

VARIABILIDAD ESPACIAL DE PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS EN UN *TYPIC UDIVITRANDS*, ARENOSO DE LA REGIÓN ANDINA CENTRAL COLOMBIANA

Franco Humberto Obando Moncayo¹; Andrés Mauricio Villegas Hincapié²; Jorge H. Betancur P.³ y Leyder Echeverri Tafur⁴

RESUMEN

Se estudió la variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands arenoso de la granja experimental Tesorito de la Universidad de Caldas, ubicado en la Cordillera Central Colombiana a 5° 01'47" N, 75° 26' 03" W y 2280 msnm. El área experimental se localiza en un Piedemonte Coluvial, con un manejo antecedente y actual en pastos, frutales de clima frío moderado y hortalizas. Se realizó un muestreo sistemático en red con una distancia aproximada entre sitios de muestreo de 30 m en un área efectiva de 3,96 ha; para un total de 60 sitios. El análisis geoestadístico se llevó a cabo en tres etapas: 1) análisis exploratorio de los datos utilizando los software Statgraphics Plus v 2.0 y SPSS 9.0, 2) análisis estructural o semivariografía. 3) interpolación por el método Kriging puntual utilizando el paquete geoestadístico GS+ versión 5.3b. Los modelos esférico y exponencial fueron los de mejor ajuste a los modelos experimentales excepto para el DPM, que se ajustó a un modelo lineal (Nugget puro). El alcance para las variables analizadas se encuentra dentro de la distancia máxima (350 m) del área de muestreo considerada para el cálculo de los semivariogramas, excepto para el fósforo que presentó un alcance de 479,4 metros. El alcance fluctuó entre 33,9 m para el Na y 308,5 m para el DPM. La variabilidad espacial de atributos del suelo en el predio experimental es alta, siendo mayor en propiedades químicas, igualmente, permitió visualizar la variabilidad espacial del deterioro estructural del suelo coincidiendo con la zona de mayor variabilidad química.

¹ Profesor Asistente. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 275. Manizales, Colombia. <fobando1@yahoo.com>

² Investigador Asistente. Centro Nacional de Investigaciones de Café. CENICAFÉ. A.A. 2427 Manizales, Colombia. <andres.villegas@cafedecolombia.com>

³ Asistente de Investigación. Universidad de Caldas. Grupo de Investigación en Ecosistemas del Suelo. A.A. 2427. Manizales, Colombia. <ecosuelo@ucaldas.edu.co>

⁴ Asistente de Investigación. Universidad de Caldas. Grupo de Investigación en Ecosistemas del Suelo. A.A. 2427. Manizales, Colombia. <leydere2000@yahoo.com>

Recibido: Mayo 12 de 2005; aceptado: Octubre 10 de 2005.

Palabras claves: análisis geoestadístico, variabilidad espacial, manejo por sitio específico.

ABSTRACT

SPATIAL VARIABILITY OF CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF A SANDY TYPIC UDIVITRANDS IN THE COLOMBIAN CENTRAL ANDEAN ZONE

A study of the spatial variability of the chemical and physical properties of a Sandy Typic Udivitrands was conducted in the Tesorito Experimental Farm of Universidad de Caldas, located in the Colombian Central Cordillera at 5° 01'47" N, 75° 26' 03" W and 2280 m elevation. The experimental plot was located in a Coluvial Piedmont with previous and current soil use and management based on pastures, moderately cold weather fruits and horticultural crops. A systematic sampling of an approximately 30 m grid was carried out at 15 cm depths with an effective area of 3,96 ha for 60 sites. The geostatistical analysis was carried out in three stages: 1) exploratory analysis of the data using the STATGRAPHICS Plus v 2.0 and SPSS 9.0 software packages; 2) structural analysis or "semivariography"; 3) interpolation by punctual Kriging using the geostatistical package GS + version 5.3b. Spherical and exponential models best fit the theoretical models except for DPM (Weighted Mean of Water Stable Aggregates) which better fit a linear model (pure Nugget). Ranges for spatial dependence for the analyzed variables were within the maximum distance (350 m) of the sampling area considered for the calculation of the semivariograms, except for phosphorous that showed a range of 479,4 m. Range fluctuated between 33,9 m for Na and 308,5 m for DPM. Spatial variability of soil attributes of the experimental plot was high, being higher for chemical properties. Geostatistical analysis allowed visualization of the spatial variability of soil structural deterioration which coincided with the area of greatest chemical variability.

Key words: geostatistical analysis, spatial variability, site specific management.

A comienzos de los años 1960, luego de muchos trabajos empíricos llevados a cabo por investigadores en Sudáfrica, George Matheron publicó sus tratados sobre la teoría de las variables regionalizadas (Clark 1979). Una variable regionalizada, es una función que describe un fenómeno natural geográficamente distribuido (Ovalles 1991). La aplicación de la teoría de las variables regionalizadas para solucionar problemas en geo-

logía y minería dio origen a la Geoestadística (Clark 1979). La Geoestadística, se define como una ciencia aplicada que estudia las variables distribuidas espacialmente, partiendo de una muestra representativa del fenómeno en estudio. Se basa en el hecho que los datos se correlacionan espacialmente, es decir, un dato se relaciona con otros cercanos, pero a medida que se alejan del mismo la dependencia espacial

disminuye (González, 2003). La dependencia espacial ha sido reconocida desde hace dos décadas para propiedades del suelo (Trangmar, Yost y Uehara 1985) y se manifiesta más fuertemente en las propiedades químicas (Webster 1985, citado por Ponce de León *et al.* 1999). Otros autores sin embargo, atribuyen mayor variabilidad a las propiedades físicas (Nielsen, Biggar y Erh 1973). Mediante el uso de modelos que representan la relación entre la semivarianza y la distancia, denominados semivariogramas, según se indica en la Figura 1, es posible definir la estructura espacial de atributos del suelo.

La semivarianza es una medida de la falta de similitud que existe entre

observaciones situadas a una determinada distancia; mientras más similares sean las observaciones, menor la semivarianza (Ovalles 1991). Su valor experimental se calcula mediante la siguiente ecuación:

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

Donde $\gamma(h)$ es el valor experimental de la semivarianza de datos separados por una distancia h , N es el número de pares de puntos de muestreo separados por la distancia h , $Z(x_i)$ es el valor de la variable Z en el punto muestreado x_i , y $Z(x_i + h)$ es el valor de la propiedad Z en el punto muestreado a una distancia $x_i + h$.

