

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA DEPENDENCIA ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS EN SUELOS A LO LARGO DE UN TRANSECTO PERPENDICULAR A UN DRENAJE NATURAL

M. W. Roque¹, E. L. Silva² y E. E. Matsura³

¹ Departamento de Agua e Solo, FEAGRI/UNICAMP, Campinas-SP; marcio.roque@agr.unicamp.br

² Departamento de Ingeniería Agrícola, UFLA, Lavras-MG; elemos@ufla.br

³ Departamento, de Agua e Solo, FEAGRI/UNICAMP, Campinas-SP; matsura@agr.unicamp.br

RESUMEN. Se utilizaron métodos de la estadística clásica y de la geoestadística para la identificación del tamaño y de la estructura de la variabilidad espacial de propiedades físico-hídricas del suelo a lo largo de un transecto de 196 m de largo, con 68 puntos muestrales. Las clases de suelos representadas comprendieron: Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Rojo-Amarillo (PVA), Gleissolo Háplico (GX) y Gleissolo Melánico (GM), según el Sistema Brasileño de Clasificación de Suelos. La magnitud de la variabilidad espacial se determinó mediante los coeficientes de variación, mientras que la estructura espacial se identificó por medio de semivariogramas, es decir a través de técnicas geoestadística. El suelo GX es el que presentó una mayor variabilidad espacial, mientras que al PVA le correspondió la menor. Al analizar la estructura de la variabilidad espacial con técnicas geoestadísticas, el PVA presentó mayor dependencia espacial, para la mayoría de las propiedades. La clase de suelos C presentó un menor grado de estructura de dependencia espacial, de modo que solo se pudieron ajustar semivariogramas a tres de las propiedades estudiadas, arcilla y limo y porosidad.

ABSTRACT. Classical statistical and geo-statistical methods were used to identify the size and structure of the spatial variability of physical-hydric attributes along a 196 meters transect with five different soil types, according to Brazilian Soil Classification System: Fluvic Neosol (RU), Cambisol (C), Yellow-Red Argisol (PVA), Haplic Gleysol (GX) and Melanic Gleysol (GM). The size of the spatial variability was assessed by the variation coefficients, while the structure was identified by semivariograms. Classical statistics showed the largest spatial variability for GX soil and the smallest one for the PVA soil. When analyzing the structure of the spatial variability by geo-statistic, the PVA soil exhibited highest spatial dependence, so that semivariograms were fitted for majority of the studied attributes. The C soil was the class of soil that presented the smallest structure of spatial dependence, where only three semi-variograms was adjusted for the attributes clay, silt and blocked pores.

1. Introducción

El estudio de la variabilidad espacial de las propiedades físico-hídricas del suelo es importante ya que, entre otros ejemplos de aplicación, dichas propiedades constituyen uno de los factores que posibilitan el manejo del suelo y del agua en una agricultura irrigada.

Debido a la diversidad de los constituyentes, en cuanto a granulometría, composición mineralógica y contenido en materia orgánica, los suelos hodromorfos ("solos de várzea") presentan normalmente gran variabilidad, así como diferentes limitaciones y aptitudes de uso. Este hecho, unido a la falta de informaciones sobre sus propiedades y características, ha limitado el éxito de la incorporación de estas áreas a la producción de alimentos (Machado, 1994).

La planificación, la elección y el manejo eficiente de un sistema de irrigación dependen, en gran parte, del conocimiento, de los antecedentes de las características y de las propiedades físico-hídricas del suelo, de tal forma que el estudio de estos atributos debe de ser hecho "in situ", con un muestreo realmente representativo y con el error mínimo posible. Al ser el suelo un sistema extremadamente heterogéneo, el conocimiento de su variabilidad espacial es imprescindible, lo que debe de ser tomado en consideración ya en el momento del muestreo. La variabilidad espacial del suelo, cuando no se analiza adecuadamente, puede comprometer la planificación de su uso y manejo, la eficiencia de proyectos de irrigación y drenaje y la conservación del suelo.

Webster y Olivier (1990) afirman que las propiedades del suelo varían continuamente en el espacio y, generalmente, los valores en lugares más próximos entre sí tienden a ser más similares o presentar valores más próximos que aquellos tomados a mayor distancia. Las herramientas estadísticas que consideran la posición de cada valor en el espacio tienen como base los trabajos desarrollados por Krige (1966) en minería, seguidos por los trabajos de Matheron (1971), autores que formalizaron la teoría de las variables regionalizadas, fundamento de la geoestadística. Según Warrick et al. (1986), la geoestadística proporciona herramientas que permiten cuantificar la correlación espacial.

