

# Variabilidad espacial de algunas propiedades físico - mecánicas de suelos de textura pesada

## Space variability of some ground properties physical - mechanical of heavy texture

Daniel Jaramillo J.<sup>1</sup>; Hugo González S.<sup>2</sup>; Fernando Álvarez M.<sup>3</sup>  
Recibido el 01 de octubre de 2008 y aceptado el 27 de noviembre de 2008

### Resumen

Se estudió el comportamiento espacial de la resistencia a la penetración (RP), densidad aparente (Da), coeficiente higroscópico (CH), contenido de fragmentos de roca (FR) y contenido de materia orgánica (MOS) en suelos de textura pesada de clima cálido seco del Centro Agropecuario Cotové de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, ubicado en el municipio de Santafé de Antioquia. El uso histórico de los suelos estudiados se caracteriza por la utilización repetida de labranza convencional por más de 30 años. Se realizó un muestreo sistemático en red con una distancia aproximada, entre sitios, de 14 m con dirección próxima al norte y de 10 m con dirección próxima al occidente, con el cual se obtuvieron 57 sitios de muestreo en un área efectiva de 0,6 ha. Las muestras se tomaron entre 150 y 200 mm de profundidad, rango promedio de trabajo de la mayoría de herramientas agrícolas de labranza. Los valores promedios de RP, Da, CH, FR y MOS fueron 133,02 psi, 1,41 Mg m<sup>-3</sup>, 6,25 %, 7,45 % y 6,14 %, y los coeficientes de variación de las mismas variables fueron de 18,12 %, 9,46 %, 7,04 %, 128,02 % y 44,68 %, respectivamente. Las variables RP, Da, CH y FR presentaron variabilidad espacial entre alta y media (nugget/sill < 50 %), con rangos de 14,6 m, 25,5 m, 16,2 m y 38,0 m, respectivamente, mientras que en MOS no hubo dependencia espacial.

### Palabras clave

Variabilidad espacial de suelos, Geoestadística, Propiedades físicas y mecánicas de suelos, Suelos agrícolas, Labranza.vv

### Abstract

The variation of penetration resistance (RP), bulk density (Da), hygroscopic coefficient (CH), content of rock fragments (FR) and organic matter content (MO) was studied in a heavy-texture, dry warm weather soil at the Cotové agricultural center located in Santafé de Antioquia, This soil has been used for traditional tillage for over 30 years. A sampling grid was defined with an approximate distance of 14 m in North-South direction and 10 m in West-East direction between sampling points, which led to an effective area of 0,6 ha and 57 different measurements. The soil samples were taken at a depth that varied between 150 and 200 mm, which is the average working range of most arable farming tools. The mean values of RP, Da, CH, FR and MOS were 133,02 psi, 1,41 Mg m<sup>-3</sup>, 6,25%, 7,45 % and 6,14% with coefficients of variation of 18,12%, 9,46%, 7,04%, 128,02 % and 44,68%, respectively. The variables RP, Da, CH and FR showed spatial variability between high and medium (nugget / sill <50%), with ranges of 14,6 m, 25,5 m, 16,2 m, 38,0 m, respectively; while MOS did not show spatial dependence.

<sup>1</sup> Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias. Grupo de Variabilidad espacial de suelos. E-mail: djaramal@unalmed.edu.co).

<sup>2</sup> Profesor Asistente de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Grupo de Ingeniería Agrícola. E-mail: hagonzal@unal.edu.co).

<sup>3</sup> Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Grupo de Ingeniería Agrícola. E-mail: falvarez@unalmed.edu.co).

## Key words

Spatial variability of soils, Geostatistic, Physical and mechanical properties of the soil, Agricultural soils, Tillage.

## Introducción

De acuerdo con Amézquita y Rubiano (2001) citados por Arango (1), el análisis de la variabilidad espacial de las características de un campo, es uno de los pilares en los que se fundamenta la agricultura de precisión.

Los suelos más evolucionados presentan menor variabilidad espacial; Su identificación ayuda a mejorar el muestreo, el diseño de experimentos y la interpretación de los resultados, y presenta la posibilidad de manejar más eficientemente los recursos de producción, con menor riesgo de deterioro ambiental <sup>(6)</sup>.

Una característica dominante de los suelos es su heterogeneidad, aún en pequeñas áreas que podrían considerarse como homogéneas. Ésta induce una variabilidad en sus propiedades que puede llegar a ser de considerable magnitud y que puede afectar en mayor medida las generalizaciones y predicciones que se hagan con ellas. La variabilidad es una condición inherente a los suelos y su origen está influenciado tanto por condiciones naturales (variados factores y procesos pedogenéticos), como por condiciones inducidas por el uso y el manejo de los mismos.

La variabilidad del suelo depende, aparte del tipo de suelo, 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 ha estado sometido a uso. Aquellas propiedades que más se alteran por el manejo del suelo serán las que presenten la mayor variabilidad <sup>(11)</sup>.

