

AGRÁRIA

Revista Brasileira de Ciências Agrárias
v.2, n.1, p.69-74, jan.-mar., 2007
Recife, PE, UFRPE. www.agrariaufrpe.com
Protocolo 127 - 15/02/2007

Eduardo S. de Souza¹

Antonio C. D. Antonino²

José R. de S. Lima¹

Gilberto da C. Gouveia Neto³

José M. da Silva³

Ivandro de F. da Silva⁴

Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado

RESUMO

As crostas são responsáveis pela diminuição da infiltração da água no solo e pelo aumento do escoamento superficial das águas provenientes das chuvas e da irrigação. Foram estimados, a partir de experimentos com infiltrômetros de anel simples, as propriedades hidráulicas de um solo com e sem crosta, cultivado com mamona. O experimento foi realizado com dois tratamentos (com e sem crosta) e sete repetições. As médias da condutividade hidráulica, da sorvidade, das umidades volumétrica inicial e final, foram comparadas por intermédio da análise de variância com o teste F. Os valores das umidades iniciais e finais entre tratamentos não diferiram significativamente, enquanto os de condutividade hidráulica e sorvidade diferiram a nível de 1% de probabilidade. Os solos sem crosta foram, em média, quase três vezes mais condutores que os com crosta. O valor médio do raio característico de poros hidráulicamente ativo (λ_m) foi de 0,16 mm para o solo sem crosta e de 0,19 mm para o com crosta. Apesar de apresentar valor menor de λ_m , os solos sem crosta são mais condutores devido à densidade de poros. Embora o valor de λ_m tenha aumentado nas superfícies com crostas, a quantidade de poros hidráulicamente ativos foi aproximadamente seis vezes menor que a das superfícies sem crosta.

Palavras-chave: condutividade hidráulica, sorvidade, infiltração

Crusting effect in the hydraulic properties of a cultivated soil

ABSTRACT

The crusts are responsible for the reduction of water infiltration into the soil and the increase in runoff process from rains and irrigation. From infiltration test using the simple ring infiltrometer, the hydraulic properties of a soil, with and without crust, cultivated with castor bean were estimated and compared. The experiment was carried out with two treatments (with and without crust) and seven replications. The mean values of hydraulic conductivity, sorptivity, initial and final volumetric water content were compared by variance analyses computing the F ratio. The mean values of the initial volumetric and final water content between treatments were not significantly different, while those for hydraulic conductivity and sorptivity were significantly different ($P \leq 0.01$). The soils without crust were on average almost three times more conductive than the ones with crust. The average value of the characteristic mean pore radius (λ_m) was of 0.16 mm for soils without crust and 0.19 mm with crust. Despite presenting a lower λ_m value, the surfaces without crust were more conductive due to the density of the pores. Although the λ_m value had increased in the surfaces with crusts, the number of hydraulically active pores was approximately six times less than in the surfaces without crust.

Key words: hydraulic conductivity, sorptivity, infiltration

¹ Pesquisador Bolsista DCR/CNPq da UFPB/CCA/ DSER, Cidade Universitária, CEP 58397-000, Areia, PB. Fone (083) 3362-2300, Ramal: 296. E-mail: edu_souza_pe@yahoo.com.br, romualdo_solo@yahoo.com.br

² Professor da UFPE/CTG/DEN, Av. Prof. Luiz Freire 1000 – Cid. Universitária – CEP 50740-540 Recife, PE. E-mail: acda@ufpe.br;

³ Bolsista PIBIC/CNPq da UFPB/CCA/ DSER, Cidade Universitária, CEP 58397-000, Areia, PB. Fone (083) 3362-2300, Ramal: 296. E-mail: neto_gouveia@hotmail.com, jose_madson@yahoo.com.br;

⁴ Professor da UFPB/CCA/ DSER, Cidade Universitária, CEP 58397-000, Areia, PB. Fone (083) 3362-2300, Ramal: 296. E-mail: ivandro@cca.ufpb.br;

INTRODUÇÃO

Uma característica importante de solos em muitas regiões tropicais e subtropicais é o desenvolvimento de crostas na superfície do solo (Casenave & Valentin, 1989; Valentin & Bresson, 1992). Segundo Valentin & Bresson (1992), o encrostamento é resultante de processos complexos e dinâmicos nos quais as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura superficial coesa, cuja espessura pode variar de 0,1 mm até valores superiores à 50 mm. O encrostamento influencia significativamente a partição da água que chega a superfície do solo; portanto, afeta o balanço hídrico de solos em muitas regiões tropicais e subtropicais; essas crostas são responsáveis pela diminuição da infiltração da água no solo e pelo aumento do escoamento superficial das águas provenientes das chuvas e irrigação o que pode potencializar os processos erosivos.

