ISSN 0568-3076 agron. 20(2): 7 - 17, 2012

VARIABILIDAD ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES DE UN MOLLISOL DE CLIMA CÁLIDO SECO DE ANTIOQUIA (COLOMBIA)

*Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo**

* I.A., M.Sc. Suelos y Aguas. Profesor Titular y Maestro Universitario, Escuela de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Colombia.
Correo electrónico: djaramal@unal.edu.co

Recibido: 12 de septembre; aprobado: 15 de noviembre de 2012

RESUMEN

En un lote plano de 4 ha de una finca del municipio de Santafé de Antioquia (Colombia), ubicado en clima cálido seco y con Mollisoles como suelos dominantes, se evaluó la variabilidad de su fertilidad mediante el estudio de la dependencia espacial de la densidad aparente (Da) y del pH en agua, así como de los contenidos de arena, limo, arcilla, materia orgánica, Ca, Mg, K y P, en los primeros 15 cm del suelo, haciendo un muestreo en una cuadrícula semi-regular con tamaño de celda aproximado de 25 x 25 m. Los suelos presentaron textura media a pesada, pH neutro, contenidos altos de materia orgánica y de bases intercambiables (Ca, Mg, K) y bajo de fósforo disponible. La Da tuvo un valor adecuado, según la textura del suelo. Todas las propiedades presentaron tendencia espacial cuadrática y en casi todas las variables, exceptuando el Ca, se presentó alta dependencia espacial con rango promedio de 38,3 m. El comportamiento espacial observado se atribuyó a la sedimentación relativamente torrencial típica de las terrazas aluviales de ríos trenzados donde se llevó a cabo el estudio, así como al uso agrícola intensivo que ha tenido esta parte de la finca durante más de tres décadas. No se consideró viable el uso de la agricultura de precisión para el manejo agropecuario de este lote.

Palabras clave: geoestadística, semivarianza, kriging.

ABSTRACT

SPATIAL VARIABILITY OF SOME SOIL PROPERTIES IN A DRY WARM CLIMATE MOLLISOLS OF ANTIOQUIA (COLOMBIA)

In a 4 ha flat plot in a farm located in the Santafé Municipality in Antioquia (Colombia) with dry warm weather and Mollisols as dominant soils, the variability of their fertility was evaluated through the study of spatial dependency on apparent density (AD) and the water pH as well as the sand, silt, clay, organic matter, Ca, Mg, K and P content in the first 15 cm of soil, by sampling a 25 x 25 mm cell size semi-regular grid. The soils showed medium to heavy texture, neutral pH, high content of organic matter and interchangeable basis (Ca, Mg, K) and low available phosphorus. The AD had an adequate value according to the soil texture. All the properties presented spatial quadratic trend and in almost all the variables, except Ca, presented high spatial dependence with mean range of 38.3 m. The observed spatial behavior was attributed to relatively torrential sedimentation typical of alluvial terraces of braided rivers where the study was carried out, as well as to intensive agricultural use in this area of the farm for more than three decades. The precision agriculture use was not considered as viable for the agricultural management of this plot.

Key words: geostatistics, semivariance, kriging.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad de cualquier propiedad edáfica presenta dos componentes fundamentales: uno aleatorio y otro sistemático. Cuando la variabilidad no puede relacionarse con causas conocidas, se define como variabilidad aleatoria o debida al azar. La variabilidad sistemática es aquella que puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles (Jaramillo, 2006).

La variabilidad espacial se caracteriza porque las propiedades que la presentan adquieren valores diferentes dependiendo de la ubicación y/o del espaciamiento entre las muestras utilizadas para caracterizarlas, es decir, que el valor que toma la variable en un sitio depende de la distancia y/o de la dirección a la cual se ubica de otro sitio vecino (Jaramillo, 2006).

La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo y depende, aparte del tipo de suelo, de la propiedad que se analice. Hay más variabilidad en las propiedades químicas que en las físicas y más en aquellos suelos que están siendo sometidos a uso agropecuario que en los que están en su condición natural (Ovalles, 1992; Obando *et al.*, 2006; Jaramillo *et al.*, 2012). Aquellas propiedades que más se alteran por el manejo del suelo (fertilización, riego, etc.) serán las que presenten la mayor variabilidad (Ovalles, 1992; Paz-González *et al.*, 2000).

