



VARIABILIDAD ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE SUELOS PALMEROS DE COLOMBIA

Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo ¹ ✉

¹: Universidad Nacional de Colombia.

✉: djaramal@unal.edu.co.

Palabras clave:

Dependencia espacial, geoestadística, semivarianza, palma africana, San Alberto-Cesar.

RESUMEN

*En dos suelos de origen aluvial, sembrados con palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq), uno en 1971 y el otro en 2001, se tomaron muestras georreferenciadas en el plato de 60 palmas. Se determinó peso del racimo, densidad aparente, textura, pH y contenidos de materia orgánica, Ca, Mg, K, P, S y B para estudiar el comportamiento espacial de cada propiedad por métodos geoestadísticos. No hubo correlación entre el peso del racimo y las propiedades edáficas, probablemente porque los niveles de los nutrientes están por encima de los valores críticos del cultivo y porque las plantas llegaron a estabilizar sus requerimientos nutricionales.*

En el lote de 1971, la producción, la densidad aparente y los contenidos de arena, limo, arcilla, materia orgánica y Mg tuvieron estructura espacial, y en el de 2001 la producción, la densidad aparente y los contenidos de Mg, K y B la tuvieron.

Exceptuando la Da en ambos lotes, en las propiedades con dependencia espacial ésta fue alta ($C/Sill > 75\%$). La relación promedia $C/Sill$ fue de 76.55% en el lote de 1971 y en el de 2001 fue de 82.425%, indicando mayor control espacial sobre la variabilidad de las propiedades edáficas en el lote de 2001.

Los semivariogramas teóricos mostraron alta dispersión de los puntos alrededor del modelo teórico, sobre todo en el lote de 1971, que indica una alta inestabilidad en la variabilidad, probablemente asociada a una mayor variabilidad aleatoria en este lote. En ambos lotes se hace difícil modelar el comportamiento de las variables para implementar prácticas de agricultura de precisión en ellos.

SPATIAL VARIABILITY OF SOME SOIL CHEMICAL PROPERTIES OF PALM PLANTATIONS IN COLOMBIA

Key words:

Spatial dependence, geostatistics, semivariance, oil palm, San Alberto-Cesar.

ABSTRACT

*In two alluvial soils planted one in 1971 and the other in 2001 with oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq) georeferenced samples in the plate of 60 palms were taken. It was analyzed bunch weight, bulk density, texture, pH and content of organic matter, Ca, Mg, K, P, S and B, to study the spatial behavior of each property. There was no correlation between bunch weight and edaphic properties, probably due to nutrient levels are above critical values for crop and because plants were able to stabilize their nutritional requirements.*

In the plot of 1971, production, bulk density and the content of sand, silt, clay, organic matter and Mg had spatial structure, and in that of 2001 production, bulk density and the content of Mg, K and B. had it.

Except for the Da on both plots, properties with spatial dependence was high ($C/Sill > 75\%$). The average ratio $C/Sill$ was 76.55% in the 1971 plot and in that of 2001 was 82.425%, indicating greater control over the spatial variability of soil properties in the 2001 plot.

Theoretical semivariogram model showed high dispersion of the points around the theoretical model, especially in the lot of 1971, indicating a high instability in the variability, probably associated with a higher random variability present in this plot, that makes it difficult to model the behavior of these variables and implement practices of precision farming in these plots.

SUELOS
ECUATORIALES
45 (2): 55-64

ISSN 0562-5351

Rec.: 11.07.2015

Acep.: 20.11.2015

INTRODUCCIÓN

La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo y depende del tipo de suelo y de la propiedad que se analice. Las propiedades químicas tienen mayor variabilidad que las físicas, y dicha variabilidad es mayor en aquellos suelos que están siendo sometidos a uso agropecuario que en los que están en su condición natural. Además, aquellas propiedades que más se alteran con las prácticas de manejo del suelo (fertilización, riego, etc.) son las que presentan la mayor variabilidad (Ovalles, 1992; Paz-González et al., 2000; Obando et al., 2006; Jaramillo, 2012a; Jaramillo et al., 2012).

La variabilidad de cualquier propiedad edáfica puede ser aleatoria y u o sistemática. La variabilidad espacial es sistemática y se caracteriza porque las propiedades que la presentan adquieren valores diferentes dependiendo de la ubicación y u 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 u o de la dirección a la cual se ubica de otro sitio vecino de muestreo (Jaramillo, 2012b).

La variabilidad espacial se estudia con un grupo de herramientas estadísticas conocidas como “Geoestadística” o “Estadística Espacial”. Ellas estiman y modelan dicha variabilidad en las propiedades que se estudian y se basan en la semivarianza que es una medida de la similitud que hay en los valores de una variable. La semivarianza establece la diferencia que hay entre los valores de una propiedad separados por una determinada distancia y se incrementa en la medida en que las muestras son más disímiles. Si se estima la semivarianza con muestras separadas por diferentes distancias y luego se grafican estos resultados (semivarianza vs distancia entre muestras) se obtiene un semivariograma experimental. A este semivariograma se le ajusta un modelo matemático que represente la variabilidad y se tiene un semivariograma teórico (Jaramillo, 2012b). Cuando una propiedad tiene dependencia espacial, la semivarianza aumenta a medida que aumenta la distancia entre muestras y puede llegar a estabilizarse a una determinada distancia, la cual se convierte en la distancia hasta la cual hay dependencia espacial en la variable y se conoce como “rango” (Webster y Oliver, 2007).

