

Eduardo S. de Souza¹Antonio C. D. Antonino²Suzana M. G. L. Montenegro³José R. de S. Lima⁴Rafael Angulo-Jaramillo⁵

Mapeamento da probabilidade de ocorrência de classes da sorvidade e da condutividade hidráulica saturada de um Neossolo Flúvico

RESUMO

A investigação do movimento da água no solo em condições de não saturação, depende de medições no campo de propriedades hidráulicas como a condutividade hidráulica saturada e a sorvidade; entretanto, existe uma discrepância entre a escala representativa das medidas fornecidas pela física do solo e a escala dos domínios de modelagem hidrológica, problema ao qual é acrescentada a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas do solo. O objetivo neste trabalho foi mapear classes de probabilidade das propriedades hidráulicas, condutividade hidráulica saturada e sorvidade, de um Neossolo Flúvico localizado no semi-árido paraibano. Essas propriedades foram determinadas em uma área de 4 ha, por meio de ensaios de infiltração realizados com infiltrômetro de anel simples. Utilizou-se a técnica de krigagem indicativa para elaborar mapas de probabilidades da condutividade hidráulica e da sorvidade, considerando-se três níveis de corte preestabelecidos. A krigagem indicativa forneceu uma medida espacial da incerteza tendo-se encontrado, para a área em estudo, com 80% de nível confiança, que: para a sorvidade, 38,8% da área apresentaram valores maiores que 0,69 mm s^{-1/2} e, para a condutividade hidráulica, 33,1% da área indicaram valores maiores que 0,015 mm s⁻¹.

Palavras-chave: krigagem indicativa, geoestatística, propriedades hidráulicas do solo

Mapping of probability classes of the sorptivity and the saturated hydraulic conductivity of a Fluvent Soil

ABSTRACT

Investigation of the soil water movement, under unsaturated conditions, depends upon field measurements of soil hydraulic properties, such as saturated hydraulic conductivity and sorptivity. However, there is a discrepancy between the representative scale of estimates of soil physics and the scales for hydrological modeling. In addition to this issue, the spatial variability of the soil hydraulic properties must be taken into account. The objective of this work was mapping probability classes of the soil hydraulic properties, saturated hydraulic conductivity and sorptivity, of a Fluvent in the semi-arid part of Paraíba State. These properties were estimated, in an area of 4 ha, on the basis of field experiments using single ring infiltrometer. The indicator kriging has been used to elaborate probability maps of the saturated hydraulic conductivity and the sorptivity, considering three different threshold levels. The indicator kriging provided the spatial uncertainty pattern in the study area, being estimated, with 80% confidence level, that: for the sorptivity, 38.8% of the area presents values higher than 0.69 mm s^{-1/2}, and for the hydraulic conductivity, 33.1% of the area encompasses values higher than 0.015 mm s⁻¹.

Key words: indicator kriging, geostatistic, soil hydraulic properties

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

² Professor da UFPE/CTG/DEN, Av. Prof. Luiz Freire 1000, Cidade Universitária, CEP 50740-540 Recife, PE. acad@ufpe.br

³ Professor da UFPE/CTG/DECIV, Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, CEP 50.740-530 Recife, PE. suzanam@ufpe.br

⁴ Pós-Doutorando do PROTEN/DEN/UFPE, Av. Prof. Luiz Freire 1000, Cidade Universitária, CEP 50740-540 Recife, PE. romualdo_solo@yahoo.com.br

⁵ Pesquisador do Laboratoire des Sciences de l'Environnement, ENTPE, Rue Maurice Audin, 69518 Vaulx en Vélain, França. angulo@hmg.inpg.fr

INTRODUÇÃO

As medições no campo de propriedades hidráulicas, como a condutividade hidráulica e a sorvidade, são de fundamental importância para a avaliação do movimento da água no solo em condição de não saturação, envolvendo processos como infiltração, escoamento da água de chuva e irrigação, transporte de solutos e nutrientes (Hillel, 1998). Um dos grandes desafios é representar essas propriedades e/ou os processos, na presença da variabilidade espacial, em uma escala diferente da escala das observações realizadas.

Vários métodos foram desenvolvidos para estimar a condutividade hidráulica e a sorvidade, a partir da medida de fluxo de infiltração transitório ou estacionário, utilizando-se infiltrômetros a disco (Smettem & Clothier, 1989; Thony et al., 1991; Haverkamp et al., 1994; Vandervaere et al., 1997; Zhang, 1997; Angulo-Jaramillo et al., 2000). Recentemente, têm-se utilizado, em vários trabalhos (Braud et al., 2005; Souza, 2005; Lassabatère et al., 2006; Souza et al., 2007) o infiltrômetro de anel simples na caracterização hidrodinâmica em regime transitório. Esses trabalhos se baseiam nas equações que Haverkamp et al. (1994) desenvolveram para descrever a infiltração tridimensional.

As propriedades hidráulicas do solo são afetadas por numerosas fontes de variabilidade (pela ausência ou presença das plantas, pela diversidade da fauna microbológica, pela exposição do solo à ação direta das chuvas etc.), sobretudo quando associadas aos fatores espaciais e temporais relacionados à ação antrópica. A importância delas pode ser considerada de duas diferentes perspectivas: i) em relação ao efeito da magnitude dessas fontes de variabilidade sobre as propriedades hidráulicas do solo, e ii) quanto ao impacto da variação nas propriedades hidráulicas do solo sobre os processos simulados, os quais são altamente não lineares (van Es et al., 1999).

Até o final dos anos 80 a geoestatística foi essencialmente vista como meio de se descrever os padrões espaciais por semi-variogramas e para prever os valores de atributos do solo em locais não amostrados por meio da krigagem citando-se, como exemplo, os trabalhos de Vieira et al. (1983), Trangmar et al. (1985) e Warrick et al. (1986). Novas ferramentas foram desenvolvidas recentemente para avaliação da incerteza sobre a qualidade do solo ou sobre as concentrações de poluentes, a simulação estocástica da distribuição espacial das características do solo e a modelagem dos processos espaço-temporal (Goovaerts, 1999). A avaliação da incerteza por meio da geoestatística é feita através da elaboração de mapas de probabilidade de excedência de certos valores críticos de determinado atributo ou variável (Goovaerts, 1999), em cujo contexto, a avaliação da incerteza pode ser utilizada no processo de tomada de decisão. O mapeamento de probabilidades de um atributo através da geoestatística, também é utilizado para descrição de atributos em categorias (Goovaerts, 1999). A geoestatística vem sendo utilizada para caracterizar e quantificar a variabilidade espacial, desenvolver uma interpolação racional e estimar a variância dos valores interpolados (Feng et al., 2004).

