

## VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO: BASES PARA SU ESTUDIO

### SOIL SPATIAL VARIABILITY: BASES FOR STUDY

*DANIEL F. JARAMILLO J.*

Recibido 14-06-2012, aceptado 20-07-2012, versión final 30-07-2012

**RESUMEN:** La variabilidad de las propiedades del suelo es principalmente espacial y debe conocerse para hacer un buen uso de este recurso. En este trabajo se exponen los métodos que se utilizan para estudiar dicha variabilidad, haciendo énfasis en los supuestos estadísticos que se deben cumplir y en la manera de lograrlos. Se ilustran los procedimientos con resultados obtenidos en varios trabajos realizados en Colombia.

Los métodos más utilizados para estudiar la variabilidad espacial en el suelo son: diseños anidados, análisis de regresión y análisis de semivarianza, siendo este último el más completo y el que mayor cantidad de aplicaciones tiene. Calculando la semivarianza entre muestras separadas a diferentes distancias se puede modelizar la dependencia espacial de las propiedades del suelo y con el modelo establecido se pueden elaborar mapas de la distribución espacial de los valores de dichas propiedades, mediante interpolación no sesgada con técnicas de kriging, que permiten hacer un uso más racional del recurso suelo.

**PALABRAS CLAVE:** Geoestadística, Kriging, Semivarianza, Suelo.

**ABSTRACT:** The variability of soil properties is primarily spatial and it should be known to make appropriate use of this resource. In this paper we describe the methods that are used to study this variability, making emphasis on the statistical assumptions that must be met and how to achieve them. Procedures are illustrated with results of several studies conducted in Colombia.

The methods used to study the spatial variability in soil are: a nested design, regression analysis and analysis of semivariance, the latter being the most complete and the more applications you have. By calculating the semivariance between separate samples at different distances can model the spatial dependence of soil properties and with the established model can map the spatial distribution of the values of these properties by interpolation unbiased kriging techniques, which to allow a more rational use of soil resources.

**KEYWORDS:** Geostatistics, Kriging, Semivariance, Soil.

---

Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.  
*djaramal@unal.edu.co*

# 1 INTRODUCCIÓN

El suelo forma un “continuum” en la superficie de la corteza terrestre cuyas propiedades varían de forma continua dentro de un determinado rango de valores. Debido a la interacción de los cinco factores de formación del suelo con varias decenas de procesos pedogenéticos, existe una amplia variedad de suelos y una variabilidad todavía mayor de sus propiedades químicas, físicas, biológicas, mineralógicas, etc. (Jaramillo, 2011). Se ha considerado que la variabilidad espacial es el principal tipo de variabilidad que afecta a los suelos, por lo que en los últimos tiempos se ha trabajado intensamente en la adopción y adaptación de metodologías para estudiar dicha variabilidad, de modo que se pueda mejorar el manejo de este recurso para tener una mayor eficiencia y rentabilidad en la producción agropecuaria, así como unas prácticas más amigables con el medio ambiente.

El objetivo fundamental de este trabajo es exponer la metodología que más intensivamente se está utilizando hoy en el mundo para estudiar la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos, de modo que su conocimiento estimule su utilización y mejore el conocimiento de este recurso para que se haga un mejor uso de él.

## 2 LA VARIABILIDAD EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO

La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo, debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes que, a su vez, están controlados por los factores de formación (clima, material parental, organismos, relieve y tiempo). Estas interacciones pueden ser muy variadas dando como consecuencia una alta cantidad de suelos posibles (Jaramillo, 2011).

La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando es sometido a uso agropecuario, y aquellas propiedades que más se pueden ver afectadas por el manejo del suelo son las que presentan la mayor variabilidad (Ovalles, 1992; Paz-González *et al.*, 2000; Obando *et al.*; Jaramillo *et al.*, 2012).

El uso histórico del suelo tiene grandes efectos sobre la variabilidad de sus propiedades. Diferencias en el manejo del agua, de los fertilizantes y de los abonos orgánicos, tanto en el tipo como en la forma de aplicarlos, generan diferencias en la variabilidad de los contenidos de nutrientes en el suelo. Los cambios en el laboreo también producen efectos similares (Cambardella *et al.*, 1994; Cambardella y Karlen, 1999; Amador *et al.*, 2000; Castrignanò *et al.*, 2000; Paz-González *et al.*, 2000; Mallarino *et al.*, 2001; Jaramillo, 2008a; Jaramillo *et al.*, 2008).

Upchurch y Edmonds (1992) sostienen que la variabilidad presenta dos componentes fundamentales: uno Aleatorio y otro Sistemático, teniendo en cuenta la fuente de error que produce la variación. La variabilidad sistemática es aquella que puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles, mientras que la variabilidad aleatoria, o debida al azar, es la que no puede relacionarse con causas conocidas.

Samra *et al.* (1990) fraccionan la variabilidad sistemática en dos componentes: uno de tendencia relacionado con la localización de las unidades experimentales y que puede llamarse tendencia espacial (T) y otro de dependencia espacial (DE). Con los conceptos anteriores la variabilidad total puede expresarse así:

$$\text{Variación total} = T + DE + \text{azar.} \quad (1)$$

No debe confundirse tendencia espacial con dependencia espacial. Hay tendencia cuando se presenta un patrón determinado en la distribución en el espacio de los valores que adquiere una variable. En la Figura 1 se observa que los mayores contenidos de materia orgánica en este lote se concentran en la parte inferior del mismo, en tanto que los menores están en el lado opuesto, mostrando un patrón extrañamente regular.