El semivariograma teórico y los datos originales de la variable se pueden utilizar para hacer una interpolación, mediante técnicas de “kriging”, que permite obtener un mapa de la distribución espacial de los valores de la variable que se estudia.

Con este trabajo se quiere estudiar la variabilidad espacial de las propiedades químicas, además de la producción, la textura y la densidad aparente en dos suelos de origen aluvial en los cuales se plantaron cultivos de palma africana (*Elaeis guineensis*) en diferentes épocas: 1971 y 2001.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio

El trabajo se desarrolló en dos lotes de una plantación de palma africana (*Elaeis guineensis*), propiedad de la empresa Indupalma Ltda., ubicada en el kilómetro 10 de la Vía Panamericana, en el municipio de San Alberto, Cesar, y a 92 metros sobre el nivel del mar. Los lotes fueron seleccionados teniendo en cuenta la edad de la plantación: el lote identificado en la plantación con el código F08C fue sembrado en el año 1971, y el lote H9B en 2001. Ambos lotes fueron sembrados con palmas de la variedad Hiro y una densidad de 143 palmas/ha. En la zona se presenta un clima cálido y húmedo con transición al cálido - subhúmedo, con una temperatura media anual de 33.6 °C y una precipitación media anual de 2461 mm, con distribución bimodal (Indupalma-Cenipalma, 2008).

Los suelos están ubicados en el plano de inundación de una llanura aluvial de desborde, con un relieve plano y pendiente rectilínea, larga y con gradiente menor de 1 %. El material parental de los suelos corresponde a aluviones medios y finos. Los suelos del lote F08C se han desarrollado en cubetas y se clasifican como Vertic Endoaquepts, fino, mezclado, activo, isohipertérmico. Son suelos superficiales, de textura pesada, pobremente drenados, moderadamente ácidos en superficie y neutros a medianamente alcalinos en profundidad. Los del lote H9B se han desarrollado en napas de desborde y se clasifican como Fluventic Endoaquepts, franco fino, mezclado, activo, isohipertérmico. Son superficiales, de textura franca, pobremente drenados, moderadamente ácidos en superficie y neutros en profundidad (Indupalma-Cenipalma, 2008).

Muestreo y propiedades determinadas

En noviembre de 2009 se llevó a cabo un muestreo georreferenciado de los suelos en cada uno de los lotes, en el plato de 60 palmas seleccionadas en forma aleatoria. En cada sitio se tomó una muestra de suelo sin disturbar, con un cilindro de 99.42 cm³ de volumen, que se utilizó para determinar la densidad aparente del suelo (Da, Mg m⁻³), y una muestra simple disturbada de 1 kg aproximadamente. El muestreo se

realizó entre 0 y 20 cm de profundidad. En la Figura 1 se muestra la distribución espacial de las muestras tomadas.

Con la muestra disturbada se determinaron las propiedades del suelo que se evalúan en los análisis de rutina para fertilidad en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, los cuales son: contenidos de arena, limo, arcilla (A, L, Ar respectivamente, %) por el método del hidrómetro; contenido de materia orgánica (MO, %) por el método de Walkley-Black;

pH en agua 1:1 por el método potenciométrico; contenidos de bases intercambiables (Ca, Mg, K, cmolc kg⁻¹ de suelo) extraídas con acetato de amonio 1N, neutro y contenido de fósforo disponible (P, mg kg⁻¹ de suelo) por el método de Bray II. Se determinaron, además, el contenido de azufre disponible (S, mg kg⁻¹ de suelo) con el método del fosfato monocálcico 0.008 M y el contenido de boro disponible (B, mg kg⁻¹ de suelo) extraído con agua caliente. A todas las palmas seleccionadas se les pesó el racimo cosechado (PR, kg).

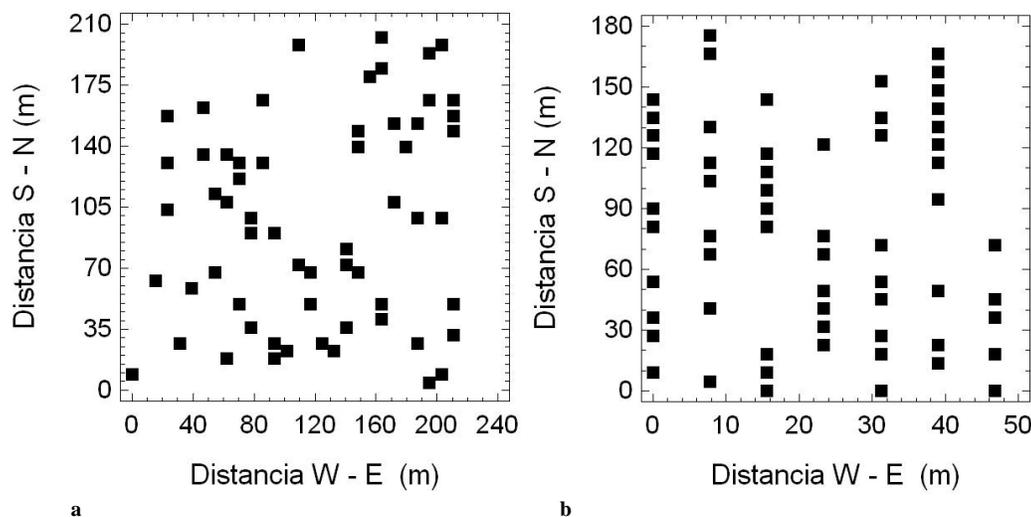


FIGURA 1. Distribución de los sitios de muestreo en los lotes experimentales. a: Lote F08C. b: Lote H9B. En la dirección S-N están las hileras de cultivo.