Landim & Sturaro (2002) sugerem o uso da krigagem indicativa, visto que o essencial não é estimar um valor, como na krigagem ordinária mas, sim, definir áreas com maior ou menor probabilidade de que um certo evento ou valor crítico ocorra ou, seja superado. A krigagem indicativa é uma aplicação da krigagem ordinária para a variável transformada, isto é, a variável decorrente da aplicação da função não linear $f(z) = 0$ ou 1 . Segundo os autores, esta aplicação foi apresentada por Journel (1983) com a proposta de construir uma função de distribuição de probabilidades acumuladas para estimar as distribuições espaciais. Exemplos podem ser encontrados em Sturaro et al. (2000), Landim & Sturaro (2002) e Lourenço & Landim (2005).

A técnica da krigagem indicativa tem sido utilizada em diversas áreas de pesquisa ligada às ciências do solo e da água. Bönische et al. (2004), por exemplo, a utilizaram para espacializar a incerteza de propriedades de solos expressas por atributos categóricos de 222 perfis pedológicos e de 219 amostras extras, referentes a solos do estado de Santa Catarina. Em investigações hidrogeológicas visando à identificação de áreas de riscos à saúde pública, Lin et al. (2002), Juang et al. (2004) e Lourenço & Landim (2005) usaram a krigagem indicativa para confeccionar mapas de poluição levando em conta a concentração de metais pesados nos solos.

Montenegro & Montenegro (2006) fizeram uso desta técnica no mapeamento das classes de solo predominantes em uma planície aluvial adotando, como indicador a ausência/presença de uma classe textural e concluíram que os solos dominantes na bacia aluvial tiveram influência na distribuição espacial da condutividade hidráulica e da salinidade. Triantafyllis et al. (2003) utilizaram a krigagem indicativa para identificar áreas de risco de salinização do lençol freático de perímetros irrigados e, baseados nesses mapas, sugeriram melhorias na eficiência da irrigação.

Propôs-se, no presente trabalho, mapear classes de probabilidade das propriedades hidráulicas, a sorvidade e a condutividade hidráulica saturada de um Neossolo Flúvico, localizado no semi-árido paraibano, com a utilização da krigagem indicativa. A condutividade hidráulica saturada e a sorvidade foram determinadas por intermédio da análise do regime transitório da infiltração tridimensional, realizada com infiltrômetro de anel simples.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área experimental

Os ensaios de campo foram conduzidos em um Neossolo Flúvico (EMBRAPA, 2006) da Fazenda Várzea Grande, localizada no município de São João do Cariri ($7^{\circ}23'27''$ S e $36^{\circ}31'58''$ O), em uma área de quatro hectares. Este município faz parte da microrregião do Cariri Oriental, mesorregião da Borborema do Estado da Paraíba. O clima segundo a classificação de Köppen (1948) é do tipo Bsh, semi-árido, caracterizando-se por ser quente e seco, com chuvas de verão, alcançando-se os índices mais baixos de precipitação do Estado.

A área foi amostrada em uma malha retangular de 25 x 25m, totalizando 75 pontos. As medições de infiltração foram feitas com um infiltrômetro de anel simples com 150 mm de diâmetro. Em cada ponto se procedeu à coleta de amostras deformadas para determinação da textura do solo. A análise textural foi determinada pelo método da ABNT (1984).

O infiltrômetro de anel simples é posicionado na superfície do solo e inserido a uma profundidade de aproximadamente 1 cm, para prevenir perdas laterais de água na superfície do solo durante o processo de infiltração de água. Os ensaios de infiltração consistem em anotar o tempo que volumes constantes de água (70 - 100 mL), adicionados continuamente no infiltrômetro, levam para serem infiltrados. Esses ensaios fornecem a infiltração tridimensional em função do tempo $I_3(t)$. Durante cada ensaio também se coletaram amostras indeformadas para determinação da densidade do solo, e das umidades inicial θ_0 e final θ_s .

Obtiveram-se as propriedades hidráulicas do solo, sorvidade (S) e condutividade hidráulica saturada (K_s), do ajuste de curvas de infiltração. As curvas de infiltração foram representadas pelo modelo de Haverkamp et al. (1994), o qual é apresentado detalhadamente em Souza et al. (2006).

Análise da variabilidade das propriedades hidráulicas do solo S e K_s

Estatística clássica: No presente trabalho, o ajuste à distribuição normal é analisado através do teste Kolmogorov-Smirnov a nível de significância de 5%. Determinaram-se, por meio da estatística descritiva, a média aritmética, o desvio-padrão amostral e o coeficiente de variação (C.V.) para a sorvidade e a condutividade hidráulica. A partir do coeficiente de variação o grau de variabilidade de S e K_s foram analisados com base na classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), que sugerem os limites $CV < 12\%$, $12 < C.V. < 52\%$ e $C.V. \geq 52\%$ para as propriedades de baixa, média e alta variabilidade, respectivamente.

Geostatística: A metodologia utilizada para estudar a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas, consiste em assimilar as N observações da variável considerada a uma realização bidimensional aplicando-se os princípios da análise geoestatística. O primeiro passo na análise geoestatística é a verificação da existência de dependência espacial que pode ser estimada pela seguinte equação:

$$\gamma(L) = \frac{1}{2N(L)} \sum_{i=1}^{N(L)} \{Z(x_i + L) - Z(x_i)\}^2 \quad (1)$$

sendo $\gamma(L)$ a função semi-variograma, $Z(x_i + L)$ o valor da variável no ponto $x_i + L$, $Z(x_i)$ o valor da variável no ponto x_i , $N(L)$ o número de pares separados por uma distância L e x_i é uma medida de posição.

Basicamente, a estrutura espacial é analisada dependendo do comportamento do semi-variograma na origem e dos seus fenômenos de transição (Figura 1).

