

ANÁLISE DO REGIME TRANSITÓRIO DA INFILTRAÇÃO TRIDIMENSIONAL SOB SUCÇÃO CONTROLADA

Antonio Celso Dantas Antonino¹, Rafael Angulo-Jaramillo², Eduardo Soares de Souza¹,
André Maciel Netto¹, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral³, Stéphanie Roulier²

Resumo - A disponibilidade de água para as plantas, em solos submetidos ao cultivo de vazantes, é resultado de processos dinâmicos que envolvem fluxos de água em direção ao perfil enraizado e da extração d'água pelas raízes. Por estarem relacionados diretamente com o movimento da água no solo, os valores da condutividade hidráulica e da sorvidade, associados a um potencial mátrico ou uma umidade, são excelentes indicadores da qualidade físico-hídrica desses solos. Foram determinadas a condutividade hidráulica e a sorvidade em função do potencial matricial, $\{K(h), S(h)\}$, em duas camadas de um Neossolo Flúvico da vazante do açude Cajueiro, localizado no município de Tuparetama, Pernambuco. Os ensaios de infiltração, utilizando um infiltrômetro a disco com 80 mm de diâmetro, foram realizados nas profundidades de 20 e 60 cm, aplicando-se potenciais de fornecimento de água de 0, -3, -6 e -12 cm de água. As propriedades hidráulicas, $K(h)$ e $S(h)$, foram obtidas utilizando-se a equação analítica para a infiltração transitória tridimensional para tempos curtos e tempos longos. As curvas de infiltração foram ajustadas pela equação para tempos curtos e tempos longos sobre intervalos de tempos variáveis, respeitando os intervalos de tempo ajustados com os tempos de estabilização, gravitacional e geométrico.

Abstract – The availability of water for plants in soils under ebb tide agriculture is a result of dynamic processes that involve fluxes of water to the rooting zone and the extraction of water by roots. The values of hydraulic conductivity and sorptivity are very good indicators of the hydro-physical conditions of soils, since they are directly related to the movement of water in soil. We determined the hydraulic conductivity and sorptivity as a function of soil matric potential $\{K(h), S(h)\}$ in two layers of a Fluvent at the ebb tide of the Cajueiro Dam, located in Tuparetama,

¹ Universidade Federal de Pernambuco; Depto. de Energia Nuclear; Av. Prof. Luiz Freire, 1000; Recife; PE; CEP 50740-540; Fone 81 3271 8252; Fax 81 3271 8250; E-mail: acda@npd.ufpe.br.

² Université Joseph Fourier; Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement - LTHE (UMR 5564 CNRS, INPG, IRD, UJF); BP 53; Grenoble cedex 9; 38041; França; E-mail: angulo@hmg.inpg.fr.

³ Universidade Federal de Pernambuco; Depto de Engenharia Civil; Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cid. Universitária; CEP 50.740-530; Recife; PE; Fone 81 3271 8221; Fax 81 3271 8222; E-mail: 44jjspc@npd.ufpe.br.

Pernambuco. The measurements of infiltration, using a disk infiltrometer with 80 mm of diameter, were performed at the depths of 20 and 60 cm, by applying water supplying potentials of 0, -3, -6, and -12 cm. The hydraulic properties, $K(h)$ and $S(h)$, were obtained through the analytical equation for three-dimensional transitory infiltration for short times and long times. The infiltration curves were adjusted by the equation for short times and long times over variable time intervals, considering the time intervals adjusted to the times of **stabilization, gravitational, and geometric**.

Palavras-chave: Condutividade hidráulica, Infiltrômetro a disco.

INTRODUÇÃO

A estimativa dos componentes do balanço hídrico necessita do conhecimento das características hidrodinâmicas dos solos, incluindo a relação entre a condutividade hidráulica e o potencial matricial ou a umidade volumétrica. O conhecimento destas propriedades nas camadas superficial do solo constitui um requisito indispensável para: i) estabelecer um diagnóstico do funcionamento hidráulico dos solos com respeito às condições naturais e antrópicas que estão submetidos, ii) e a modelagem dos processos envolvidos a fim de prever a repartição da precipitação pluviométrica que atinge a superfície do solo, em infiltração e escoamento superficial, e os fluxos de água no solo que podem carregar substâncias químicas (Haverkamp et al., 1994).