Análisis estadísticos

Básicos

A todos los resultados de laboratorio se les hizo un análisis descriptivo que incluyó los estadísticos básicos que caracterizaron cada una de las variables y su distribución de probabilidad: promedio, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación, valores mínimo y máximo, cuartiles superior e inferior y asimetría. Se hicieron luego análisis de correlación lineal de Pearson entre todas las variables para establecer posibles relaciones entre ellas. Estos análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa Statgraphics Centurion XV-II.

Análisis de variabilidad espacial

Se estudió la dependencia espacial de los índices de calidad de suelo calculados mediante un análisis geoestadístico para el cual el grupo de datos debe tener una distribución normal o, por lo menos, presentar simetría en la distribución, y tener varianzas

y medias homogéneas (estacionaridad) en todos los grupos de distancias definidos (Jaramillo, 2012b).

Cuando no se cumplió la normalidad ni la simetría, los datos fueron transformados utilizando logaritmos, raíz cuadrada o inverso (Webster y Oliver, 2007; Gallardo y Maestre, 2008; Jaramillo, 2009, 2012b). La confirmación de la estacionaridad en cada variable se hizo con un análisis de regresión múltiple de segundo orden (Diggle y Ribeiro, 2007) utilizando las coordenadas de los puntos de muestreo en la ecuación [1] como variables independientes. Cuando se presentó tendencia, es decir, se encontró un modelo de regresión significativo, el análisis de semivarianza se hizo con los residuos del análisis de regresión correspondiente.

$$V = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_3 XY + \beta_4 X^2 + \beta_5 Y^2 \quad [1]$$

Donde V es la variable; β_0, \dots, β_5 son coeficientes; X, Y son coordenadas.

La semivarianza se estimó mediante la siguiente relación:

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

Donde $\gamma(h)$ es la semivarianza; $N(h)$ es el número de pares de observaciones comparadas en cada distancia; $Z(x_i)$ es el valor de la variable en el sitio x ; $Z(x_i + h)$ es el valor de la variable en un sitio ubicado a una distancia h del sitio x .

Todos los análisis geoestadísticos se hicieron con el programa GS+ 9.0

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estadística descriptiva

En las Tablas 1 y 2 se presentan los estadísticos que caracterizaron los suelos estudiados en cada lote. En general, puede decirse que en promedio los suelos son de textura media, tienen pH ligeramente ácido, moderado a bajo contenido de MO, alto contenido de bases y una Da relativamente baja, adecuada a la textura que presentan (Jaramillo, 2014). Los menores valores de Da, A, L, Ar, pH, Ca y Mg se presentaron en el suelo del lote sembrado en 2001, mientras que los menores de MO, P, S y B estuvieron en el del lote sembrado en 1971.

Los máximos valores en el coeficiente de variación, y con amplias diferencias entre los nutrientes, correspondieron al lote de 1971. El comportamiento de la variabilidad se puede deber a

que el muestreo en el lote de 1971 cobijó un área mayor que en el de 2001 y, teniendo en cuenta la fisiografía de la zona, es posible que una mayor área tenga más probabilidades de incluir una mayor variabilidad espacial en las variables que se relacionen con el material parental de los suelos que un área menor, es decir, podría tratarse de un problema de escala (Cambardella et al., 1994; Sun et al., 2003; Webster y Oliver, 2007; Jaramillo, 2012a). Otra posibilidad es que el manejo de la fertilización edáfica no haya sido adecuado, probablemente debido al sistema de fertilización con dosis iguales para áreas relativamente grandes (entre 25 y 30 ha) que se utiliza en el cultivo y que pueden generar problemas de sobre y sub-fertilización en sectores del lote. Estos efectos de sobre y sub-fertilización por la aplicación de dosis uniformes de fertilizante se han detectado en estudios de variabilidad espacial y de agricultura de precisión (Castrignanò et al., 2000; Espinosa, 2000; Martínez, 2003; Arango, 2004; Castañeda, 2011). Esta última hipótesis también la sustentan, en parte, los altos valores de asimetría (> 2) que se presentaron en los contenidos de la mayoría de nutrientes (K, P, S y B) en ambos lotes.

La Tabla 3 muestra que hay diferencia significativa en los estadísticos de la producción y de la mayoría de las propiedades edáficas estudiadas, entre los lotes. Sólo Da y K no fueron diferentes en ambos lotes. Las diferencias en los promedios de L y Ar pueden estar confirmando el efecto del material parental, y las de MO, Ca, Mg, P, S y B pueden relacionarse tanto con efectos del material parental, como con efectos acumulados en el tiempo del manejo del cultivo, como se planteó anteriormente.