La geoestadística o teoría de la variable regionalizada, a pesar de su sólida implantación, hace relativamente poco tiempo que viene despertando el interés de los investigadores en ciencias del suelo. Su interés como herramienta estadística para la evaluación de la variabilidad espacial del suelo es obvio, dado que posibilita la identificación de la estructura de la varianza, o sea, permite conocer no sólo la magnitud de variación de una propiedad, sino también como esta variación está ocurriendo espacialmente en el campo.

El estudio geoestadístico presenta un valor económico, pues con el conocimiento de la estructura de la dependencia de los datos es posible planificar de manera más eficaz la implantación de redes de muestreo. Así, con el conocimiento de las posiciones relativas de los muestreos o las medidas hechas en el campo, la variabilidad espacial pasa a utilizarse como un factor positivo identificando interacciones importantes.

Con objeto de obtener información básica sobre el tamaño y la estructura de la variabilidad espacial de las propiedades físico-hídricas en suelos hidromorfos, se llevó a cabo un estudio a lo largo de un transecto perpendicular a un curso de agua, en el que estaban representadas cinco clases de suelos: Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Rojo-Amarillo (PVA), Gleissolo Háptico (GX) y el Gleissolo Melánico (GM) (Embrapa, 1999). Se utilizó la estadística clásica con el fin de verificar el tamaño de la variabilidad espacial de las propiedades físico-hídricas, mediante los coeficientes de variación, mientras que la estructura de la dependencia espacial fue analizada mediante técnicas geoestadísticas, es decir, a través de los semivariogramas.

2. Material y Métodos

El experimento se realizó en la localidad de Santa Cruz, localizado en la margen derecha del riachuelo Santa Cruz en el municipio de Lavras, al Sur del Estado de Minas Gerais, a 21°15' de latitud sur y a 45° de longitud oeste. El área de muestreo se dedicaba a pastizal.

Tras la clasificación de los suelos del área experimental, se trazó un transecto de 196 m perpendicular al curso del riachuelo Santa Cruz. Las clases de suelos se presentan en la Tabla 1, con sus respectivas longitudes. La Fig. 1 ilustra el perfil topográfico del transecto estudiado mostrando la longitud y la localización de cada clase de suelo en el mismo.

Tabla 1. Extensión de las clases de suelos estudiadas dentro del transecto

Distancia Horizontal (m)	Clasificación Embrapa (1999)
0 – 92	Neossolo Flúvico (RU)
92 – 98	Cambissolo (C)
98 – 160	Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)
160 – 172	Gleissolo Háptico (GX)
172 – 196	Gleissolo Melánico (GM)

La toma de muestras se realizó de forma sistemática, con espaciados regulares, variando de 0,25 m a 16,00 m, obteniéndose un total de 68 puntos de muestreo (Fig. 2).

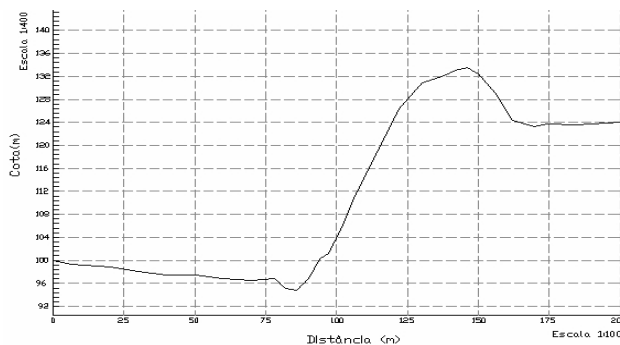


Fig. 1. Perfil topográfico del transecto estudiado.

En cada punto experimental, representado en la Fig. 2, se realizaron medidas con permeámetro de Guelph modelo 2800 de la marca Soil Moisture, de acuerdo con los procedimientos descritos en su manual de utilización, para la obtención de los valores de permeabilidad intrínseca (K'). Se recogieron muestras de suelos tanto deformadas como indeformadas en la capa de 0 – 15 cm, para la determinación de las propiedades físico-hídricas: densidad real (Dp), densidad aparente (Ds), textura (arena, limo y arcilla), porosidad total, tanto calculada indirectamente como determinada experimentalmente (VTPc y VTPd), microporosidad (Micro) y macroporosidad (Macro).