Valentin & Bresson (1992) classificaram as crostas de superfície de acordo com a sua formação, conduzindo-a a três classes principais: crostas estruturais, crostas de erosão e crostas de deposição, cada uma com diversas subclasses. As crostas estruturais são aquelas formadas pelo impacto de gotas d'água, enquanto as crostas de deposição o são pela translocação e deposição de partículas finas em determinados pontos distantes do seu local de origem. As crostas de erosão representam superfícies rígidas e lisas de partículas finas, já que as partículas mais grosseiras são removidas por escoamento superficial. As crostas de superfície têm, em geral uma densidade maior e poros menores e, conseqüentemente, uma condutividade hidráulica saturada menor que o solo subjacente. Embora a espessura dos encrostamentos seja geralmente de apenas alguns milímetros, a baixa condutividade hidráulica saturada pode reduzir significativamente a taxa de infiltração da água no solo.

Para calcular os fluxos de infiltração transitório e estacionário em perfis de solos com presença de crosta na superfície, vários autores (Hillel & Gardner, 1969, 1970; Ahuja, 1974; Smiles et al., 1982) se basearam em soluções quasi-analíticas e no conhecimento das propriedades hidráulicas da crosta e da camada subjacente, soluções que foram desenvolvidas para o fluxo monodimensional de água no solo. Como os encrostamentos são tipicamente muito finos, poucos métodos de campo conseguem estimar suas propriedades hidráulicas (Vandervaere et al., 1997); no entanto, alguns métodos baseados no infiltrômetro a disco com pressão controlada (Perroux & White, 1988; Reynolds & Elrick, 1991; Logsdon et al., 1993; Ankeny et al., 1996; entre outros) ou no infiltrômetro de anel simples (Haverkamp et al., 1998; Soria Ugalde et al., 2003; Braud et al., 2005; Souza, 2005; Lassabatère et al., 2006) permitem realizar medidas no campo para caracterizar os parâmetros fenomenológicos da infiltrabilidade, tais como a condutividade hidráulica e a sorvidade. Esses testes fornecem a infiltração tridimensional em função do tempo $I_3(t)$. Os desenvolvimentos teóricos para o fluxo transiente proposto por Haverkamp et al. (1994) foram utilizados nessas análises.

O trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado com mamona; para isto, foram determinadas as propriedades hidráulicas, como a condutividade hidráulica e a

sorvidade, por intermédio da análise do regime transitório da infiltração tridimensional, realizadas em superfícies com a presença e ausência de crosta.

MATERIAL E MÉTODOS

Ensaio de infiltração

Os ensaios de infiltração consistem em se anotar o tempo que volumes constantes de água (100 mL), adicionados continuamente no anel (20 vezes), levam para serem infiltrados. Esses ensaios fornecem a infiltração tridimensional em função do tempo $I_3(t)$. Durante cada ensaio também foram coletadas amostras indeformadas para determinação da densidade do solo e das umidades inicial θ_{inic} e final θ_{fin} . A extremidade inferior do cilindro apresenta um corte em bisel, facilitando a sua introdução na superfície do solo, que deve ser realizada com o mínimo de esforço possível; além disso, garante a integridade estrutural da superfície. O cilindro é posicionado na superfície do solo e inserido a uma profundidade de aproximadamente 1 cm, para prevenir perdas laterais de água durante o processo de infiltração de água na superfície do solo. Nos ensaios foi utilizado um infiltrômetro com 150 mm de diâmetro (Figura 1).