TABLA 1. Estadísticos* básicos del peso del racimo y de las propiedades** del suelo sembrado en 1971.

	PR	Da	A	L	Ar	pH	MO	Ca	Mg	K	P	S	B
Promedio	18.3	1.19	21.73	47.8	30.47	6.03	3.64	14.02	3.18	0.263	13.78	1.05	0.051
Mediana	17.0	1.19	20.0	48.0	30.0	6.0	3.8	13.95	3.1	0.23	10.0	0.5	0.0
DE	5.588	0.111	3.888	4.535	4.253	0.366	1.048	2.444	0.875	0.171	12.8	1.227	0.088
CV (%)	30.54	9.321	17.89	9.49	13.96	6.07	28.79	17.43	27.49	64.96	92.86	116.87	173.08
Mínimo	10.0	0.95	16.0	38.0	22.0	5.5	1.5	9.4	1.3	0.08	5.0	0.0	0.0
Máximo	35.0	1.41	34.0	58.0	40.0	6.9	5.7	20.7	5.1	1.19	79.0	4.0	0.3
Q1	14.0	1.115	20.0	45.0	28.0	5.75	2.75	12.7	2.7	0.15	7.0	0.0	0.0
Q3	22.0	1.265	24.0	50.0	34.0	6.3	4.3	15.5	3.75	0.335	15.5	2.0	0.1
Sesgo	2.725	-0.197	3.014	0.319	-0.17	2.034	-0.479	0.805	-0.32	9.36	11.926	2.21	4.797
K-S	0.295	0.934	0.028	0.425	0.193	0.147	0.872	0.878	0.51	0.078	0.976	0.001	0.0001

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior. K-S: Valor p de la prueba de normalidad con el estadístico de Kolmogorov-Smirnov (Valor $p > 0.05$ indica distribución normal).

** PR: Peso de racimo (kg). Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}). A, L, Ar y MO: Contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica, respectivamente (%). Ca, Mg, K: (cmolc kg^{-1} de suelo). P, S, B: (mg kg^{-1} de suelo).

TABLA 2. Estadísticos* básicos del peso del racimo y de las propiedades** del suelo sembrado en 2001.

	PR	Da	A	L	Ar	pH	MO	Ca	Mg	K	P	S	B
Promedio	13.0	1.18	23.37	50.8	25.83	6.09	3.02	11.63	2.84	0.299	48.35	13.77	0.311
Mediana	12.25	1.18	20.0	52.0	26.0	6.0	2.9	11.6	2.8	0.265	46.0	13.0	0.285
DE	3.413	0.134	10.732	8.511	3.85	0.631	0.589	2.981	0.883	0.159	25.227	6.985	0.137
CV (%)	26.28	11.41	45.93	16.75	14.90	10.34	19.48	25.62	31.06	53.10	52.18	50.74	44.04
Mínimo	7.5	0.77	10.0	24.0	16.0	4.6	1.7	5.5	1.0	0.08	26.0	3.0	0.1
Máximo	24.0	1.48	60.0	62.0	34.0	7.8	4.5	20.0	4.7	0.92	209.0	38.0	0.92
Q1	11.0	1.11	16.0	48.0	24.0	5.75	2.6	9.8	2.15	0.2	35.0	9.0	0.22
Q3	14.75	1.26	28.0	58.0	28.0	6.55	3.3	13.1	3.6	0.37	51.5	17.5	0.345
Sesgo	2.631	-0.858	4.437	-3.723	-0.220	-0.273	1.728	1.837	0.233	4.411	14.599	3.078	6.121
K-S	0.427	0.443	0.012	0.156	0.235	0.743	0.397	0.673	0.548	0.335	0.009	0.552	0.062

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior. K-S: Valor p de la prueba de normalidad con el estadístico de Kolmogorov-Smirnov (Valor $p > 0.05$ indica distribución normal).

** PR: Peso de racimo (kg). Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}). A, L, Ar y MO: Contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica, respectivamente (%). Ca, Mg, K: (cmolc kg^{-1} de suelo). P, S, B: (mg kg^{-1} de suelo).

TABLA 3. Valores de probabilidad de la comparación de los estadísticos básicos de las variables* entre los dos lotes estudiados. En negrilla e itálica los valores p que presentaron diferencia significativa al 95 % ($p < 0.05$).

Variables	Valores p de los estadísticos de prueba** para comparación de			
	Medias	Desviación estándar	Medianas	Distribuciones
PR	<i>5.64316E-9</i>	<i>0.000215436</i>	<i>1.94856E-8</i>	<i>2.2135E-7</i>
Da	0.59916	0.142383	0.612261	0.522992
A	0.269962	<i>0</i>	0.434687	<i>0.000627655</i>
L	<i>0.0175148</i>	<i>0.00000303</i>	<i>0.000688441</i>	<i>0.000001636</i>
Ar	<i>6.53816E-9</i>	0.446817	<i>7.7972E-8</i>	<i>0</i>
pH	0.458605	<i>0.00004758</i>	0.327374	0.119623
MO	<i>0.000118096</i>	<i>0.000017326</i>	<i>0.000223755</i>	<i>0.000010577</i>
Ca	<i>0.000004630</i>	0.129924	<i>0.000001972</i>	<i>0.000004229</i>
Mg	<i>0.0362401</i>	0.944898	<i>0.0470503</i>	<i>0.028057</i>
K	0.236852	0.571641	0.100232	0.119623
P	<i>0</i>	<i>5.45623E-7</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
S	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
B	<i>0</i>	<i>0,000967981</i>	<i>0</i>	<i>0</i>

* PR: Peso de racimo (kg). Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}). A, L, Ar y MO: Contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica, respectivamente (%). Ca, Mg, K: (cmolc kg^{-1} de suelo). P, S, B: (mg kg^{-1} de suelo).