Upchurch y Edmonds <sup>(16)</sup> señalan que cuando la variabilidad no puede relacionarse con causas conocidas, se define como variabilidad aleatoria o debida al azar, mientras que si puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles, se denomina variabilidad sistemática. Esta última tiene dos componentes: uno de tendencia relacionada con la localización de las muestras y que puede llamarse tendencia espacial (T) y otro de dependencia espacial (DE).

La dependencia espacial se caracteriza porque las propiedades que la presentan adquieren valores diferentes dependiendo del espaciamiento entre las muestras o de la distancia y la dirección en que ellas sean recolectadas; las variables que tienen este comportamiento son llamadas variables regionalizadas. Para estudiar variables que presentan dependencia espacial se tiene un conjunto de procedimientos estadísticos que se conoce como Geoestadística. Su herramienta fundamental no es el semivariograma, el cual es una gráfica que relaciona la semivarianza de los pares de puntos de muestreo que están separados una determinada distancia, con los incrementos en la distancia de separación entre ellos. Si la variable que se estudia presenta dependencia espacial, la semivarianza irá aumentando su valor al irse incrementando la distancia de separación entre los puntos de muestreo hasta llegar, idealmente, a un valor constante de la semivarianza a partir de una determinada distancia <sup>(6)</sup>.

La semivarianza describe el componente dependiente espacialmente de una función aleatoria y al comparar dos sitios dentro de la zona de estudio, ella depende sólo de la distancia o de la distancia y la dirección de separación entre los dos sitios y no de su localización geográfica <sup>(15)</sup>.

Según Trangmar et al. <sup>(15)</sup>, la semivarianza, en un intervalo de distancia dado o lag, se estima como el promedio de las diferencias al cuadrado entre todas las observaciones que están separadas por ese lag. Para hacer dicha estimación se utiliza la ecuación <sup>(1)</sup>.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_{i+h})]^2$$

Donde, (h): semivarianza.

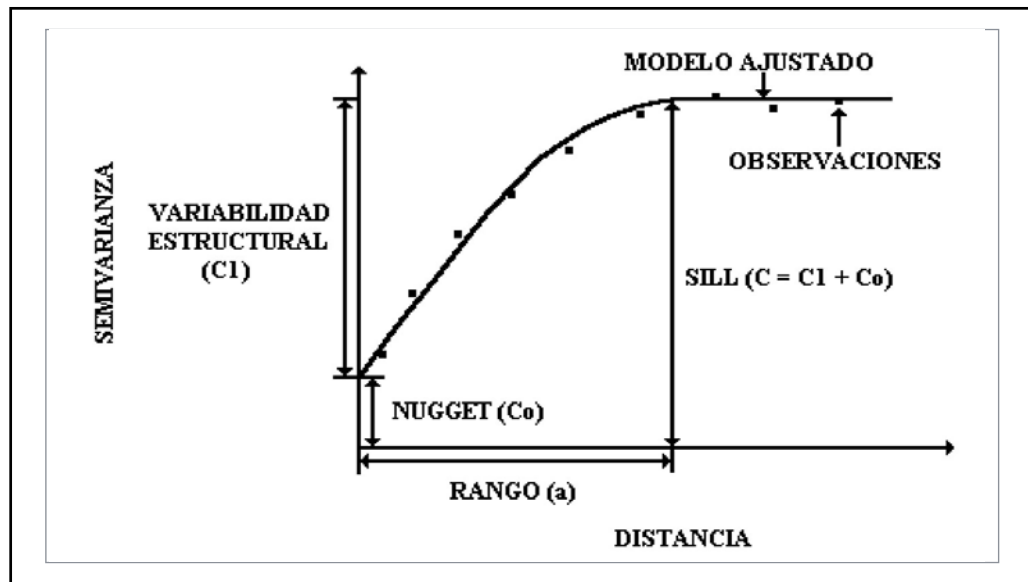
N: número de pares de puntos separados por una determinada distancia h.

z(xi): valor de la variable en una localidad.

z(xi+h): valor que toma la variable en otra localidad ubicada a una distancia h de x.

Cuando se relacionan gráficamente los valores de semivarianza contra los intervalos lag establecidos se tiene el producto fundamental del análisis geoestadístico que es el semivariograma (ver Figura 1).

Figura 1. El semivariograma y sus componentes (5).



El conjunto de observaciones ubicadas en la gráfica conforma el semivariograma experimental, y ajustándose a un modelo teórico para poder realizar predicciones sobre el comportamiento espacial de la variable. En los semivariogramas transicionales, es decir, aquellos en los cuales la semivarianza aumenta al aumentar la distancia hasta un cierto punto en el cual se torna constante, la distancia a la cual se estabiliza la semivarianza es llamada rango (a) y define la distancia hasta la cual hay dependencia espacial en las muestras; muestras tomadas a una distancia mayor que el rango son independientes. En los semivariogramas no transicionales no puede definirse un rango ya que éste, si existe, está por fuera de la máxima longitud utilizada para el análisis <sup>(5)</sup>.

El sill (C) es el valor de la semivarianza en el cual se estabiliza el modelo, está compuesto por la suma de la semivarianza estructural (C1) y la semivarianza aleatoria o nugget (Co); adquiere un valor muy cercano al valor de la varianza total de la variable, cuando se cumple la estacionaridad en los datos.

