

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS MODELOS DE INFILTRACIÓN DE PHILIP Y KOSTIAKOV EN UN SUELO ÂNDICO

ANDRÉS F. RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ¹, ANDRÉS M. ARISTIZÁBAL-CASTILLO²,
JESÚS H. CAMACHO-TAMAYO³

RESUMO: Conhecer o comportamento da infiltração é de grande utilidade devido a sua aplicação na produção agrícola, pois permite definir a operação de sistemas de irrigação e estudar os efeitos de diferentes práticas de uso do solo. O objetivo do presente estudo foi analisar a variabilidade espacial dos parâmetros do modelo de infiltração de Philip e Kostiakov, assim como a sua relação com a densidade do solo, a densidade das partículas e os teores de areia, de silte e de argila. Os testes de infiltração foram medidos usando dois anéis concêntricos, em uma malha de amostragem retangular de 5 x 8 pontos, em intervalos regulares de 20 m, sob duas condições de umidade do solo. Encontrou-se que a variabilidade do solo e, principalmente, os teores de argila, influem na variabilidade espacial da infiltração, observando-se que os parâmetros do modelo de Philip e Kostiakov nem sempre se ajustaram a modelos teóricos de semivariogramas. O modelo que apresentou ajustes para todos os testes realizados nas duas condições de umidade foi o de Kostiakov. Os testes apresentaram-se limitantes para o modelo de Philip, quando o solo apresenta altos teores de água, indicando que esse modelo não foi adequado no solo ândico em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: geostatística, propriedades hidrofísicas, atributos do solo.

SPATIAL VARIABILITY OF PHILIP AND KOSTIAKOV INFILTRATION MODELS IN AN ANDIC SOIL

ABSTRACT: To know the infiltration behavior is very important due to its application in the agricultural production, since it allows to define the operation of irrigation systems and to study the effects of different practices of soil use. The objective of present study was to determinate the spatial variability of the infiltration model parameters of Philip and Kostiakov, as well as its relation with the bulk density, soil particles density and the sand, lime and clay contents. The infiltration tests were made using double ring infiltrometers, in a rectangular grid of 5 x 8 points of sampling, spaced at separation distance of 20 m, among two moisture soil conditions. It was found that soil spatial variability and mainly the clay contents affect the spatial variability of the infiltration, showing that the parameters of Philip and Kostiakov model, not always adjusted to theoretical semivariogramas models. The model that fitted for all sampling points in the two moisture soil conditions was Kostiakov. The test presented limiting for the Philip model, when the soil water content is high, indicating that this model is not adequate in this andic soil.

KEYWORDS: geostatistic, hydrophysical properties, soil attributes.

INTRODUCCIÓN

La estimación de la velocidad de infiltración y la lámina acumulada, es de gran importancia debido a su aplicación en el sector agrícola y ambiental, dado que permiten cuantificar la escorrentía, la erosión, disponibilidad de sedimentos, la capacidad de recarga de acuíferos, definir la operación de sistemas de riego y estudiar los efectos de diferentes prácticas de uso de suelos (IROUMÉ & SCHÄFER, 2000; MACHIWAL et al., 2006; GREGO & VIEIRA, 2005; SOUZA et al., 2003; SOUZA et al., 2004)

¹ Ingeniero Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, andres_f_rodriguez_v@yahoo.es

² Ingeniero Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, amaristizabal@unal.edu.co

³ Ingeniero Agrícola, M.Sc., Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Ciudad Universitaria, Edificio 214, Oficina 304, Bogotá, Colombia, jhcamachot@unal.edu.co

Recebido pelo Conselho Editorial em: 13-12-2006

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 21-1-2008

Un apropiado manejo agrícola puede depender de un conocimiento adecuado de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo (MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2006). Autores como Philip y Kostiakov, han determinado de manera analítica y empírica, modelos que simulan la infiltración de agua en el suelo, que en algunas ocasiones los parámetros están relacionados con unas propiedades hidrofísicas del suelo (PHILIP, 1957a). No existe un método estándar para la medición de la infiltración (LIMA & SILANS, 1999), siendo el método de anillos dobles el más usado en Colombia, debido a su facilidad de manipulación a nivel de campo (ALVES et al., 2002).

En general, los parámetros de las ecuaciones de infiltración, tienen una variabilidad espacial para un mismo tipo de suelo (IROUMÉ & SCHÄFER, 2000), algunos estudios sobre variabilidad espacial de las propiedades hidrodinámicas del suelo, indican que los suelos con una apariencia homogénea, presentan una considerable variabilidad en el espacio de las propiedades físicas (LIMA & SILANS, 1999; VIEIRA et al., 1981). Por esto, el presente trabajo tuvo como objetivo la caracterización de la variabilidad espacial de los parámetros del modelo de infiltración, desarrollados por Kostiakov y Philip y su relación con algunos atributos del suelo.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Centro Agropecuario Marengo (CAM), de la Universidad Nacional de Colombia, localizada en el municipio de Mosquera (Cundinamarca – Colombia), coordenadas geográficas 4° 42' de latitud norte, 74° 12' de longitud oeste y una altitud de 2.543 m. La zona pertenece a la cuenca hidrográfica del río Bogotá, que presentan suelo de la serie Marengo, con texturas franco limosas y franco arcillosas, con pendientes inferiores al 1%. El suelo es un Andisol, con un horizonte A espeso y oscuro originado de sedimentos lacustres con aspersiones de cenizas volcánicas y aportes de arcillas aluviales (MALAGÓN, 2003), presentando un drenaje natural entre pobre a imperfecto. En el momento de muestreo, la vegetación predominante era el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y la principal actividad realizada sobre esta zona es la ganadería.