** Medias: Prueba-t. Desviación estándar: Prueba-F. Medianas: Prueba de Mann-Whitney. Distribuciones: Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Los análisis de correlación (Tablas 4 y 5) indican que hubo un número importante de correlaciones significativas entre propiedades de los suelos. Hay que resaltar que se presentaron variables como Da y B que no correlacionaron significativamente con ninguna

otra variable en el lote sembrado en 2001, o el Mg que no lo fue en el lote de 1971, aunque sí las tuvieron en el otro lote. También hubo diferencias importantes entre las correlaciones significativas que presentaron la A, la MO y el pH con las demás variables.

TABLA 4. Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre las propiedades edáficas* determinadas y el peso del racimo en el lote sembrado en 1971. En negrilla e itálica los coeficientes que fueron significativos al 95 %.

	Da	A	L	Ar	pH	MO	Ca	Mg	K	P	S	B
A	-0,063											
L	0,378	-0,499										
Ar	-0,345	-0,382	-0,610									
pH	0,473	0,020	0,392	-0,436								
MO	-0,872	0,021	-0,377	0,383	-0,501							
Ca	-0,068	0,001	0,111	-0,119	0,582	0,061						
Mg	-0,193	-0,182	-0,027	0,195	-0,155	0,223	-0,084					
K	-0,198	0,147	-0,512	0,412	-0,099	0,223	-0,260	0,181				
P	0,069	-0,003	-0,028	0,032	0,213	0,024	0,131	-0,327	0,132			
S	-0,141	0,053	0,014	-0,063	-0,015	0,280	-0,141	0,152	0,234	0,251		
B	0,051	-0,166	-0,105	0,263	-0,170	0,038	-0,237	0,142	0,214	0,096	0,420	
PR	-0,216	0,072	-0,188	0,134	-0,076	0,131	-0,153	0,061	0,042	0,049	-0,002	0,082

** PR: Peso de racimo (kg). Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}). A, L, Ar y MO: Contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica, respectivamente (%). Ca, Mg, K: (cmolc kg^{-1} de suelo). P, S, B: (mg kg^{-1} de suelo).

TABLA 5. Coeficientes de correlación lineal de Pearson entre las propiedades edáficas* determinadas y el peso del racimo en el lote sembrado en 2001. En negrilla e itálica los coeficientes que fueron significativos al 95 %.

	Da	A	L	Ar	pH	MO	Ca	Mg	K	P	S	B
A	-0,033											
L	0,005	-0,946										
Ar	0,081	-0,697	0,426									
pH	0,133	0,497	-0,486	-0,312								
MO	0,106	-0,405	0,409	0,223	-0,154							
Ca	0,240	-0,173	0,094	0,275	0,570	0,234						
Mg	0,137	-0,337	0,252	0,381	0,111	0,100	0,264					
K	-0,171	-0,279	0,240	0,248	-0,341	0,170	-0,311	-0,284				
P	-0,117	-0,002	0,067	-0,143	-0,100	0,072	-0,174	-0,351	0,488			
S	-0,029	0,192	-0,107	-0,298	-0,141	0,225	-0,115	-0,343	0,096	0,152		
B	-0,198	0,127	-0,045	-0,253	0,247	0,062	0,003	-0,099	0,033	0,037	0,157	
PR	-0,003	-0,073	0,074	0,040	-0,191	0,210	-0,044	0,007	0,116	0,049	0,192	0,003

** PR: Peso de racimo (kg). Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}). A, L, Ar y MO: Contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica, respectivamente (%). Ca, Mg, K: (cmolc kg^{-1} de suelo). P, S, B: (mg kg^{-1} de suelo).

Es notable la ausencia de correlaciones significativas del peso de los racimos con todas las propiedades edafológicas evaluadas, en ambos lotes, lo que confirma que una vez madura el cultivo, las condiciones nutricionales de la planta se reflejan más en los análisis foliares que en los del suelo (Munévar, 2001). La palma de aceite tiene una exigencia creciente en nutrientes a partir del año de trasplantada la planta y dicha exigencia se estabiliza a partir del quinto año, llegando a ser casi constante (Owen, 1992, 1994; Munévar, 2001) lo que, unido a los niveles relativamente altos de nutrientes en el suelo, con respecto a los niveles críticos para la palma, podría explicar satisfactoriamente la falta de correlaciones significativas entre los contenidos de nutrientes en el suelo y la producción.