A infiltrômetria a disco (Smettem e Clothier, 1989; Thony et al., 1991; Haverkamp et al., 1994; Angulo-Jaramillo et al., 1996; Vandervaere et al., 1997; Zhang, 1997; Angulo-Jaramillo et al., 2000) é um método desenvolvido recentemente que permite a estimativa da condutividade hidráulica no campo, próxima à saturação. Vários métodos têm sido desenvolvidos para estimar as propriedades hidráulicas de solos a partir da medida de fluxos de infiltração transitório ou estacionário, que emana de um disco ajustado a uma sucção h_0 . Os métodos se baseiam sejam em soluções quasi-analíticas da equação de fluxos em perfil de solo homogêneo ou na solução numérica da mesma equação através de técnicas inversas de estimação de parâmetros, seja o solo homogêneo ou não (Simunek et al., 1998).

A caracterização hidrodinâmica tem sido estudada utilizando o regime de fluxos estacionário (Smettem e Clothier, 1989; Thony et al., 1991). Ankeny et al. (1991) propuseram um método que utiliza um único disco e pressões sucessivas.

Recentemente, Haverkamp et al. (1994) desenvolveram equações que permite descrever a infiltração tridimensional acumulada a partir de uma fonte circular para a caracterização

hidrodinâmica em regime transitório. No método de Haverkamp et al. (1994), a base física não impõe nenhuma forma para a relação entre a condutividade hidráulica e o potencial matricial.

O objetivo deste trabalho é o de analisar o regime transitório, pelo método de Haverkamp et al. (1994), da infiltração tridimensional sob sucção controlada.

MATERIAL E MÉTODOS

Infiltrômetro a disco

O infiltrômetro a disco com uma sucção controlada permite realizar medidas no campo para caracterizar os parâmetros fenomenológicos da infiltrabilidade, tais como a condutividade hidráulica e a sorvidade capilar (Thony et al., 1991; Borges et al., 1999). O infiltrômetro a disco utilizado, com uma base de 80 mm de diâmetro, foi concebido por Perroux e White (1988). Um tubo graduado funciona como reservatório de alimentação para o fornecimento de água. Um outro reservatório tubular contém um tubo de aeração que pode ser deslocado verticalmente possibilitando impor uma pressão constante de fornecimento de água, h_0 , sendo menor ou igual a pressão atmosférica, na base do infiltrômetro.

O infiltrômetro é colocado no solo sobre uma superfície plana e horizontal preparada previamente. A base do disco é coberta com uma tela de náilon com abertura de 20 μm . Uma fina camada de areia fina é usada para garantir um bom contato hidráulico entre o disco e o solo. A leitura da variação do nível de água no reservatório de alimentação, em determinados intervalos de tempo, permite a obtenção da infiltração acumulada (Borges et al., 1999).

Método de Haverkamp et al. (1994)

Uma equação analítica para a infiltração transitória tridimensional é usada para obter a condutividade hidráulica, K , e a sorvidade, S , de um solo não saturado (Haverkamp et al., 1994). A expressão simplificada da equação da infiltração acumulada para tempos curtos é dada por:

$$I(t) = St^{1/2} + \left[K_0 + \frac{\gamma S^2}{r(\theta_f - \theta_0)} + \frac{1}{3}(K - K_0)(2 - \beta) \right] t \quad (1)$$

onde r é o raio do disco (L), K_0 é a condutividade hidráulica correspondente a umidade volumétrica inicial ($\text{L} \cdot \text{T}^{-1}$) θ_0 ($\text{L}^3 \cdot \text{L}^{-3}$), θ_f é a umidade volumétrica final ($\text{L}^3 \cdot \text{L}^{-3}$), β é uma constante no intervalo

($0 < \beta < 1$) (Haverkamp et al., 1994) e γ é uma constante teórica, cujo valor é igual a 0,75 (Smettem et al., 1994).