El suelo puede variar espacialmente en sus propiedades debido a los procesos naturales (pedogenéticos) que han actuado en su formación (Goovaerts, 1998, 1999; Briggs *et al.*, 2006) y/o debido al manejo (agropecuario o de otro tipo) que se hace en él (Cambardella & Karlen, 1999; Jaramillo *et al.*, 2008; Jaramillo, 2008a, 2010; Paz-González *et al.*, 2000). Asimismo, la variabilidad depende de la escala de trabajo, ya que es común que las propiedades del suelo presenten dependencia espacial a diferentes rangos de distancia (Goovaerts, 1998, 1999; Amador *et al.*, 2000; Facchinelli *et al.*, 2001; Lin, 2002; Lin *et al.*, 2006; Webster & Oliver, 2007; Gallardo & Maestre, 2008; Guastaferro *et al.*, 2010).

El uso histórico del suelo tiene grandes efectos sobre la variabilidad de sus propiedades. Diferencias en el manejo 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 sobre propiedades físicas del suelo (Cambardella *et al.*, 1994; Mallarino, 1996; Cambardella & Karlen, 1999; Paz-González *et al.*, 2000).

La caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo ayuda a entender las relaciones complejas que pueden presentarse entre ellas mismas, así como entre ellas y el ambiente en que se desarrolla el suelo, lo que ayuda a definir las prácticas de manejo más adecuadas, tanto para el suelo, como para el cultivo (Goovaerts, 1998, 1999). Las herramientas geoestadísticas, y sobre todo los métodos de interpolación no sesgados (kriging), permiten elaborar mapas que ayudan a entender la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en un área determinada (Silva *et al.*, 2011).

Con este trabajo se pretende establecer el grado de dependencia espacial que presentan algunas propiedades físicas y químicas de un Mollisol que ha estado sometido a uso agrícola intensivo por más de tres décadas, bajo clima cálido seco.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación. El estudio se realizó en un lote de 4 ha del Centro Agropecuario Cotové de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, ubicado en el municipio de Santafé de Antioquia, vereda El Espinal (coordenadas: 6º31’51,92” N, 75º49’45,63” W) y distante de la ciudad de Medellín 79 km (Figura 1). Los suelos estudiados han estado dedicados a la producción agrícola intensiva de papaya, maíz y pasto ángleton para

ensilaje, con alto grado de mecanización convencional y con riego superficial desde finales de los años 70.

El Centro Agropecuario se encuentra a 565 m de altitud y presenta un clima cálido seco (bs-T) caracterizado por una temperatura promedia mensual de 27,3°C, una precipitación promedia anual de 1019,6 mm y una evapotranspiración promedia anual de 1611 mm. 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. El lote experimental se ubica en una terraza aluvial plana (pendiente < 3%) y los suelos dominantes son Fluventic Haplustolls, caracterizados por tener textura media a fina, con arcillas expandibles, moderadamente profundos y de buen nivel de fertilidad.

Procedimiento. En la parcela seleccionada se localizó una cuadrícula semi-regular con tamaño de celda aproximado de 25 x 25 m (Figura 1), obteniéndose una malla con 85 intersecciones que fueron georreferenciadas con un sistema de coordenadas planas (*x, y*) de origen arbitrario. En cada intercepto se tomó una muestra de suelo sin disturbar, en un estado de humedad cercano a capacidad de campo, con un cilindro biselado de 95,4 cm^3 de volumen, para determinar densidad aparente (Da), y otra muestra disturbada, con barreno, entre 0 y 15 cm de profundidad, para hacer las siguientes determinaciones en el laboratorio.