El grado de dependencia espacial de las propiedades del suelo 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) que ella presenta, puede estimarse el grado de dependencia espacial que tiene. Cambardella et al. <sup>(2)</sup> establecieron 3 categorías para agrupar la importancia de la variabilidad espacial de las variables, de acuerdo con dichos porcentajes, así:

-Fuerte dependencia espacial: nugget < 25%.

-Moderada dependencia espacial: nugget entre 25 y 75%.

-Débil dependencia espacial: nugget > 75%.

El conocimiento de la variabilidad espacial del suelo, aparte de mejorar el conocimiento que se adquiere del mismo cuando se establece, tiene varias aplicaciones prácticas como:

-Elaboración de mapas de propiedades del suelo por procesos de interpolación.

-Realizar controles de calidad de mapas de suelos.

-Definir el tamaño y la ubicación de unidades experimentales en el campo.

-Mejorar los sistemas de muestreo de suelos.

-Optimizar la interpretación de resultados de investigación.

-Ayudar en el manejo intensivo y sostenibilidad ambiental de los suelos.

González <sup>(4)</sup> estudió el efecto de la mecanización, con labranza convencional, sobre la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas de un Haplustoll del abanico de Ibagué a diferentes profundidades, encontrando dependencia espacial en la densidad aparente y la resistencia a la penetración. Los rangos encontrados para el horizonte superficial (0 a 16 cm) y para el subsuperficial (16 a 30 cm) fueron de 30 y 42 m en la densidad aparente, y de 33 y 34,5 m en la resistencia a la penetración, respectivamente.

Rivera y Madero <sup>(13)</sup> encontraron dependencia espacial

de la resistencia a la penetración en un Vertisol (Typic Haplustert) del municipio de Candelaria, Valle del Cauca, entre 15 y 25 cm de profundidad, con un rango de 24,5 m.

Lozano et al. <sup>(8)</sup> detectaron alta dependencia espacial (relación C/Sill > 65 %) en la resistencia a la penetración, la densidad aparente, el contenido de materia orgánica y el contenido de agua fácilmente aprovechable en Vertisoles, Alfisoles y Mollisoles del Valle del Cauca, tanto en la parte superficial como en la subsuperficial del suelo, con rangos que variaron entre 267 y 528 m en superficie y entre 109 y 4110 m, en profundidad. Observaron, además, que el comportamiento espacial de la resistencia a la penetración, la densidad aparente y el contenido de humedad fácilmente aprovechable fue más uniforme en profundidad que en superficie, mientras que el de la materia orgánica se comportó de manera contraria, todo ésto posiblemente relacionado con el uso

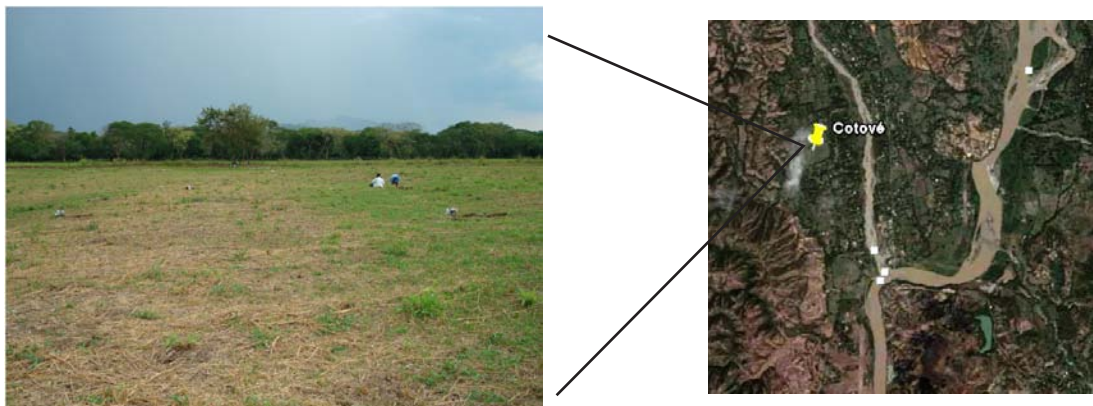
intensivo del suelo.

Arango <sup>(1)</sup>, en un lote cercano al sitio de este trabajo, en un Alfisol, encontró dependencia espacial media a alta en la densidad aparente y en la resistencia a la penetración, con rangos de 14,85 y 17,76 m, respectivamente, y sin encontrar variabilidad espacial en el contenido de materia orgánica.

## Materiales y Procedimientos

Las unidades experimentales se localizaron en el lote N° 8 del Centro Agropecuario Cotové de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, ubicado en la vereda El Espinal del municipio de Santafé de Antioquia. El uso histórico de los suelos estudiados se caracteriza por la utilización agrícola intensiva de labranza convencional (con considerable utilización de arados y rastras de discos), por más de 30 años (ver Figura 2).