A expressão da equação da infiltração acumulada para tempos longos é dada por:

$$I(t) = \left[K + \frac{\gamma S^2}{r(\theta_f - \theta_0)} \right] t + \frac{S^2}{2(K - K_0)(1 - \beta)} \ln \left[\frac{1}{\beta} \right] \quad (2)$$

e o fluxo de infiltração estacionário torna-se:

$$q_\infty = K + \frac{\gamma S^2}{r(\theta_f - \theta_0)} \quad (3)$$

Esta equação é consistente com a de Wooding (1968), utilizando a aproximação de Ankeny et al. (1991).

Escalas características

Durante o processo de infiltração tridimensional, os fatores que podem afetar o fluxo de entrada de água no solo são: a geometria da fonte de água, a capilaridade e a gravidade. Estes fatores são caracterizados pelas escalas de tempo e de comprimento. É possível definir diferentes escalas de tempos característicos representativas do processo de infiltração. Introduzindo o tempo gravitacional t_{grav} (Philip, 1957a, b):

$$t_{\text{grav}} = \left(\frac{S}{K} \right)^2 \quad (4)$$

definido como o tempo após o qual a força gravitacional domina as forças capilares à pressão imposta no caso de infiltração monodimensional.

Para os casos particulares de infiltração tridimensional, Vandervaere (1995) propôs um outro tempo característico para definir a duração regime transitório considerando o efeito adicional da capilaridade que atua lateralmente. Ele é chamado de tempo de estabilização e se escreve:

$$t_{\text{stab}} = \left(\frac{S}{K_0 + \frac{\gamma S^2}{r(\theta_f - \theta_0)}} \right)^2 \quad (5)$$

A um certo tempo de infiltração, a geometria do sistema torna-se dominante sobre o caráter inicial do escoamento devido aos efeitos capilares. Para representar este fenômeno, Philip (1969) introduziu um terceiro tempo característico da infiltração, chamado de tempo geométrico, que depende da dimensão característica da fonte de água. Para o caso da infiltrômetria a disco (fonte de raio r), considerando o efeito da gravidade sobre o caráter tridimensional do escoamento, Roulier (1999) exprime este tempo como o tempo geométrico modificado:

$$t_{\text{geomod}} = \left(\frac{r(\theta_f - \theta_0)}{\gamma S} \right)^2 \quad (6)$$

A precisão nos cálculos dos tempos t_{stab} , t_{grav} e t_{geomod} pode ser atribuída às limitações inerentes à qualidade dos dados disponíveis, à metodologia empregada nos ensaios e às incertezas de estimação de K e S . Os intervalos de tempo de aplicação das equações aos tempos curtos ou aos tempos longos devem então ser revistos a fim de estabelecer um compromisso entre um intervalo de tempo de ajustamento das equações o maior possível. Os parâmetros hidrodinâmicos são então obtidos pelo ajuste das equações (1) e (2), dos tempos curtos e longos respectivamente, aos dados de infiltração. O intervalo de tempo de validade é tal que a equação (1) ao tempo curto será considerado válido para os tempos inferiores aos t_{grav} e t_{geomod} (Eqs. 4 e 6).

A escala de comprimento capilar, λ_c (L) (White e Sully, 1987) e o raio característico de poros, λ_m (L) (Philip, 1987) são determinados respectivamente pelas equações:

$$\lambda_c = \frac{bS^2}{(\theta_f - \theta_0)K} \quad (7)$$

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_a g \lambda_c} \quad (8)$$

onde σ é a tensão superficial da água (71,9 g.s² a 25 °C), ρ_a é a massa específica da água (1g.cm⁻³), g a aceleração da gravidade (981 cm.s⁻²) e b é igual a 0,55.

A escala de comprimento capilar (Eq. 7) representa a importância relativa das forças capilares em relação à gravidade quando a água é transmitida de uma fonte mantida a θ_0 através do solo, com umidade inicial θ_i . O raio característico de poros (Eq. 8) define a dimensão média dos poros que participam do processo de infiltração submetida à pressão aplicada h . Quanto maior for o raio característico, λ_m , maior é o efeito da gravidade em comparação ao da capilaridade.

Experimentos de infiltração

Os ensaios de infiltração para a determinação da sorvidade e da condutividade hidráulica foram realizados numa parcela de solo nu da vazante do açude de Cajueiro localizado no município de Tuparetama, PE (7°36'S e 37°18'O). O solo é caracterizado como Neossolo Flúvico (EMBRAPA, 1999) (Tabela 1).