Variabilidad espacial de las propiedades edáficas

Al aplicar la fórmula [1] se estableció que en el lote sembrado en 1971 presentaron tendencia espacial L, Da, MO y pH, mientras que en el sembrado en 2001 la presentaron PR, Da, Ar, pH, MO, Mg y S. En las Tablas 6 y 7 se aprecian los parámetros que caracterizaron la dependencia espacial de las propiedades evaluadas en los lotes sembrados en 1971 y 2001, respectivamente.

En el lote sembrado en 1971, la producción y los contenidos de arena, limo, arcilla, materia orgánica y Mg, así como la densidad aparente, tuvieron alguna estructura espacial: su varianza se ajustó a algún modelo diferente al de Nugget puro. En el lote de 2001, fueron la producción, la densidad aparente y los contenidos de Mg, K y B las propiedades que tuvieron estructura espacial.

El modelo de nugget puro es una línea recta paralela al eje x (Figuras 2 y 3), por lo que no muestra acumulación de varianza con la distancia y, por tanto, no hay dependencia espacial en la variable, lo que explica que la relación C/Sill (varianza estructurada o espacial sobre la varianza total) sea igual a cero (Webster y Oliver, 2007; Jaramillo, 2012b). Exceptuando la Da en ambos lotes, en todas las propiedades que hubo dependencia espacial ésta fue alta (C/Sill > 75%), según la clasificación de Cambardella et al. (1994).

Si se promedian los valores de la relación C/Sill de aquellas propiedades estructuradas espacialmente se

observa que la relación promedio en el lote de 1971 fue de 76.55%, mientras que en el de 2001 fue de 82.425%. Estos resultados muestran que hay un mayor control espacial, y menor aleatorio, sobre la variabilidad de las propiedades edáficas en el lote de 2001, lo que puede estar relacionado, aparte de algún efecto fisiográfico (por ejemplo distribución de los sedimentos aluviales), con el poco tiempo que lleva este lote sometido al manejo de la fertilidad del suelo en el cultivo, comparado con el lote de 1971, que puede haber ido perdiendo variabilidad espacial por efecto de homogenización en los suelos por el manejo.

TABLA 6. Parámetros geoestadísticos de la producción y de las propiedades edáficas evaluadas en el lote sembrado en 1971.

Variable*	Modelo	Nugget	Sill	Rango (m)	C/Sill (%)**
PR	Exponencial	0.01	29.15	32.1	100
Log A	Esférico	0.00065	0.0055	40.4	88.2
Res tend L	Esférico	0.01	14.63	25.7	99.9
Ar	Esférico	0.99	19.07	40.8	94.8
Res tend MO	Esférico	0.273	0.954	49.9	71.4
Res tend Da	Lineal	0.007023	-	-	-
Res tend pH	Nugget puro	0.0957	0.0957	-	0
Ca	Nugget puro	5.53014	5.53014	-	0
Mg	Exponencial	0.075	0.799	33.6	90.6
K	Nugget puro	0.02897	0.02897	-	0
Log P	Nugget puro	0.066429	0.066429	-	0
Log S	Nugget puro	0.06095	0.06095	-	0
Log B	Nugget puro	0.001018	0.001018	-	0

* PR: Peso de racimo (kg). Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}). A, L, Ar y MO: Contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica, respectivamente (%). Ca, Mg, K: (cmolc kg^{-1} de suelo). P, S, B: (mg kg^{-1} de suelo). Log: logaritmo base 10. Res tend: Residuos de la regresión de tendencia espacial.

** C: Variabilidad estructurada = Sill - Nugget. Es la parte de la semivarianza que corresponde a la variabilidad espacial. Sill: Variabilidad total.

TABLA 7. Parámetros geoestadísticos de la producción y de las propiedades edáficas evaluadas en el lote sembrado en 2001.

Variable*	Modelo	Nugget	Sill	Rango (m)	C/Sill (%)**
Res tend PR	Esférico	0.001	0.997	13.4	99.9
Log A	Nugget puro	0.033	0.033	-	0
L	Nugget puro	48.02	48.02	-	0
Res tend Ar	Nugget puro	1.027	1.027	-	0
Res tend MO	Nugget puro	1.098	1.098	-	0
Res tend Da	Esférico	0.55	1.254	49.6	56.1
Res tend pH	Nugget puro	1.0978	1.0978	-	0
Ca	Nugget puro	9.34	9.34	-	0
Res tend Mg	Esférico	0.04	1.071	14.1	96.3
Log K	Exponencial	0.0035	0.051	17.4	93.1
Log P	Nugget puro	0.0172	0.0172	-	0
Res tend Log S	Nugget puro	1.054	1.054	-	0
Log B	Exponencial	0.0039	0.0307	22.8	87.2

* PR: Peso de racimo (kg). Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}). A, L, Ar y MO: Contenidos de arena, limo, arcilla y materia orgánica, respectivamente (%). Ca, Mg, K: (cmolc kg^{-1} de suelo). P, S, B: (mg kg^{-1} de suelo). Log: logaritmo base 10. Res tend: Residuos de la regresión de tendencia espacial.

** C: Variabilidad estructurada = Sill - Nugget. Es la parte de la semivarianza que corresponde a la variabilidad espacial. Sill: Variabilidad total.