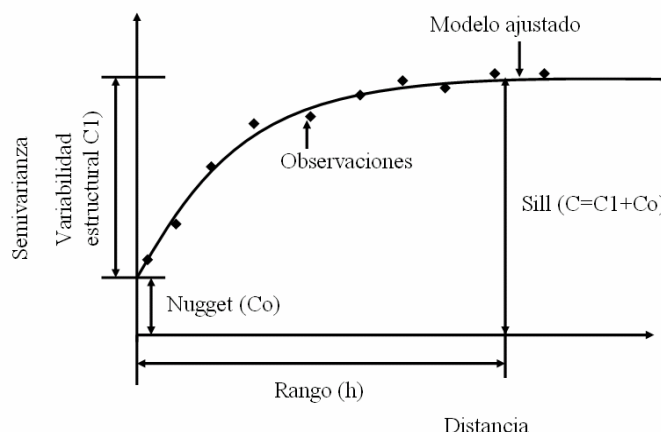


Figura 1. Estructura de un semivariograma.

La semivarianza con frecuencia aumenta con la distancia hasta un valor máximo a partir del cual tiende a ser constante; el umbral de máxima semivarianza se conoce como *meseta* o *sill* (C) y está compuesto por la suma de la semivarianza estructural (C_1) y la semivarianza aleatoria o nugget (C_0). El *efecto pepita* o *nugget* (C_0) representa una discontinuidad en el origen, que puede ser causada bien por errores experimentales, o por la presencia de variaciones espaciales a escalas menores que la mínima distancia de muestreo (Paz, Gómez y Taboada 1996). La distancia desde el origen hasta donde se inicia el *sill* se denomina *alcance* o *rango* (a) e indica que en muestras tomadas a distancias más cortas su valor está relacionado espacialmente, mientras que las que se toman a distancias mayores no están relacionadas espacialmente, debido a que la semivarianza se hace igual a la varianza de la muestra, lo que implica variación aleatoria (Trangmar, Yost y Uehara 1985). La granja Tesorito de la Universidad de Caldas, posee un área la cual por su condición topográfica hace posible la implementación de cultivos transitorios (hortalizas) y semipermanentes (frutales de clima frío); por tanto esta es la zona de mayor impacto en cuanto uso y manejo del suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas del suelo en un paisaje productivo localizado en la granja experimental Tesorito de la Universidad de Caldas y

la viabilidad en la implementación de tecnologías orientadas al manejo del suelo por sitio específico a escala predial.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en un predio de la granja experimental Tesorito de la Universidad de Caldas, ubicada en un piedemonte coluvial de la Cordillera Central Colombiana a $5^{\circ} 01'47''$ N, $75^{\circ} 26' 03''$ W y 2280 msnm, en la zona de vida bosque húmedo Montano Bajo (bh – MB), con un relieve inclinado, con pendientes de 7° - 15° . Se realizó un muestreo sistemático en red con una distancia aproximada entre sitios de muestreo de 30 m en un área efectiva de 3,96 ha; para un total de 60 sitios, correspondientes a las intersecciones, las cuales se georreferenciaron con GPS Garmin GPSMAP 76S®. El modelo digital de terreno (MDT) de la granja experimental Tesorito (Naranjo 2001), las curvas a nivel del área de trabajo y los sitios de muestreo se muestran en la Figura 2. El suelo en el predio experimental se clasifica como *Typic Udivitrands arenoso*, Consociación Tesorito (Betancur y Trejos 2004), con uso en pasturas para ganadería lechera y cultivos comerciales de hortalizas y frutales de clima frío moderado. En cada sitio de muestreo y a una profundidad de 15 cm, se tomaron muestras de suelo de aproxima-

damente 800 g, 300 g para determinar estabilidad estructural mediante el diámetro ponderado medio de agregados estables al agua (DPM) de acuerdo con las recomendaciones de

Pla 1983 y 500 g para análisis químico de caracterización y físico según las metodologías descritas en Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) 1990.

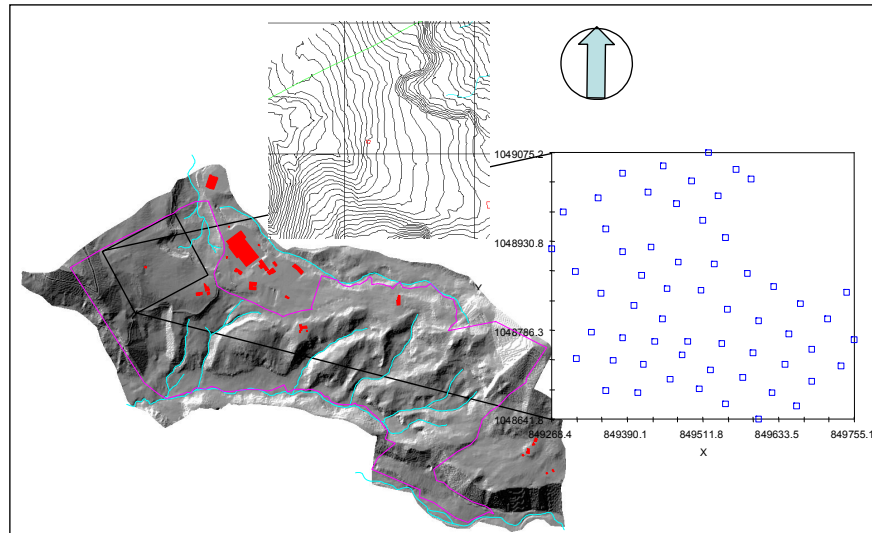


Figura 2. Modelo digital de terreno de la granja experimental Tesorito, curvas a nivel y ubicación espacial de los sitios de muestreo en el área del trabajo. Cordillera Central Colombiana.

El análisis geoestadístico se llevó a cabo en tres etapas: 1) análisis exploratorio de los datos, con el fin de establecer los supuestos de normalidad, se realizó la estadística descriptiva y se aplicó la prueba de Shapiro-Wilks (S.W.) considerando que una distribución de frecuencias es simétrica y está próxima a la normalidad cuando la media, la mediana y la moda tienen valores

muy próximos y el coeficiente de asimetría es inferior a 1 (Paz, Gómez y Taboada 1996). Con los datos que cumplieron el supuesto de distribución normal o simétrica se procedió a confirmar el supuesto de estacionariedad. Este supuesto considera que el nivel promedio de la variable debe ser constante en todos los puntos del área de estudio, es decir, no deben existir tendencias (Giraldo 2003). El

cumplimiento del supuesto se verificó de acuerdo con la metodología presentada por Arango 2004, que consiste en el desarrollo de modelos de regresión lineal múltiple de la forma: $variable = a + bX + cY + dXY$, en los cuales se describe la relación entre la variable dependiente y dos variables independientes, donde X y Y corresponden a las coordenadas planas y XY a la interacción de ambas coordenadas. Para establecer la estacionaridad a partir de los modelos de regresión se realizó un proceso iterativo de evaluación de la significancia de los modelos de regresión. Con las variables que presentaron modelos significativos se trabajó con los residuales de la regresión, los que a su vez deben cumplir con los supuestos de igualdad de varianza (igual S^2) ausencia de autocorrelación de los residuos y distribución normal o simétrica evalua-