La dependencia espacial, en cambio, establece que el valor que toma una variable en un determinado punto del terreno, depende del valor que toma la misma variable en los puntos vecinos a ella, ubicados dentro de un rango de distancia y sobre una dirección dados, y no hay, necesariamente, un patrón de distribución especial del conjunto de los valores que toma la variable en el terreno. Las propiedades que presentan dependencia espacial adquieren valores más diferentes mientras más alejadas estén las muestras que se toman para caracterizarlas y, por el contrario, mientras más cercanas se tomen las muestras, más parecidos son los valores que toma la variable. Se ampliará este concepto más adelante.

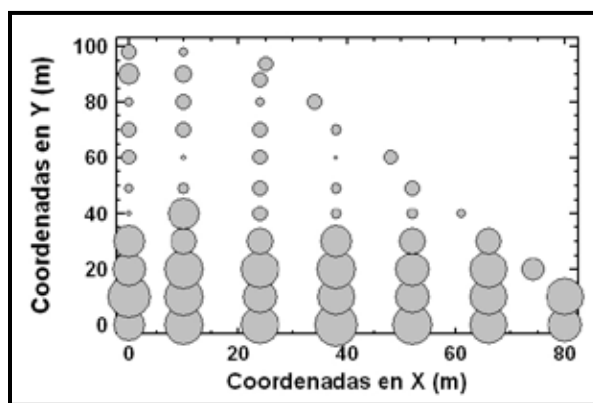


Figura 1: Distribución del contenido de materia orgánica en el horizonte A de un suelo de origen aluvial, muestreado en una malla de 10 x 14 m (Tomado de Jaramillo *et al.*, 2008). En la gráfica, el tamaño del círculo es proporcional al contenido de materia orgánica en el suelo.

La variabilidad de una propiedad depende de una gran cantidad de factores. Por ello, su interpretación debe estar basada en un amplio conocimiento tanto de la propiedad de interés como de los factores que la controlan. En la Tabla 1 se presentan los coeficientes de variación de algunas propiedades comunes del suelo, evaluadas con muestras tomadas bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo, pero con los mismos métodos de laboratorio. Obsérvese la gran cantidad de valores diferentes que puede tomar dicho coeficiente en la misma propiedad, dependiendo de las condiciones que represente el suelo e independientemente del número de muestras que se analicen. Los resultados expuestos sugieren que la variabilidad es una característica intrínseca de cada propiedad y que su comportamiento es específico para cada condición ambiental, de suelo, de uso y de manejo.

Tabla 1: Coeficiente de variación (CV %) para algunas propiedades comunes del suelo, en el horizonte A, evaluadas con muestras tomadas bajo diferentes condiciones ambientales y de uso, en el departamento de Antioquia, calculados con base en datos de IGAC (2007a, b, c).

Propiedad	Región		
	Urabá	Magdalena Medio	Bajo Cauca
Carbono orgánico	50.56 (280)*	122.64 (33)	37.2 (18)
Densidad aparente	14.89 (272)	15.29 (29)	11.12 (18)
CIC	31.74 (280)	62.86 (34)	52.25 (18)
Bases totales	42.76 (280)	57.72 (33)	98.67 (18)
pH	13.01 (280)	17.61 (34)	19.88 (18)
Agua aprovechable	34.97 (264)	70.16 (29)	44.31 (18)
Arcilla	37.72 (280)	59.44 (33)	34.9 (18)

\* Entre paréntesis, cantidad de muestras utilizadas para el análisis.

Con respecto a los valores que puede tomar el coeficiente de variación en algunas propiedades físicas del suelo, Jury et al. (1991) presentan rangos que van desde menores a 50 % para la porosidad, la densidad aparente, el porcentaje de arena y de arcilla, y para los contenidos de agua a 0.1 y 15 bares, hasta del 100 % para la velocidad de infiltración del agua y de 320 % para la conductividad hidráulica saturada. Cabe aclarar que en todos los coeficientes de variación que se han presentado puede haber un componente de variabilidad sistemática que no es posible detectar en ellos.

Cuando se presenta la variabilidad sistemática, ésta se reconoce porque los valores de las propiedades que la tienen cambian de acuerdo con un patrón regular que coincide con la distribución del factor que la está controlando. Lo más frecuente es que la variabilidad se manifieste de acuerdo a la ubicación que presentan las muestras analizadas, bien sea en el espacio (variabilidad espacial) o en el tiempo (variabilidad temporal). El principal tipo de variabilidad sistemática en los suelos lo constituye la variabilidad espacial.

### 3 LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO

Con el desarrollo de la teoría de las variables regionalizadas, y su incorporación a los estudios de suelos, se han adquirido herramientas estadísticas que ayudan a evaluar buena parte de la variabilidad espacial de sus propiedades.

Cuando el valor que toma una propiedad en un sitio depende de la distancia y/o de la dirección en la cual se ubica con respecto a otro sitio vecino, se tiene una variable con dependencia espacial. Journel y Huijbregts (1978) llaman a estas propiedades que tienen dependencia espacial “variables regionalizadas”. Estas variables regionalizadas son una función que describe un fenómeno natural geográficamente distribuido y tienen, según Webster y Oliver (2007), algún grado de autocorrelación. Para el estudio de este tipo de variables se tiene un grupo de herramientas estadísticas conocido con el nombre genérico de “Geoestadística” o “Estadística Espacial”.