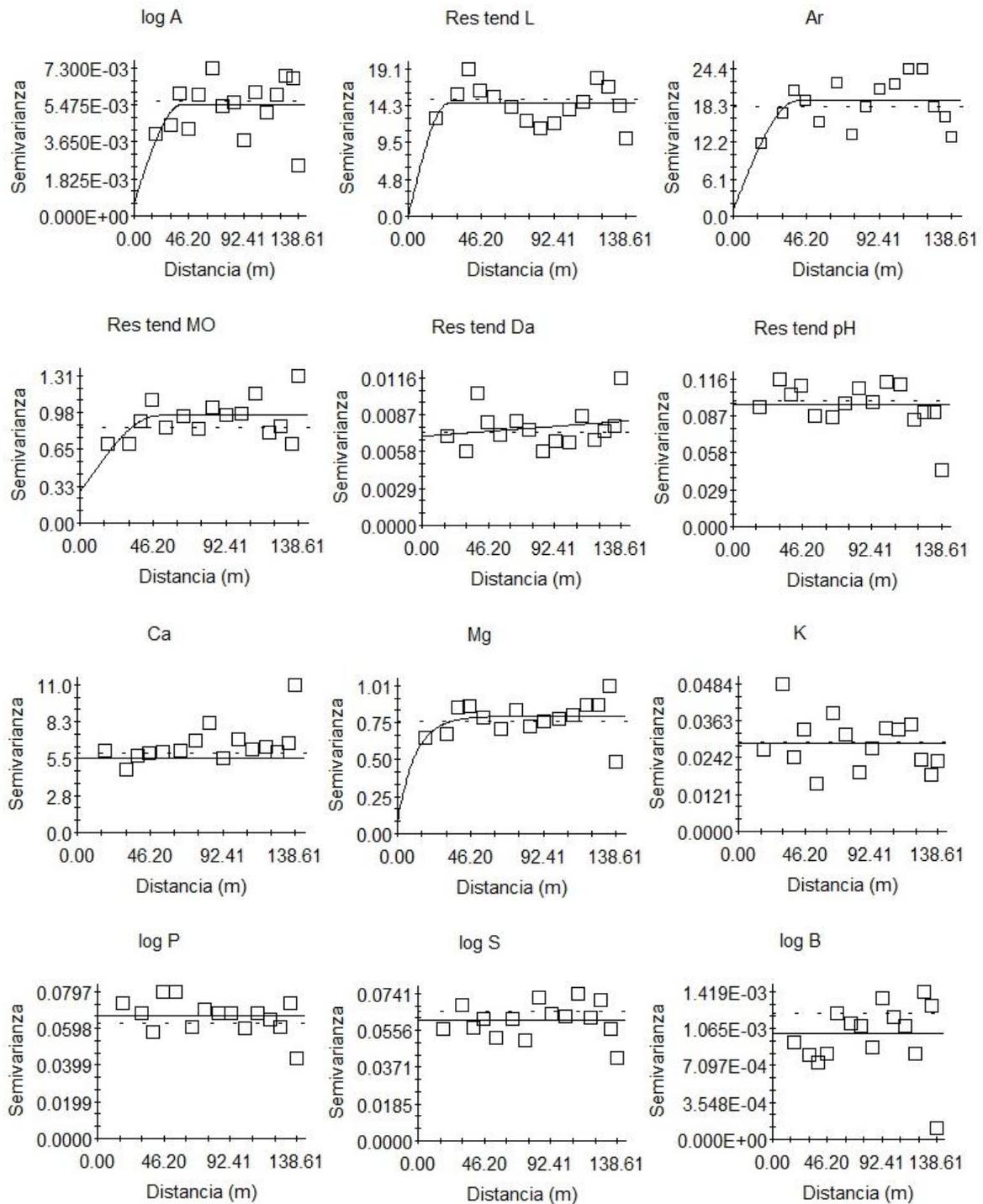


FIGURA 2. Semivariogramas experimentales (cuadros) y teóricos (líneas continuas) de las propiedades edáficas evaluadas en el lote sembrado en 1971.