dos en los supuestos de la regresión. Para determinar la ausencia de autocorrelación se utilizó el estadístico D de Durbin – Watson (Arango 2004). Igualmente se realizó un análisis de correlación Pearson para las 15 variables evaluadas en el estudio. 2) análisis estructural o semivariografía. Las propiedades que cumplieron los supuestos de normalidad o simetría se consideraron para continuar hacia la etapa de análisis estructural. Se calcularon los semivariogramas experimentales y se ajustaron a semivariogramas teóricos. 3) Interpolación según la metodología sugerida por Moral 2004, a partir de los semivariogramas ajustados, se generaron mapas 2D de contornos de las propiedades, mediante el método de interpolación Kriging puntual (Vieira, Nielsen y Biggar 1981, Nielsen, Wierenga y Biggar 1983 citados por Madero, Herrera y Castaño 2000).

Tabla 1. Métodos de análisis utilizados para la caracterización química y física del suelo, en la granja experimental Tesorito. Cordillera Central Colombiana.

Variable	Método utilizado
Diámetro ponderado medio	Pla 1983
Distribución de partículas (arena, limo y arcilla)	Hidrómetro de Boyoucos. IGAC 1990.
Profundidad a la capa de Lapilli	Medida directamente en campo.
pH relación 1:1 (Agua suelo)	Potenciómetro IGAC 1990.
Carbono orgánico (CO)	Colorimétrico de Walkley-Black. IGAC 1990.
Fósforo (P)	Bray II modificado. IGAC 1990.
Ca, Mg, K y Na.	Espectrofotómetro de absorción atómica. IGAC 1990.
CIC	Colorimetría (IGAC 1990).
Bases Totales (BT)	Calculado
Saturación de Bases (SB)	Calculado

Para el análisis estadístico se utilizaron los software Statgraphics Plus v 2.0 y SPSS 9.0 para Windows. Los semivariogramas y los mapas de contornos se calcularon utilizando el paquete geoestadístico GS+ versión 5.3b. Las coordenadas geográficas obtenidas con el GPS, se transformaron a coordenadas planas x e y .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2, resume la estadística descriptiva y la prueba de normalidad de Shapiro Wilks para el conjunto de variables analizadas en el estudio. El pH y CO presentaron distribución normal. Ca, Mg, K y BT, se ajustaron a una distribución normal con datos transformados a logaritmo natural ($\ln$). La raíz cuadrada del contenido de arena presentó distribución simétrica (media: 8,5, mediana: 8,5, moda 8,6 y un coeficiente de asimetría de -0,094). De acuerdo con las consideraciones de Ortega 1987, el pH osciló entre extremadamente ácido a ligeramente ácido, el contenido de bases intercambiables, P, CIC variaron entre bajo y alto. En las propiedades físicas la amplitud del rango resultó mayor en la profundidad a la capa de Lapilli comparado con las demás variables físicas, y la arena presentó el menor C.V. (3,81 %). El contenido de P presentó el mayor C.V. con un valor de 91 %. El alto C.V. de P concuerda con varios trabajos reportados en la literatura que reportan incluso valo-

res superiores al 100 % (Ovalles 1991, Paz, Gómez y Taboada 1996, Melchiori y Echeverría 1998, Ponce de León *et al.* 1999, Sadeghian *et al.* 2001, Jaramillo 2002, Silva *et al.* 2003). Con base en los límites de C.V. para las propiedades del suelo, propuestos por Warrick y Nielsen 1980, citados por Ochoa, Suárez y Sadeghian 2003, se encontró una baja variación (C.V. < 12 %) para pH, contenido de arena y contenido de limo, una variación media (C.V. entre 12 – 60 %) para Ca, K, Na, CIC, BT, SB, CO, contenido de arcilla, DPM y profundidad a la capa de Lapilli y una alta variación (C.V. > 60 %) para P y Mg. Estos resultados confirman que tanto el rango como el coeficiente de variación son parámetros que permiten una visión general de la variabilidad de atributos del suelo.

Se encontraron correlaciones positivas y significativas entre todas las variables químicas excepto para la variable Na, esto se podrá utilizar en la obtención de funciones de edafotransferencia hacia el futuro como es el caso del pH, Ca, Mg, y P con las Bases Totales y la Saturación de Bases para el suelo evaluado. Es de resaltar la correlación encontrada entre la profundidad a la capa de Lapilli y el contenido de Mg, la CIC y el CO, tal como se muestra en la Tabla 3.

La Tabla 4 presenta los modelos de regresión lineal múltiple. Se puede observar que los R^2 ajustados de los modelos son bajos. Sin embargo, con base en el valor p se puede apreciar

que los modelos de las variables pH, $\ln$ Ca, $\ln$ Mg, $\ln$ K, y $\ln$ BT son no significativos, no existen tendencias y en consecuencia se asume el cumplimiento del supuesto de estacionariedad. Para CO y la raíz cuadrada del contenido de arena los modelos fueron significativos, es decir, no se cumple el supuesto de estacionariedad, existen tendencias y en consecuencia fue necesario trabajar con los residuales de la regresión. Se encontró que CO y raíz cuadrada del contenido de arena cumplieron el supuesto de normalidad y no presentaron autocorrelación, con valores p de Shapiro Wilks (S.W.) de 0,39 y 0,92 respectivamente. En efecto, para que se cumpla el supuesto de ausencia de autocorrelación el valor del estadístico D debe ser mayor a 1,4 (Arango 2004), aunque depende también del número de variables, y del nivel de significancia. La Figura 3, muestra la distribución de frecuencias de las variables originales y las que necesitaron ser transformadas, con su respectiva curva normal.