Las técnicas más utilizadas para llevar a cabo el estudio de la variabilidad espacial del suelo son el diseño anidado, la regresión y el análisis de semivarianza. A continuación se detallan las principales características y aplicaciones de las dos primeras técnicas, así como las metodologías empleadas para realizarlas, y en otro apartado, por ser el más importante, se describirá el análisis de semivarianza.

El modelo de variación **anidado** se basa en que una población puede ser dividida en dos o más niveles categóricos dentro de una jerarquía, de modo que pueda ser muestreada en forma anidada para estimar la contribución de cada nivel a la variabilidad mediante un análisis de varianza anidado. Cuando se tiene un atributo distribuido en el espacio, los niveles pueden ser representados por diferentes distancias entre muestras. Este método permite tener una primera aproximación a la descripción de la variabilidad en una región poco conocida y tiene el mérito de que se puede estudiar un amplio rango de escalas espaciales con un solo análisis simple (Webster y Oliver, 2007).

En la Tabla 2 y la Figura 2 se presentan los resultados de un análisis de varianza anidado realizado en un cultivo de flores del oriente antioqueño, tomando como variables la temperatura superficial del suelo, el peso y la altura de la planta al momento de cosecharla, y el diámetro de la flor. Los niveles de anidamiento fueron distancias de muestreo a 30 m, 10 m, 5 m y 0.80 m. Para establecer el error se tomaron muestras separadas 0.20 m en cada sitio.

Tabla 2: Porcentaje de la varianza que le corresponde a cada una de las distancias de muestreo utilizadas en un diseño anidado para estudiar algunas características de calidad de las flores de crisantemo en invernadero. (Tomados de Jaramillo, 2010b).

Fuente de variación	Temperatura	Peso planta	Altura planta	Diámetro flor
	Porcentaje			
Distancia 30 m	20,96	21,56	20,20	35,44
Distancia 10 m	28,99	5,52	18,88	0,00
Distancia 5 m	1,14	0,00	0,00	0,00
Distancia 0,80 m	18,54	23,76	34,53	28,79
Error	30,37	49,15	26,39	35,77

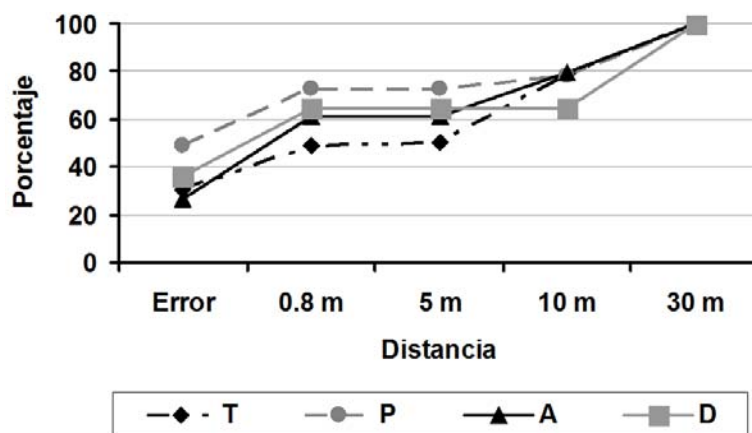


Figura 2: Variogramas acumulativos de las variables de la Tabla 2 (T: Temperatura del suelo; P: Peso de la planta; A: Altura del tallo; D: Diámetro de la flor). (Tomada de Jaramillo, 2010b).

Los resultados de la Tabla 2 muestran que el error aporta la mayor cantidad de variabilidad en casi todas las variables, excepto en la altura de la planta. Teniendo en cuenta la magnitud de la varianza que aporta el error, que las replicaciones utilizadas para establecer éste se hicieron con muestras separadas por distancias de alrededor de 0,20 m, y que como se observa en la Figura 2, ninguna de las variables alcanza el 100 % de su variabilidad antes de los 30 m, puede pensarse que la variabilidad de las propiedades estudiadas tiene un alto componente aleatorio y que, si existe alguna variabilidad espacial en ellas, o ésta es de rango muy corto, estaría en distancias menores a 0,80 m, o será de rango largo y estará actuando a distancias de más de 30 m.

Para el caso del estudio de la variabilidad espacial en suelos, la **regresión** establece si hay alguna tendencia espacial en la distribución de los valores de la variable que se estudia. Esta tendencia puede estudiarse mediante análisis de regresión simple o múltiple (Schabenberger y Pierce, 2002; Krasilnikov, 2008; Webster y Oliver, 2007; Webster, 2008), y Diggle y Ribeiro (2007) recomiendan que el modelo que se utilice no sea más complicado que uno de segundo grado.

Para definir la tendencia espacial, en el modelo de regresión las variables dependientes son las propiedades edáficas y las independientes son las coordenadas de los puntos de muestreo que se hayan tenido. El modelo de regresión más complejo que se recomienda para estos estudios, como se indicó con anterioridad, es del tipo:

$$V = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2y + \beta_3xy + \beta_4x^2 + \beta_5y^2, \tag{2}$$

donde  $V$ , es la variable o propiedad que se estudia;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ , son los coeficientes;  $x, y$ , son las coordenadas de los puntos de muestreo.