**Figura 2. Aspecto general del lote N° 8 y ubicación del área del estudio.**



El Centro Agropecuario Cotové se encuentra a 565 m.s.n.m y presenta clima cálido seco (bs-T) caracterizado por valores medios de 27,3 °C de temperatura, 1919,6 mm de precipitación total anual y 1611 mm de evapotranspiración total anual. El mes más lluvioso es octubre y el más seco es enero. Se presenta un déficit total de agua promedio anual de 591,4 mm <sup>(1)</sup>. El lote seleccionado se ubica en una terraza aluvial plana (con pendiente < 3%) y los suelos dominantes son de textura media a pesada, moderadamente profundos y con buen nivel de fertilidad.

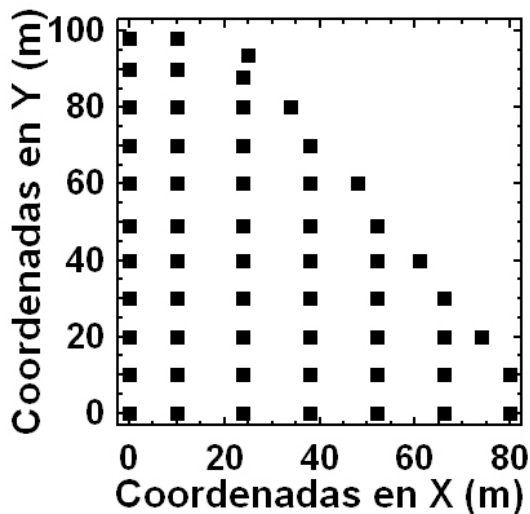
En el lote seleccionado se estableció una cuadrícula de aproximadamente 6000 m<sup>2</sup> (ver Figura 3), con un

tamaño de celda de 14 x 10 m. Con este diseño se obtuvo una malla con 57 intersecciones que se materializaron en el terreno con estacas y que se georreferenciaron con un sistema de coordenadas planas (X, Y) de origen arbitrario. Cada intercepto definió un punto de referencia para el muestreo a realizar.

Una vez materializada la malla de muestreo, en cada sitio se hizo una minicalicata de 30x30x15 cm, en la cual se tomaron las muestras de suelo entre 15 y 20 cm de profundidad. Antes de tomar las muestras de suelo, se determinó la resistencia a la penetración (RP, en psi), utilizando un penetrómetro de cono Royal Gauge con cono de 2 mm, medidor de reloj y resolución de 4 psi. En

cada una de las esquinas de la minicalicata se realizó una lectura con el penetrómetro a 15 cm de profundidad (4 en total por cada sitio) y se estableció el promedio de ellas para caracterizar la RP del sitio.

**Figura 3. Esquema de muestreo utilizado.**



Después de medir la resistencia a la penetración, se procedió a tomar una muestra de suelo sin disturbar, con un cilindro metálico biselado de 96,21 cm<sup>3</sup> de volumen, para determinar la densidad aparente de la tierra fina, excluyendo los fragmentos de roca (Da, en Mg m<sup>-3</sup>) y luego se colectó una muestra disturbada de suelo de aproximadamente 2500 g para determinar el contenido de fragmentos de roca (FR: partículas minerales con diámetro mayor a 2 mm, en %), el coeficiente higroscópico (CH: contenido de humedad gravimétrica del suelo seco al aire, en %) y el contenido de materia orgánica (MOS, por el método de Walkley y Black, en %). Todos los análisis se realizaron con muestras secadas al aire, exceptuando los FR (fragmentos de roca), en muestras tamizadas a 2 mm. Los métodos utilizados para hacer las determinaciones planteadas se encuentran descritos en Motta et al. <sup>(10)</sup>.

Con los resultados obtenidos se hicieron análisis estadísticos exploratorios para conocer sus propiedades y para caracterizar su distribución. Luego se procedió a establecer si se cumplían los supuestos de normalidad y de estacionaridad requeridos para los análisis de semivariografía.

Para comprobar el supuesto de estacionaridad se llevó a cabo un análisis de tendencia espacial mediante un mo-

delo de regresión múltiple (ver ecuación 2):

$$\text{Variable} = a + bx + cy + d(xy) + e(x^2) + f(y^2) \quad [2]$$

Donde x, y son las coordenadas.

Cuando se obtuvo un modelo de regresión significativo (al 95 %), se procedió a confirmar los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianza de los residuales de dicho modelo, cuando estos supuestos se cumplieron, se tomaron los residuales de éste para hacer los análisis de semivarianza; si el modelo de regresión no era significativo, la semivariografía se realizaba con los valores originales de la variable.

La normalidad se probó con el modelo estadístico de Shapiro-Wilk. En caso de que la distribución de los datos (originales o residuales, según el caso) en alguna variable no fuera normal, se aceptó que por lo menos fuera simétrica y si esta condición tampoco se presentaba, se procedió a realizar transformaciones sencillas de los datos originales de la variable (logarítmica, raíz cuadrada o inversa) para observar si se lograba la normalización o, por lo menos, la simetrización de los datos: si se trabajaba con los residuales, se confrontaba de nuevo todo el proceso de análisis de tendencia con los datos transformados.