Os experimentos de infiltração foram realizados nas profundidades de 20 e 60 cm nos potenciais de 0, -3, -6 e -12 cm com três repetições por potencial.

Tabela 1 - Análise granulométrica e massa específica do solo de Cajueiro.

Profundidade	$\rho^\dagger$	Areia	Silte	Argila	Classe
cm	g.cm ⁻³	———— % —————			textural
5 - 25	1,47±0,02	85,8	5,4	8,8	Areia
50 - 70	1,41±0,03	87,3	4,6	8,1	Areia

† Média e o erro padrão da massa específica do solo (ρ).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apesar das duas camadas apresentarem características texturais e de massa específica do solo semelhantes (Tabela 1), os resultados dos ensaios de infiltração são diferentes (Figura 1) para as várias sucções aplicadas a cada uma das duas profundidades. À saturação ($h = 0$), para o mesmo tempo de infiltração, as lâminas de água infiltradas são duas vezes superiores para a camada $z = 60$ cm (Figura 1a, c). A mesma ordem de grandeza na relação das lâminas infiltradas se conserva quando a sucção é reduzida (Figura 1b, d).

Isto pode ser explicado pela redução do tamanho de poros, mas com um aumento da quantidade destes poros hidraulicamente bem conectados. O escoamento saturado compreende o fluxo, seja na matriz, seja na macroporosidade. Quando o solo se torna não saturado, isto é, com o aumento da sucção, a macroporosidade torna-se menos ativa, participando menos do escoamento da

água no solo, correspondendo a uma redução importante da condutividade hidráulica, sobretudo, na camada na qual os macroporos de maior dimensão (de maior raio característicos de poros hidraulicamente funcionais, λ_m) são menos numerosos ($z = 20$ cm), e uma redução menos importante onde os macroporos de menor dimensão são mais numerosos ($z = 60$ cm) (Tabela 2). Esta diferença de comportamento hidráulico reflete a heterogeneidade da estrutura dos poros das duas camadas.

As curvas de infiltração foram ajustadas pela equação (1) para tempos curtos e pela equação (2) para tempos longos sobre intervalos de tempos variáveis, apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,997, respeitando os intervalos de tempo ajustados com os tempos t_{stab} , t_{grav} e t_{geomod} .