Para el muestreo se diseñó una malla de 40 puntos (8 x 5), distanciados 20 m entre sí, con un área experimental de 1,12 ha (Figura 1). En el lote de trabajo se hizo la altimetría y se determinaron la densidad aparente (D_a), densidad de partículas del suelo (D_p) y los contenidos de arenas, limos y arcillas, entre 0 y 0,25 m de profundidad. Las pruebas de infiltración se realizaron en dos periodos, donde el segundo se caracterizó por su baja precipitación, transcurriendo entre uno y otro periodo un intervalo de treinta días. El método usado para las pruebas de infiltración fue el de anillos dobles, por un lapso de tiempo de 180 minutos, con carga variable, evitando que la diferencia entre la máxima y mínima lectura no superara los 0,15 m. La D_a fue determinada mediante el método del cilindro, la D_p y los contenidos de arena, limo y arcilla fueron establecidos mediante el método de hidrometría y el contenido de agua (CA) por estufa (MONTENEGRO & MALAGÓN, 1990).

Para la determinación de los parámetros de los modelos de infiltración se trabajó con el modelo de Kostiakov (Ecuación 1) y el modelo de Philip (Ecuación 2), determinando los parámetros de la lámina de infiltración (Ecuación 3), como es descrito por GIL (2002). Para esto hicieron dos ajustes, uno mediante regresión lineal simple (RLS) y otro mediante optimización de variables (OV) con el programa CURVE EXPERT, v.1.3 (HYAMS, 2005), para ajustar los modelos de Philip y Kostiakov, similar a la metodología propuesta por LIMA & SILANS (1999), para luego escoger aquel que presentara un mejor coeficiente de determinación (R^2).

Kostiakov en 1932 propuso el siguiente modelo para determinar la lámina de infiltración:

$$I(t) = at^b \quad (1)$$

en que,

$I(t)$ - la lámina de infiltración acumulada, respecto al tiempo transcurrido (t);

a y b - parámetros empíricos de ajuste, determinados a partir de los datos experimentales de infiltración (PREVEDELLO, 1996).

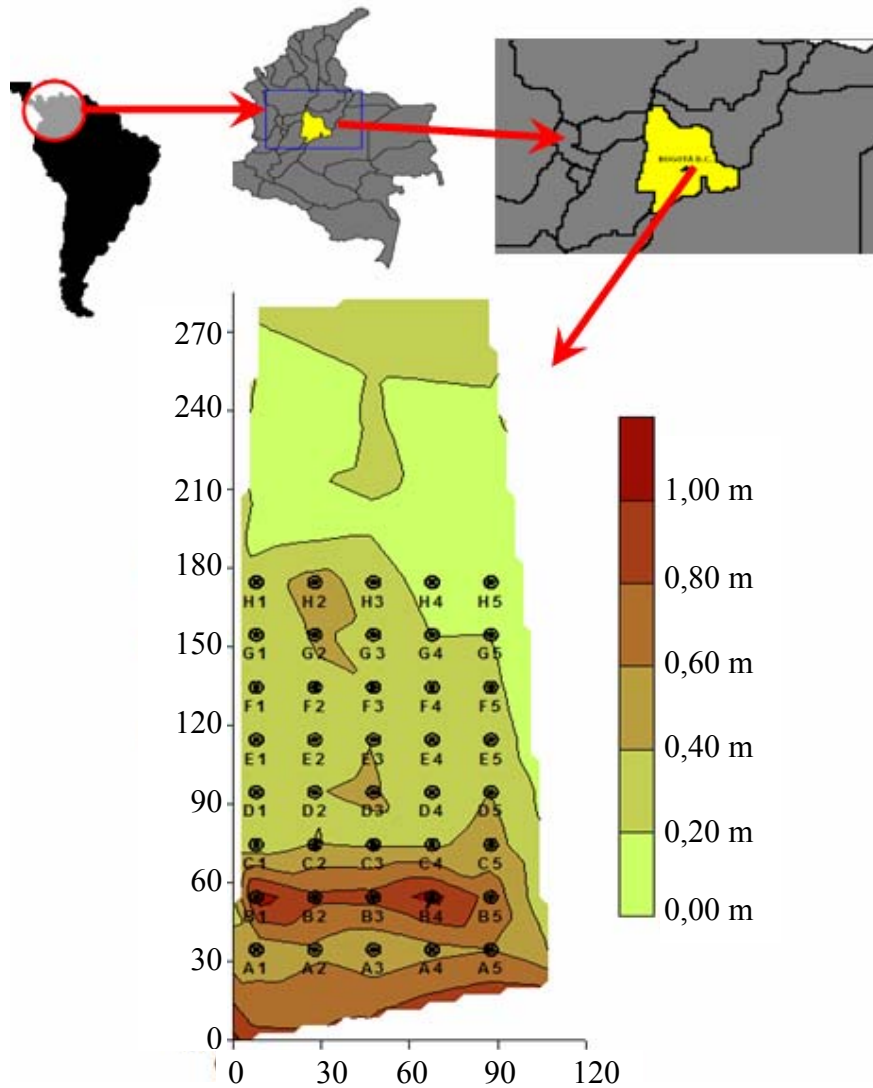


FIGURA 1. Modelo del área de estudio. **Layout of the study area.**

La ecuación que relaciona la infiltración acumulada en un tiempo transcurrido en el flujo vertical (modelo de Philip), toma la forma de (GIL, 2002):

$$I(t) = S_1 t^{1/2} + S_2 t + S_3 t^{3/2} + \dots + S_n t^{n/2} + K_0 t \quad (2)$$

Philip (1957b) demostró que una forma resumida de la Ecuación 2, con sólo dos parámetros de ajuste es suficiente para describir el comportamiento de la infiltración en relación con el tiempo:

$$I(t) = S_1 t^{1/2} + K_0 t \quad (3)$$

en que,

S_1 - la sortividad ($\text{cm h}^{-0.5}$) y describe la absorción de agua por el suelo como resultado del gradiente de potencial mátrico;

K_0 - la conductividad hidráulica saturada (cm h^{-1}), aunque diferentes autores solo la toman como parámetro de ajuste (LIMA & SILANS, 1999) o un factor (MACHIWAL et al., 2006), definiéndola como un factor de transitividad, que depende del contenido de agua inicial y del tipo de suelo.