Teoricamente, há uma tendência de $\gamma(L)$ crescer indefinidamente com L porém, na prática, pode ocorrer das amostras não apresentarem influência umas sobre as outras, a partir de certa distância. Este efeito pode ser observado pelo alcance

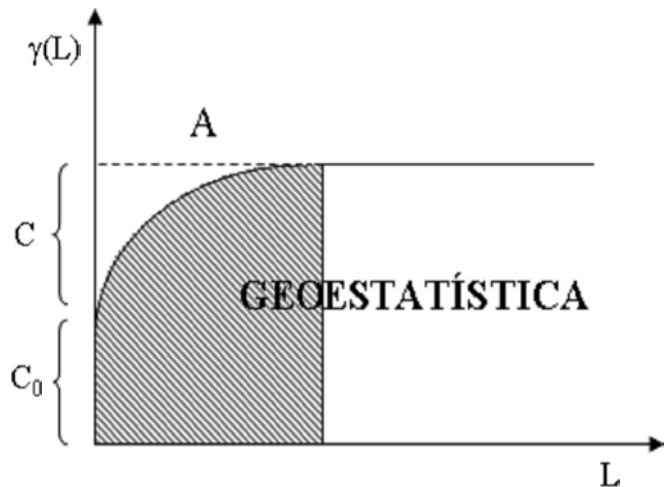


Figura 1. Descrição dos fenômenos de transição nas análises dos semi-variogramas (Guerra, 1988)

Figure 1. Description of the transition phenomena in the semi-variograms analyses (Guerra, 1988)

A, demonstrado na Figura 1; ele marca a distância a partir da qual o valor da variável em um ponto não tem mais influência sobre o valor no ponto vizinho; o alcance marca, assim, o início da zona de pura aleatoriedade. Este tipo de situação se refere a fenômenos de transição que se caracterizam por semi-variogramas cujo crescimento tende a até um patamar ($C_0 + C$) (Figura 1); o patamar marca o valor da variância total da variável em estudo, o parâmetro C é denominado variância de dispersão e representa as diferenças espaciais entre os valores de uma variável tomada em dois pontos separados por distâncias cada vez maiores (Guerra, 1988).

Cambardella et al. (1994) propuseram, a partir da relação $[C_0 / (C_0 + C) \times 100]$, os seguintes intervalos para avaliar a dependência espacial: $\leq 25\%$ - forte dependência espacial; entre 25 e 75% - moderada dependência espacial $\geq 75\%$ - fraca dependência espacial.

O semi-variograma indicativo expressa o quanto dois valores da variável regionalizada, separadas por uma distância L, estão em lados opostos de um valor de referência, ou seja, o semi-variograma indicativo expressa a frequência de transição entre duas classes de valores da variável analisada (Goovaerts, 1999); assim, a krigagem baseada no semi-variograma dado pela Eq (1) estima a variável em pontos não amostrados enquanto a krigagem indicativa identifica áreas com maior ou menor probabilidade de que determinado evento ocorra isto é, seja superado, caso em que se tem classes de probabilidade definidas. A análise de incerteza ou de risco é baseada em probabilidades de excedências de um valor crítico.

Algumas investigações definem os níveis de cortes a partir de teores de referência, de valores de alerta e valores de intervenção citando-se, como exemplos, os estudos de impactos ambientais ou de risco à saúde pública (Lin et al., 2002, Juang et al., 2004 e Lourenço & Landim, 2005).

Como não há níveis de corte definidos para as propriedades hidráulicas (S e K_s), no presente trabalho, escolheram-se três níveis correspondentes aos percentis da distribuição de

probabilidades acumuladas {30, 50 (mediana) e 70%} para a aplicação da krigagem indicativa.

A krigagem indicativa requer dados convertidos em binário baseados nos valores dos níveis de corte preestabelecidos, ou seja:

$$i_j(x_i; z_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } Z(x_i) \leq z_k \\ 0 & \text{se } Z(x_i) > z_k \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

sendo, $Z(x_i)$ o valor observado e z_k o nível de corte.

O semi-variograma indicativo experimental é calculado pela função:

$$\gamma(L; z_k) = \frac{1}{2N(L)} \sum_{i=1}^{N(L)} \{Z(x_i + L; z_k) - Z(x_i; z_k)\}^2 \quad (3)$$

Em seguida à determinação dos semi-variogramas experimentais (convencional e indicativo), deve-se fazer o ajuste dos modelos teóricos de semi-variogramas ou a parametrização dos semi-variogramas experimentais. Diversos modelos teóricos devem ser testados e, dentre estes, escolhidos os de melhor ajuste. Dentre os modelos teóricos usualmente considerados, estão o esférico, o exponencial e o Gaussiano. O modelo esférico pode ser descrito como:

$$\gamma^*(L) = C_0 + C \cdot \left[1,5 \cdot \left[\frac{L}{A} \right] - 0,5 \cdot \left(\frac{L}{A} \right)^3 \right] \quad (4)$$

sendo C_0 o efeito pepita, $(C_0 + C)$ o patamar e A o alcance. Expressões dos outros modelos são encontrados na literatura (Vieira et al., 1983).

Os semi-variogramas experimentais onidirecionais foram calculados e modelados com o programa geostatístico VARIOWIN® (Pannatier, 1996). A seleção dos modelos teóricos se baseou na inspeção visual e no índice IGF (Indicative Goodness of Fit) dos semi-variogramas experimentais. Quanto mais próximo o valor de IGF for de zero, melhor é o ajuste. Este índice computado pelo Variowin® é fornecido pela fórmula:

$$IGF = \sum_{i=0}^{N(L)} \frac{P(L)}{\sum_{j=0}^{N(L)} P(j)} \cdot \frac{D(k)}{d(L)} \cdot \left[\frac{\gamma(L) - \gamma^*(L)}{\sigma^2} \right]^2 \quad (5)$$

sendo $N(L)$ o número de passos (lag) relativo ao semi-variograma, $D(k)$ a distância máxima no semi-variograma, $P(L)$ o número de pares do L -ésimo lag do semi-variograma, $d(L)$ a distância média dos pares do L -ésimo lag do semi-variograma, $\gamma(L)$ o valor real do semi-variograma para o L -ésimo lag, $\gamma^*(L)$ o valor experimental do semi-variograma para o L -ésimo lag e σ^2 a variância.