Obsérvese que para poder implementar este análisis, las muestras que se tomen deben georreferenciarse, es decir, se deben posicionar geográficamente mediante un sistema de coordenadas. Al aplicar esta metodología a los valores de contenido de materia orgánica expuestos en la Figura 1, se encontró una tendencia espacial en ellos que se describió con el siguiente modelo de regresión, significativo al 99.99 %:

$$MO = 10.6461 - 0.184572 y + 0.00119349 y^2; \quad R^2 = 79.8 \% . \quad (3)$$

Efectivamente, si se mira la distribución de los valores de MO en la Figura 1 se observa que hay una superficie de tendencia inversa en la cual disminuye el valor del contenido de materia orgánica al aumentar el valor de las coordenadas en  $y$ , tal como lo indica el modelo de regresión. Obsérvese que el modelo tiene una capacidad explicativa alta, con un coeficiente de determinación  $R^2$ , de 79.8 %, que lo hace bastante significativo.

## 4 EL ANÁLISIS DE SEMIVARIANZA

La dependencia espacial en las propiedades del suelo se estudia mediante técnicas de la geoestadística, cuya herramienta básica es el análisis de semivarianza y el producto fundamental de este análisis es el semivariograma.

### 4.1 La semivarianza

La semivarianza es una medida de la similitud que existe entre observaciones situadas a una determinada distancia. Se estima mediante la siguiente relación:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad (4)$$

donde  $\gamma(h)$  es la semivarianza,  $N(h)$  es el número de pares de observaciones comparadas en cada distancia (debe ser  $> 50$ ),  $Z(x_i)$  es el valor de la variable en el sitio  $x$ , y  $Z(x_i + h)$  es el valor de la variable en un sitio ubicado a una distancia  $h$  del sitio  $x$ .

Para el análisis de semivarianza, el grupo de datos debe tener una distribución normal y estacionaridad de segundo orden (Trangmar *et al.*, 1985) o, por lo menos, presentar simetría en la distribución y cumplir con la hipótesis intrínseca que sólo es violada cuando hay una tendencia obvia en la variable regionalizada (Upchurch y Edmonds, 1992; Webster, 2008). Lo anterior implica que los datos deben ser al menos simétricos, si no se distribuyen normalmente, y que deben tener varianzas y medias homogéneas en todos los grupos de distancias definidos.

Sin embargo, algunos autores, como Yost *et al.* (1982 a, b) y Burrough (1993), han encontrado que la falta de estacionaridad en los datos no afecta apreciablemente el análisis de semivarianza y Webster y Oliver (2007) han reconocido que la semivarianza es más sensible a las distribuciones asimétricas de los datos y a la presencia de valores anómalos y/o extremos en ellos.

El procedimiento básico para llevar a cabo el análisis de semivarianza es el siguiente:

- Se definen las distancias de muestreo.
- Se ubican los puntos de muestreo en el campo y se georreferencian mediante coordenadas en dos dimensiones (x, y) o en tres (x, y, z), verdaderas o artificiales.
- Se hace el muestreo cuidadosamente para no confundir muestras.
- Se debe tener sumo cuidado en la elaboración de la base de datos con los resultados de la evaluación de las variables que se estudian.
- Cuando ya se tiene la base de datos completa se debe hacer un análisis exploratorio de los mismos con el fin de:
  - Comprobar que la distribución es normal o, por lo menos, que no hay asimetría.
  - Detectar valores anómalos o extremos.
  - Comprobar que no hay tendencia espacial.
- Se obtiene el semivariograma y se analizan sus características.
- Se hacen los análisis complementarios, según las aplicaciones que se hayan definido para el estudio.

La distancia de muestreo más adecuada para este análisis se puede establecer mediante un diseño anidado en una parte del área experimental, cubriendo posteriormente con otro muestreo el resto del área que no fue incluida en el anidado. Como en los análisis anteriores, se requiere un muestreo hecho a distancias controladas para establecer la variabilidad espacial de las propiedades del suelo.

En el análisis exploratorio de datos se deben corregir las anomalías que se encuentren antes de obtener el semivariograma. Si hay valores extremos o anómalos, hay que analizarlos y los erróneos deben ser eliminados. De todas maneras, si hay pocos valores extraños, y ellos se distribuyen de forma aleatoria, pueden ser eliminados para mejorar el comportamiento del semivariograma y del kriging (Webster y Oliver, 2007). Si los datos no se distribuyen en forma normal o presentan asimetría se pueden hacer transformaciones sencillas como la logarítmica, raíz cuadrada o inversa, con el fin de, por lo menos, hacer más simétrica su distribución (Gallardo y Maestre, 2008). Webster y Oliver (2007) sostienen que el tamaño de la muestra puede afectar la distribución de los datos y recomiendan que para un análisis de semivarianza no se utilicen menos de 100 muestras, cuando la variación es isotrópica.

La confirmación de la estacionaridad puede hacerse con un análisis de tendencia, que puede ser espacial, es decir, debida a la ubicación de las muestras, utilizando las coordenadas de los puntos de muestreo con la ecuación (2), o puede tener componentes de otras propiedades que la están afectando (covariables). En cualesquiera de los casos, si hay tendencia, hay que eliminarla. Hamlett *et al.*, (1986), Utset *et al.* (1989), Rey (1994), Jaramillo (2005, 2006, 2008a, 2008b, 2009, 2010a), Webster y Oliver (2007), Diggle y Ribeiro (2007) y Jaramillo *et al.* (2008) describen como hacer el análisis exploratorio de los datos y la forma de llevar a cabo las correcciones necesarias.

Si al hacer el análisis de tendencia mediante una regresión múltiple, con o sin covariables, se encuentra un modelo significativo, se deben tomar los residuos de este análisis para hacer el análisis de semivarianza. Nótese que para desarrollar el análisis de semivarianza es posible tener tres tipos de datos: los valores originales de la variable, los valores transformados de los valores originales de la variable o los residuos de la regresión de los valores originales de la variable, y en todo caso hay que hacer todos los análisis exploratorios para los datos que finalmente se vayan a utilizar.