Las Ecuaciones 2 y 3 indican que cuando el contenido de agua en el suelo tiende a cero, la tasa de infiltración inicial es alta debido a la sortividad, pero a medida que transcurre el tiempo la velocidad de infiltración alcanza un valor constante, a menudo llamada infiltración básica, similar a la conductividad hidráulica saturada (GIL, 2002).

Los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva para obtener la media, mediana, asimetría, curtosis, máximos y mínimos, así como el coeficiente de variación (CV), que es una medida indicadora de la magnitud de la variabilidad (ROQUE et al., 2005). También se realizó el análisis de correlación lineal de Pearson, con el fin de identificar la correlación entre los parámetros de los modelos de Philip y Kostiakov, con las propiedades del suelo. Para la estadística descriptiva se empleó el programa SPSS 12.0 (2003). Dado que las propiedades hidrofísicas del suelo no son distribuidas espacialmente de modo aleatorio y presentan una distribución estructural que la estadística clásica no puede definir, también se utilizó la Geoestadística para analizar y predecir los valores de las variables estudiadas y determinar su distribución espacial. Para determinar los grados de dependencia espacial se tuvo en cuenta la teoría de variables regionalizadas, la cual dispone de diferentes métodos de análisis de variación espacial, siendo uno de ellos el semivariograma (VIEIRA, 2000). Los semivariogramas de cada propiedad fueron obtenidos mediante el programa GS⁺ (ROBERTSON, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los valores encontrados para la media y la mediana son similares para cada una de las propiedades estudiadas, indicando distribuciones simétricas, lo cual se verifica por los valores de asimetría cercanos a cero, para todas las propiedades, mostrando un comportamiento cercano a la normalidad, como se confirma al observar el resultado de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, prueba que fue significativa para todas las propiedades. El comportamiento de normalidad de estas propiedades también es reportado por EGUCHI et al. (2002) y SOUZA et al. (2004). De acuerdo al criterio dado por WARRICK & NIELSEN (1980), que indican para las propiedades del suelo una variabilidad baja para CV menores a 12%, variabilidad media para CV entre 12 y 60% y variabilidad alta para CV mayores a 60%, se tiene que los contenidos de arena y de arcilla mostraron variabilidad media y las otras propiedades evaluadas mostraron baja variabilidad con CV inferiores al 10%. Resultados similares para el CV de Da fueron observados por SOUZA et al. (2004). Por otra parte, verificando los contenidos de partículas para suelos de diferentes texturas, se observa que la partícula que presenta un mayor contenido, presentan también una variabilidad baja, es decir un CV menor respecto a las otras partículas, como sucedió en el presente estudio para el limo (CV = 9,35%). Este comportamiento también se observa para diferentes tipos de suelos, en estudios realizados por SALDAÑA et al. (1998), SOUZA et al., (2004).

TABLA 1. Estadística descriptiva para las variables Da, Dp y contenidos de arena, limo y arcilla.
Descriptive statistics of soil properties Da, Dp and sand, silt and clay contents.

Parámetro	Propiedades Físicas del Suelo				
	Da (g cm ⁻³)	Dp (g cm ⁻³)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Media	1,24	2,55	23,69	64,62	11,69
Mediana	1,24	2,54	24,37	64,18	11,99
Asimetría	-0,13	0,61	-0,53	0,17	0,22
Curtosis	2,10	0,61	-0,36	-0,77	-0,31
Mínimo	0,86	2,39	13,08	54,57	2,50
Máximo	1,55	2,86	31,70	76,33	23,78
CV (%)	9,86	4,02	19,62	9,35	42,50
Z [*]	_s	_s	_s	_s	_s

* Estadística del test de Kolmogorov- Smirnov, _s- significativo al 5%.

Los resultados de los ajustes de los modelos de Philip y Kostiakov, mediante regresión lineal simple (RLS) y optimización de variables (OV) se encuentra en las Tabla 2 y 3 para el primer y segundo periodo respectivamente, seleccionados a partir del coeficiente de determinación (R²) y de la representatividad de los valores de infiltración encontrados en campo, al compararlos con los valores teóricos dados por lo modelos, predominando el ajuste de OV. Estos resultados muestran rangos amplios de los valores encontrados para los parámetros de Philip y Kostiakov, sugiriendo alta variabilidad de las propiedades hidráulicas del suelo en estudio (MACHIWAL et al., 2006).

No se presentó ajuste al modelo de Philip, en los puntos D1, D2, E1 y E3 en el primer periodo, donde el parámetro **b** del modelo de Kostiakov presentó valores inferiores de 0,1, indicando una baja tasa de infiltración. VARADHAN & WILLIAMS (1998) citan a Philip enunciando que este modelo no tiende a cero para tiempos infinitos a diferencia del modelo de Kostiakov, pero representa adecuadamente la disminución de la velocidad de infiltración. Para el segundo periodo, todos los puntos presentaron ajuste en los dos modelos (Tabla 3) y los parámetros obtenidos siempre fueron positivos, mostrando una influencia del contenido de agua.

TABLA 2. Valores de los parámetros de los modelos de infiltración (modelo de Philip (MP), modelo de Kostiakov (MK)) para cada punto de muestreo del primer periodo.
Parameter values of the infiltration models (Philip model (MP), Kostiakov model (MK)) for each sample point of first time.