Los procedimientos para la toma de muestras y los análisis de laboratorio se realizaron de acuerdo con las recomendaciones de Lemos y Santos (1982) y Embrapa (1997).

Los análisis de los datos experimentales se realizaron utilizando dos metodologías: la estadística clásica y la geoestadística.

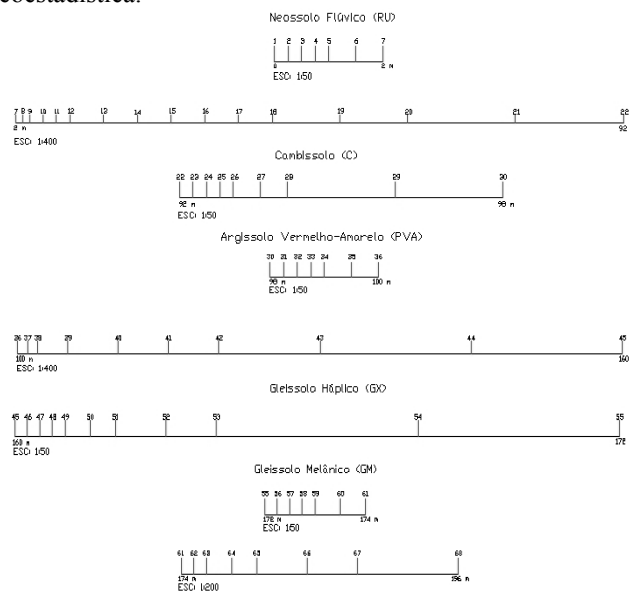


Fig. 2. Esquema de muestreo de diferentes clases de suelos en el transecto.

Todos los datos de las variables estudiadas, con su respectiva posición geográfica, longitud y latitud, se almacenaron en plantillas electrónicas. Estos datos se

procesaron utilizando el software Sisvar (Ferreira, 2000) para el análisis de la estadística clásica, y del software Variowin (Pantier, 1996) para el análisis de la geoestadística.

Para cada propiedad estudiada se efectuó un análisis estadístico, intentando verificar la variabilidad de los datos.

Se utilizó el análisis descriptivo para medidas de posición de la media, la mediana y la moda. En el análisis descriptivo para medidas de dispersión se utilizó la amplitud total, la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Las normalidades de las variables se verificaron mediante la prueba de Shapiro y Wilk (1965), juntamente con los análisis de los coeficientes de asimetría y curtosis. Se consideraron normales las variables que presentaron valores de probabilidad de Shapiro-Wilk mayores que un 5%.

A partir de la hipótesis de que cada conjunto de valores medidos de una propiedad constituye la realización de un proceso estocástico, como mínimo intrínsecamente estacionario, se utilizó la geoestadística con el objetivo de definir la estructura de la variabilidad espacial.

Se realizaron los cálculos de semivarianzas y se construyeron los semivariogramas experimentales, representando los gráficos de semivarianza $\gamma(h)$ como función de la distancia (h). El estimador del semivariograma utilizado fue el clásico o el del método de los momentos, presentado por la Ec. 1:

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

en donde,

γ^* - es la semivarianza experimental, obtenida por los valores muestreados $[Z(x_i), Z(x_i+h)]$;

h - es la distancia entre puntos de muestreo, y

N(h) - es el número de pares de puntos posibles distanciados por el vector h (Vieira, 2000).

3. Resultados y Discusión

La variabilidad espacial de las cinco clases de suelos estudiados pudo compararse atendiendo tanto a su magnitud como a su estructura.

Analizando la magnitud de la variabilidad mediante los coeficientes de variación (Tabla 2), se observa que la permeabilidad intrínseca es la propiedad más variable para todos los suelos estudiados.

Atendiendo a los límites del coeficiente de variación propuesto por Warrick y Nielsen (1980) para la clasificación de variables del suelo ($CV < 12\%$, $12\% < CV < 60\%$ y $CV > 60\%$ para clases de variabilidad baja, media y alta variabilidad respectivamente), el Gleissolo Háplico, en general, presentó mayor grado de variabilidad estadística.

Tabla 2. Coeficientes de variación en %, de las propiedades de los suelos estudiados. Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Gleissolo Háplico (GX) e Gleissolo Melánico (GM).