La Tabla 5 presenta los modelos teóricos; se asumió la condición de isotropía, debido a que el número de datos era menor de 100 (Moral 2004). Los modelos esférico y exponencial fueron los de mejor ajuste a los modelos experimentales excepto para el DPM, que se ajustó a un modelo lineal (Nugget puro); este modelo describe un fenómeno puramente aleatorio, sin correlación entre las muestras, cualquiera que sea la distancia que las

separe (Nielsen y Wendroth 2003). El r^2 del ajuste del semivariograma teórico al semi-variograma experimental para las variables $\ln$ Ca, $\ln$ K, $\ln$ BT; Raíz cuadrada SB, los residuales del CO, el Logaritmo del P, los residuales de la raíz cuadrada del contenido de arena y el logaritmo natural de la profundidad a la capa de Lapilli. ($> 0,84$). El pH, el LOGARITMO natural de Mg, la CIC y la raíz cuadrada del limo presentaron un r^2 moderado (0,62 a 0,77) a diferencia del logaritmo del Na, y el diámetro ponderado medio que presentaron r^2 de 0,03 y 0,27 respectivamente. El alcance para las variables analizadas se encuentra dentro de la distancia máxima (350 m) del área de muestreo considerada para el cálculo de los semivariogramas, excepto para el fósforo que presentó un alcance de 479,4 m. El alcance fluctuó entre 33,9 m para el Na y 308,5 m para el DPM. Las variables presentaron una alta dependencia espacial según la clasificación propuesta por Cambardella 1994, citado por Cambardella y Karlen (1999) quien considera una fuerte dependencia espacial cuando el semivariograma tiene un efecto Nugget $< 25 \%$ de la semivarianza total. En este rango se encuentran las variables pH, $\ln$ Ca, $\ln$ Mg, $\ln$ K, $\log$ Na, CIC, $\ln$ BT, $\sqrt{SB}$, Residuales del CO, $\log$ P y Arcilla. Los residuales de la $\sqrt{\text{arena}}$, el $\sqrt{\text{limo}}$ y el $\ln$ Lapilli, presentaron una dependencia espacial moderada y el DPM, presentó una dependencia espacial débil.

Tabla 2. Estadística descriptiva para las propiedades químicas y físicas originales y transformadas de acuerdo a la normalidad. Granja experimental Tesorito. Cordillera Central Colombiana.

Variable	Min	Max	Media	Moda	C.V.	D.E.	VAR.	Cuantiles			Asimetría	Curtosis	S.W.	valor p	D. W.
								25	50	75					
pH	4.31	6.26	5.11	5.19	7.38	0.38	0.14	4.82	5.11	5.33	0.59	0.59	0.9761	0.2878	1.70
Ca	0.99	11.01	4.54	2.19	52.34	2.38	5.66	2.66	4.18	5.58	0.78	-0.06	0.9363	0.0037	1.63
In Ca	-0.01	2.40	1.37	0.78	39.96	0.55	0.30	0.98	1.43	1.72	-0.25	-0.50	0.9828	0.5599	1.51
Mg	0.17	6.45	1.71	0.78	72.62	1.24	1.55	0.78	1.40	2.13	1.61	2.90	0.8462	<0.0001	1.94
In Mg	-1.77	1.86	0.30	-0.25	237.76	0.71	0.51	-0.25	0.34	0.76	-0.27	0.45	0.9791	0.3952	1.79
K	0.14	3.30	0.63	0.46	92.67	0.58	0.34	0.31	0.46	0.69	2.88	9.29	0.6596	<0.0001	1.56
In K	-1.97	1.19	-0.72	-0.91	92.16	0.66	0.44	-1.19	-0.79	-0.38	0.76	0.76	0.9606	0.0509	1.79
Na	0.02	0.41	0.09	0.05	83.96	0.07	0.01	0.05	0.07	0.10	3.16	11.86	0.6578	<0.0001	1.75
log Na	-1.70	-0.39	-1.17	-1.30	23.93	0.28	0.08	-1.30	-1.16	-1.00	0.28	0.95	0.9557	0.0293	1.84
CIC	3.64	32.46	20.35	19.20	21.36	4.35	18.89	17.88	20.28	22.83	-0.71	3.62	0.9364	0.0038	1.31
BT	1.34	18.04	6.97	7.26	53.55	3.73	13.93	4.25	6.33	8.87	0.98	0.41	0.9176	0.0006	1.64
In BT	0.29	2.89	1.80	1.98	29.92	0.54	0.29	1.45	1.84	2.18	-0.14	-0.21	0.9841	0.6268	1.47
SB	8.93	68.64	33.17	-	45.52	15.10	227.94	21.77	30.33	43.38	0.53	-0.51	0.9572	0.0344	1.55
V SB	2.99	8.28	5.61	-	23.52	1.32	1.74	4.67	5.51	6.59	0.10	-0.71	0.9811	0.4779	1.46
CO	3.00	8.16	5.02	4.38	22.18	1.11	1.24	4.22	4.88	5.84	0.60	0.23	0.9675	0.3903	1.61
P	10.50	598.60	140.67	16.52	90.88	127.84	16343	50.81	96.14	193.25	1.61	2.57	0.8336	<0.0001	1.66
log P	1.02	2.78	1.97	1.22	21.47	0.42	0.18	1.70	1.98	2.29	-0.34	-0.35	0.9790	0.3897	1.21
Arena	67.07	79.28	71.95	73.27	3.81	2.75	7.54	70.93	73.05	73.29	-0.10	-0.10	0.9377	0.0043	1.42
V arena	8.19	8.90	8.48	8.56	1.91	0.16	0.03	8.42	8.55	8.56	-0.15	-0.14	0.9366	0.9238	1.42
Limo	14.50	24.94	20.68	18.49	10.66	2.20	4.86	18.58	20.59	22.5	-0.16	0.30	0.9322	0.0025	1.41
V limo	3.81	4.99	4.54	4.30	5.39	0.24	0.06	4.31	4.54	4.74	-0.35	0.55	0.9286	0.0017	1.40
Arcilla	6.14	10.25	7.37	6.16	16.35	1.20	1.45	6.17	8.17	8.23	0.41	-0.74	0.7513	<0.0001	1.86
DPM	0.67	2.64	1.89	-	19.37	0.37	0.13	1.69	1.93	2.12	-0.94	1.90	0.9429	0.0073	1.61
Lapilli	13.00	55.00	26.90	22.00	34.91	9.39	88.19	20.50	24.50	31.50	1.14	1.11	0.9127	0.0004	0.93
In Lapilli	2.56	4.01	3.24	3.09	10.09	0.33	0.11	3.02	3.20	3.45	0.34	-0.21	0.9832	0.5785	1.03

Ca, Mg, K, Na, CIC en cmol (+) kg⁻¹ suelo; BT, SB, CO, Arena, Limo, Arcilla en %; P en mg kg⁻¹ suelo; DPM en mm y profundidad a la capa de Lapilli en cm; (D.E.) Desviación Estándar. (CV) Coeficiente de Variación; (VAR) Varianza, (S.W.)