Una vez confirmados los supuestos estadísticos pertinentes, se procede a realizar el semivariograma con el conjunto de datos que los hayan cumplido, utilizando programas de computación diseñados para el efecto: GS+, GeoEAS, Geostat, Variowin, Vesper, etc., o módulos dentro de paquetes estadísticos como SAS, SPSS o R, o de otro tipo como Grass, Spring, Surfer o ArcGIS.

## 4.2 El semivariograma

El semivariograma (o simplemente variograma) es una gráfica que relaciona los valores promedios de la semivarianza con el espaciamiento presente entre las muestras que se toman para hacer el estudio. Cuando una propiedad tiene dependencia espacial, la semivarianza aumenta, a medida que aumenta la distancia entre muestras y la semivarianza puede llegar a estabilizarse a una determinada distancia, situación en la que se tiene un semivariograma **limitado**. Cuando la semivarianza aumenta monótonamente con la distancia y no se estabiliza dentro del rango de distancias utilizadas para el muestreo, se tiene un semivariograma **no transicional** (Webster y Oliver, 2007).

Cuando se representan los valores de la semivarianza que le corresponden a cada intervalo de distancia (**lag** en inglés) considerado, aplicando la expresión (4), se obtiene un gráfico de puntos que se conoce como semivariograma **experimental**. A este semivariograma se le ajusta un modelo matemático denominado semivariograma **teórico** (Figura 3).

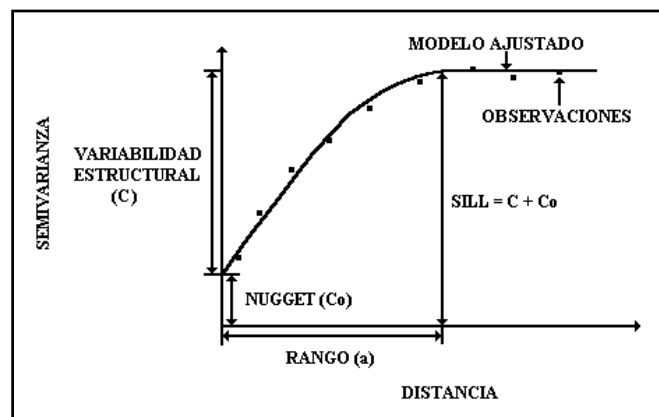


Figura 3: El semivariograma y sus componentes (tomado de Jaramillo, 2003).

El semivariograma se extiende hasta la mitad de la máxima distancia de separación de las muestras tomadas, ya que en adelante la semivarianza se torna inestable, aparte de que, según Webster y Oliver (2007), el semivariograma se estima mejor para distancias reducidas, y en ellas es donde debe ser modelizado para que los algoritmos de estimación geoestadísticos den soluciones precisas. En los semivariogramas limitados (Figura 3) se definen algunos parámetros que caracterizan la dependencia espacial de la variable que se estudia:

- **Nugget, efecto pepita o variabilidad aleatoria ( $C_0$ ):** Es la semivarianza que es independiente de la distancia de muestreo. Cuando es muy alto, la propiedad evaluada tiene efectos dominantes de procesos de corto rango. Es posible encontrar variables cuya variabilidad es completamente aleatoria (nugget o pepita puro); en estos casos el modelo que se ajusta es una línea recta horizontal y el sill es igual al nugget para todas las distancias (Figura 4: log  $C_a$ ).



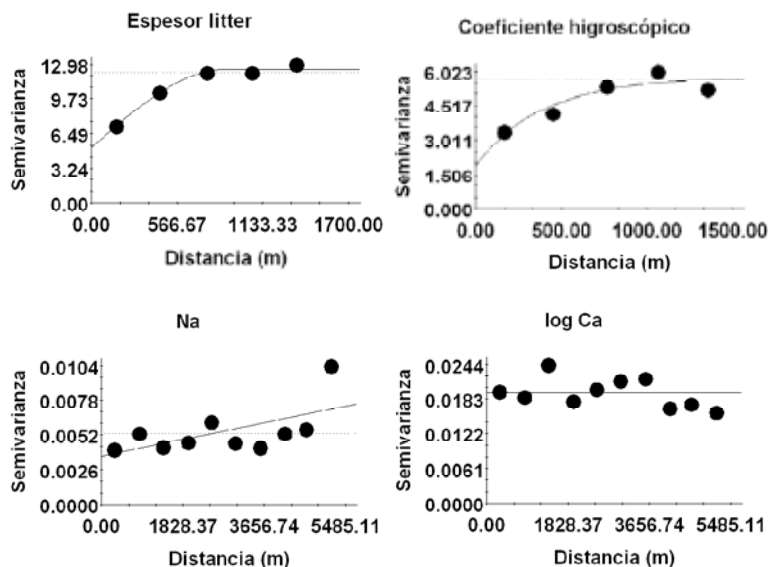


Figura 4: Modelos de semivariogramas de algunas propiedades del horizonte superficial de Andisoles repelentes al agua de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. (Esférico: Espesor litter. Exponencial: Coeficiente higroscópico. Lineal: Na. Nugget puro: log Ca. Tomados de Jaramillo, 2008b).