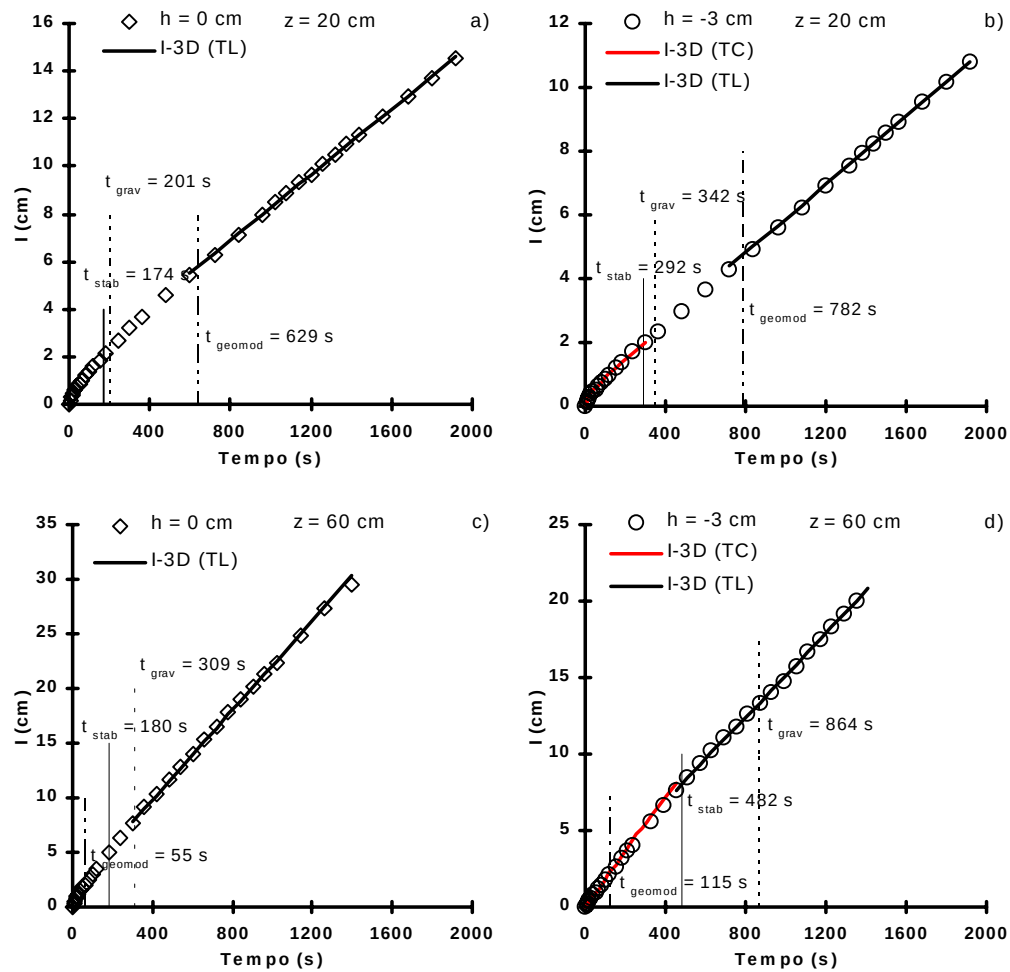


Figura 1. Diferentes escalas de tempos característicos do processo de infiltração nas duas profundidades e curvas de infiltração ajustadas para os tempos curtos (TC) e os tempos longos (TL).

Quando a sucção aumenta, K e S diminuem (Tabela 2) – o tempo de estabilização (Eq. 5) é sempre inferior ao tempo gravitacional (Eq. 4). Ao contrário, o t_{geomod} (Eq. 6) é superior a estes tempos para $h = 0$ a -6 cm (camada $z = 20$), e inferior em todos os outros ensaios. Nos dois casos, os tempos característicos estão indicados na Figura 1. Com relação ao tempo experimental de medida a $z = 20$ cm e $h = 0$ (Figura 1a), o método de análise escolhida é o tempo longo e a aproximação da equação (2) é feito para $t > 629$ s. O intervalo de tempo (0 a 174 s) (até o t_{stab}) é, neste caso, muito curto para obter um ajuste de boa precisão. Um argumento análogo é feito para $z = 60$ cm e $h = 0$ (Figura 1c).

A $z = 20$ cm e $h = -3$ cm (Figura 1b), as duas equações (Eqs. 1 e 2) são aplicáveis ao intervalo de tempo (0 – 292 s) e $t > 782$ s, respectivamente. As condutividades hidráulicas estimadas pelas duas equações são similares ($K = 13,07 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ para os tempos curtos (Eq. 1) e $K = 10,72 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ para os tempos longos (Eq. 2)). O mesmo caso se apresenta à $z = 60$ e $h = -3$ cm (Figura 1d).

O valor escolhido (Tabela 2) é aquele no qual o ajuste sobre os dados experimentais foi melhor.

Tabela 2 - Valores da variação da umidade ($\Delta\theta$), condutividade hidráulica (K), sorvidade (S), tempos de estabilização (t_{stab}), gravitacional (t_{grav}), geométrico modificado (t_{geomod}) e o raio característico de poros (λ_m), sob alguns potenciais de fornecimento de água (h) para o solo de Cajueiro.

h	$\Delta\theta$	K	S	t_{stab}	t_{grav}	t_{geomod}	λ_m
cm	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	cm h^{-1}	$\text{cm h}^{-1/2}$	(s)	(s)	(s)	(mm)
z = 20 cm							
0	0,367	19,53	4,62	174	201	649	0,45
-3	0,339	13,07	4,03	294	342	727	0,36
-6	0,333	9,51	3,85	489	589	768	0,28
-12	0,277	6,64	4,00	1032	1306	491	0,15
z = 60 cm							
0	0,362	53,13	15,56	180	309	55	0,11
-3	0,352	21,42	10,49	482	864	115	0,09
-6	0,361	10,02	7,90	1109	2240	213	0,08
-12	0,311	5,26	5,86	2347	4472	288	0,06

CONCLUSÕES

1. As curvas de infiltração foram ajustadas pela equação para tempos curtos e tempos longos sobre intervalos de tempos variáveis, apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,997, respeitando os intervalos de tempo ajustados com os tempos de estabilização, gravitacional e geométrico.
2. A diferença no comportamento hidrodinâmico nas duas camadas do solo de Cajueiro não é explicável pelas características texturais e de massa específica do solo, e sim pela forma, tamanho e arranjo das partículas sólidas distribuídas no solo.