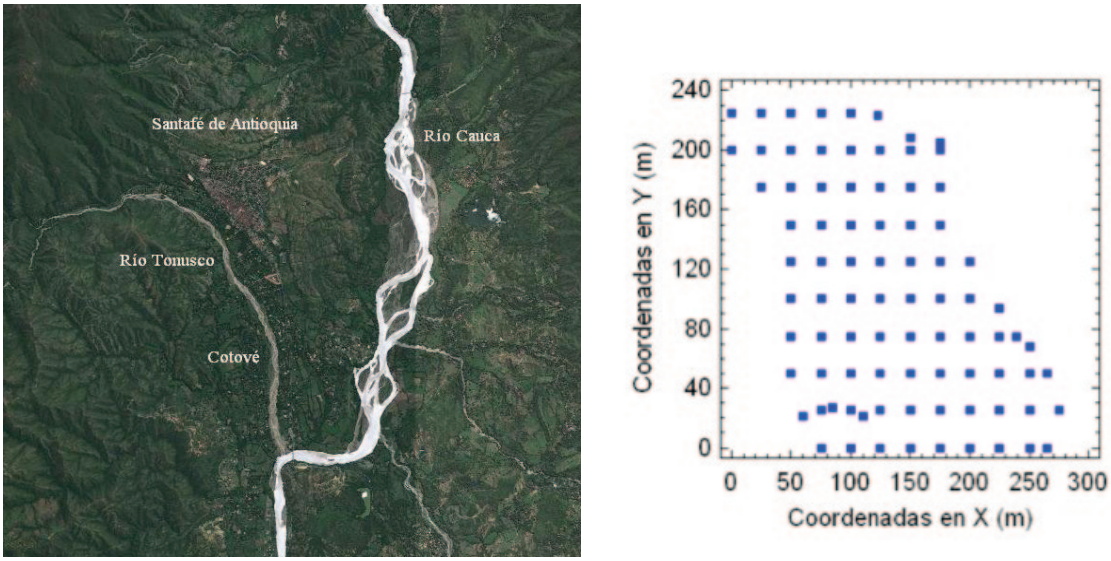

Figura 1. Localización general del sitio experimental (*Fuente*: Google Earth, 2011) y esquema de muestreo utilizado.

La muestra disturbada se secó al aire y se pasó por tamiz de 2 mm. Luego se determinó con ella el porcentaje de arena (A: partículas con diámetro entre 0,05 y 2 mm), limo (L: partículas con diámetro entre 0,05 y 0,002 mm) y arcilla (Ar: partículas con diámetro < 0,002 mm) del suelo, con el método del hidrómetro. Además se determinaron el pH en agua 1:1, los contenidos de materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black, de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) intercambiables, mediante extracción con acetato de amonio normal y neutro y el fósforo disponible (P) por Bray II.

A las variables se les confirmaron los supuestos de estacionaridad, mediante un análisis de tendencia espacial con regresión múltiple y modelo cuadrático (*propiedad* = $a + bx + cy + dxy + ex^2 + fy^2$) (Jaramillo, 2006, 2008a, 2009; Jaramillo *et al*., 2008, 2012), donde la propiedad del suelo fue la variable dependiente y las coordenadas (x, y) de los puntos de muestreo fueron las independientes, así como los de normalidad o de simetría (Schabenberger & Pierce, 2002; Diggle & Ribeiro, 2007; Krasilnikov & Sidorova, 2008; Jaramillo, 2009). Cuando hubo tendencia espacial se trabajó la semivariografía con los residuos de la regresión. A los semivariogramas experimentales se les ajustaron otros teóricos con los que se produjeron mapas de isolíneas, mediante interpolación con kriging puntual. Todos los análisis estadísticos se hicieron con el programa Statgraphics Centurion XV, versión 15.1.02 (StatPoint Technology, Inc., 2006), y los geoestadísticos con el GS+ 9.0 (Gamma Design Software, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estadísticos que caracterizan las propiedades evaluadas se encuentran en la Tabla 1. Los suelos, en su mayoría, presentan textura media a fina (más de 30% de arcilla) y tienen pH neutro (alrededor de 7,0), contenidos altos de materia orgánica (mayor a 2%) y de bases intercambiables [más de 20 cmol (+) kg^{-1} suelo de Ca + Mg + K] y bajo de fósforo disponible (menos de 15 mg kg^{-1}), según niveles críticos propuestos por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 1992), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2007) y Sadeghian (2008). La Da se encuentra en un valor adecuado, teniendo en cuenta la textura de los suelos (Jaramillo, 2011). Los resultados promedios de los Mollisoles estudiados son similares a los encontrados por Arango (2004) en Alfisoles vérticos de la misma finca, pero los coeficientes de variación fueron mayores en los Alfisoles. El contenido de P fue la propiedad más variable en ambos suelos, con coeficientes de variación de 55,76% en el Alfisol (Arango, 2004) y de 41,45%, en el Mollisol. En ambos suelos el pH fue la propiedad menos variable, con coeficientes de solo 2,36% y 2,46%, respectivamente. La distribución de los valores del pH, K y P no fue normal ni simétrica y la del porcentaje de limo (L) fue simétrica pero no normal. Las propiedades químicas observadas en estos suelos reflejan el efecto que ha tenido el clima cálido seco en su desarrollo.