- **Variabilidad estructural (C):** Es la variabilidad espacial de la variable. Es la diferencia entre el sill y el nugget.
- **Sill, umbral o meseta (Co+C):** Es el valor máximo que toma la semivarianza y es igual a la suma del nugget más la variabilidad estructural. Cuando el supuesto de estacionaridad se cumple, el sill es muy similar a la varianza de los datos experimentales. El sill es el valor de la semivarianza que se torna constante a partir de una determinada distancia, a partir de la cual hay independencia espacial. Cuando el sill no se estabiliza, es decir, no se vuelve constante a ninguna distancia de las utilizadas en el muestreo, se dice que no se pudo resolver el problema de la variabilidad espacial de la propiedad en la zona de muestreo y el modelo más simple que se ajusta a los datos es lineal (Figura 4: Na).
- **Rango o alcance (a):** Es la distancia a la cual se estabiliza la semivarianza, es decir, se obtiene el sill. Este parámetro define la distancia hasta la cual hay dependencia espacial entre las muestras, es decir, aquellas tomadas a una distancia menor al rango, están relacionadas espacialmente y las que se tomen a una distancia mayor al rango son espacialmente independientes.

A los semivariogramas experimentales se les pueden ajustar varios modelos teóricos (Figura 4). Webster y Oliver (2007) y Gallardo y Maestre (2008) describen una buena cantidad de ellos: lineal, circular, esférico, pentaesférico, exponencial, gaussiano, etc. Los que se ajustan con mayor frecuencia a las propiedades del suelo que presentan dependencia espacial son el esférico y el exponencial, y según recomendación de Webster y Oliver (2007), deben preferirse sobre los demás.

En la Figura 4 se presentan algunos ejemplos de semivariogramas obtenidos para algunas propiedades químicas del horizonte superficial de Andisoles repelentes al agua del Oriente Antioqueño, tomados de Jaramillo (2008b). En la Tabla 3 se exponen los parámetros que caracterizan los modelos de los semivariogramas presentados en la Figura 4.

Tabla 3: Parámetros de los modelos de los semivariogramas de algunas propiedades del horizonte superficial de Andisoles repelentes al agua de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. (Tomados de Jaramillo, 2008b).

Variable*	Modelo	Nugget	Sill	Rango (m)	C/Sill (%)
EL	Esférico	5.21	12.53	900	58.4
CH	Exponencial	1.89	5.75	1191	67.2
Na	Lineal	0.004	-	-	-
log Ca	Nugget	0.021	0.021	-	0

\*: EL: Espesor capa de litter. CH: Coeficiente higroscópico. log: Logaritmo decimal.

La dependencia espacial puede presentarse de igual forma en todas las direcciones de muestreo, es decir, depender sólo del espaciamiento entre las muestras y, en este caso, se habla de propiedades con variabilidad **isotrópica**. Hay otras propiedades cuya variabilidad es diferente en distintas direcciones, es decir, que ella depende tanto de la distancia como de la dirección del muestreo, presentándose una variabilidad **anisotrópica**.

El grado de dependencia espacial de las propiedades del suelo también es muy variable. Si se establece el porcentaje que le corresponde a la variabilidad aleatoria (nugget) de una propiedad dentro de la variabilidad total (sill), puede estimarse el grado de dependencia espacial que tiene. Cambardella et al. (1994) establecieron 3 categorías para agrupar la importancia de la variabilidad espacial de las variables; de acuerdo con dichos porcentajes se tiene:

- Fuerte dependencia espacial: nugget < 25 % del sill.
- Moderada dependencia espacial: nugget entre 25 y 75 % del sill.
- Débil dependencia espacial: nugget > 75 % del sill.

## 5 APLICACIONES DEL ESTUDIO DE LA DEPENDENCIA ESPACIAL DEL SUELO

El conocimiento de la dependencia espacial del suelo, aparte de mejorar el conocimiento que se adquiere sobre él, tiene varias aplicaciones prácticas como:

- Elaborar mapas de propiedades del suelo por procesos de interpolación.
- Hacer control de calidad de mapas de suelos.
- Definir el tamaño y la ubicación de unidades experimentales en ensayos de campo.
- Mejorar los sistemas de muestreo de suelos.
- Mejorar la interpretación de resultados de investigación.
- Ayudar en el manejo intensivo de los suelos.

De las aplicaciones anteriores, la más utilizada es la de elaborar mapas de isóneas que muestren la distribución espacial de alguna variable, mediante la técnica del **kriging**, la cual es una técnica que permite hacer interpolaciones óptimas y no sesgadas de variables regionalizadas en sitios no muestreados, utilizando las propiedades estructurales de un semivariograma y un conjunto de datos iniciales. Este método tiene la ventaja, sobre otros métodos de interpolación, de que a cada valor interpolado se le calcula el error con que ha sido estimado, lo que da una medida de la precisión con que se hace la interpolación. Este error también se puede cartografiar, pudiéndose establecer en qué lugares son más y en cuales menos fiables las

estimaciones hechas (Webster y Oliver, 2007). Se han diseñado varios métodos para hacer el kriging cuya aplicación depende del tipo de datos de que se disponga (Goovaerts, 1998, 1999; Webster y Oliver, 2007; Hengl, 2009).

Según Trangmar et al. (1985), cuando los datos cumplen los supuestos de estacionaridad y de distribución normal, las formas más simples de kriging pueden estimar valores en puntos: **kriging puntual**, o en áreas: **kriging en bloques**. El kriging en bloques produce mapas un poco más suavizados que el kriging puntual, efecto deseable cuando los patrones regionales de variación son más interesantes que los patrones locales. Un ejemplo de un mapa de isolíneas producido por Kriging puede apreciarse en la Figura 5.