Tabla 3. Análisis de correlación Pearson para un conjunto de 15 variables, tanto químicas y físicas evaluadas de un suelo *Typic Udivitrands arenoso*. Granja experimental Tesorito. Cordillera Central Colombiana.

	pH	Ca	Mg	K	Na	CIC	BT	SB	CO	P	Arena	Limo	Arcilla	DPM	Lapilli
pH	1,00	0,67**	0,41**	0,26*	-0,07	0,17	0,60**	0,67**	-0,01	0,52**	0,32*	-0,25*	-0,27*	0,04	-0,12
Ca		1,00	0,69**	0,48**	-0,13	0,38*	0,94**	0,92**	0,32*	0,72**	0,30*	-0,28*	-0,17	0,02	0,14
Mg			1,00	0,67**	0,08	0,47*	0,88**	0,75**	0,43*	0,54**	0,06	-0,01	-0,11	-0,12	0,32*
K				1,00	0,14	0,32*	0,69**	0,59**	0,28*	0,46*	-0,09	0,12	-0,01	-0,24	0,31*
Na					1,00	-0,01	-0,02	-0,04	0,10	-0,05	0,04	0,01	-0,12	0,10	0,19
CIC						1,00	0,45*	0,16	0,77**	0,12	0,10	-0,06	-0,11	0,22	0,55**
BT							1,00	0,93**	0,39*	0,71**	0,20	-0,17	-0,15	-0,07	0,25*
SB								1,00	0,13	0,76**	0,25*	-0,22	-0,17	-0,12	0,02
CO									1,00	-0,09	0,16	-0,08	-0,21	0,29*	0,52**
P										1,00	0,08	-0,11	0,02	-0,15	-0,02
Arena											1,00	-0,90**	-0,62**	0,26*	0,15
Limo												1,00	0,23	-0,19	-0,19
Arcilla													1,00	-0,25*	0,01
DPM														1,00	0,25*
Lapilli															1,00

** Correlación altamente significativa $p = 0,01$. * Correlación significativa $p = 0,05$.

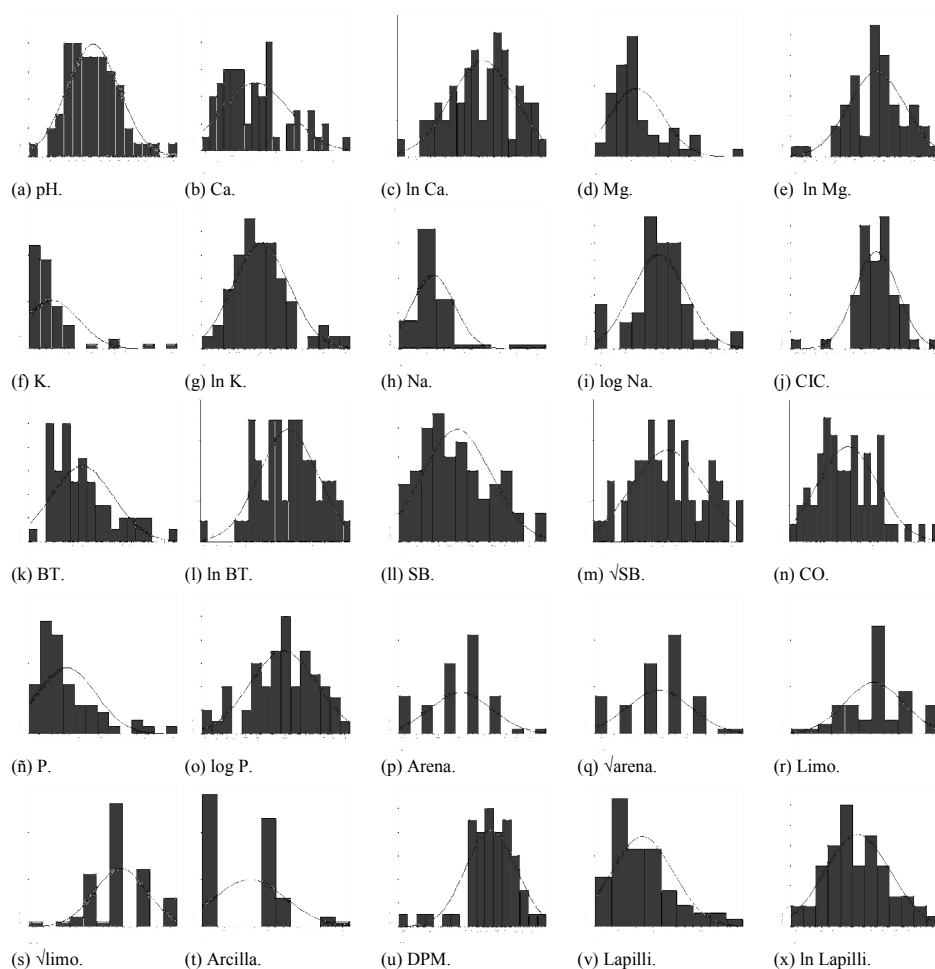


Figura 3. Distribución de frecuencias para las variables originales y transformadas utilizadas en el estudio y su curva normal. (a) pH, (b) Ca, (c) ln Ca, (d) Mg, (e) ln Mg, (f) K, (g) ln K, (h) Na, (i) log Na, (j) CIC, (k) BT, (l) ln BT, (ll) SB, (m) $\sqrt{SB}$, (n) CO, (ñ) P, (o) log P, (p) Arena, (q) $\sqrt{arena}$, (r) Limo, (s) $\sqrt{limo}$, (t) Arcilla, (u) DPM, (v) Lapilli, (x) ln Lapilli. Granja experimental Tesorito. Cordillera Central Colombiana.

Tabla 4. Modelos de regresión lineal múltiple para evaluar la estacionaridad. Granja experimental Tesorito. Cordillera Central Colombiana.

Modelo	R ² ajustado (%)	Valor <i>p</i>
pH = -622,089 + 0,000597997Y**	1,9	0,1
ln Ca = -880,343 + 0,00103793X**	3,9	0,06
ln Mg = 756,279 - 0,000720799Y**	0,0	0,3
ln K = -741,629 + 0,000872057X**	2,8	0,1
ln BT = -730,594 + 0,000862156X**	2,2	0,1
CO = 123526,0 - 0,14208X - 0,11485Y + 1,32028E-7XY*	13,6	0,01
Raíz arena = -418,12 + 0,000406741Y*	6,18	0,0310

**Modelo de regresión significativo (valor *p* < 0,05). **Modelo de regresión no significativo (valor *p* > 0,05)

La Tabla 5 presenta los modelos teóricos; se asumió la condición de isotropía, debido a que el número de datos era menor de 100 (Moral 2004). Los modelos esférico y exponencial fueron los de mejor ajuste a los modelos experimentales excepto para el DPM, que se ajustó a un modelo lineal (Nugget puro); este modelo describe un fenómeno puramente aleatorio, sin correlación entre las muestras, cualquiera que sea la distancia que las separe (Nielsen y Wendroth 2003). El *r*² del ajuste del semivariograma teórico al semivariograma experimental para las variables Ln Ca, Ln K, Ln BT; Raíz cuadrada SB, los residuales del CO, el Logaritmo del P, los residuales de la raíz cuadrada del contenido de arena y el logaritmo natural de la profundidad a la capa de Lapilli. (> 0,84). El pH, el logaritmo natural de Mg, la CIC y la raíz cuadrada del limo presentaron un *r*² moderado (0,62 a