Tabla 1. Estadísticos básicos[1] de los atributos[2] del suelo evaluados (n = 85)

	Da	A	L	Ar	MO	pH	Ca	Mg	K	P
	Mg m^{-3}		%				$cmol_{(+)}$	kg^{-1}	suelo	mg kg^{-1}
Promedio	1,11	34,66	30,82	34,52	4,97	6,94	24,73	10,16	0,29	9,41
Mediana	1,13	34,0	30,0	34,0	5,1	6,9	24,6	10,2	0,27	9,0
Moda	-	34,0	30,0	34,0	5,3	6,9	-	-	0,25	7,0
Varianza	0,021	32,70	28,41	38,68	0,66	0,029	10,31	2,82	0,011	15,22
DE	0,14	5,72	5,33	6,22	0,81	0,17	3,21	1,68	0,1	3,90
CV (%)	12,98	16,5	17,29	18,02	16,36	2,46	12,99	16,52	36,23	41,45
Mínimo	0,85	22,0	20,0	20,0	2,5	6,4	19,0	6,1	0,11	4,0
Máximo	1,57	50,0	44,0	50,0	6,9	7,6	32,6	13,6	0,77	26,0
Rango	0,72	28,0	24,0	30,0	4,4	1,2	13,6	7,5	0,66	22,0
Q1	0,99	32,0	28,0	30,0	4,3	6,8	22,4	9,1	0,21	7.0
Q3	1,21	38,0	34,0	38,0	5,6	7,0	26,9	11,4	0,35	11,0
Sesgo	1,72	0,39	1,66	-0,09	-0,94	2,37	1,56	-0,99	5,65	5,17
Curtosis	1,01	0,22	-0,47	0,6	0,28	5,36	-0,61	-0,37	8,94	5,57
Norm	0,052	0,28	0,025	0,127	0,746	0,013	0,066	0,29	0,011	0,0002

[1] DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de Variación. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior. Norm: Valor p de Shapiro-Wilks (Si Norm > 0,05, la distribución de los datos de la variable es normal).

[2] A: Arena. L: Limo. Ar: Arcilla. MO: Materia orgánica. Ca: Calcio. Mg: Magnesio. K: Potasio. P: Fósforo. Da: Densidad aparente.

Mediante el análisis de regresión se observó que todas las propiedades presentaron tendencia espacial cuadrática, como puede verse en la Tabla 2, aunque con coeficientes de determinación R^2 que explicaron, en casi todos los casos, menos del 50 % de la variación total de la propiedad evaluada, lo que está mostrando que el peso de este tipo de variabilidad (la de tendencia espacial) es bajo en la mayoría de ellas, quedando un porcentaje importante de la variabilidad total, correspondiente a la aleatoria y a la dependencia espacial (Jaramillo, 2006) por explicar.

Tabla 2. Modelos de regresión lineal de tendencia espacial y su coeficiente de determinación para las propiedades* del suelo estudiadas

Modelo	R^2 (%)
$A = 24{,}91 + 0{,}08294x + 0{,}04359y - 0{,}000258x^2$	28,44
$L = 45{,}59 - 0{,}132x - 0{,}26y + 0{,}00048xy + 0{,}00042x^2 + 0{,}00092y^2$	60,37
$Ar = 39{,}64 - 0{,}0395x + 0{,}101y - 0{,}00065y^2$	40,17
$pH = 6{,}94 - 0{,}00012x - 0{,}0033y + 0{,}000011xy + 0{,}000014y^2$	26,58
$MO = 3{,}48 + 0{,}021x + 0{,}024y - 0{,}00007xy - 0{,}00008x^2 - 0{,}00008y^2$	41,84
$Ca = 23{,}31 + 0{,}0478x - 0{,}0141y - 0{,}00016x^2$	16,33
$Mg = 11{,}175 - 0{,}0064x + 0{,}0185y - 0{,}00013y^2$	24,12
$K = -0{,}05 + 0{,}004x + 0{,}003y - 0{,}00001xy - 0{,}00001x^2 - 0{,}00001y^2$	41,16
$P = 12{,}798 + 0{,}00293x - 0{,}137y + 0{,}00021xy + 0{,}000498y^2$	36,04
$Da = 0{,}972 + 0{,}0010x + 0{,}00082y - 0{,}0000074xy$	6,65

* A: Arena. L: Limo. Ar: Arcilla. MO: Materia orgánica. Ca: Calcio. Mg: Magnesio. K: Potasio. P: Fósforo. Da: Densidad aparente.

Resultados muy similares de tendencia a los de este trabajo fueron obtenidos por Arango (2004) en suelos Vertic Haplustalfs de la misma finca. La tendencia espacial observada en la distribución de las propiedades del suelo, puede estar mostrando el efecto de la dinámica aluvial que dio origen al material parental del mismo, así como el de las prácticas de manejo intensivas que se han llevado a cabo en la finca durante más de 35 años de explotación agrícola con mecanización, riego y fertilización (Mallarino, 1996; Cambardella & Karlen, 1999; Paz-González *et al.*, 2000; Arango, 2004; Obando *et al.*, 2006; Jaramillo *et al*, 2012).