Punto	Philip				Kostiakov				CA (%)
	S_1 , (cm h ^{-1/2})	K_0	R^2	MS*	a	b	R^2	MS*	
A1	11,02	6,26	0,999	OV	17,43	0,59	0,998	OV	41,6
A2	7,57	10,51	0,997	OV	18,38	0,80	0,997	OV	37,9
A3	2,25	1,99	0,993	OV	4,31	0,74	0,990	OV	31,1
A4	6,52	4,82	0,998	OV	11,56	0,72	0,995	OV	38,9
A5	19,93	9,56	0,994	OV	30,01	0,67	0,997	OV	34,4
B1	2,59	2,16	0,992	OV	4,83	0,73	0,988	OV	46,4
B2	8,26	9,98	0,999	OV	18,58	0,78	0,999	OV	38,0
B3	7,91	5,02	1,000	OV	13,19	0,70	0,999	OV	31,0
B4	51,30	0,04	0,955	RLS	54,12	0,47	0,990	OV	34,4
B5	3,39	0,96	0,961	RLS	4,43	0,44	0,987	OV	32,9
C1	1,18	-0,51	0,515	OV	0,57	0,13	0,870	OV	37,6
C2	2,27	2,51	0,996	OV	4,83	0,78	0,993	OV	33,8
C3	0,84	-0,25	0,925	OV	0,55	0,27	0,967	OV	36,6
C4	1,68	7,50	0,999	OV	9,24	0,92	0,998	OV	37,5
C5	6,78	5,51	0,999	OV	12,54	0,73	0,999	OV	30,5
D1	NA	NA	NA	NA	0,20	0,06	0,591	OV	36,3
D2	NA	NA	NA	NA	0,76	0,06	0,854	OV	35,2
D3	1,40	-0,21	0,973	OV	1,18	0,38	0,985	OV	34,5
D4	2,57	5,91	1,000	OV	8,58	0,86	1,000	OV	29,3
D5	8,74	0,01	0,998	OV	8,76	0,50	0,998	OV	40,1
E1	NA	NA	NA	NA	0,50	0,02	0,607	OV	34,2
E2	0,09	0,36	0,984	OV	0,46	0,90	0,984	OV	33,4
E3	NA	NA	NA	NA	0,49	0,09	0,783	OV	32,9
E4	0,65	0,26	0,995	OV	0,92	0,64	0,994	OV	35,1
E5	1,89	-0,80	0,234	OV	0,93	0,12	0,945	OV	33,9
F1	0,29	-0,10	0,767	OV	0,17	0,21	0,851	OV	35,6
F2	0,37	-0,11	0,190	OV	0,25	0,18	0,759	OV	30,4
F3	0,33	-0,02	0,838	OV	0,32	0,36	0,866	OV	36,1
F4	0,86	-0,30	0,970	OV	0,51	0,27	0,944	OV	32,0
F5	0,36	-0,06	0,948	OV	0,29	0,41	0,944	OV	28,8
G1	1,81	-0,35	0,994	OV	1,40	0,40	0,987	OV	52,4
G2	1,54	-0,48	0,972	OV	0,99	0,28	0,985	OV	30,4
G3	0,75	-0,27	0,976	OV	0,43	0,27	0,935	OV	32,6
G4	0,41	-0,06	0,959	OV	0,35	0,42	0,959	OV	37,1
G5	2,58	-0,71	0,991	OV	1,76	0,33	0,985	OV	36,5
H1	4,14	-0,21	0,990	OV	3,88	0,49	0,989	OV	22,7
H2	20,27	-0,39	0,987	OV	19,65	0,52	0,987	OV	33,6
H3	0,25	-0,04	0,941	OV	0,21	0,42	0,940	OV	33,1
H4	1,60	0,03	0,987	OV	1,62	0,53	0,987	OV	34,1
H5	1,06	-0,15	0,977	OV	0,88	0,46	0,971	OV	31,9

NA: No presentó ajuste; *MS: Método seleccionado; RLS: Modelo ajustado por regresión lineal simple; OV: Modelo ajustado por optimización de variables, a partir de CURVE EXPERT 1.3. CA: contenido de agua del suelo.

TABLA 3. Valores de los parámetros de los modelos de infiltración (modelo de Philip (MP), modelo de Kostiakov (MK)) para cada punto de muestreo del segundo periodo.
Parameter values of the infiltration models (Philip model (MP), Kostiakov model (MK)) for each sample point of second time.

Punto	Philip				Kostiakov				CA (%)
	S_1 , (cm h ^{-1/2})	K_0	R^2	MS*	a	b	R^2	MS*	
A1	1,86	6,50	0,999	OV	8,46	0,89	0,999	OV	28,6
A2	7,68	12,90	0,985	OV	21,01	0,82	0,987	OV	28,3
A3	0,54	0,31	0,971	OV	0,87	0,68	0,961	OV	27,0
A4	0,99	1,35	0,994	OV	2,39	0,79	0,995	OV	26,8
A5	21,40	9,28	0,995	OV	31,21	0,66	0,998	OV	30,9
B1	2,48	0,21	0,992	RLS	3,36	1,12	0,988	OV	31,5
B2	22,96	27,53	0,993	OV	51,27	0,75	0,996	OV	28,0
B3	39,75	25,81	0,976	OV	66,46	0,68	0,983	OV	25,4
B4	9,170	9,70	0,995	OV	19,28	0,76	0,998	OV	25,2
B5	5,53	1,05	0,983	OV	6,72	0,56	0,977	OV	24,3
C1	6,30	7,78	0,994	OV	14,38	0,78	0,996	OV	27,8
C2	7,65	3,70	0,999	OV	11,57	0,67	0,999	OV	25,5
C3	11,84	0,83	1,000	OV	11,84	0,83	1,000	OV	28,8
C4	32,34	0,06	0,992	OV	32,30	0,51	0,993	OV	26,6
C5	4,32	1,30	0,998	OV	5,72	0,61	0,995	OV	25,8
D1	1,04	1,168	0,989	OV	2,23	0,78	0,983	OV	27,5
D2	11,43	8,03	0,962	OV	19,86	0,71	0,970	OV	31,1
D3	2,31	3,99	0,999	OV	6,38	0,83	0,996	OV	25,7
D4	15,36	3,89	0,967	OV	19,42	0,62	0,974	OV	25,2
D5	5,65	1,25	0,992	OV	7,01	0,59	0,991	OV	31,0
E1	23,83	23,14	0,990	OV	48,00	0,75	0,994	OV	25,9
E2	0,75	0,19	0,985	OV	0,95	0,61	0,987	OV	24,7
E3	32,89	9,83	0,970	OV	43,21	0,63	0,976	OV	24,3
E4	1,01	1,13	0,985	OV	2,18	0,77	0,983	OV	24,4
E5	3,78	5,82	0,996	OV	9,75	0,81	0,995	OV	25,0
F1	5,69	1,14	0,974	RLS	4,84	0,45	0,976	OV	26,2
F2	0,77	50,79	0,992	OV	51,54	1,00	0,992	OV	26,0
F3	1,68	2,95	0,880	OV	4,75	0,81	0,886	OV	27,5
F4	3,43	3,44	0,987	OV	7,01	0,76	0,990	OV	24,7
F5	4,58	7,95	0,999	OV	12,76	0,82	0,999	OV	25,6
G1	8,58	7,91	0,991	OV	16,84	0,74	0,994	OV	26,4
G2	26,33	0,22	0,990	RLS	25,16	0,49	0,978	OV	26,9
G3	4,13	3,06	0,996	OV	7,33	0,72	0,998	OV	26,0
G4	23,51	4,65	0,992	OV	28,41	0,59	0,996	OV	25,6
G5	0,44	0,28	0,981	OV	0,74	0,69	0,972	OV	27,2
H1	4,73	1,35	0,962	RLS	3,86	0,50	0,979	OV	29,7
H2	21,22	0,17	0,961	RLS	19,95	0,51	0,974	OV	25,9
H3	2,91	3,75	0,952	RLS	1,86	0,33	0,982	OV	25,9
H4	1,90	0,25	0,979	RLS	2,63	0,96	0,924	OV	24,6
H5	6,82	3,89	0,995	OV	10,92	0,69	0,998	OV	28,5