Figura 1. Teste de infiltração tridimensional com infiltrômetro de anel

Figure 1. Three-dimensional infiltration test with simple ring infiltrometer

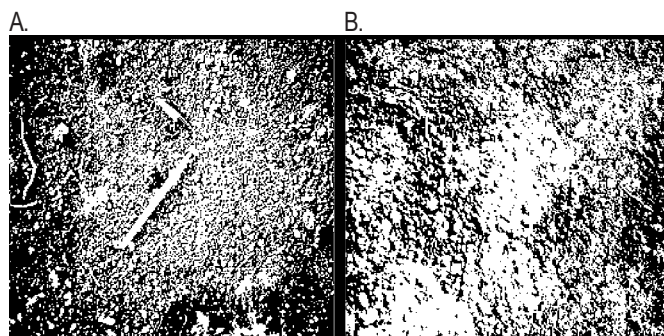
Os ensaios foram realizados em uma parcela de solo cultivado com mamona, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias (CCA) da UFPB, no município de Areia (6°58'12" S e 35°42'15" O), estado da Paraíba. O solo é caracterizado como Latossolo Amarelo (EMBRAPA, 2006). Os dados da análise granulométrica e da densidade do solo da área experimental, são apresentados na Tabela 1. De acordo com os dados da Estação Meteorológica do CCA/UFPB, a precipitação média anual no município de Areia é de 1400 mm, a temperatura média anual é de 24,5 °C e a umidade relativa média é 80 %. O quadrimestre mais chuvosa é constituída dos meses de abril, maio, junho e julho e representa 62% do total médio anual.

Tabela 1. Análise granulométrica e densidade das amostras de solo**Table 1.** Granulometric analysis and bulk density of the soil samples

Amostras	ρ_t (kg dm ⁻³)	Areia	Silte	Argila	Classe textural
			%		
Sem Crosta	1,18 ± 0,03	59,5	12,9	27,6	Franco argilo arenosa
Com Crosta	1,29 ± 0,03	59,6	11,4	29,0	Franco argilo arenosa

† Média e erro padrão da densidade do solo (ρ)

Foram programadas campanhas de infiltração em um estágio mais avançado da cultura, ou seja, na fase próxima à colheita. Nos sete pontos considerados sem crostas é possível observar a presença de estrutura granular (Figura 2A), característica predominante na superfície do solo, desde a implantação da cultura e que apesar de terem sido submetidos a ciclos de secagem e umedecimento, se mantiveram com o mesmo comportamento estrutural até a colheita; observou-se, porém, que outros pontos adquiriram um estado de compactidade ligeiramente maior devido à formação de crostas estruturais nessas superfícies (Figura 2B). Os experimentos de infiltração foram realizados entre plantas, em 14 pontos escolhidos aleatoriamente na parcela: sete pontos com a ausência de crosta na superfície e sete com sua presença.

**Figura 2.** Superfícies sem crosta (A) e com crosta estrutural (B)**Figure 2.** Soil surface without crust (A) and with structural crust (B)

Método de Haverkamp et al. (1994)

Uma equação analítica para a infiltração transitória tridimensional é usada para obter a condutividade hidráulica saturada, K_s [LT^{-1}], e a sorvidade, S [$LT^{-1/2}$], de um solo não saturado (Haverkamp et al., 1994). A expressão da equação da infiltração acumulada para tempos longos é dada por (Haverkamp et al., 1994):

$$I(t) = \left[K_s + \frac{\gamma S^2}{r_d (\theta_{fin} - \theta_{mic})} \right] t + \frac{S^2}{2(K_s - K_0)(1 - \beta)} \ln \left[\frac{1}{\beta} \right] \quad (1)$$

e o fluxo de infiltração estacionário se torna:

$$q_{\infty} = K_s + \frac{\gamma S^2}{r_d (\theta_{fin} - \theta_{mic})} t \quad (2)$$

sendo r_d o raio do disco (L), K_0 a condutividade hidráulica correspondente à umidade volumétrica inicial [$L T^{-1}$] θ_{mic} [$L^3 L^{-3}$],

θ_{fin} à umidade volumétrica final [$L^3 L^{-3}$], β uma constante no intervalo ($0 < \beta < 1$), cujo valor é 0,6 (Haverkamp et al., 1994), e γ é uma constante teórica, cujo valor é igual a 0,75 (Smettem et al., 1994).

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. Uma das formas de se caracterizar esses fatores, é a partir de escalas de comprimento. A escala de comprimento capilar, λ_c [L] (White & Sully, 1987) e o raio característico de poros hidráulicamente ativos, λ_m [L] (Philip, 1987) são determinados, respectivamente, pelas equações:

$$\lambda_c = \frac{bS^2}{(\theta_{fin} - \theta_{mic})K_s} \quad (3)$$

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_a g \lambda_c} \quad (4)$$

nas quais σ é a tensão superficial da água ($0,0719 \text{ N m}^{-1}$), ρ_a é a massa específica da água (10^3 kg m^{-3}), g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$), b é igual a 0,55 (White & Sully, 1987).