Al llevar a cabo la confirmación de los supuestos para el análisis de semivarianza en los residuos de las propiedades estudiadas, se encontró que los residuales de K y de P no presentaron distribución normal ni simétrica, por lo que se efectuó una transformación logarítmica de sus valores originales, al igual que lo tuvo que hacer Arango (2004) en suelos vérticos cercanos a los de este estudio. Con los datos transformados también se presentó tendencia espacial y los nuevos residuos fueron normales y simétricos para el log K (valor p de Shapiro-Wilk de 0,2852 y sesgo de -1,0356), pero no para el log P (valor p de Shapiro-Wilk de 0,0284 y sesgo de 3,5857). Después de someter el P a un análisis y exclusión de valores anómalos y extremos, tampoco fue posible hacer que la distribución fuera normal ni simétrica, comportamiento observado también por Silva *et al.* (2011) en Alfisoles de Brasil, y que ha sido atribuido por varios autores, citados por aquellos, a la aplicación continua de este elemento como fertilizante y a su poca movilidad en el suelo. Por lo anterior, se optó por hacer el análisis de semivarianza con los residuos del log P (reslogP), ya que fueron los datos menos desviados de las condiciones estadísticas óptimas. En resumen, las variables definitivas para hacer semivarianza fueron: residuos de arena (resA),

residuos de limo (resL), residuos de arcilla (resAr), residuos de materia orgánica (resMO), residuos de pH (respH), residuos de calcio (resCa), residuos de magnesio (resMg), residuos del log de potasio (reslogK), residuos del log de fósforo (reslogP) y residuos de la densidad aparente (resDa).

En la Tabla 3 y en la Figura 2 se muestran los resultados de los análisis de semivarianza realizados con las propiedades del suelo mencionadas anteriormente. Con el Ca no se obtuvo modelo de semivarianza (nugget puro) y con el Mg se consiguió un modelo lineal que no pudo resolver el problema de la dependencia espacial con las distancias de muestreo utilizadas. El resto de las variables presentaron modelos esféricos para caracterizar su dependencia espacial. En todas las variables que presentaron modelo limitado, la dependencia espacial fue alta (C/Sill > 75%), según los criterios de Cambardella *et al.* (1994), y tuvieron un rango promedio de 38,3 m.

Tabla 3. Resultados del análisis de semivarianza simple con los residuos de las variables estudiadas (Alcance: 170 m. Lag: 30 m. Pares en el lag 1: 163).

Variable[1]	Modelo	Nugget	Sill	Rango (m)	C/Sill (%)[2]	R^2 (%)	RSS
resA	Esférico	1,48	24,48	41,0	94,0	28,3	52,2
resL	Esférico	1,22	11,28	59,9	89,2	79,2	3,71
resAr	Esférico	2,06	24,12	35,5	91,5	71,0	3,02
respH	Esférico	0,001	0,021	33,9	94,1	9,3	4,0E-5
resMO	Esférico	0,001	0,354	31,7	99,7	12,7	4,2E-3
resCa	Nugget	8,65	8,65	-	0	-	1,27
resMg	Lineal	2,156	2,156	-	0	26,6	0,055
reslogP	Esférico	0,00126	0,0154	40,6	91,8	50,4	7,3E-6
reslogK	Esférico	0,00083	0,011	32,9	92,4	5,4	1,4E-5
resDa	Esférico	0,00058	0,019	31,0	97,0	26,7	3,4E-6

[1] res: residuo. log: logaritmo base 10. A: Arena. L: Limo. Ar: Arcilla. MO: Materia orgánica. Ca: Calcio. Mg: Magnesio. K: Potasio. P: Fósforo. Da: Densidad aparente.
[2] C: Variabilidad estructurada = Sill - Nugget.

En la Figura 2 se aprecia que la forma de los semivariogramas experimentales de resA, resL, respH, resMO, reslogP y reslogK implica la presencia de cambios lineales o de parches en la distribución de las propiedades en el terreno, como lo han mostrado Jaramillo (2008b), Jaramillo *et al.* (2008, 2012, 2013), Kerry y Oliver (2004), Krasilnikov (2008) y Webster y Oliver (2007), lo que puede estar relacionada con los procesos de sedimentación aluvial torrencial, característica de ríos trenzados como el que originó la terraza donde se ubican los suelos de este estudio.

La distribución en parches mencionada en el párrafo anterior fue evidenciada para la mayoría de las propiedades del suelo, en los mapas de la Figura 3. Cabe resaltar el hecho de que la Da también presente dicho patrón de parches, a pesar de que su semivariograma no lo sugiere (Krasilnikov, 2008; Krasilnikov & Sidorova, 2008). La Da tiene una relación de dependencia muy marcada con la MO, y la distribución espacial de esta se presenta en parches (Figura 3) que pudo haber sido transmitida, parcialmente, a la Da.