*MS - método seleccionado; RLS - modelo ajustado por regresión lineal simple; OV - modelo ajustado por optimización de variables, a partir de CURVE EXPERT 1.3.; CA - contenido de agua del suelo.

Se observa también que los parámetros de S_1 y K_0 para el modelo de Philip, así como de a y b para el modelo de Kostiakov, tienden a disminuir cuando el suelo tuvo un contenido de agua mas alto, para la mayoría de los puntos, tendencia que también fue reportada por IROUMÉ & SCHÄFER (2000). Además, el parámetro b del modelo de Kostiakov, presenta un rango característico entre 0 y 1, a excepción del punto B1 para el segundo periodo, situación similar a la encontrada para algunas pruebas realizadas por GHOSH (1985) e IROUMÉ & SCHÄFER (2000).

El parámetro K_0 del modelo de Philip, presentó valores negativos en algunos puntos para el primer periodo. SERRALHEIRO (1995) también reporta este comportamiento e indica que estos valores no tienen ningún significado físico. Los puntos que presentaron este comportamiento se encontraban en la zona mas baja de la zona de estudio (Figura 1), verificándose que el nivel freático se encontraba cerca de la superficie del suelo o ligeramente por encima, causando una baja infiltración, situación que también es reportada por MACHIWAL et al. (2006), quienes afirman que tasas de infiltración menores de cero indican excesos de agua en el suelo.

Los parámetros del modelo de Philip, así como el parámetro a del modelo de Kostiakov no presentaron ajuste a una distribución normal, como se verifica al observar los valores encontrados de la media y la mediana, así como por los altos valores de asimetría (Tabla 4). Estos parámetros también presentaron alta variabilidad, con CV superiores al 100%, en los dos periodos. MACHIWAL et al. (2006) también reportó alta variabilidad para estos parámetros, pero con CV menores a los encontrados en este estudio. Por otra parte, LIMA & SILANS (1999) reportaron variabilidad media para los parámetros del modelo de Philip.

TABLA 4. Estadística descriptiva de los parámetros de los modelos de infiltración y del contenido de agua del suelo. **Descriptive statistics of infiltration models and soil water content.**

Parámetro	Philip		Kostiakov		CA (%)
	S_1 , (cm h ^{-1/2})	K_0	a	b	
Primer Periodo					
Media	5,15	1,90	6,50	0,47	34,9
Mediana	1,85	-0,003	1,29	0,45	34,3
Asimetría	3,87	1,43	2,86	0,02	1,15
Curtosis	17,61	0,80	10,27	-1,01	4,35
Mínimo	0,09	-0,80	0,17	0,02	22,66
Máximo	51,30	10,51	54,12	0,92	52,43
CV(%)	181,0	177,8	162,0	54,7 _s	13,9 _s
Z*					
Segundo Periodo					
Media	9,74	6,46	16,11	0,71	26,81
Mediana	5,59	3,57	10,33	0,72	26,11
Asimetría	1,36	2,98	1,47	0,12	0,95
Curtosis	0,88	10,46	1,59	0,77	0,17
Mínimo	0,44	0,06	0,74	0,33	24,27
Máximo	39,75	50,79	66,46	1,12	31,48
CV(%)	107,4	152,3	101,9	21,8 _s	7,4 _s
Z*					

* Estadística del test de Kolmogorov-Smirnov; _s - significativo al 5%; CA - contenido de agua del suelo.

El parámetro b del modelo de Kostiakov y el CA indican un comportamiento cercano a la normalidad, lo cual se verifica por los valores de asimetría cercanos a cero, así como por la similitud entre la media y la mediana para los dos periodos de muestro, como se confirma al observar el resultado de la prueba de Kolmogorov - Smirnov, mostrando también los menores valores de CV de los parámetros anteriormente descritos.

El análisis de correlación para los parámetros de los modelos de infiltración y de las propiedades del suelo estudiadas, se encuentran en la Tabla 5, para ambos periodos evaluados. Se observa que los parámetros S_1 y K_0 mostraron correlación significativa y directa con el parámetro a del modelo de Kostiakov, para los dos periodos, indicando una asociación entre estos parámetros.