A escala de comprimento capilar (Eq. 3) representa a importância relativa das forças capilares em relação à gravidade, quando a água é transmitida de uma fonte mantida a θ_{fin} através do solo, com umidade inicial θ_{mic} . O raio característico de poros (Eq. 4) define a dimensão média dos poros que participam do processo de infiltração. Quanto maior for o raio característico, λ_m , maior será o efeito da gravidade em comparação com o da capilaridade.

A concentração de raio característico de poros λ_m , $C_{\lambda m}$ (número de poros m^{-2}), é estimada usando-se a lei de Poiseuille para fluxo em um tubo capilar, a partir da seguinte expressão:

$$C_{\lambda m} = \frac{8\mu K}{\rho_a g \pi \lambda_m^4} \quad (5)$$

sendo μ a viscosidade dinâmica da água ($0,00089 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

Análise dos dados

Inicialmente, o comportamento de S , K_s , θ_{mic} e θ_{fin} para as superfícies dos solos com e sem crostas, foi avaliado por meio de medidas descritivas: $\bar{\mu}$ - média; IC - intervalo de confiança e CV - coeficiente de variação; esses limites de confiança refletem o grau de segurança da amostragem e o risco ou incerteza, associados ao valor médio estimado. Segundo Guerra (1988), se o número total de amostras (x) for menor que 25 o limite de confiança poderá ser definido como:

$$IC = \bar{\mu} \pm t_{(1-p)} \cdot \frac{S}{\sqrt{x}} \quad (6)$$

sendo $t_{(1-p)}$ o valor percentual da distribuição t de Student, que é função do grau de liberdade n ($n = x - 1$) e s o desvio padrão. Este valor é obtido a partir das tabelas disponíveis em Rendu (1981).

De acordo com os valores de CV, a variabilidade dessas propriedades foi classificada, segundo Warrick & Nielsen (1980) em baixa ($CV < 12\%$), média ($12\% < CV < 62\%$) e alta ($CV > 62\%$); em seguida, as propriedades foram comparadas por análise de variância, para amostras inteiramente casualizadas, complementadas pelo teste F.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes de infiltração (Figura 3) estão agrupados de acordo com os tratamentos. As comparações das lâminas de água medidas nas duas situações, demonstram diferenças qualitativas dos efeitos estruturais no fluxo de água.

A duração das infiltrações nas superfícies sem a presença de crosta variou de 470 a 720 s para aproximadamente 11,3 cm de lâmina total de água infiltrada (Figura 3A) enquanto para a mesma lâmina de água infiltrada nas superfícies com a presença de crosta, a duração variou de 1250 a 2900 s (Figura 3B); desta forma se constata, para as superfícies com crosta, que a infiltração é lenta e se torna possível observar uma variabilidade mais significativa dos fluxos de infiltração.

Os intervalos de tempo de aplicação da equação ao tempo longo foram estabelecidos de tal forma que os intervalos de tempo de ajustamento das equações fossem o maior possível. Os parâmetros hidrodinâmicos foram então obtidos pelo

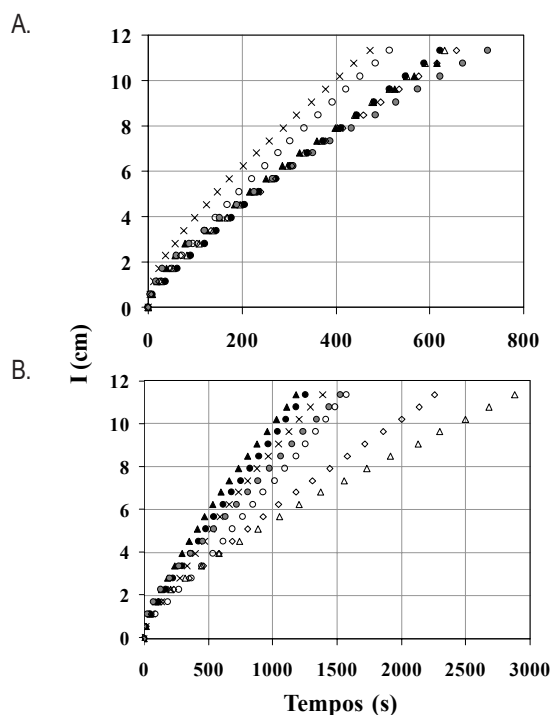


Figura 3. Curvas de infiltração acumulada I (mm) para as superfícies sem crosta (A) e com crosta (B)

Figure 3. Cumulative infiltration curves I (mm) for surfaces without crust (A) and with crust (B)

ajuste da Eq. (1) aos dados de infiltração, apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,999. O intervalo de tempo de validade foi definido a partir das diferentes escalas de tempos característicos representativas do processo de infiltração (Souza et al., 2006).