Díaz (2002), agrupa los diferentes tipos de kriging así:

- Con estimadores lineales: Simple, ordinario, universal, residual.
- Con estimadores no lineales: Indicador, disjunto, probabilístico.
- Paramétricos: Logarítmico, disjunto, multigaussiano.
- No paramétricos: Simple, ordinario, universal, residual, indicador, probabilístico.
- Sin estacionaridad: Universal, indicador, disjunto, probabilístico, multigaussiano.

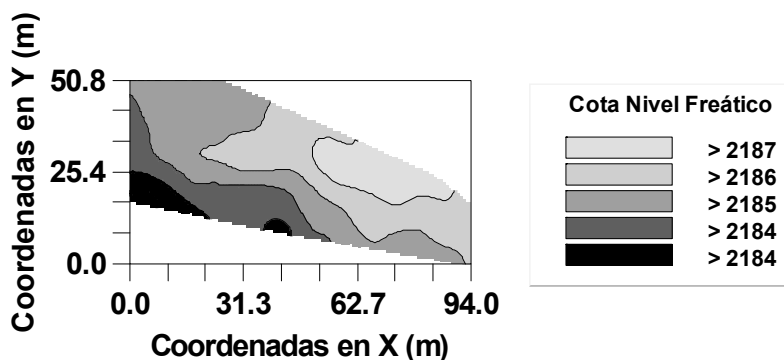


Figura 5: Mapa de la profundidad del nivel freático en un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, elaborado mediante interpolación con kriging puntual.

De los anteriores tipos de kriging, los más utilizados con las propiedades del suelo son el ordinario, el logarítmico, el universal y el indicador. El kriging ordinario es el más robusto y el más utilizado para variables simples estacionarias. El logarítmico se utiliza para datos fuertemente sesgados positivamente. El Universal es el indicado para trabajar con datos que no presentan estacionaridad en la media, es decir, que tienen tendencia o deriva. El indicador transforma variables continuas en binarias, unos y ceros, dependiendo de que las variables indicadoras estén por debajo o por encima, respectivamente, de un valor de corte previamente establecido (Díaz, 2002; Webster y Oliver, 2007).

## 6 CONCLUSIONES

Se presentaron algunos métodos simples para estudiar la dependencia espacial de las propiedades del suelo, destacando los supuestos estadísticos que se deben cumplir para que el análisis de semivarianza tenga validez, así como la manera de probarlos y de hacer las correcciones necesarias para alcanzarlos, en caso de que no se cumplan en los datos originales. También se mencionan algunas técnicas de kriging para mapear propiedades del suelo.

Para establecer semivariogramas válidos se debe trabajar con datos que presenten una distribución normal, o por lo menos simétrica, y que sean homogéneos en media y varianza en toda el área de estudio, es decir, que tengan estacionaridad. La estacionaridad se pierde cuando la distribución de los datos en el terreno tiene alguna tendencia, siendo la más crítica la espacial. Cuando se presenta tendencia, ésta debe eliminarse y el análisis de semivarianza se hace con los residuos que quedan. Si se tienen distribuciones sesgadas o no normales en los datos, esto puede corregirse con transformaciones sencillas como logaritmo, raíz cuadrada o inverso, o eliminando valores anómalos.