A análise do comportamento visual dos semi-variogramas é importante haja vista que fornece uma descrição sintética das estruturas dos fenômenos estudados. A adequação do modelo de semi-variograma, caracterizando a estrutura de um conjunto de pontos, deve ser verificada antes do mesmo ser usado para a geração de mapas, prognósticos e de cenários. O método de Jack – knifing, ou validação cruzada, é usual-

mente aplicado para tal validação (Vauclin et al., 1983); ele consiste em remover sucessivamente um dado ponto Z_i de cada vez e depois estimá-lo a partir do restante de pontos, produzindo um valor de Z_i^* ; desta forma, em cada localização dos pontos X_i , se definem um erro reduzido R_i , seu valor médio e sua variância; o erro reduzido médio deve ser próximo de zero, caso não exista erro sistemático, e a variância deve ser próxima de um, sugerindo que a variância dos erros $(Z_i - Z_i^*)$ está consistente com a variância da krigagem $(\sigma_{KR})^2$.

Os mapas de contorno das propriedades do solo foram produzidos com o programa Surfer 7.0 (Golden software, Colorado, U.S.A.), que utiliza, para a interpolação, a Krigagem Ordinária.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comportamento das componentes texturais e da infiltração

A Figura 2 refere-se ao diagrama das classes texturais encontradas no solo, na qual se nota uma importante variação textural; dos 75 pontos amostrados, 91,2% são de textura média (55,0% são franco-arenosos, 23,7% são franca e 12,5% são franco-argilo-arenosos) e 8,8% são de textura arenosa (7,5% de areia-franca e 1,3% de areia).

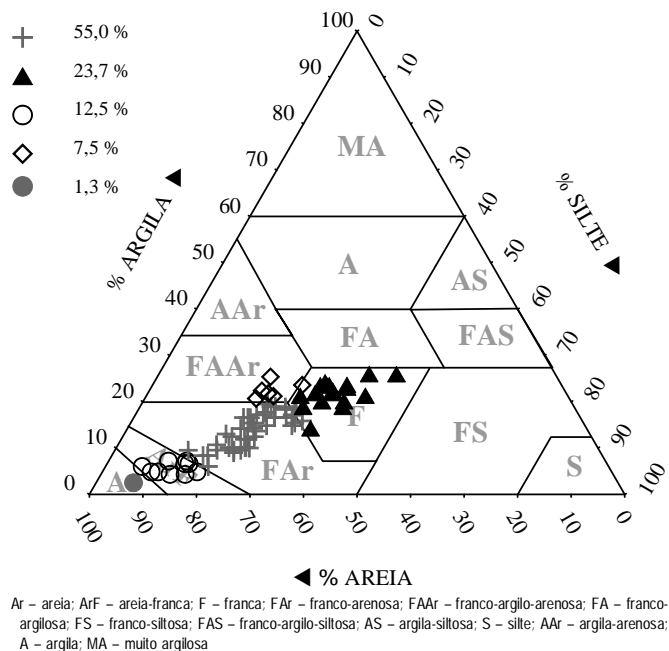


Figura 2. Classes texturais dominantes do Neossolo Flúvico

Figure 2. Dominant textural classes of the Fluvent soil

Os testes de infiltração (Figura 3) estão agrupados de acordo com a textura do solo (Figura 2); por exemplo, 55% dos testes de infiltração foram conduzidos na classe FAr (Figura 3). As comparações das lâminas de água medidas nas diferentes classes texturais, demonstram diferenças qualitativas dos efeitos texturais e estruturais no fluxo de água.

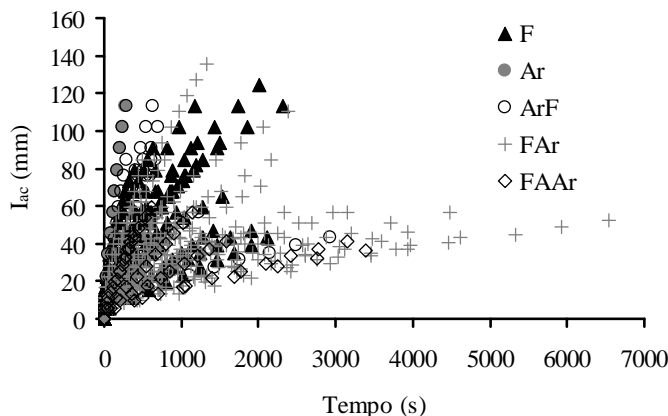


Figura 3. Infiltrações acumuladas em função do tempo para o Neossolo Flúvico

Figure 3. Cumulative infiltration as a function of time for the Fluvent soil

Na maioria dos ensaios a duração do teste de infiltração variou de 200 até 4000 s, para uma variação de lâmina acumulada de 120 a 40 mm, respectivamente (Fig. 3); desta forma, é possível observar uma variabilidade significativa dos fluxos de infiltração, o que pode ser interpretado como o efeito mais importante da heterogeneidade local; esta variabilidade, por sua vez, deve estar mais associada com os fatores estruturais do solo que com os texturais, uma vez que em uma mesma classe textural (por exemplo, a franco-arenosa), existe uma variabilidade elevada nas lâminas infiltradas. Os fatores estruturais do solo podem estar associados à ativação hidráulica dos macroporos, durante a infiltração com pressão zero.

Variabilidade espacial

A normalidade foi formalmente confirmada para as duas propriedades (S e $\ln K_s$) aplicando-se o teste de Kolmogorov-Smirnov, com nível de 95% de confiança. Determinou-se a diferença entre a frequência acumulada observada e a teórica máxima, $|F(O) - F(t)|_{\max}$, com base no número total de amostras da população observada dos dados experimentais, e na distribuição teórica Normal. Comparando-se esta diferença com o valor admissível do coeficiente de Kolmogorov-Smirnov, D_{KS} , conclui-se que a hipótese de normalidade não pode ser rejeitada. Como se pode verificar na Figura 4, os valores da sorvidade e do logaritmo da condutividade hidráulica se aproximam de uma distribuição Normal.