Solo los contenidos de Ca y Mg presentaron una distribución espacial en patrones lo suficientemente simples (Figura 2) como para permitir el establecimiento de áreas homogéneas para su manejo.

El comportamiento espacial mostrado por las demás propiedades fue demasiado complejo y produjo una gran cantidad de áreas pequeñas, que generan unas unidades homogéneas de manejo de tamaño muy reducido que no hacen viable el establecimiento de prácticas intensivas de manejo, dentro de un programa de Agricultura de Precisión.

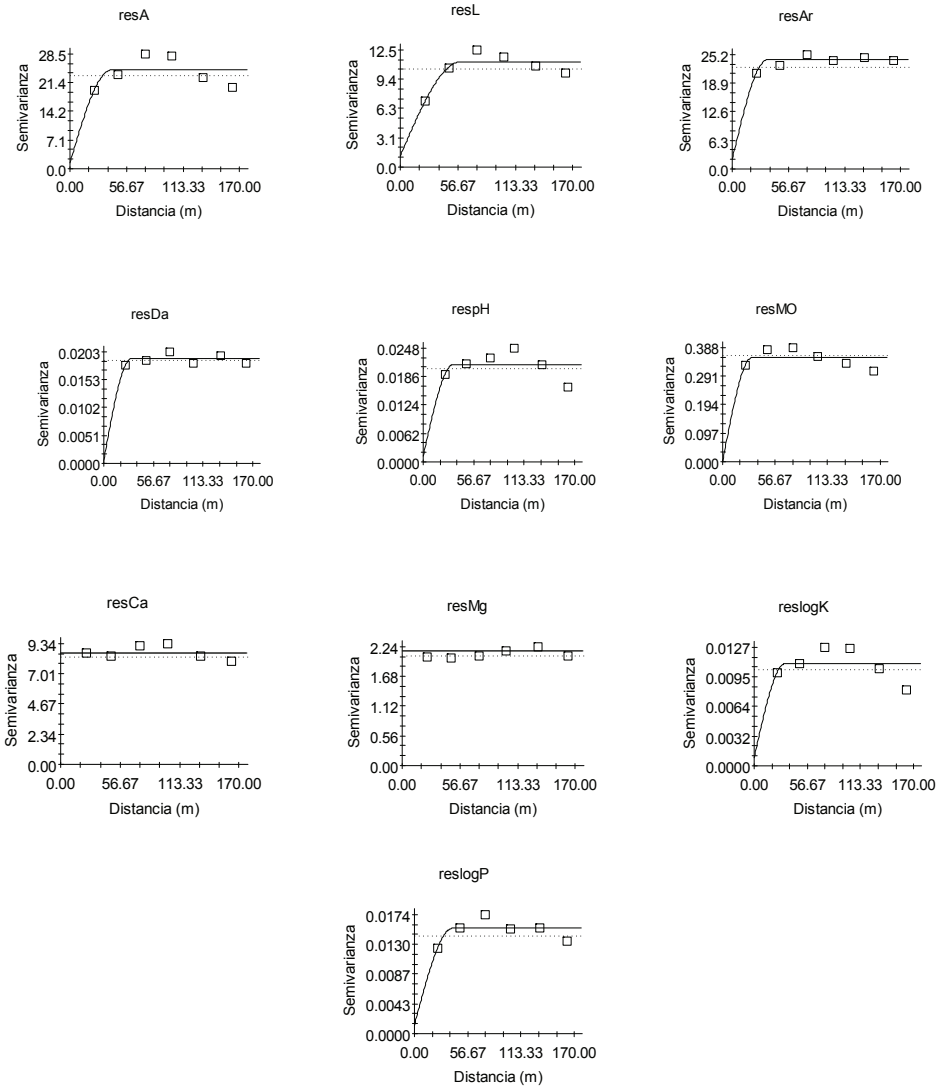

Figura 2. Semivariogramas experimentales (puntos) y teóricos (líneas) de los residuales de las propiedades del suelo estudiado.