0,77) a diferencia del logaritmo del Na, y el diámetro ponderado medio que presentaron *r*² de 0,03 y 0,27 respectivamente. El alcance para las variables analizadas se encuentra dentro de la distancia máxima (350 m) del área de muestreo considerada para el cálculo de los semivariogramas, excepto para el fósforo que presentó un alcance de 479,4 m. El alcance fluctuó entre 33,9 m para el Na y 308,5 m para el DPM. Las variables presentaron una alta dependencia espacial según la clasificación propuesta por Cambardella 1994, citado por Cambardella y Karlen (1999) quien considera una fuerte dependencia espacial cuando el semivariograma tiene un efecto Nugget < 25% de la semivarianza total. En este rango se encuentran las variables pH, ln Ca, ln Mg, ln K, log Na, CIC, ln BT, √SB, Residuales del CO, log P y Arcilla. Los residuales de la √arena, el √limo y el ln Lapilli, pre

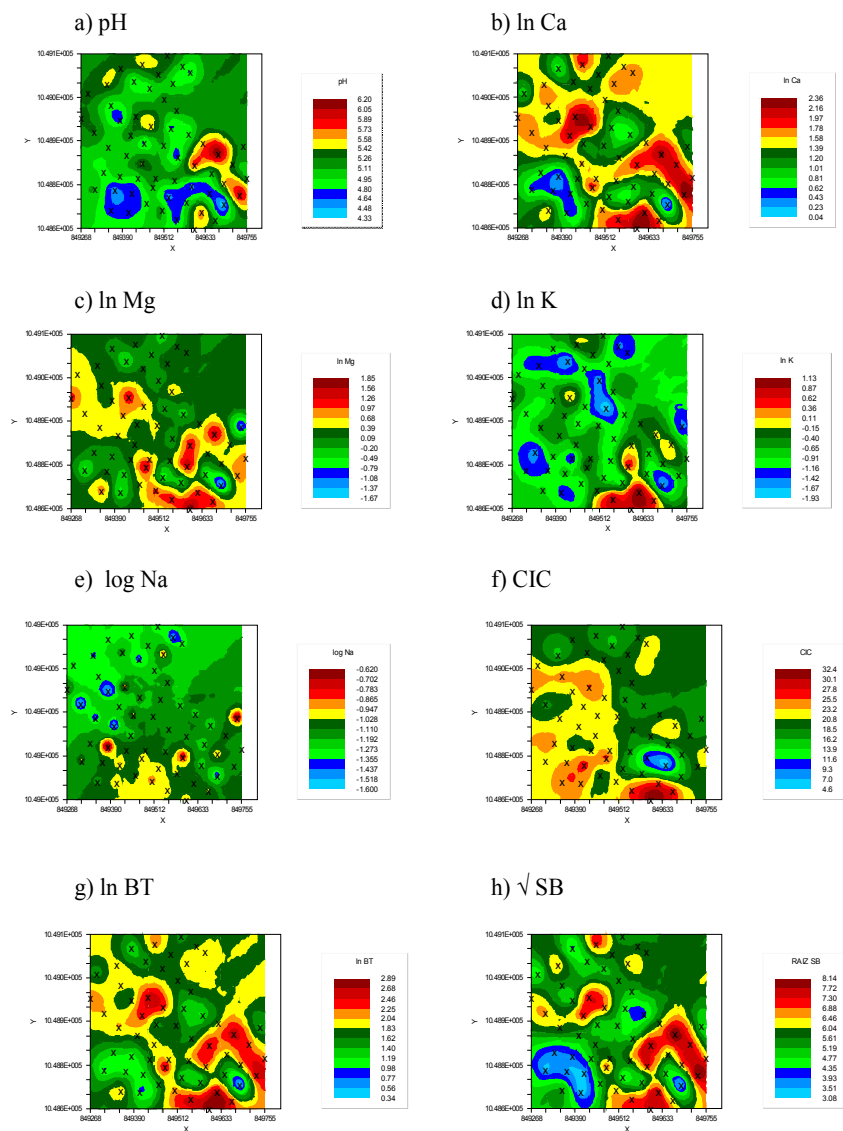
sentaron una dependencia espacial moderada y el DPM, presentó una dependencia espacial débil.

La Figura 4 presenta los mapas de contornos generados mediante Kriging puntual. Los resultados concuerdan con lo expuesto por diversos autores, quienes afirman que las propiedades que presentan mayor variabilidad espacial son aquellas que son sensibles al manejo del suelo (Paz, Gómez y Taboada 1996, Ochoa, Suárez y Sadeghian 2003, Ovalles, 1991 citado por Arango, 2004), siendo en este caso más apreciable en los atributos químicos que en los físicos. En efecto, el predio experimental, localizado en un piedemonte Coluvial, con pendientes entre 7° al 15° presenta un

manejo antecedente y actual variable en términos de uso y manejo de suelos basado en pasturas en el Ápice, frutales de clima frío en el Cuerpo y hortalizas en la parte inferior o Pie del piedemonte Coluvial. El elemento del paisaje correspondiente al pié, ha sido sometido a labranza continua con azadón y aplicación de intensiva de abonos químicos por efecto del cultivo de hortalizas. Los mapas de contornos muestran un mayor variación espacial de las propiedades químicas en el área comprendida entre las coordenadas 1048641,8 en Y, 849511,8 en X; 1048786,3 en Y, y 849755,1 en X, área que corresponde al del Pie del piedemonte Coluvial. En cambio en el Ápice, los contenidos de nutrientes tienden a ser homogéneos.

Tabla 5. Modelos teóricos ajustados a los semivariogramas experimentales para evaluar la variabilidad espacial. Granja experimental Tesorito. Cordillera Central Colombiana.