Na Figura 4 são apresentados os limites de confiança de 90% em torno dos valores médios de S , K_s , θ_{inic} e θ_{fin} . Para obtenção desses valores, levou-se em consideração que para o número total de amostras igual a 7 o valor tabelado de $t_{0,95}$ é igual a 1,943. Os valores da condutividade hidráulica e da sorvidade foram maiores para as superfícies sem crostas que para as superfícies com crosta, estando em acordo com as diferenças observadas nas lâminas infiltradas (Figura 4C e D) enquanto os valores de θ_{inic} e de θ_{fin} foram menores para as superfícies sem crostas que para as superfícies com crostas (Figura 4A e B).

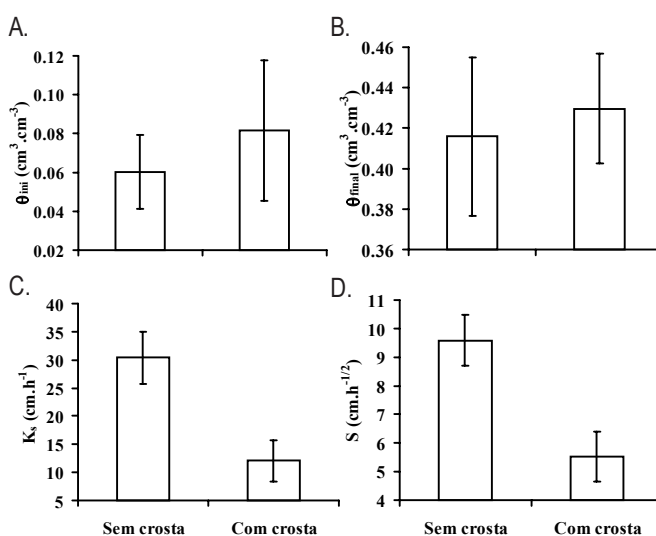


Figura 4. Valores médios de S , K_s , θ_{inic} e θ_{fin} e limites de confiança de 90% ($t_{0,95} = 1,943$)

Figure 4. Mean values of S , K_s , θ_{inic} and θ_{fin} and confidence limits of 90% ($t_{0,95} = 1,943$)

Através dos coeficientes de variação (CV), pode-se constatar a seguinte ordem de variação: para as superfícies sem crosta, o maior valor foi obtido pelo θ_{inic} com 42,55%, seguido do K_s , θ_{fin} e S com coeficientes de variação iguais a 16,42, 12,78 e 12,44%, respectivamente, para as superfícies com crosta, os maiores valores de CV também foram obtidos para θ_{inic} , com 60,54%, seguido de K_s , S e θ_{fin} , com CV iguais a 42,35, 21,78 e 8,57%, respectivamente. Os valores de CV permitem classificar os resultados como de média variabilidade conforme Warrick & Nielsen (1980), com exceção de θ_{fin} nas amostras com crosta, que apresentou baixa variabilidade.

Para verificar se existe ou não diferença significativa entre as médias de S , K_s , θ_{inic} e θ_{fin} nas duas condições (com e sem crosta) aplicou-se o teste F na análise da variância apresentada na Tabela 2. De acordo com o teste F a nível de 1% de probabilidade, os valores de θ_{inic} e de θ_{fin} não diferiram estatisticamente entre as superfícies com e sem crosta, enquanto

os valores médios de S e K_s foram significativos a nível de 1% de probabilidade, ou seja, os valores médios nas superfícies sem crosta diferem dos com crosta (Tabela 2).