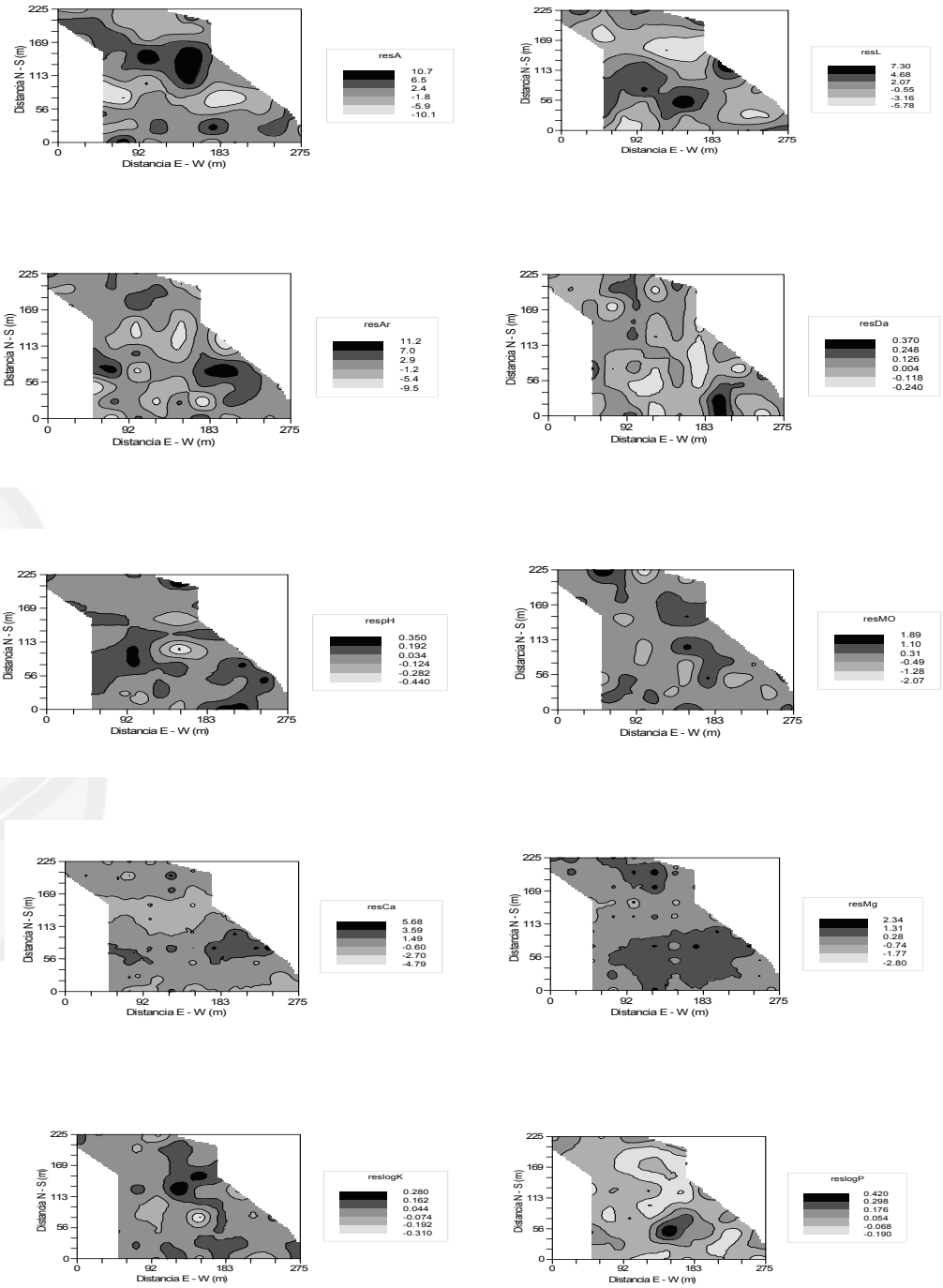

Figura 3. Mapas de isolíneas de las propiedades del suelo evaluadas (res: Residuos. log: logaritmo base 10).

CONCLUSIONES

En todas las propiedades analizadas se presentó tendencia espacial cuadrática que obligó a realizar los análisis de semivarianza con los residuos de la regresión utilizada para confirmar la estacionaridad de los datos.

El patrón espacial en parches, dominante en la mayoría de las propiedades de este suelo, se atribuye a la sedimentación relativamente torrencial que se produce en la llanura aluvial de los ríos trenzados y que fue la que dio origen a la terraza aluvial en la que se llevó a cabo el estudio, así como al uso agrícola intensivo que ha tenido esta parte de la finca durante más de tres décadas. Este comportamiento hace poco viable la utilización de prácticas de manejo de agricultura de precisión en este lote, debido a que resultan muchas áreas homogéneas de tamaño muy reducido en él.

AGRADECIMIENTOS

A los estudiantes D. Álvarez, A. Castillo, W. Duque, C. Higuita, G. Ochoa y A. Ospina, por su colaboración en el muestreo en campo. Al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por facilitar la realización de los análisis de los suelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFÍCAS

Amador, J. A., Wang, Y., Savin, M. C. & Görres, J. H. 2000. Fine-scale spatial variability of physical and biological soil properties in Kingston, Rode Island. Geoderma. 98:83-94.