## Referencias

- Amador, J. A.; Y. Wang; M. C. Savin and J. H. Görres. (2000), Fine-scale spatial variability of physical and biological soil properties in Kingston, Rode Island. *Geoderma*, **98**: 83-94.
- Burrough, P. A. (1993), Soil variability: a late 20th century view. *Soils and Fertilizers*, **56** (5): 529-562.
- Cambardella, C. A. and D. Karlen. (1999), Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture*, **1**: 5-14.
- Cambardella, C. A.; T. B. Moorman; T. B. Parking and D. L. Karlen. (1994), Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, **58**: 1501-1511.
- Castrignanò, A.; L. Giugliarini; L. Risaliti and N. Martinelli. (2000), Study of spatial relationships among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics. *Geoderma*, **97**: 39-60.
- Díaz, M. A. 2002, Geoestadística aplicada. UNAM-CITMA. México. 131 p.
- Diggle, P. J. and P. J. Ribeiro. (2007), Model-based geostatistics. New York: Springer Science. 228 p.
- Gallardo, A. y F. T. Maestre. (2008), Métodos geoestadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos. **En**: Maestre, F. T.; A. Escudero y A. Bonet (Ed.). Introducción al análisis especial de datos en ecología y ciencias ambientales: Métodos y aplicaciones. Universidad Rey Juan Carlos. Editorial Dykinson S.L. Madrid. p. 215-272.
- Goovaerts, P. (1999), Geostatistics in soil science: state-of - the- art and perspectives. *Geoderma*, **89** (1-2): 1-45.
- Goovaerts, P. (1998), Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of the microbiological and physic-chemical soil properties. *Biology and Fertility of the Soils*, **27**(4): 315-334.
- Hamlett, J. M.; R. Horton and N. A. C. Cressie. (1986), Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **50**: 868-875.
- Hengl, T. (2009), A Practical Guide to Geostatistical Mapping. 2nd. Ed. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 271 p.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2007a), Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas. Bajo Cauca. Departamento de Antioquia. Memorias y Anexos. 2 tomos. IGAC. Bogotá. 454 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2007b), Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas. Magdalena Medio. Departamento de Antioquia. Memorias. IGAC. Bogotá. 328 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2007c), Estudio semidetallado de suelos de las áreas potencialmente agrícolas. Urabá. Departamento de Antioquia. Memorias y Anexos. 2 tomos. IGAC. Bogotá. 1241 p.
- Jaramillo, D. F. (2011), El suelo: Origen, Propiedades, Espacialidad. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 553 p.
- Jaramillo, D. F. (2010a), Dependencia espacial de algunas propiedades químicas superficiales del suelo y de algunas variables de producción en cultivos de crisantemo bajo invernadero. *Revista Científica UDO Agrícola*, **10** (1): 60-67.
- Jaramillo, D. F. (2010b), Variabilidad espacial de la temperatura superficial del suelo y de algunas variables de producción en cultivos de crisantemo bajo invernadero. *Revista Científica UDO Agrícola*, **10** (1): 68-75.
- Jaramillo, D. F. (2009), Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, **62**(1): 4907-4921.
- Jaramillo, D. F. (2008a), Variabilidad espacial de las propiedades químicas del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, **61**(2): 4588-4599.
- Jaramillo, D. F. (2008b), Variabilidad espacial de rango largo de algunas propiedades químicas de Andisoles repelentes al agua de Antioquia. *Suelos Ecuatoriales*, **38**(1): 60-74.
- Jaramillo, D. F. (2006), Efecto de la variabilidad sistemática de la producción de fríjol en experimentos de fertilización. Segunda siembra. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. **59**(1): 3147-3165.
- Jaramillo, D. F. (2005), Efecto de la variabilidad sistemática en experimentos de fertilización con fríjol: Primera siembra. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. **58**(1): 2717-2732.
- Jaramillo, D. F. (2003), La variabilidad de las propiedades del suelo y su efecto sobre el manejo de la fertilidad. Curso teórico-práctico sobre interpretación de análisis de suelos. Centro de Extensión y Oficina del Egresado de la Facultad de Ciencias Agropecuarias. *Universidad Nacional de Colombia. Medellín* p. 1-19.
- Jaramillo, D. F.; H. González y F. Álvarez. (2008), Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-mecánicas de suelos de textura pesada. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, **3**(2): 10-19.

- Jaramillo, D. F.; S. Sadeghian y L. A. Lince. (2012), Agricultura de precision en el manejo de la fertilización en el cultivo del café en Colombia. Informe de año sabático. *Universidad Nacional de Colombia-CENICAFÉ*. Medellín. 71 p.
- Journel, A. G. y CH. J. Huijbregts. (1978), Mining geostatistics. Academic Press. Londres. 598 p.
- Jury, W. A.; W.R. Gardner and W. H. Gardner. (1991), Soil physics. 5ª Ed. John Wiley and Sons, Inc. New York. 328 p.
- Krasilnikov, P. (2008), Chapter 2. Variography of discrete soil properties. In: Soil geography and geostatistics. Krasilnikov, P. et al. Eds. JRC Scientific and Technical Reports. European Communities. Luxembourg. pp: 12-25.
- Mallarino, A.P.; D. Wittry and J. Klatt. (2001), Using the Iowa phosphorus index and variable-rate technology for effective agronomic and environmental phosphorus management. In: The Integrated Crop Management Conf. Proceedings. Ames, IA. Iowa State Univ. Extensión. pp. 151-158.
- Obando, F.; A. Villegas; J. Betancur y L. Echeverri. (2006), Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands arenoso de la región andina central colombiana. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, **59**(1): 3217-3235.
- Ovalles, F. (1992), Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Instituto de Investigaciones Agrícolas Generales. Serie B. Maracay. 44 p.
- Paz-González, A.; S. R. Vieira and M. Taboada. (2000), The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, **97**: 273-292.
- Rey, J. C. (1994), Análisis de la variabilidad espacial para atributos seleccionados en un suelo del Estado Aragua. Informe final. Universidad Central de Venezuela. Postgrado en Ciencias del Suelo. Venezuela. 38 p.
- Samra, J. S.; J. Richter; H. S. Gill and R. Anlauf. (1990), Spatial dependence of soil sodicity and tree growth in a Natric Haplustalf. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54**: 1228-1233.
- Schabenberger, O. and F. J. Pierce. (2002), Contemporary statistical model for the plant and soil sciences. New York: CRC Press. 737 p.
- Trangmar, B.B.; R. S. Yost and G. Wehara. (1985), Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in agronomy*, **28**: 45-94.
- Upchurch, D. R. and W. J. Edmonds. (1992), Statistical procedures for specific objectives. In: Spatial variabilities of soils and landforms. SSSA Special publication No. 28. 2ª Ed. SSSA. Madison. pp: 49-71.

- Utset, S.A.; M. E. Ruiz; R. Irarragorri y L. Torres. (1989), Estructura espacial de las propiedades del suelo. III: Análisis bidimensional. *Ciencias de la Agricultura*. 37-38: 124-129.
- Webster, R. (2008), Chapter 1. Soil science and geostatistics. In: Soil geography and geostatistics. Krasilnikov, P. et al. Eds. JRC Scientific and Technical Reports. European Communities. Luxembourg. pp: 1-11.
- Webster, R. and M. Oliver. (2007), Geostatistics for environmental scientists. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd. England. 315 p.
- Yost, R. S.; G. Uehara and R. L. Fox. (1982a), Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. II. Kriging. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**: 1033-1037.
- Yost, R. S.; G. Uehara and R. L. Fox. (1982b), Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semi-variograms. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**: 1028-1032.