Si con los procedimientos anteriores se podía corregir el problema, la semivariografía se determinaba con los datos transformados o con los nuevos residuales, sino, como lo que se busca era conocer si las variables presentan variabilidad espacial y su comportamiento aproximado, sin pretender establecer modelos que permitan hacer estimaciones de los valores de ellas con fines de elaborar mapas de isolíneas, los semivariogramas se establecieron con los datos originales, transformados o residuales que menores conflictos presentaron con los supuestos requeridos para este análisis. Todos los análisis estadísticos se hicieron con los programas Statgraphics 5.1 plus y GS+ 3.1.

## Resultados

En la Tabla 1 se resumen los estadísticos básicos de algunas propiedades superficiales.

**Tabla 1. Propiedades superficiales de un suelo pesado de clima cálido seco de Santafé de Antioquia, Colombia (n = 57).**

Variable	Promedio	Desviación estándar	Máximo	Mínimo	Coefficiente de variación (%)	Asimetría	Valor p de Shapiro-Wilk
RP	133,02	24,11	150,0	70,0	18,12	-3,9429	2,24E-14
Da	1,41	0,13	1,84	0,96	9,46	-0,0779	0,4978
CH	6,25	0,44	7,24	5,27	7,04	0,3778	0,6417
FR	7,45	9,54	52,57	0,3	128,02	9,1819	0
MOS	6,14	2,74	11,4	3,0	44,68	1,4713	2,99E-8

RP (resistencia a la penetración, en psi); Da (Densidad aparente, en Mg m<sup>-3</sup>); CH (coeficiente higroscópico, en %); FR (contenido de fragmentos de roca, en %); MOS (contenido de materia orgánica, en %).

La Figura 4 muestra la distribución relativa de los valores (el tamaño de los círculos es proporcional al valor obtenido) que tomaron las variables estudiadas en el campo.

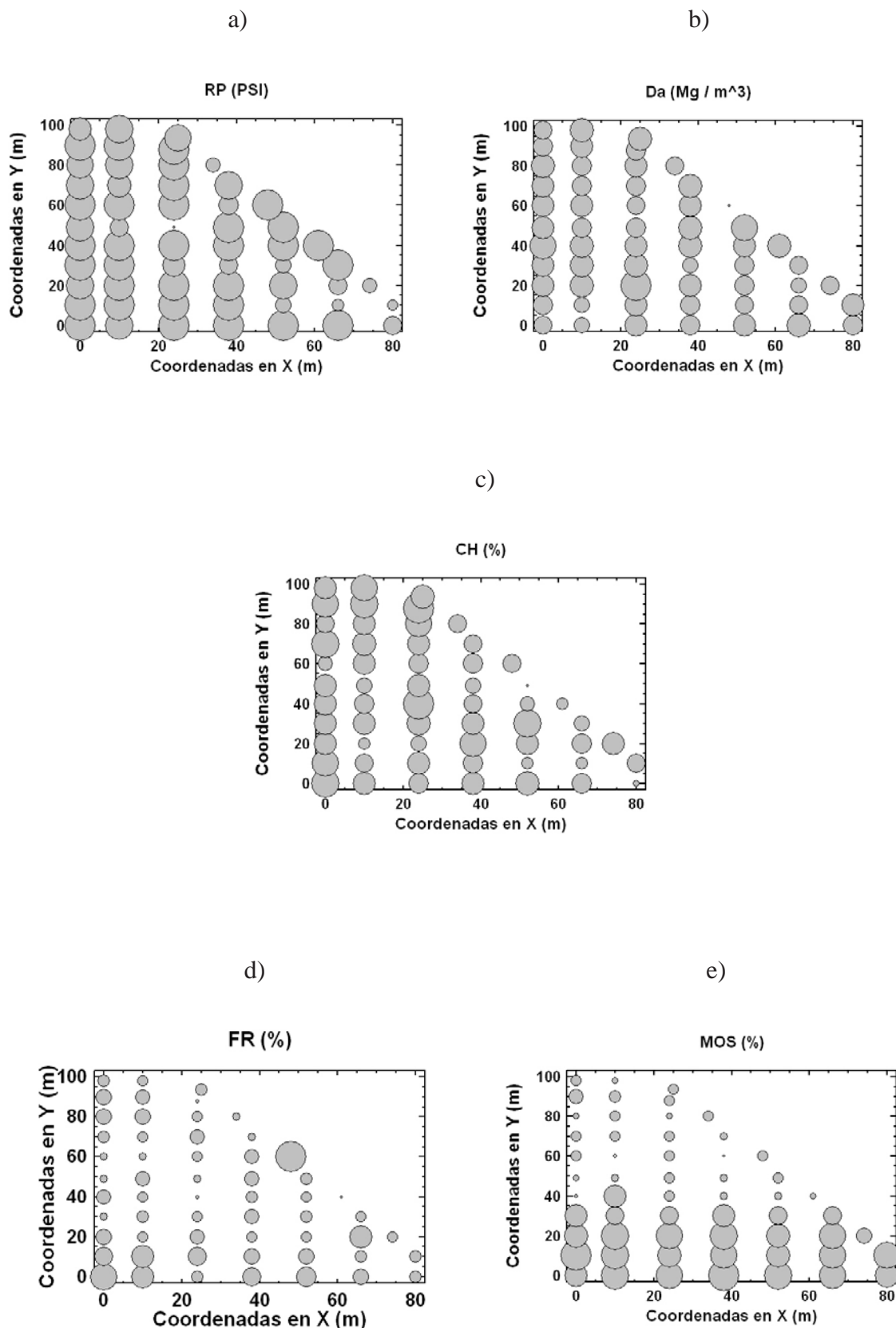
También se realizó el análisis de tendencia de los valores de algunas propiedades del suelo de Cotové (ver Tabla 2).