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. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Colombia.

Briggs, C. A. D., Busacca, A. J. & McDaniel, P. A. 2006. Pedogenic processes and soil-landscape relationships in North Cascades National Park, Washington. Geoderma. 137:192-204.

Cambardella, C. A. & Karlen, D. 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. Prec Agric. 1:5-14.

Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Parking, T. B. & Karlen, D. L. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Sci Soc of Am J. 58:1501-1511.

Diggle, P. J. & Ribeiro, P. J. 2007. Model-based geostatistics. Springer Science, New York, USA.

Facchinelli, A., Sacchi, E. & Mallen, L. 2001. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. Environmental Pollution. 114:313-324.

Gallardo, A. & Maestre, F. T. 2008. Métodos geoestadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos. pp. 215-272. En: Maestre, F. T., Escudero, A. & Bonet, A. (eds.). Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: Métodos y aplicaciones. Editorial Dykinson SL, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España.

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.

Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. Geoderma. 89(1-2):1-45.

Guastaferro, F., Castrignanò, A., De Benedetto, D., Sollitto, D., Troccoli, A. & Cafarelli, B. 2010. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. Prec Agric. 11:600-620.

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). 1992. Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación. ICA, Tibaitatá.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2007. Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Antioquia. Tres tomos. IGAC, Bogotá, D.C.

Jaramillo, D. F. 2006. Efecto de la variabilidad sistemática de la producción de fríjol en experimentos de fertilización. Segunda siembra. Rev Fac Nal Agr Medellín. 59(1):3147-3165.

Jaramillo, D. F. 2008a. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). Rev Fac Nal Agr 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. 2009. Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). Rev Fac Nal Agr Medellín. 62(1):4907-4921.

Jaramillo, D. F. 2010. 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. 2011. El suelo: Origen, Propiedades, Espacialidad. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Jaramillo, D. F., González, H. & Álvarez, F. 2008. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-mecánicas de suelos de textura pesada. Rev CES Med Vet y Zootec. 3(2):10-19.

Jaramillo, D. F., Sadeghian, S. & Lince, L. A. 2012. Agricultura de precisión en el manejo de la fertilización en el cultivo del café en Colombia. Informe de año sabático. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia - Cenicafé. Medellín, Colombia.

Jaramillo, D. F., Sadeghian, S. & Lince, L. A. 2013. Variabilidad espacial de las bases en un Andisol de la zona cafetera central colombiana. Boletín de Ciencias de la Tierra. 33:111-124.

Kerry, R. & Oliver, M. 2004. Average variograms to guide soil sampling. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 5:307-325.

Krasilnikov, P. 2008. Variography of discrete soil properties. pp. 12-25. En: Krasilnikov, P., Carré, F. & Montanarella, L. (eds.). Soil geography and geostatistics: Concepts and Applications. Institute for Environment and Sustainability, European Communities, Luxembourg.

Krasilnikov, P. & Sidorova, V. 2008. Geostatistical analysis of the spatial structure of acidity and organic carbon in zonal soils of the Russian plain. pp. 55-67. En: Krasilnikov, P., Carré, F. & Montanarella, L. (eds.). Soil geography and geostatistics: Concepts and Applications. Institute for Environment and Sustainability, European Communities, Luxembourg.

Lin, Y. B., Lin, Y. P., Liu, Ch. W. & Tan, Y. Ch. 2006. Mapping of spatial multi-scale sources of arsenic variation in groundwater on ChiaNan floodplain of Taiwan. Science of the Total Environment. 370:168-181.

Lin, Y. P. 2002. Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals. Environmental Goeology. 42:1-10.

Mallarino, A. P. 1996. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. Soil Sci Soc of Am J. 60:1473-1481.

Obando, F., Villegas, A., Betancur, J. & Echeverri, L. 2006. Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands arenoso de la región andina central colombiana. Rev Fac Nal Agr 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, Venezuela.

Paz-González, A., Vieira, S. R. & Taboada, M. 2000. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. Geoderma. 97:273-292.

Sadeghian, S. 2008. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. Guía práctica. Boletín Técnico No. 32. Cenicafé, Chinchiná.

Schabenberger, O. & Pierce, F. J. 2002. Contemporary statistical model for the plant and soil sciences. CRC Press, New York, USA.

Silva, J., de Assis Júnior, R. N., Rocha, S. S. & Camacho, J. H. 2011. Spatial variability of an Alfisol cultived with sugarcane. Ciencia e Investigación Agraria. 38(1):155-164.

Webster, R. & Oliver, M. 2007. Geostatistics for environmental scientists. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England.