Tabela 2. Testes F (1% significância), análise de variância para S , K_s , θ_{mic} e θ_{fin}

Table 2. F test (1% significance), variance analysis for S , K_s , θ_{mic} and θ_{fin}

Fonte da variação	GL	SQ	QM	F
S (cm h^{-1/2})				
Entre Tratamentos	1	57,88	57,88	40,32 **
Dentro dos Tratamentos	12	17,23	1,44	
Total	13	75,10		
K_s (cm h⁻¹)				
Entre Tratamentos	1	1174,49	1174,49	36,91 **
Dentro dos Tratamentos	12	381,89	31,82	
Total	13	1556,38		
θ_{mic} (cm³ cm⁻³)				
Entre Tratamentos	1	0,0016	0,00160	1,03 ns
Dentro dos Tratamentos	12	0,0186	0,00155	
Total	13	0,0202		
θ_{fin} (cm³ cm⁻³)				
Entre Tratamentos	1	0,00066	0,00066	0,32 ns
Dentro dos Tratamentos	12	0,02506	0,00209	
Total	13	0,02572		

GL - número de graus de liberdade; SQ - soma de quadrados; QM - quadrado médio; F - valor calculado do teste F; ** - significativo pelo teste F a nível de 1% de probabilidade; ns - não significativo a nível de 1% de probabilidade; $F_{critico} = 9,33$

Calcularam-se valores de λ_m e C_{λ_m} a partir das médias de S , K_s , θ_{mic} e θ_{fin} . O raio característico de poros hidraulicamente funcionais (Eq. 4) aumentou ligeiramente com o encrostamento. O valor médio de λ_m foi de 0,16 mm para a superfície sem crosta e 0,19 mm para a superfície com crosta. Esses valores estão de acordo com os valores reportados em outros trabalhos (White & Sully, 1987; Sauer et al., 1990; Thony et al., 1991; Cook & Boeren, 1994; Angulo-Jaramillo et al., 1997; Souza et al., 2006). Apesar de apresentar um valor de λ_m menor, as superfícies sem crosta são mais condutoras devido a densidade de poros, C_{λ_m} (quantidade de poros hidraulicamente ativos por unidade de área) ($3,06 \times 10^4$ N° de poros m^{-2}); assim, embora o valor de λ_m tenha aumentado nas superfícies com crostas, a quantidade de poros hidraulicamente ativos ($0,54 \times 10^4$ de poros m^{-2}) foi aproximadamente 6 vezes menor que a das superfícies sem crosta.

CONCLUSÕES

1. A análise do regime transitório da infiltração permitiu, pelo método de Haverkamp, a determinação das características hidráulicas das superfícies dos solos com a presença e ausência de crosta.

2. Os solos sem crosta foram, em média, quase 3 vezes mais condutores que os com crosta. Os valores médios da condutividade hidráulica e da sorvidade obtidos nas superfícies sem crosta diferem dos valores médios dos com crosta, com 99% de probabilidade, enquanto os valores de θ_{mic} e de θ_{fin} não diferiram estatisticamente.

3. O valor médio de λ_m foi de 0,16 mm para o solo sem crosta e de 0,19 mm para o com crosta. Apesar de apresentar valor de λ_m menor, os solos sem crosta são mais condutores em virtude da densidade de poros. Nos solos com crostas a quantidade de poros hidraulicamente ativos foi aproximadamente 6 vezes menor que a dos solos sem crosta.

AGRADECIMENTOS

A FAPESQ/CNPq (Processo n° 003/05, Edital 002/03 – FAPESQ/MCT/CNPq, convênio 002/2003, no âmbito do Programa de Desenvolvimento Regional - Paraíba) e ao CNPq (Processos N°s: 303790/02-4, 373089/2006-6 e 373139/2006-3) pela concessão de bolsas e dos recursos necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- Ahuja, L.R. Applicability of the Green-Ampt approach to water infiltration through surface crust. *Soil Science*, Baltimore, v.118, p.283–288, 1974.
- Angullo-Jaramillo, R.; Moreno, F.; Clothier, B.E.; Thony, J.L.; Vachaud, G.; Fernandez-Boy, E.; Cayuela, J.A. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.61, p.27-32, 1997.
- Ankeny, M.D.; Ahmed, M.; Kaspar, T.C.; Horton, R. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.55, p.467-470, 1996.
- Braud, I.; De Condappa, D.; Soria Ugalde, J.M.; Haverkamp, R.; Angulo-Jaramillo, R.; Galle, S.; Vauclin, M. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method). *European Journal of Soil Science*, Oxford, v.56, p.361-374, 2005.
- Casenave, A.; Valentin, C. (eds.). *Les états de surface en zone sahélienne*. Paris: ORSTOM, 1989. 229p.
- Cook, F.J.; Broeren, A. Six methods for determining sorptivity and hydraulic conductivity with disc permeameters. *Soil Science*, Baltimore, v.157, p.3-11, 1994.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306p.
- Guerra, P.A.L.G. *Geoestatística operacional*. Brasília: Ministério das Minas e Energia-Departamento Nacional da Produção Mineral, 1988. 145p.
- Haverkamp, R.; Parlange, J.Y.; Cuenca, R.; Ross, P.J.; Steenhuis, T.S. Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling. In: Sposito, G. (ed). *Scale dependence and scale invariance in hydrology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p.190-223.
- 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*, Washington, v.30, p.2931-2935, 1994.