Como o grau de variabilidade é dependente da natureza das propriedades que estão sendo examinadas, as duas propriedades do solo foram agrupadas de acordo com critérios utilizados por Warrick & Nielsen (1980), ou seja, em função dos seus respectivos coeficientes de variação (C.V.). Analisando-se a Tabela 1, pode-se observar que S e K_s são, respectivamente, classificados como de alta variabilidade.

O modelo esférico foi escolhido, haja vista que se ajustou melhor às semi-variâncias experimentais de S ($IGF = 4,02 \times 10^{-3}$) e de $\ln K_s$ ($IGF = 5,18 \times 10^{-3}$). A análise pelo método Jack-knifing para a sorvidade produziu resíduos com média 0,004 e desvio-padrão 0,980, aproximando-se de zero e de um, respectivamente. Para o $\ln K_s$, as análises conduziram a erros médios

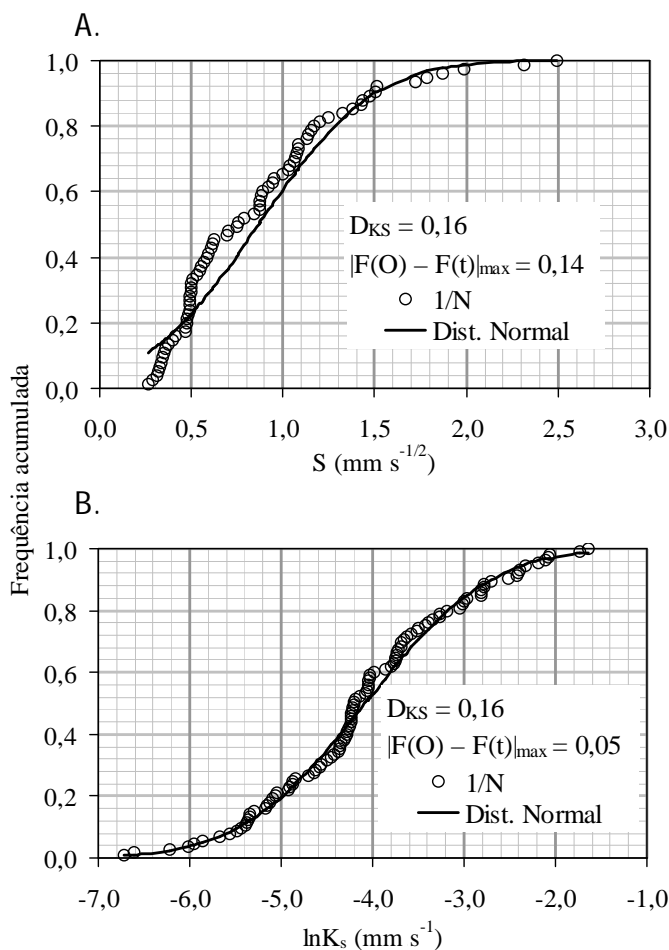


Figura 4. Testes de distribuição Kolmogorov-Smirnov para sorvidade S (A) e condutividade hidráulica saturado - K_s (B)

Figure 4. Kolmogorov-Smirnov distribution test for sorptivity S (A) and saturated hydraulic conductivity - K_s (B)

Tabela 1. Estatística das variáveis estudadas*

Table 1. Statistics of the studied variables

	S (mm s ^{-1/2})	K_s (mm s ⁻¹)	$\ln K_s$ (mm s ⁻¹)
Média	0,87	0,032	-4,02
Mediana	0,76	0,017	-4,05
Desvio-padrão	0,49	0,038	-1,09
CV (%)	56,5	120,3	-27,3
Percentil 30%	0,50	0,012	-4,42
Percentil 70%	1,07	0,029	-3,53
N	75	75	75

* S - sorvidade, K_s - condutividade hidráulica saturada

próximos de zero (0,009), porém a variância foi ligeiramente menor que 1 (0,840).

Os resultados da análise geoestatística das propriedades hidráulicas são apresentados na Tabela 2. O exame dos semi-variogramas mostra que o alcance foi maior para a sorvidade que para a condutividade hidráulica. A sorvidade também apresentou maior valor de efeito pepita, igual a 0,920, que a

condutividade hidráulica. Os valores de efeito pepita refletem a variabilidade não explicada ou uma variabilidade provavelmente não detectada pelas distâncias da malha de amostragem.

Tabela 2. Parâmetros da análise geoestatística de sorvidade S ($\text{mm s}^{-1/2}$) e condutividade hidráulica saturada - K_s (mm s^{-1})

Table 2. Geostatistic of sorptivity S ($\text{mm s}^{-1/2}$) and saturated hydraulic conductivity - K_s (mm s^{-1})

Parâmetros	Modelo	C_0	C	A (m)
S	Esférico	0,064	0,231	159,4
$\ln K_s$	Esférico	0,920	0,304	132,0