**Tabla 2. Análisis de tendencia de los valores de algunas propiedades superficiales de un suelo pesado de clima cálido seco de Santafé de Antioquia, Colombia.**

Variable	Modelo	R <sup>2</sup> (%)	Valor p del
RP	RP = 144.379-0.396802X	13.66	0.0027
Da	Sin modelo significativo	-	-
CH	CH = 6.46104 - 0.00754261X	15.02	0.0017
FR	FR = 22.0702 - 0.185339*X - 0.60899*Y+0.0054767*X*Y <sup>2</sup> + 0.00418376*Y	18.53	0.0052
MOS	MOS = 10.6461 - 0.184572Y+0.00119349Y <sup>2</sup>	79.8	0

RP (resistencia a la penetración, en psi); Da (Densidad aparente, en Mg m<sup>-3</sup>); CH (coeficiente higroscópico, en %); FR (contenido de fragmentos de roca, en %); MOS (contenido de materia orgánica, en %).

**Figura 4. Gráficos de burbujas de la distribución espacial relativa de los valores de algunas propiedades superficiales de un suelo pesado de clima cálido seco de Santafé de Antioquia, Colombia. a) RP (resistencia a la penetración, en psi); b) Da (Densidad aparente, en Mg m<sup>-3</sup>); c) CH (coeficiente higroscópico, en %); d) FR (contenido de fragmentos de roca, en %); e) MOS (contenido de materia orgánica, en %).**



## Discusión

La mayoría de las propiedades del suelo que fueron evaluadas tienen una variabilidad relativamente alta ya que poseen amplios rangos de valores, alta desviación estándar y altos coeficientes de variación. Además, RP y FR tienen una fuerte asimetría (-3,9429 y 9,1819, respectivamente) y, adicionalmente a la MOS, no tienen una distribución normal de sus datos (ver Tabla 1).

En la Figura 4 se observa que en dicha distribución los valores de Da no tienen, aparentemente, ninguna tendencia espacial en su distribución, mientras que los valores en las demás variables sí presentan una tendencia espacial que es bastante notable en la MOS. Este comportamiento en la distribución de los valores de las propiedades del suelo viola uno de los supuestos fundamentales del análisis de semivarianza, el de la estacionaridad.

Para confirmar la presencia de la tendencia espacial mencionada se procedió a hacer análisis de regresión múltiple con cada una de las variables utilizando el modelo que se presentó en la ecuación <sup>(2)</sup>. Los resultados obtenidos con este análisis se exponen en la Tabla 2 y muestran que efectivamente se presentó tendencia espacial en todas las variables, excepto en Da, como ya se había insinuado.

Respecto a las propiedades analizadas, Arango <sup>(1)</sup> encontró tendencia espacial en RP y en Da en la parcela que estudió. Las diferencias encontradas entre los dos trabajos, realizados en condiciones bastante similares, pueden obedecer a las diferencias en uso y manejo a que han estado sometidos los lotes involucrados en ellos, como lo han notado Mallarino et al. <sup>(9)</sup>, Cambardella y Karlen <sup>(3)</sup> y Paz-González et al. <sup>(12)</sup>, quienes sostienen que diferencias en el uso histórico del suelo pueden generar grandes efectos sobre la variabilidad de sus propiedades. El lote en que trabajó Arango <sup>(1)</sup> ha estado destinado a la producción de pasto para henificación desde 1985, mientras que el del presente trabajo ha estado sometido, permanentemente, a uso agrícola intensivo con labranza convencional.

Al encontrarse una tendencia espacial en la distribución de los valores de las propiedades del suelo, ésta debe ser eliminada para cumplir el supuesto de estacionaridad y poder realizar los análisis de semivariografía. Para lograr este propósito se debe trabajar la semivarianza

con los residuales de la regresión, una vez que se haya verificado que ellos presentan distribución normal, o por lo menos simétrica, y homogeneidad de varianza. Realizados estos procedimientos, los residuales de todas las variables tuvieron varianzas homogéneas pero los de RP y de FR no fueron ni normales ni simétricos, lo que obligó a hacer ciertas transformaciones. Con ninguna de las transformaciones ensayadas se obtuvo normalidad ni simetría en la distribución de los residuales de estas variables. Con los resultados obtenidos en estos tratamientos, se seleccionaron finalmente los residuales (Res) de la regresión de RP, CH, MOS y log FR y los datos originales de Da para llevar a cabo la semivariografía (ver Tabla 3).