Variable	Modelo	Sill	Nugget	Rango (m)	R ²	$\left(\frac{\text{Nugget}}{\text{Sill}}\right) * 100$
pH	Esférico	0,1402	0,0001	73,6	0,77	0,07
ln Ca	Esférico	0,2982	0,0001	92,1	0,95	0,03
ln Mg	Esférico	0,4890	0,0010	57,8	0,64	0,20
ln K	Esférico	0,4310	0,0010	96,6	0,89	0,23
log Na	Exponencial	0,0722	0,0037	33,9	0,03	5,12
CIC	Esférico	18,9400	0,0100	99,90	0,71	0,05
ln BT	Esférico	0,2832	0,0001	79,5	0,94	0,04
? SB	Esférico	1,7110	0,0010	101,3	0,90	0,06
Res. CO	Esférico	0,9700	0,1000	77,7	0,95	10,31
log P	Exponencial	0,2492	0,0001	479,4	0,95	0,04
Res. ? arena	Exponencial	0,1800	0,0500	78,2	0,96	27,78
? limo	Esférico	0,0646	0,0310	147,9	0,62	47,99
Arcilla	Esférico	1,4360	0,0011	73,8	0,84	0,08
DPM	Lineal (Nugget puro)	0,1700	0,1700	308,5	0,27	100,00
ln Lapilli	Esférico	0,1170	0,0455	220,9	0,90	38,89



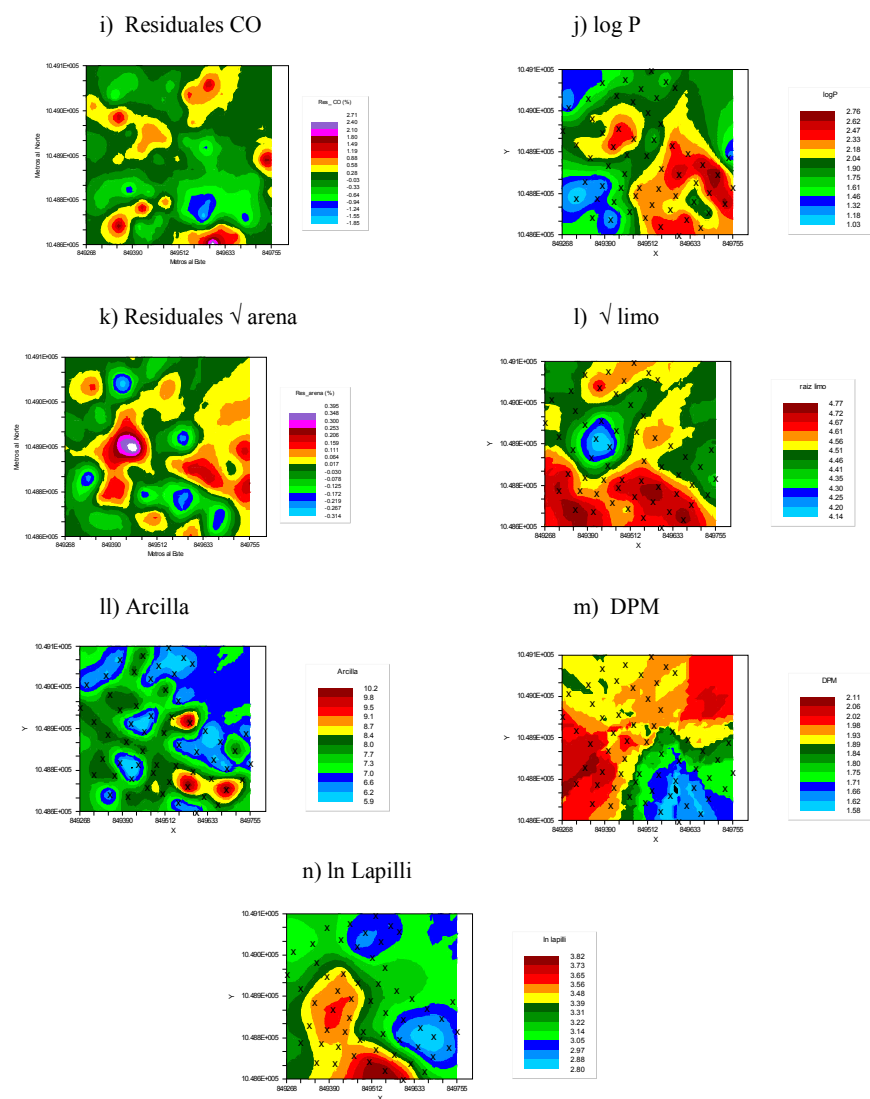


Figura 4. Mapas de contornos para diferentes propiedades físicas y químicas evaluadas. (a) pH, (b) ln Ca, (c) ln Mg, (d) ln K, (e) log Na, (f) CIC, (g) ln BT, (h) $\sqrt{\text{SB}}$, (i) Residuales CO, (j) log P, (k) Residuales $\sqrt{\text{arena}}$, (l) $\sqrt{\text{limo}}$, (II) Arcilla, (m) DPM, (n) ln Lapilli. Granja experimental Tesorito. Cordillera Central Colombiana.

Para las variables físicas, el DPM se observa un menor valor para la zona del pié del piedemonte coluvial (menor a 1,71 mm), lo que confirma el

cambio en la estructura del suelo por efecto continuo de la labranza intensiva para el cultivo de hortalizas. Igualmente se observa una menor profundidad a la capa de Lapilli en la zona inferior del área de trabajo y una mayor en el zona superior (profundidades superiores a 22 cm). Además, se observaron mayores contenidos de limo (>22,4 %) y mayores contenido de arcilla (>8,4 %), debido probablemente a procesos de erosión y sedimentación del suelo. En efecto el limo presenta alta susceptibilidad al desprendimiento y transporte por gotas de lluvia (Morgan, 1990) y la arcilla por efecto del deterioro estructural del suelo. Esta área se encuentra enmarcada en la zona de mayor variación de propiedades químicas.

CONCLUSIONES

El estudio permite concluir que la variabilidad espacial de atributos del suelo en el predio experimental es alta, siendo mayor en las propiedades químicas debido posiblemente a efectos del manejo y geomorfología del terreno. Los mapas de contornos muestran un mayor variación espacial de las propiedades químicas en el área comprendida entre las coordenadas 1048641,8 en Y, 849511.8 en X; 1048786.3 en Y, y

849755.1 en X. En cambio la parte superior del piedemonte coluvial tiende a ser homogénea en los contenidos de nutrientes. Igualmente, el trabajo permitió visualizar la variabilidad espacial del deterioro estructural del suelo coincidiendo con la zona de mayor variabilidad química; a su vez permitió delimitar áreas con necesidad de introducir sistemas sostenibles de manejo del suelo.