C_0 é o efeito pepita; C é a variância espacial; A é o alcance

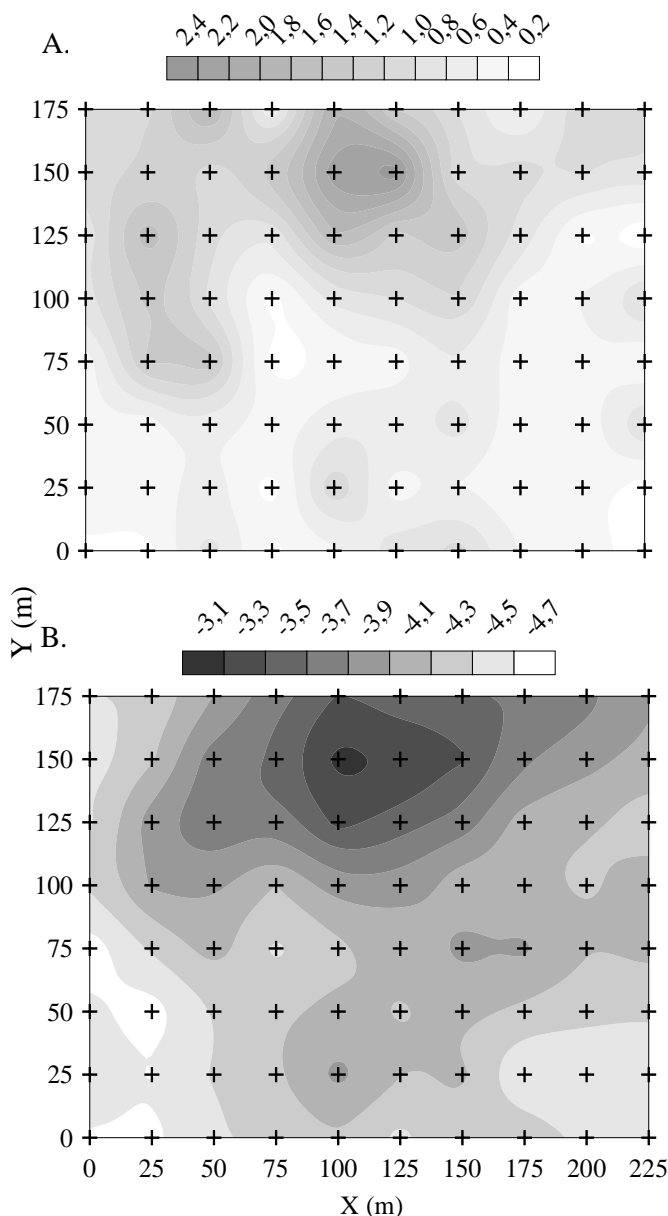


Figura 5. Mapas de isolinhas de sorvidade S (A) e condutividade hidráulica saturada - $\ln K_s$ (B) no Neossolo Flúvico

Figura 5. Isolines maps of sorptivity S (A) and saturated hydraulic conductivity - $\ln K_s$ (B) in the Fluvent soil

De acordo com os critérios de Cambardella et al. (1994), os valores de C_0 apresentaram dependência espacial forte para S e fraca para $\ln K_s$. Cambardella et al. (1994) avaliaram o grau de dependência espacial, segundo este critério, em 27 atributos do solo, e identificaram diferentes níveis de dependência. Abreu et al. (2003) destacam que, de maneira geral, as propriedades do solo apresentam moderada dependência espacial. Os mesmos autores identificaram, avaliando a condutividade hidráulica saturada a 30 cm de profundidade em Argissolo sob plantio direto, forte dependência espacial dessa variável. Grego & Vieira (2005) identificaram dependência espacial moderada e forte para propriedades físico-hídricas (teor de água no solo, porosidade, densidade do solo, resistência a penetração e retenção da água, na camada superficial (0-25 cm) de um Latossolo Vermelho sob uso agrícola. Farias et al. (2005) também avaliaram o grau de dependência espacial de atributos físico-hídricos de solo seguindo o critério de Cambardella et al. (1994) e identificaram diferentes graus de dependência espacial, destacando-se a influência de práticas agrícolas neste comportamento.

A Figura 5 mostra os mapas de isolinhas das propriedades hidrodinâmicas de S e de $\ln K_s$. Os mapas de S e $\ln K_s$ mostram certa semelhança em termos de padrão de variabilidade. Observa-se que as faixas de solo com altos valores de condutividade hidráulica são as que também apresentam elevados valores de sorvidade.

Para se calcular os semi-variogramas experimentais indicativos com uma boa aproximação dos modelos para cada nível de corte (30, 50 e 70%), geraram-se alguns pontos na malha, distanciados 12,5 m (Figura 6); nesses novos pontos, S e K_s , foram estimados a partir dos semi-variogramas teóricos e da krigagem ordinária com os parâmetros relacionados na Tabela 2.

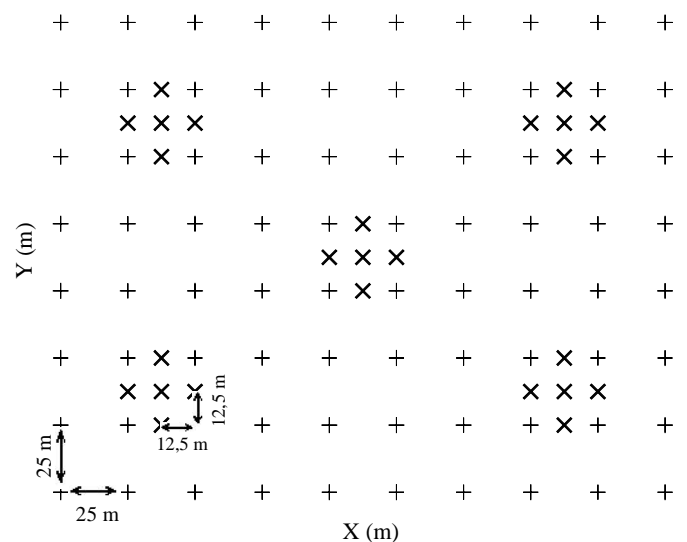


Figura 6. Distribuição na área em estudo dos pontos onde foram realizados os ensaios de infiltração e as coletas de solo (+) e dos pontos estimados pela krigagem ordinária (x)

Figure 6. Distribution in the study area of the points where the infiltration assays and collection of soil samples were performed (+) and estimates points for the ordinary kriging (x)