**Tabla 3. Dependencia espacial de algunas propiedades superficiales de un suelo pesado de clima cálido seco de Santafé de Antioquia, Colombia.**

Variable	Modelo	Co	Sill	Rango (m)	CI Sill (%)	R (%)
Res RP	Esférico	113	525.7	14.6	78.5	46.3
Da	Esférico	0.0009	0.0204	25.5	95.6	97.5
Res CH	Exponencial	0.0466	0.1652	16.2	71.8	56.9
Res log FR	Esférico	0.073	0.147	38.0	50.3	73.4
Res MOS	Nugget	1.386	1.386	-	0	-

Res RP (residuales de resistencia a la penetración, en psi); Da (Densidad aparente, en Mg m<sup>-3</sup>); Res CH (residuales de coeficiente higroscópico, en %); Res log FR (residuales contenido de fragmentos de roca con transformación logarítmica, en %); Res MOS (residuales de contenido de materia orgánica, en %).

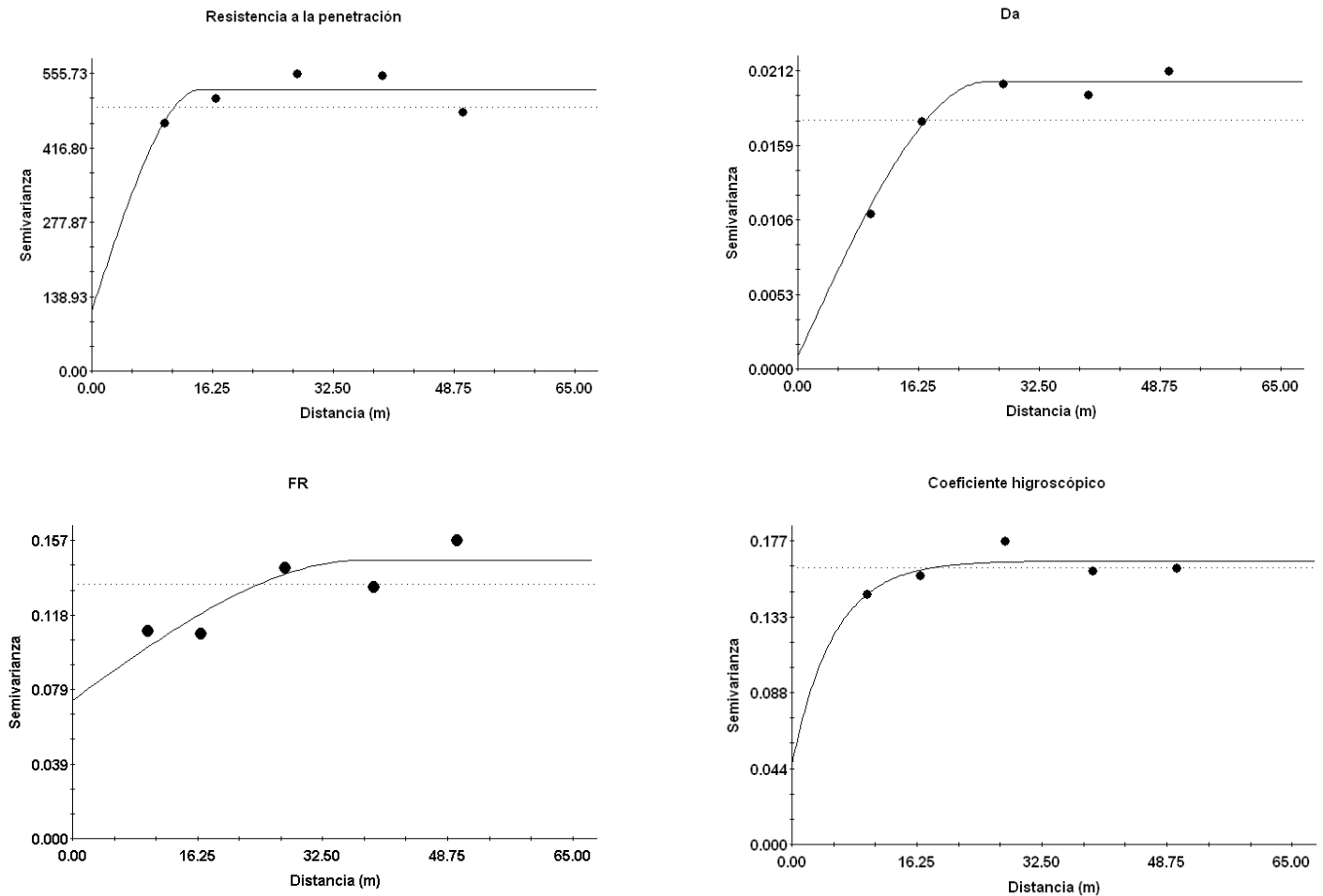
Exceptuando la MOS, todas las variables presentaron dependencia espacial de alta a media: el nugget representa menos del 50 % de la variabilidad total encontrada en los modelos de semivarianza. Además, los rangos de dependencia son relativamente cortos (ver Tabla 3). Las características de dependencia espacial mencionadas coinciden bastante bien con las encontradas por Arango <sup>(1)</sup>, lo que sugiere que las diferencias en el uso y el manejo que se ha hecho en estos suelos no ha afectado de forma notable la variabilidad espacial en ambos lotes. La Figura 5 ilustra los modelos teóricos que mejor se ajustaron a los semivariogramas experimentales obtenidos.