Mediante el uso de la estadística descriptiva, el cumplimiento de los supuestos básicos del análisis geostatístico y el ajuste de semivariogramas experimentales a modelos teóricos fue posible generar mapas de contornos por el método de interpolación por Kriging puntual, lo que permitió identificar y explicar la variación espacial del suelo en algunas propiedades químicas y físicas, con el propósito de desarrollar un manejo por sitio específico en la zona de mayor uso intensivo de la granja Tesorito de la Universidad de Caldas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Programa Nacional del Medio Ambiente y Hábitat del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología, COLCIENCIAS, por la financiación del proyecto "Desarrollo de indicadores de calidad de suelos de la región andina central. Referencia: Pisos

Montano Bajo y Tropical del Departamento de Caldas". Código 1127-13-10629.

BIBLIOGRAFÍA

Arango A., L. A. 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*). Medellín. 78 h. Tesis Maestría en Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.

Betancur Patiño., Jorge Hernán y Trejos González, Gustavo Adolfo. 2004. Mineralogía y micromorfología de suelos de ladera sitios de referencia: granjas Tesorito, Montelindo y la Cruz, de la Región Andina Central de Colombia. Manizales. 170 h. Tesis Geología. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Cambardella, C. A. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa. En: Journal of Soil Science Society of American. vol. 58, No.5; p. 1501-1511. Citado por Cambardella, C. A. and Karlen, D. L. 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. En: Precision Agriculture. Vol. 1, no.1; p. 10.

Clark, I. 1979. Practical geostatistics. London: Applied Science Publishers. 129 p.

Giraldo H., R. 2003. Introducción a la Geoestadística. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 94 p.

González T., D. M. 2003. Módulo de geoestadística para Excel: aplicación a pesca. En: VI Congreso Gallego de Estadística e Investigación de Operaciones. Disponible en Internet: <http://eioweb.uvigo.es/visgapeio/8> p.; [Consultada: Sep. 2004.]

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 1990. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 5 ed. Bogotá: IGAC. 502 p.

Jaramillo J., D. F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. 595 p.

Melchiori M., R. J. y Echeverría, H. 1998. Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo. I Asociación con las variaciones en el rendimiento del trigo. Disponible en Internet: <http://www.agriculturadeprecision.org/mansit/VariabilidadEspacial.htm>. [Consultada: 9 Sep. 2004].

Moral G., F. J. 2004. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. Disponible en Internet: <http://www.aeet.org/ecosistemas/041/documentos/Revision3.doc>. [Consultada: 12 Sep. 2004.]

Morgan, R. P. C. 1990. Soil erosion and conservation. Essex, England: Longman Scientific & Technical. 298 p.

- Naranjo, J. L. 2001. Modelo digital de terreno de la granja Tesorito de la Universidad de Caldas. Proyecto: desarrollo de indicadores de Calidad del suelo de la región andina central. Referencia: Piso montano bajo y tropical del departamento de Caldas. COLCIENCIAS. Código 1127-13-10629.
- Nielsen, D. R., Biggar, J. W. and ERH, K. T. 1973. Spatial variability of field measured soil water properties. En: Hilgardia. Vol. 42; p. 215-259.
- _____ and Wendroth, O. 2003. Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation. Reiskirchen: Catena Verlag GMBH. 398 p.
- _____, Wierenga, P. J. and Biggar, J. W. 1983. Spatial soil variability and mass transfers from agricultural soils. p. 65-78. En: Symposium on Chemical Mobility and Reactivity in Soil Systems (1981: Atlanta). Proceedings. s.l.: s.n., 1981. p.65-78. Citados por Madero M., E. E., Herrera G., O. A. y Castaño C., A. 2000. La variabilidad espacial en el estudio de la condición física del suelo. En: Acta Agronómica. Vol.50, no. 3-4; p. 41.
- Ochoa M., W. A., Suárez V., S. and Sadeghian, S. 2003. Variabilidad espacial del nitrógeno disponible en andisoles de la zona cafetera colombiana. En: Cenicafe. Vol. 54, no.2; p. 179-189.
- Ortega, D. F. 1987. Sistema de evaluación de la fertilidad del suelo. En: Suelos Ecuatoriales. Vol. 12, no. 2; p. 281-286.
- Ovalles V., F. A. 1991. Evaluación de la variabilidad de suelos a nivel de parcela, para el establecimiento en lotes comerciales en el estado Cojedes. En: Agronomía Tropical. Vol. 41, no. 1; p. 5-22. Citado por: Arango A., L. A. 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*). Medellín. p. 45. Tesis Maestría en Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.
- Paz, A., Gómez, M. J. y Taboada, M. T. 1996. Análisis geoestadístico de las propiedades generales de un suelo de cultivo. En: Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales. Vol. 11, no.1; p. 133-160.
- Pla, S., I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. En: Revista de la Facultad Nacional de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Vol. 32; p. 30-35.
- Ponce De León, D., Pablos, P., Balmaseda, C. y Henriquez, M. 1999. Variabilidad espacial del pH, fósforo y potasio en muestreos de suelos con fines de fertilidad en plantaciones de caña de azúcar en Cuba. En: Bioagro. Vol. 11, no.1; p. 3-11.

- Sadeghian, S., Murgueitio, E., Mejía, C. y Rivera, M. 2001. Ordenamiento ambiental y reglamentación del uso y manejo del suelo en la zona cafetera. p. 96-108. En: Suelos del Eje Cafetero. Pereira: Fondo Editorial del Departamento de Risaralda. 199 p.
- Silva, V. R., Reichert, J., M., Stork, L. y Feijó, S. 2003. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um argissolo vermelho-amarelo distrófico arénico. En: Revista Brasileira de Ciencia do Solo. Vol. 27; p. 1013-1020.
- Statgraphic, 1989. Statistical Graphics System Corp., Version 2.0, USA.
- SPSS Base 9. 0. 1999. Applications guide. Chicago: SPSS Inc.
- Trangmar, B. B., Yost, R. S. and Uehara, G. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. En: Advances in Agronomy. Vol. 38; p. 45-94.
- Webster, R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. En: Advances in Soil Science. Vol. 3; p. 1-70. Citado por: Ponce De León, D.; Pablos, P.; Balmaseda, C. y Henriquez, M. 1999. Variabilidad espacial del pH, fósforo y potasio en muestreos de suelos con fines de fertilidad en plantaciones de caña de azúcar en Cuba. En: Bioagro. Vol. 11, no. 1; p. 9.
- Vieira, S., Nielsen, D. and Biggar, J. 1981. Spatial variability of field-measured infiltration rate. En: Journal of Soil Science Society of America. Vol. 45; p. 1040-1048.
- Warrick, A. W. and Nielsen, D. R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. p. 319-344. En: Applications of soil physics. New York: Academic Press. Citados por: Ochoa M., W. A., Suárez V., S. y Sadeghian, S. 2003. Variabilidad espacial del nitrógeno disponible en andisoles de la zona cafetera colombiana. En: Cenicafé. Vol. 54, no. 2; p.181.