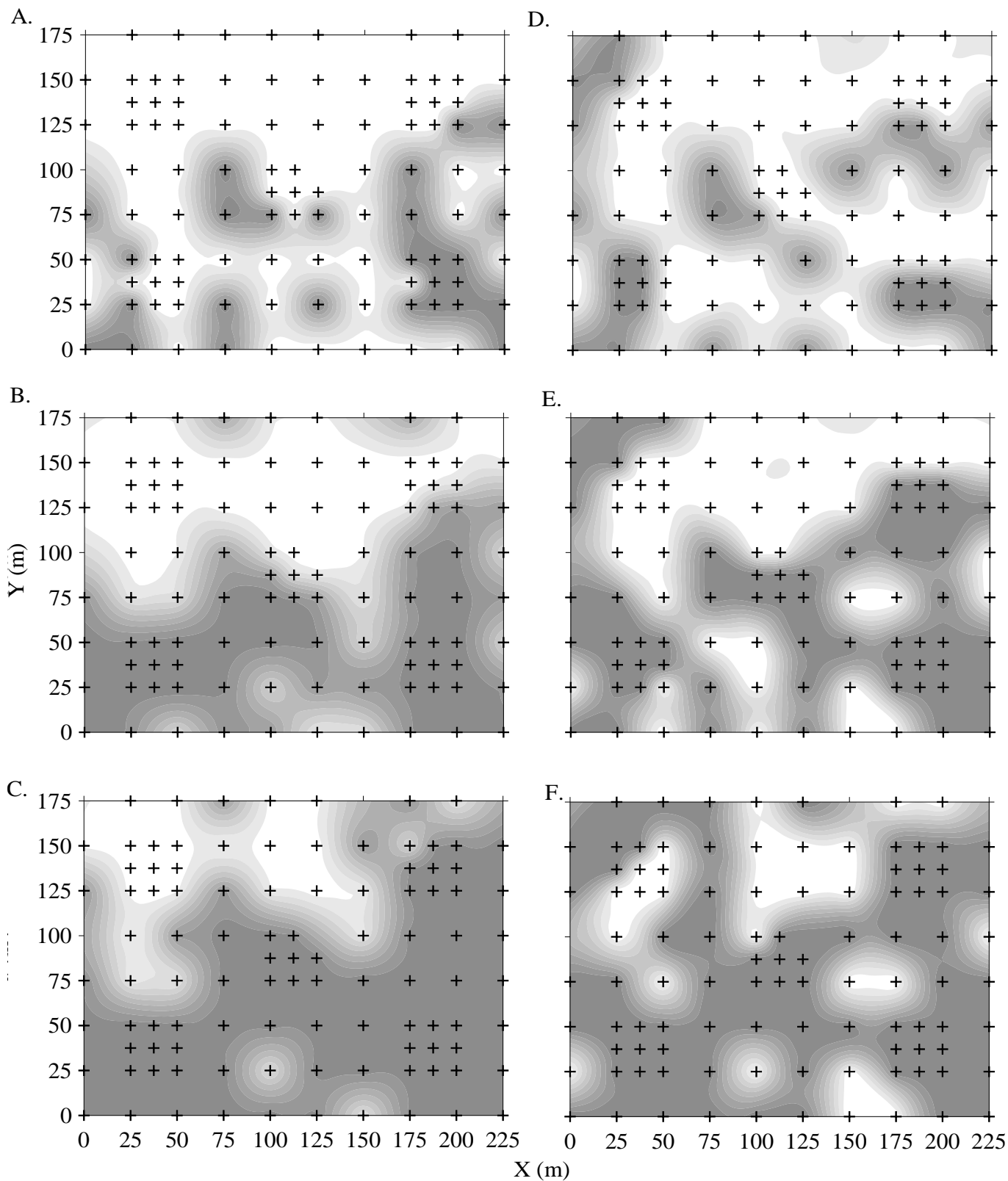


Figura 7. Mapas de probabilidades da sorvidade (A, B, C) e da condutividade hidráulica saturada (D, E, F) serem superiores aos respectivos níveis de corte, 30, 50 e 70%

Figure 7. Probability maps of the sorptivity (A, B, C) and the saturated hydraulic conductivity (D, E, F) superior than the respective threshold levels of 30, 50 and 70%

Tabela 3. Geoestatística dos percentis escolhidos como níveis de corte para S e $\ln K_s$ **Table 3.** Geostatistic of the chosen percentiles as threshold levels for S and $\ln K_s$

Percentis	C_0	C	A (m)
S			
30%	0,025	0,184	51,50
50%	0,037	0,246	116,70
70%	0,014	0,233	148,60
$\ln K_s$			
30%	0,031	0,195	38,70
50%	0,000	0,255	52,00
70%	0,000	0,196	49,60

C_0 é o efeito pepita; C é a variância espacial; A é o alcance

As duas propriedades analisadas, S e K_s , apresentaram dependência espacial para os três níveis de corte. Os semi-variogramas indicativos experimentais foram calculados substituindo-se dados de acordo com a função binária (Equação 2), da variável Z na equação do variograma (Equação 1), utilizando-se o modelo teórico ajustado para estimativa espacial dos valores da variável pela krigagem ordinária.

Analisando-se o índice de melhor ajuste (IGF) para os modelos dos semi-variogramas para os três níveis de corte, verificou-se que todos os valores estão próximos de zero, variando de $6,14 \times 10^{-3}$ a $1,17 \times 10^{-2}$, indicando um bom ajuste. Vários modelos foram testados e somente os que apresentaram os melhores IGF foram mostrados. O modelo teórico ajustado em todos os casos, foi o esférico, cujos parâmetros são explicitados na Tabela 3.

As análises do método Jack-knifing para a sorvidade conduziram a erros médios iguais a - 0,012, - 0,002 e - 0,003 para os respectivos percentis de 30, 50 e 70%, porém as variâncias foram ligeiramente maiores que 1 (1,260, 1,256 e 1,470 para os respectivos percentis de 30, 50 e 70%). As análises para o $\ln K_s$ produziram erros médios iguais a - 0,001, - 0,004 e - 0,001 para percentuais de 30, 50 e 70%, respectivamente; e variâncias iguais a 0,862, 1,154 e 1,356, para os respectivos percentis de 30, 50 e 70%.

O efeito pepita como porcentagem do patamar, permite que se compare o grau da dependência espacial. De acordo com os critérios propostos por Cambardella et al. (1994), todos apresentaram forte dependência espacial.

Definidos os parâmetros dos semi-variogramas indicativos de S e $\ln K_s$ (Tabela 3), efetuaram-se os cálculos para a confecção dos mapas pelo método da krigagem indicativa. A Figura 7 mostra os mapas de probabilidade de ocorrência da sorvidade e da condutividade hidráulica para os três níveis de corte. As escalas desses mapas são definidas por 0,0, 0,1, 0,2...0,8, 0,9 e 1,0, em que zero (0) significa que a probabilidade de ocorrência está acima do limite definido pelo nível de corte que, é de 100% já que, inicialmente, ficou estabelecido que valores acima dos níveis de corte fossem substituídos pelo valor zero, condição esta indicada pela cor branca nos mapas.