TABLA 5. Correlación de los parámetros obtenidos para los modelos de Philip y Kostiakov, de las variables D_p , D_a y de los contenidos de arena, limo y arcilla, para los dos periodos de muestreo. **Correlation of the parameters obtained from Philip and Kostiakov models, soil properties D_p , D_a and sand, silt and clay contents, for the two sampling time.**

Parámetro	S_1	K_0	a	b	CA	D_a	D_p	Arena	Limo	Arcilla
Primer Periodo										
S_1	1									
K_0	0,192	1								
a	0,952**	0,481**	1							
b	0,137	0,703**	0,386 *	1						
CA	0,026	0,124	0,063	0,060	1					
D_a	0,039	-0,267	-0,07	-0,135	-0,307	1				
D_p	-0,235	-0,127	-0,270	0,006	-0,112	0,008	1			
Arena	-0,007	-0,032	-0,033	0,119	0,101	-0,082	0,165	1		
Limo	0,189	0,502**	0,349 *	0,279	0,011	-0,223	-0,357*	-0,595**	1	
Arcilla	-0,225	-0,586**	-0,394*	-0,451**	-0,108	0,349 *	0,280	-0,212	-0,659**	1
Segundo Periodo										
S_1	1									
K_0	0,262	1								
a	0,803 **	0,783 **	1							
b	-0,340 *	0,312 *	0,009	1						
CA	-0,063	-0,046	-0,066	0,159	1					
D_a	-0,036	-0,071	-0,083	-0,315*	-0,102	1				
D_p	0,010	-0,281	-0,167	0,013	0,122	0,008	1			
Arena	0,224	0,059	0,167	-0,091	0,030	-0,082	0,165	1		
Limo	0,038	0,220	0,177	0,185	0,016	-0,223	-0,357*	-0,595**	1	
Arcilla	-0,256	-0,323*	-0,371*	-0,14	-0,480	0,349*	0,280	-0,212	-0,659**	1

CA - contenido de agua del suelo; *Correlación significativa al nivel de 0,05; **Correlación significativa al nivel de 0,01.

De la misma forma, se observa que el contenido de arcilla mostró correlación inversa con los parámetros de los dos modelos estudiados, para ambos periodos, indicando que a mayor contenido de arcilla, se presenta menor infiltración, pero no mostró correlación significativa con el parámetro S_1 del modelo de Philip. Caso contrario sucedió con los contenidos de arena y limo, que presentaron correlaciones directas pero no significativas, exceptuándose el contenido del limo, con el parámetro K_0 , la cual si presentó correlación significativa. De igual manera se observa que a mayor contenido de limo y a menor densidad aparente, se presenta mayor infiltración.

Por otra parte, el CA, la D_p y el contenido de arena no presentaron correlaciones significativas con los parámetros de los modelos de Philip y Kostiakov, para los dos periodos analizados. MAHESHWARI (1997) también reportó baja correlación entre las propiedades del suelo y los parámetros del modelo de Kostiakov. También se observó que la D_p solo mostró correlación significativa e inversa con el contenido de limo.

No fue encontrado un único modelo teórico de semivariograma, presentándose modelos gaussianos, esféricos y exponenciales, observándose que el contenido de arena y algunos parámetros de los modelos de infiltración no presentaron dependencia espacial (Tablas 6 y 7). La D_a y los contenidos de limo y arcilla, mostraron un buen ajuste a modelos teóricos de semivariograma (Figura 2), con R^2 superiores a 0,80 y de acuerdo con la relación $C/(C_0+C)$, presentaron modelos con estructura espacial fuerte, similar a suelos con bajos contenidos de arcillas, reportados por KILIÇ et al. (2004), CARROLL & OLIVER (2005), quienes también encontraron que estas propiedades se ajustaron a modelos teóricos, pero con alcances menores a los encontrados en el presente estudio. La D_p se ajustó a un modelo exponencial, con una estructura espacial media y el menor R^2 de las propiedades del suelo analizadas.

También se observa que el rango obtenido para la D_a , D_p y el parámetro b del modelo de Kostiakov en el segundo periodo, son superiores a la máxima distancia de muestreo (161,3 m), debido posiblemente al ajuste buscado (mejor R^2) para los modelos teóricos de las variables que presentaron este comportamiento, indicando que estos parámetros muestran dependencia espacial a mayores distancias, siendo necesario la realización de muestreos en áreas mayores, con distancias que sean menores a la máxima distancia utilizada en el presente estudio, dada la condición de la teoría de variables regionalizadas (VIEIRA, 2000), cuyos resultados son solo válidos para puntos internos de la zonas donde se hace el muestreo.

No todos los parámetros del modelo de Philip y de Kostiakov se ajustaron a modelos teóricos (Tabla 7), evidenciado una distribución aleatoria en la mayoría de ellos, principalmente cuando el suelo presentó un menor contenido de agua. Es posible que la alta variabilidad de los parámetros de los modelos de infiltración, no hayan permitido encontrar un patrón definido de variabilidad espacial para todas los parámetros de los modelos, como es reportado por MACHIWAL et al. (2006). Para el primer periodo, los parámetros K_0 de Philip y a de Kostiakov, se ajustaron a modelos gaussiano y esférico respectivamente (Figura 3), con una fuerte dependencia espacial. Para el segundo periodo el parámetro b de Kostiakov fue el único que presentó dependencia espacial, ajustándose a un modelo gaussiano. La razón por la cual más parámetros de los modelos de infiltración del primer periodo presentaron ajuste a un modelo teórico de semivariograma, puede ser el mayor contenido de agua del suelo, lo cual disminuye los espacios vacíos presentes en este, forzando a un flujo unidimensional del agua en el suelo, reduciendo el movimiento del agua en el eje horizontal.

TABLA 6. Parámetros de ajuste de semivariograma teóricos a las propiedades físicas del suelo.
Fitted parameters of theoretical semivariograms of soil physical properties.