Propiedades	Clase de Suelos				
	RU	C	PVA	GX	GM
Ds (g/cm ³)	7,79	5,13	3,78	7,50	5,47
Dp (g/cm ³)	3,95	2,09	1,53	1,89	4,03
Argila (%)	5,80	3,23	9,01	4,42	14,61
Areia (%)	27,02	4,01	3,68	15,53	6,80
Silte (%)	5,18	7,89	8,72	8,73	6,04
VTPc (%)	5,47	6,11	4,71	6,36	2,34
VTPd (%)	6,23	5,03	4,31	6,97	2,34
Macro (%)	48,31	64,32	41,59	22,04	20,43
Micro (%)	7,11	7,05	7,29	13,06	4,71
K' (cm ²)	93,82	175,56	68,07	92,87	54,37

En las Tablas 3 y 4 se presentan los tipos modelos ajustados a los semivariogramas experimentales y el alcance obtenido para las distintas propiedades estudiadas, respectivamente. Se aprecia otro aspecto de la variabilidad espacial, en concreto la estructura de la variación, es decir, el comportamiento de la variabilidad en el espacio. También en este aspecto, la permeabilidad intrínseca es la propiedad que presentó una mayor desorganización en cuanto a la variabilidad espacial. Además, es notorio que existe un patrón en la estructura de variabilidad, siendo el suelo PVA, el mejor estructurado, con un comportamiento bien definido en cuanto a la variabilidad espacial, de acuerdo con los semivariogramas. A pesar de que para este suelo no se obtuvo ningún ajuste a los modelos teóricos para la permeabilidad intrínseca, el resto de las propiedades estudiadas presentaron dependencia espacial, de modo que este suelo, junto con el suelo de clase GM, presentó el mayor número de semivariogramas que se pudieron ajustar a los clásicos modelos esférico, exponencial y gaussiano.

El Cambissolo (C) fue la clase de suelos que presentó una mayor falta de organización en lo referente a la estructura de la variabilidad espacial, observándose que siete de los diez semivariogramas estudiados no presentaron ajuste a un modelo teórico, sino que su estructura estaba caracterizada por un efecto pepita puro.

Tabla 3. Modelos ajustados a los semivariogramas teóricos para las propiedades estudiadas de los siguientes suelos: Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Gleissolo Háplico (GX) y Gleissolo Melánico (GM).

Propiedades	Clase de Suelos				
	RU	C	PVA	GX	GM
Ds (g/cm ³)	Esférico	E. Pepita	Gaussiano	Esférico	Esférico
Dp (g/cm ³)	E. Pepita	E. Pepita	Esférico	Gaussiano	Gaussiano
Argila (%)	Gaussiano	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
Areia (%)	E. Pepita	Potencial	Esférico	Esférico	Esférico
Silte (%)	E. Pepita	Esférico	Esférico	Esférico	Gaussiano
VTPc (%)	Esférico	E. Pepita	Exponencial	Potencial	Potencial
VTPd (%)	Esférico	E. Pepita	Esférico	Potencial	Potencial
Macro (%)	Esférico	E. Pepita	Gaussiano	Gaussiano	Esférico
Micro (%)	Esférico	E. Pepita	Gaussiano	Potencial	Esférico
K' (cm ²)	E. Pepita	E. Pepita	E. Pepita	Esférico	Esférico

En los casos en que se puso en evidencia la presencia de una estructura espacial, el dominio de cada muestra, dado por el alcance del semivariograma es un parámetro importante a tener en cuenta en futuros muestreos y para la planificación del uso del suelo. Este parámetro, el alcance,

proporciona indicios acerca del número de muestreos que hay que realizar para llegar a conclusiones precisas en futuros manejos y proyectos de irrigación y drenaje en estos suelos.

Tabla 4. Alcance (en metros), de los modelos de semivariogramas ajustados para diferentes propiedades de los suelos estudiados: Neossolo Flúvico (RU), Cambissolo (C), Argissolo Vermelo-Amarelo (PVA), Gleissolo Háptico (GX) y Gleissolo Melânico (GM).