Os mapas gerados para a sorvidade mostraram que, em um nível de probabilidade de 80%, foram encontrados: 57,6% de área com valores maiores que $0,52 \text{ mm s}^{-1/2}$ (Figura 7A); 36,1% de área

com valores maiores que $0,69 \text{ mm s}^{-1/2}$ (Figura 7B) e apenas 16,9% de área com valores superiores que $1,04 \text{ mm s}^{-1/2}$ (Figura 7C).

Para a condutividade hidráulica, os mapas mostraram que, em um nível de probabilidade de 80%, foram encontrados: 53,2% de área com valores maiores que $0,011 \text{ mm s}^{-1}$ (Figura 7D); 32,5% de área com valores maiores que $0,015 \text{ mm s}^{-1}$ (Figura 7E) e apenas 13,1% de área com valores maiores que $0,026 \text{ mm s}^{-1}$ (Figura 7F).

CONCLUSÕES

A krigagem indicativa permitiu espacializar a sorvidade e a condutividade hidráulica do solo em função dos três níveis de corte predefinidos produzindo, para cada nível de corte, uma medida espacial da probabilidade de excedência de valor de referência da variável.

Tomando-se como base os valores medianos, pode-se afirmar, com 80% de confiança, que: para a sorvidade, 38,8% da área apresentaram valores maiores que $0,69 \text{ mm s}^{-1/2}$ e para a condutividade hidráulica, 33,1% da área mostraram valores maiores que $0,015 \text{ mm s}^{-1}$.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba – FAPESQ (processo No 003/05, Edital 002/03 – FAPESQ/MCT/CNPq, convênio 002/2003) e ao CNPq (Processos nº 350277/2005-2, 309986/2006-0, 373089/2006-6 e 373139/2006-3) pela concessão de bolsas e dos recursos necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR – 7181. Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- Abreu, S. L. de; Reichert, J. M.; Silva, V. R. da; Reinert, D. J.; Blume, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. *Ciência Rural*, v.33, n.2, p. 275-282, 2003.
- 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*, v.55, p.1-29, 2000.
- Bönisch, S, Lopes Assad, M. L., Câmara, G., Monteiro, A. M. V. Representação e propagação de incertezas em dados de solos. 1- Atributos categóricos. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v.28, p.21-32, 2004.
- 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*, v.56, p.361-374, 2005.

- Cambardella, C.A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkim, T. B.; Karlen, D. I.; Turco, R. F.; Koopka, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, n.5, p.1501 – 1511, 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.
- Farias, L. N.; Ceddia, M. B.; Vieira, S. R.; Costa, A. D.; Gonçalves, M. G.; Carvalho, D. F. de; Ravelli Neto, A. Variabilidade espacial de alguns atributos físico-hídricos de solos em sistema de produção agroecológico. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 30, Recife, PE. CD-Rom, 2005.
- Feng, Q.; Liu, Y.; Mikami, M. Geostatistical analysis of soil moisture variability in grassland. *Journal of Arid Environments*, v.58, p.357–372, 2004.
- Grego, C. R.; Vieira, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p. 169-177, 2005.
- Goovaerts, P. Geostatistical in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, v.89, p.1-45, 1999.
- Guerra, P.A.L.G. Geoestatística operacional. Brasília: Ministério das Minas e Energia-Departamento Nacional da Produção Mineral, 1988. 145p.
- 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.
- Hillel, D. Environmental soil physics. New York: Academic press, 1998. 771p.
- Journel, A. G. Non-parametric estimation of spatial distribution. *Mathematical Geology*, v.15, n.3, p.445-468, 1983.
- Juang, K.; Chen, Y.; and Lee, D. Using sequential indicator simulation to assess the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soils. *Environmental Pollution*, v.127, p. 229-238, 2004.
- Köppen, W. Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra. Traducción Pedro R. H. Pérez. México: Fondo de Cultura Economía, 1948, 478p.
- Landim, P.M.B.; Sturaro, J.R. Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 06, 19 pp. 2002. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 27/07/2007.
- 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*, v.70, p.521-532, 2006.
- Lin, Y.; Chang, T.; Shih, C.; Tseng, C. Factorial and indicator kriging methods using a geographic information system to delineate spatial variation and pollution sources of soil heavy metals. *Environmental Geology*, v. 42, p.900-909, 2002.
- Lourenço, R. W.; Landim, P. M. B. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. *Cadernos Saúde Pública*, v.21, n.1, p. 150-160, 2005.
- Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície Aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.1, p.30–37, 2006.
- Pannatier, Y. Variowin 2.2. Software for spatial data analysis in 2D. New York: Springer, 1996. 91p.
- 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.
- 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. Recife: UFRPE, 2005. 138p. Tese de 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*, v.11, n.1, p.5-13, 2006.
- Souza, E.S.; Antonino, A.C.D.; Lima, J. R. S.; Gouveia Neto, G. C.; Silva, J. M.; Silva, I. F. Efeito do encrustamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.2, n.1, p.69-74, 2007.
- Sturaro J.R.; Landim P.M.B.; Riedel, P.S. O emprego da técnica geoestatística da krigagem indicativa em geotecnia ambiental. *Revista Solos e Rochas*, v.23, p.157-164, 2000.
- Thony, J.L.; Vachaud, G.; Clothier, B.E.; Angulo-Jaramillo, R. Field measurement of the hydraulic properties of soil. *Soil Technology*, v.4, p.111-123, 1991.
- Trangmar, B. B.; Yost, R. S.; Uehara, G. Application of geostatistic to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, v.38, p.45-94, 1985.
- Triantafyllis, J.; Huckel, A. I.; Odeh, I.O.A. Field-scale assessment of deep drainage risk. *Irrigation Science*, v.21, p.183–192, 2003.
- van Es, H.M.; Ogden, C.B.; Hill, R.L.; Schindelbeck, R.R.; Tsegaye, T. Integrated assessment of space, time, and management-related variability of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, v.63, p.1599–1608, 1999.
- 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*, v.188–189, p.203–223, 1997.
- Vauclin, M.; Vieira, S. R.; Vachaud, G.; Nielsen, D. R. The use of cokriging with limited field soil observations. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.47, p.175 – 184, 1983.
- Vieira, S.R.; Hatfield, J.L.; Nielsen, D.R.; Biggar, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, v.51, p.1-75, 1983.
- 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.
- Zhang, R.. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disc infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, v.61, p.1024-1030, 1997.