Propiedad	Modelo	C_0	$C_0 + C$	C/C_0+C	Alcance	R^2
D_a	Gaussiano	0,01	0,15	0,93	386,7	0,81
D_p	Exponencial	0,01	0,03	0,69	410,9	0,32
Arena	Pepita	21,07				
Limo	Gaussiano	18,00	130	0,86	329,09	0,86
Arcilla	Esférico	0,10	61,2	0,99	216,6	0,91

TABLA 7. Parámetros de ajuste de semivariograma teóricos a los parámetros de los modelos de Philip y Kostiakov, en los dos periodos estudiados. **Fitted parameters of theoretical semivariograms obtained from Philip and Kostiakov parameter models, for the two sampling time.**

Parámetro	Modelo	C_0	$C_0 + C$	C/C_0+C	Alcance	R^2
Primer Periodo						
S_1	Pepita	82,95				
K_0	Gaussiano	4,50	40,00	0,89	160,10	0,95
a	Esférico	33,4	158,6	0,79	139,50	0,53
b	Pepita	0,06				
CA	Esférico	11,30	53,6	0,79	329,10	0,87
Segundo Periodo						
S_1	Pepita	107,52				
K_0	Pepita	92,71				
a	Pepita	246,42				
b	Gaussiano	0,02	0,13	0,87	318,00	0,91
CA	Pepita	3,80				

CA - contenido de agua del suelo.

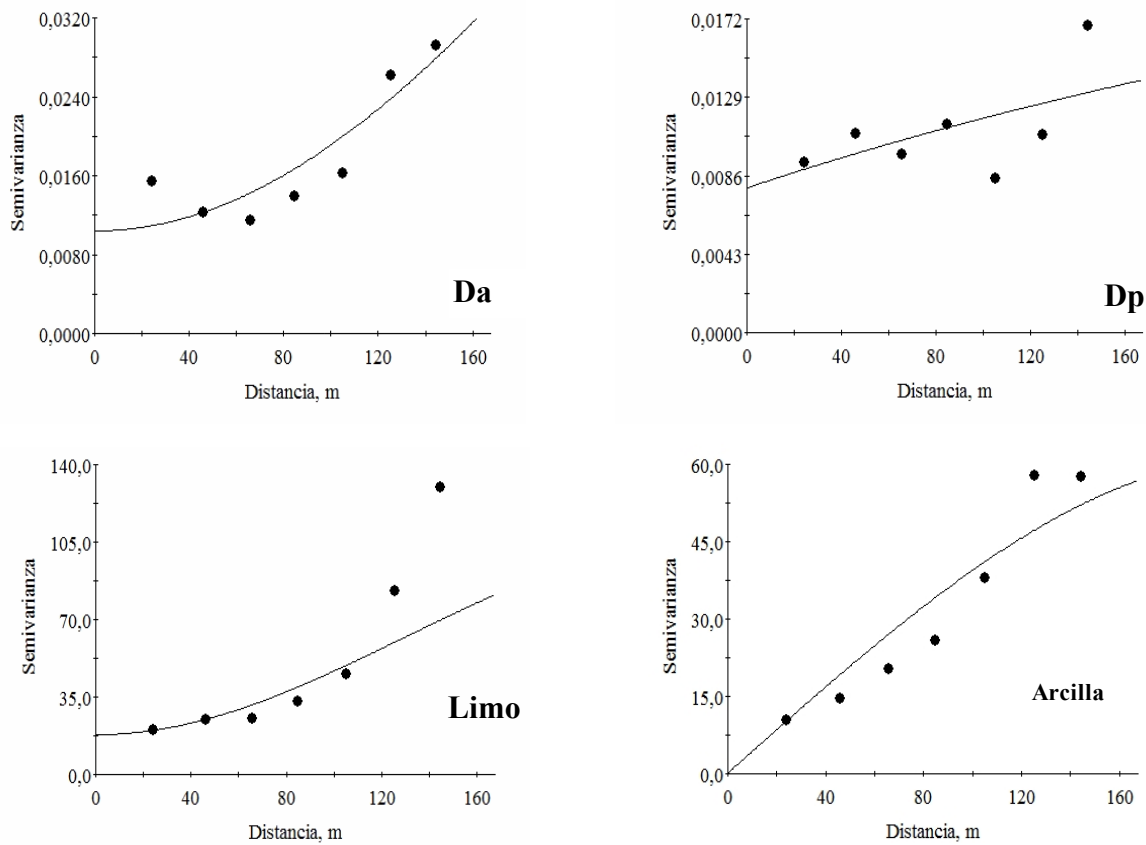


FIGURA 2. Semivariogramas de las variables densidad aparente (Da), densidad de partículas (Dp), limo y arcilla. Semivariograms for soil bulk density (Da), particle density, silt and clay.