REFERÊNCIAS

- ANGULO-JARAMILLO, R.; GAUDET, J.P.; THONY, J.L.; VAUCLIN, M. Measurement of hydraulic properties and mobile water content of a field soil. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.60, p.710-715, 1996.
- ANGULO-JARAMILLO, R.; VANDERVAERE, J.P.; ROULIER, S.; THONY, J.L.; GAUDET, J.P.; VAUCLIN, M. Field Measurement of soil hydraulic properties by disc and ring infiltrometers : a review and recent developments. *Soil & Tillage Research*, Madison, 2000.
- ANKENY, M. D.; AHMED, M.; KASPAR, T. C. and HORTON, R. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.55, p.467-470, 1996.
- BORGES, E.; ANTONINO, A.C.D.; DALL'OLIO, A.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C.J.G. Determinação das Propriedades Hidráulicas de Solos Não Saturados Utilizando-se Permeâmetros a Disco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol.34, n.11, p.2083-2090, 1999.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, EMBRAPA – Serviço de Produção da Informação; Rio de Janeiro, EMBRAPA solos, 1999. 412p.
- HAVERKAMP, R.; ROSS, P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, v.30, p.2931-2935, 1994.
- PERROUX, K.M.; and WHITE, I. Design for disc permeameters. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.52, p.1205-1215, 1988.
- PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, v.84, p.257-264, 1957.

- PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Science*, v.84, p.257-264, 1957.
- PHILIP, J. R. The theory of infiltration. In: **Advances in Hydrosience**. New York: Academic Press, v.5, p.215-296, 1969.
- PHILIP, J.R. The quasi-linear analysis, the scattering analog, and other aspects of infiltration and seepage. In: Y. S. Fok (ed.). *Infiltration Development and Application*. Water Resources Research Center, Honolulu, Hawaii. p.1-27, 1987.
- ROULIER, S. Caractérisation hydro-dispersive in situ de sols non-saturés par infiltration d'eau et de solute. Cas de solo structures et de sols hétérogènes. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier – Grenoble I, Grenoble, p. 267. 1999.
- SIMUNEK, J.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SCHAAP, M.; VANDERVAERE, J-P.; and VAN GENUCHTEN, M.Th. Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension disc infiltrometer data. *Geoderma*, 86(12): 61-81, 1998.
- SMETTEM, K.R.J.; CLOTHIER, B.E. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multi-disc permeameters. *Journal of Soil Science*, v.40, p.563-568, 1989.
- SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J. Y.; ROSS, P. J and HAVERKAMP, R. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 1. A capillary-based theory. *Water Resources Research*, v.30, p.2925-2929, 1994.
- THONY, J.L.; VACHAUD, G.; CLOTHIER, B.E.; ANGULO-JARAMILLO, R. Field measurements of the hydraulic properties of soil. *Soil Technology*, Cremlingen, v.4, p.111-123, 1991.
- VANDERVAERE, J.P.; PEUGEOT, C.; VAUCLIN, M.; R. ANGULO-JARAMILLO; LEBEL, T. Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers. *Journal of Hydrology*, Netherlands, v.188-189, p.203-223, 1997.
- VANDERVAERE, J.P. Caractérisation hydrodynamique du sol in situ para infiltrometrie à disques. Analyse critique des regimes pseudo-permanents, méthodes transitoires et câs dês sols encroutés. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier – Grenoble I, Grenoble, p. 329. 1995.
- WHITE, I. and SULLY, M.J. Macroscopic and microscopic capillary length and times scales from field infiltration. *Water Resour. Res.* 23: 1514-1522, 1987.
- WOODING, R. A. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*, v. 4, p.1259-1273. 1968.
- ZHANG, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disc infiltrometer. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.61, p.1024-1030, 1997.