Al observar los semivariogramas experimentales, llama la atención el hecho de que se presente un modelo periódico en RP y un modelo escalonado en FR; este comportamiento ha sido interpretado como efecto de la presencia de fenómenos periódicos actuando sobre las variables <sup>(15)</sup>, presencia de variabilidad a diferentes escalas o modelos anidados <sup>(14)</sup>, cambios lineales en características del suelo o distribución fractal en las propiedades del suelo <sup>(7)</sup>, y en el caso de FR podría pensarse en que el escalonamiento



observado está mostrando un patrón de sedimentación que actuó superficialmente en el suelo (el lote está ubicado en una terraza aluvial de un río trenzado).

**Figura 5. Semivariogramas estructurados de un suelo pesado de clima cálido seco de Santafé de Antioquia, Colombia: a) RP (resistencia a la penetración, en psi), b) Da (Densidad aparente, en Mg m<sup>-3</sup>), c) CH (coeficiente higroscópico, en %), d) FR (contenido de fragmentos de roca, en %), e) MOS (contenido de materia orgánica, en %).**



## Conclusión

La resistencia a la penetración, el contenido de fragmentos de roca y el contenido de materia orgánica presentaron alta variabilidad, con un componente importante de tendencia espacial. Exceptuando la materia orgánica, que no presentó variabilidad espacial, las demás propiedades evaluadas tuvieron una dependencia espacial relativamente alta.

Toda la variabilidad encontrada en estos suelos puede estar relacionada con el uso agrícola intensivo a que han estado sometidos por más de 30 años y, en algunas propiedades que presentaron una estructura espacial especial, el tipo

de material parental puede haber influenciado también esa variabilidad.

## Agradecimientos

A la dirección de investigaciones de la Universidad Nacional - Sede Medellín (DIME) que está financiando el proyecto de investigación “Desarrollo de herramientas de arado tipo cincel para labranza de suelos de textura pesada de clima cálido seco (Santafé de Antioquia)”. Al Grupo de Tribología y Superficies (GTS), al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias y al Laboratorio de Mecanización Agrícola, de la Universidad Nacional – Sede Medellín.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Arango, L. 2004. Efecto de la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas del suelo relacionadas con la producción del forraje del pasto ángleton (*Dichanthium aristatum* (Poir) C. E. Hubbard). Tesis Maestría en Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 78 p.
2. Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F. y Konopka, A. E. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
3. Cambardella, C. A. y Karlen, D. 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture* 1: 5-14.
4. González, A. 1992. Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas en un Typic Haplustoll por prácticas de labranza. Tesis Maestría en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira. 100 p.
5. Jaramillo, D. F. 2003. La variabilidad de las propiedades del suelo y su efecto sobre el manejo de la fertilidad. En: 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 pp 1-19.
6. \_\_\_\_\_. 1997. Variabilidad de suelos. En: SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO. Comité Regional Antioquia. Diagnostico químico de la fertilidad del suelo. Editado por Walter Osorio. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. PP. 167 – 197.
7. 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.
8. Lozano, J.; Madero, E.; Tafur, H.; Herrera, O. y Amézquita, E. 2004. Distribución de un nuevo índice de compactación validado en suelos del Valle del Cauca. *Suelos Ecuatoriales* 34 (2): 102-111.
9. Mallarino, A.P., Wittry, D. y Klatt, J. 2001. Using the Iowa phosphorus index and variable-rate technology for effective agronomic and environmental phosphorus management. p. 151-158. In *The Integrated Crop Management Conf. Proceedings*. Dec. 5-6, 2001, Ames, IA. Iowa State Univ. Extension.
10. Motta, B. et al. 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5ª. Ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
11. Ovalles, F. 1992. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Maracay. 44 p.
12. Paz-González, A.; Vieira, S. R. y Taboada, M. 2000. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma* 97: 273-292.
13. Rivera, M. V. y Madero, E. 1997. Variabilidad espacial de algunas características físicas de un Vertisol del Valle del Cauca. *Suelos Ecuatoriales* 27: 173-176.
14. Solomotova, E. y Sidorova, V. 2008. Chapter 3. Spatial variability of forest litters in bilberry spruce forests of Fennoscandia. In: *Soil geography and geostatistics*. Krasilnikov, P. et al. Eds. JRC Scientific and Technical Reports. European Communities. Luxembourg. pp: 26-36.
15. Trangmar, B.B.; R. S. Yost y G. Wehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in agronomy* 28: 45-94.
16. Upchurch, D. R. y Edmonds, W. J. 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.