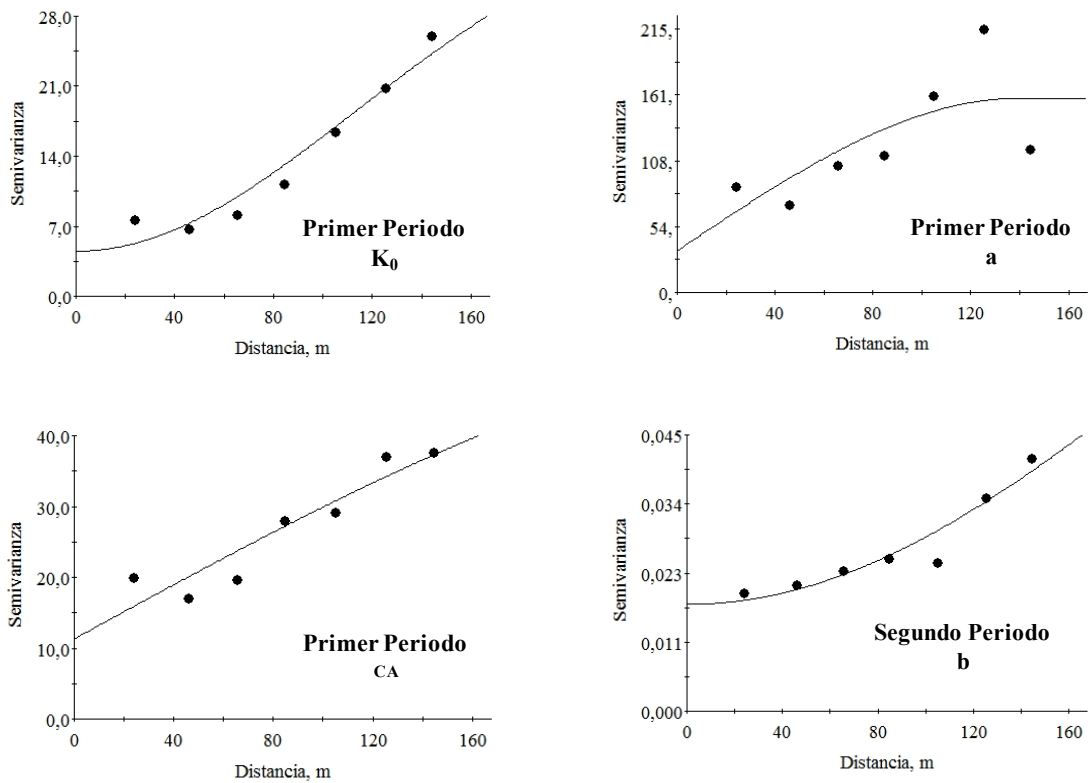


FIGURA 3. Semivariogramas de los parámetros de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov y del contenido de agua del suelo (CA). Semivariograms for parameters of Philip and Kostiakov models and the soil water content.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió determinar que la variabilidad del suelo y en especial los contenidos de arcillas, inciden en la variabilidad espacial de la infiltración, como se observó en los ajustes realizados al modelo de Philip y Kostiakov, cuyos parámetros variaron entre un punto y otro, pero sin mostrar una dependencia espacial para todos los casos, lo cual no permitió encontrar un patrón definido de variabilidad para estos parámetros.

El modelo que presentó ajustes para todos los puntos muestreados en los dos periodos de estudio, fue el de Kostiakov, mostrándose limitantes para el modelo de Philip, cuando el suelo presenta contenidos de agua altos, donde no permitió establecer los parámetros de este modelo de infiltración.

REFERÊNCIAS

- ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P.A.; PRUSKI, F.F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.2, p.337-44, 2002.
- CARROLL, Z.L.; OLIVER, M.A. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. *Geoderma*, Amsterdam, v.128, n.3-4, p.354-74, 2005.
- DUFFERA, M.; WHITE, J.G.; WEISZ, R. Spatial variability of southeastern U.S. Coastal Plain soil physical properties: implications for site-specific management. *Geoderma*, Amsterdam, v.137, n.3-4, p.327-39, 2007.
- EGUCHI, E.S.; SILVA, E.L. da; OLIVEIRA, M.S. de. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.2, p.242-6, 2002.
- GHOSH, R.K. A note on the Lewis-Kostiakov's infiltration equation. *Soil Science*, Baltimore, v.139, n.3, p.193-6, 1985.
- GIL, R.C. *El comportamiento físico-funcional de los suelos*. Buenos Aires: Instituto de Suelos. Inta Castelar, 2002. 19 p.
- GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, n.2, p.169-77, 2005.
- HYAMS, D.G. Curve Expert Version 1.37. *A comprehensive curve fitting package for Windows*. 2005.
- IROUMÉ, A.; SCHÄFER, M. Variabilidad espacial y temporal de la infiltración en una cuenca experimental en la cordillera de los Andes, IX Región, Chile. *Agro sur*, Valdivia, v.28, n.2, p.1-9, 2000.
- KILIÇ, K.; ÖZGÖZ, E.; AKBAŞ, F. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.76, n.1, p.1-11, 2004.
- LIMA, C.A.G.; SILANS, A.P. de. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, n.12, p.2311-20, 1999.
- MACHIWAL, D.; JHA, M.K.; MAL, B.C. Modelling Infiltration and quantifying spatial soil variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*, United Kingdom, v.95, n.4, p.569-82, 2006.
- MAHESHWARI, B.L. Interrelations among physical and hydraulic parameters of non-cracking soils. *Journal of Agricultural Engineering Research*, United Kingdom, v.68, n.4, p.297-309, 1997.

- MALAGÓN CASTRO, D. Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas*, Bogotá, v.27, n.104, p.319-341, 2003.
- 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*, Campina Grande, v.10, n.1, p.30-37, 2006.
- MONTENEGRO, G. H.; MALAGON, C. D. Propiedades físicas de los suelos. Bogotá: Instituto Colombiano "Agustín Codazzi", Subdirección Agrológica, 1990. 813 p.
- PHILIP, J.R. The theory of infiltration-3: moisture profiles and relation to experiment. *Soil Science*, Baltimore, v.84, p.163-78, 1957a.
- PHILIP, J.R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Science*, Baltimore, v.84, p.257-265, 1957b.
- PREVEDELLO, C.L. *Física do solo com problemas resolvidos*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1996. 446 p.
- ROBERTSON, G.P. *GS⁺: Geostatistics for the environmental sciences - GS⁺ user's guide*. Plainwell: Gamma Desing Software, 1998. 152 p.
- ROQUE, M.W.; SILVA, E.L.; MATSURA, E.E. Análisis comparativo de la dependencia espacial de propiedades físicas e hídricas en suelos de un transecto perpendicular a un canal de drenaje. En: SAMPER, J.; PAZ, A. *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo*. Coruña: Universidad de la Coruña, 2005. v.7, p.229-33.
- SALDANA, A.; STEIN, A.; ZINCK, J.A. Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares river (Spain). *Catena*, Amsterdam, v.33, n.3-4, p.139-53, 1998.
- SERRALHEIRO, R.P. Furrow irrigation advance and infiltration equations for a Mediterranean soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, United Kingdon, v.62, n.2, p.117-26, 1995.
- SOUZA, C.K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, G.T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, n.6, p.1067-74, 2003.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n.6, p.937-44, 2004.
- SPSS Inc. *SPSS statistical software*. Version 12.0. Illinois, 2003.
- VARADHAN, R.; WILLIAMS., J.R. *Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models: application of selected mathematical models*. Ada: National Risk Management Research Laboratory, U.S. EPA, 1998. v.1, 84 p. (EPA/600/R-97/128b)
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZ V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Spatial variability of field' measured infiltration rate. *Soil Science of Society American Journal*, Madison, v.45, n.6, p.1040-7, 1981
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. p.319-44.