- Hillel, D.; Gardner, W.R. Steady infiltration into crust-topped profiles. *Soil Science*, Baltimore, v.108, p.137-142, 1969.
- Hillel, D.; Gardner, W.R. Transient infiltration into crust-topped profiles. *Soil Science*, Baltimore, v.109, p.69-74, 1970.
- Lassabatère, L.; Angulo-Jaramillo, R.; Soria Ugalde, J.M.; Cuenca, R.; Braud, I.; Haverkamp, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments - BEST. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.70, p.521-532, 2006.
- Logsdon, S.D.; McCoy, E.L.; Allmaras, R.R.; Linden, D.R. Macropore characterization by indirect methods. *Soil Science*, Baltimore, v.155, p.316-324, 1993.
- Perroux, K.M.; White, I. Design for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.52, p.1205-1215, 1988.
- Philip, J.R. The quasi-linear analysis, the scattering analog, and other aspects of infiltration and seepage. In: Fok, Y.S. (ed.). *Infiltration development and application*. Honolulu: Water Resources Research Center, 1987, p.1-27.
- Reynolds, W.D.; Elrick, D.E. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.55, p.633-639, 1991.
- Rendu, J.M. *An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation*. Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy, 1981. 197p.
- Sauer, T.J.; Clothier, B.E.; Daniel, T.C. Surface measurements of the hydraulic properties of tilled and untilled soil. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.15, p.359-369, 1990.
- Smettem, K.R.J.; Parlange, J.Y.; Ross, P.J.; Haverkamp, R. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 1. A capillary-based theory. *Water Resources Research*, Washington, v.30, p.2925-2929, 1994.
- Smiles, D.E.; Knight, J.H.; Perroux, K.M. Absorption of water by soil: the effect of a surface crust. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.46, p.476-481, 1982.
- Soria Ugalde, J.M.; Leij, F.J.; Angulo-Jaramillo, R.; Fuentes, C.; Haverkamp, R.; Parlange, J.Y. Aggregation scenarios to model water fluxes in watersheds with spatial changes in soil texture. In: *AGU Hydrology Days*, 23, 2003, Fort Collins. *Proceedings...* Fort Collins, 2003. 29p.
- Souza, E.S. *Caracterização hidrodinâmica na escala local e da parcela agrícola de dois solos do estado da Paraíba: Variabilidade espacial e temporal, e meio homogêneo equivalente*. 2005. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2005. 138p. Tese Doutorado.
- Souza, E.S.; Antonino, A.C.D.; Netto, A.M.; Cabral, J.J.S.P.; Angulo-Jaramillo, R.; Roulier, S. Análise do regime transitório da infiltração tridimensional sob sucção controlada. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.11, n.1, p.5-13, 2006.
- Thony, J.L.; Vachaud, G.; Clothier, B.E.; Angulo-Jaramillo, R. Field measurement of the hydraulic properties of soil. *Soil Technology*, Amsterdam, v.4, p.111-123, 1991.
- Valentin, C.; Bresson, L.M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, Amsterdam, v.55, p.225-245, 1992.
- Vandervaere, J.-P.; Peugeot, C.; Vauclin, M.; Angulo-Jaramillo, R.; Lebel, T. Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.188-189, p.203-223, 1997.
- Warrick, A.W.; Nielsen, D.R. Spatial variability of soil physics properties in the field. In: Hillel, D. (ed) *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. p.319-344.
- White, I.; Sully, M.J. Macroscopic and microscopic capillary length and times scales from field infiltration. *Water Resource Research*, Washington, v.23, p.1514-1522, 1987.