Propiedades	Clase de Suelos				
	RU	C	PVA	GX	GM
Ds (g/cm ³)	1,65	-	0,88	1,92	3,46
Dp (g/cm ³)	-	-	2,38	4,71	1,72
Argila (%)	6,51	0,87	1,25	1,28	1,29
Areia (%)	-	-	0,94	1,08	0,69
Silte (%)	-	1,51	1,68	0,56	1,03
VTPc (%)	2,30	-	3,00	-	-
VTPd (%)	2,16	-	0,76	-	-
Macro (%)	4,60	-	7,04	0,84	0,33
Micro (%)	-	-	8,52	-	1,36
K' (cm ²)	-	-	-	1,06	1,33

Se observa que tanto el patrón de tamaño como la estructura de la variabilidad espacial, no es el mismo en estos suelos (Tabla 5). Por otro lado, los dos enfoques empleados para el estudio de la variabilidad son complementarios y cada uno de ellos es idóneo para mostrar aspectos diferentes de la variabilidad del suelo. De este modo, se puede comprobar también en la Tabla 5, como variación no significa más desorganización espacial.

Tabla 5. Magnitud y estructura de la variabilidad espacial de los cinco suelos estudiados en el transecto.

Variabilidad Espacial	
Magnitud	Estructura
GX	PVA
RU	GM
GM	GX
C	RU
PVA	C

Las anteriores descripciones y cuantificaciones de la variabilidad espacial son no sólo interesantes, sino también informativas, pues permiten inferir o confirmar la manera en que los procesos de formación de estos suelos definen sus estructuras de dependencia espacial. Por ejemplo, se observa que el PVA presenta mayor organización de la variabilidad espacial, cuando se compara con el Cambissolo, pudiendo estar relacionado este resultado con el hecho de que este suelo es más joven que los restantes suelos estudiados, por lo que se caracteriza por la presencia de muchos mineral primario, todavía no meteorizados, de modo que la estructura de la variabilidad espacial de este suelo todavía no sería estable. Otro hecho a destacar puede ser la localización de estos suelos en el perfil del transecto y la extensión con que cada clase de suelo contribuyó al transecto total.

4. Conclusiones

La propiedad permeabilidad intrínseca es la más variable a lo largo del transecto estudiado en todas las clases de suelos, de acuerdo con la magnitud del coeficiente de variación. Esta propiedad también presentó la mayor desorganización estructural, si se toma como criterio la dependencia espacial descrita mediante semivariogramas.

El Gleissolo Háptico presentó la mayor variabilidad espacial, mientras que al Argissolo Vermelo-Amarelo le corresponde la menor.

El Argissolo Vermelo-Amarelo es la clase de suelo que mostró una mayor organización, es decir, en este suelo se obtuvo una mayor dependencia espacial para la mayor parte de las propiedades estudiadas. El mayor valor del parámetro alcance se obtuvo para la microporosidad, con de 8,52 m.

La clase de suelo que presentó la menor estructura en cuanto a la variabilidad espacial fue el Cambissolo, en el cual, no obstante, se pudo determinar la dependencia espacial para dos propiedades importantes como son arcilla y limo.

La estadística clásica y la geoestadística, son herramientas complementarias debido a que con la primera se obtiene la magnitud de la variación y con la segunda, la estructura de la variabilidad espacial.

Con la utilización de estas dos herramientas se desarrolla la Edafometría, disciplina que auxilia a la Edafología en la identificación de los límites entre clases de suelos diferentes.

Agradecimientos. A la Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) y a la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referencias

Embrapa. 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 212 pp.

Embrapa. 1999. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 412 pp.

Ferreira, D.F. 2000. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: *45ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria*. UFSCar, São Carlos, SP, 255-258 pp.

Lemos, R.C. de Santos, R. D. 1982. dos. *Manual de descrição e coleta de solos no campo*. 2ed. Campinas: SBCS; SNLCS, 45 pp

Krige, D.G. 1966. Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore evaluation. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, v .66, .13-38 pp.

Machado, R.V. 1994. *Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos em uma hidrosequência de solos bem à muito mal drenados*. 88 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

Matheron, G. 1991. The theory of regionalized variables and its applications. *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fointanebleau*. n.5.

Panatier, Y. 1996. Variowin: software for spatial data analysis in 2d. New York: Springer-Verlag, 93 pp.

Shapiro, S.S. y Wilk, M.B. 1965. An analysis of variance test for normality (complete sample). *Biometrika*, London, v.52, n.3/4, 591-611 pp.

Vieira, S.R. 2000. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. *Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo. vol 1, 1-55 pp.

Warrick, A. W. y Nielsen, D.R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D.(ed). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press.

Warrick, A. W., Myers, D. E. y Nielsen, D. R. 1986. Geoestatistical methods applied to soil science. In: *Methods of soil analysis*. Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy – Soil Science Society of America, 53-82 pp.

Webster, R y Olivier, M. A. 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford: Oxford University Press, 316 pp.