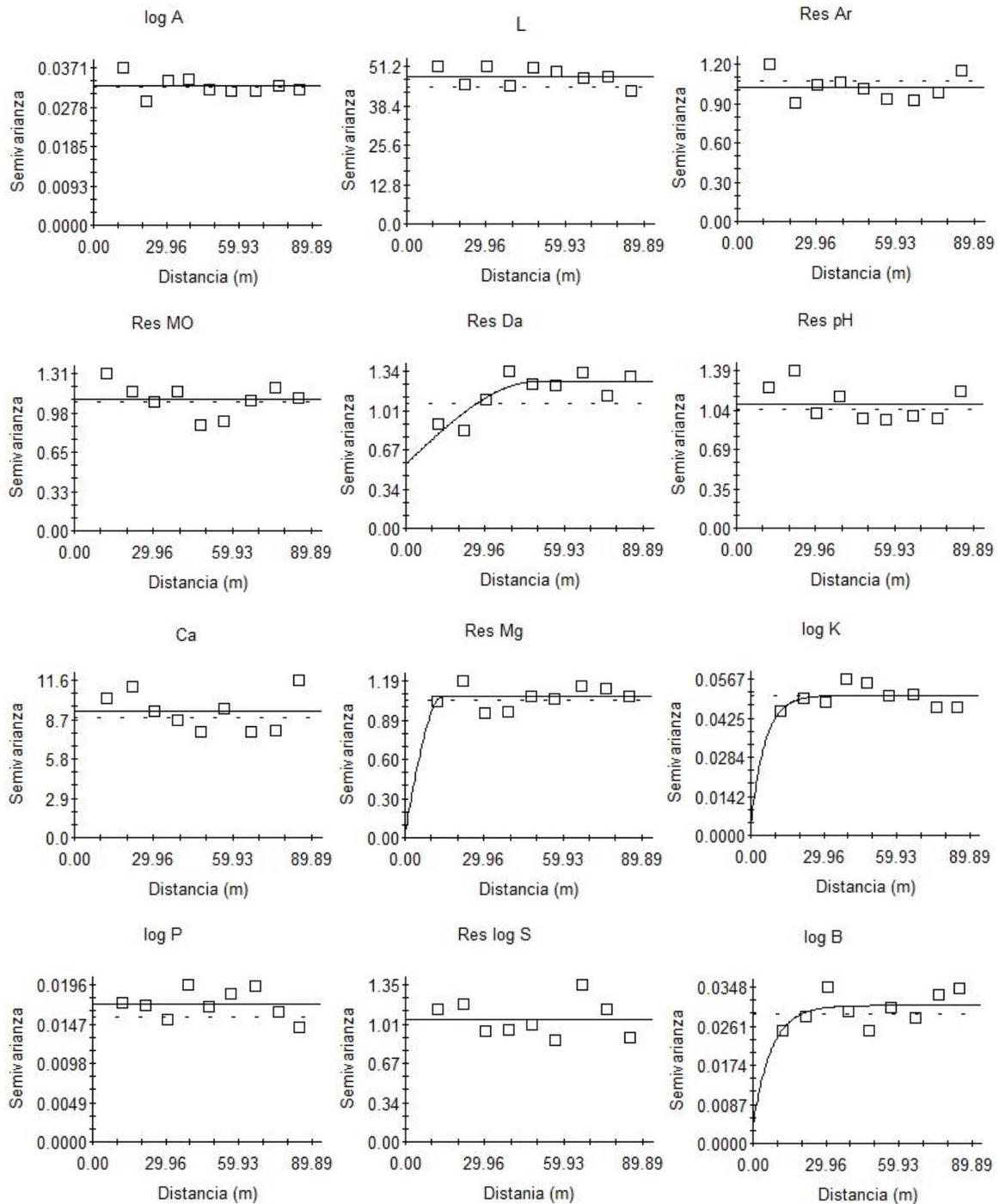


FIGURA 3. Semivariogramas experimentales (cuadros) y teóricos (líneas continuas) de las propiedades edáficas evaluadas en el lote sembrado en 2001.

La mayoría de los semivariogramas teóricos muestran una alta dispersión de los puntos alrededor del modelo teórico establecido para las propiedades edáficas evaluadas, sobre todo en el lote de 1971, que puede interpretarse como una alta inestabilidad en la variabilidad de las mismas, probablemente asociada a la mayor variabilidad aleatoria presente en este lote.

Este comportamiento hace difícil modelar el comportamiento de dichas variables y puede generar dificultades para implementar prácticas de agricultura de precisión en estos lotes ya que no facilita el cumplimiento de uno de los requisitos establecidos por Pierce y Nowak (1999) para poderla llevar a cabo, cual es el de que la variabilidad sea manejable.

El comportamiento de la semivarianza en el peso de los racimos (Figura 4), fue similar al de las propiedades edáficas, mostrando una alta dependencia espacial en ambos lotes. El mayor rango obtenido para la producción en el lote sembrado en 1971 (Tablas 6 y 7) puede interpretarse como un proceso de homogenización de las propiedades del suelo relacionadas con ella, por efecto del manejo repetido

de la fertilidad durante el largo tiempo transcurrido desde la siembra del cultivo hasta la fecha del muestreo. Además, el hecho de que el valor del nugget, o variabilidad no estructurada, del peso del racimo sea mayor en ese mismo lote de 1971 también está mostrando una pérdida de variabilidad espacial de esta propiedad en dicho lote, comparado con el de la siembra de 2001, de menor variabilidad aleatoria.

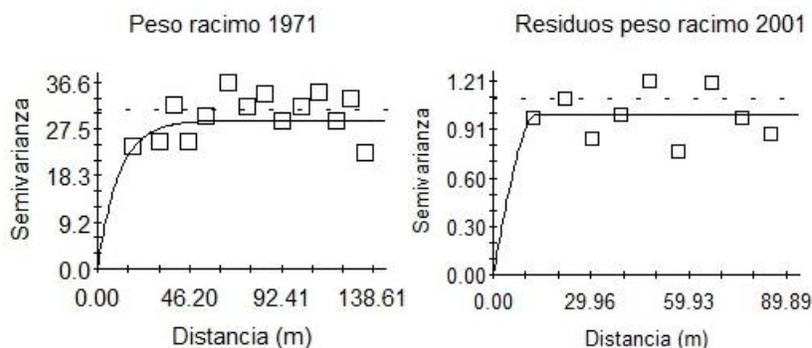


FIGURA 4. Semivariogramas experimentales (cuadros) y teóricos (líneas continuas) del peso de los racimos en ambos lotes.

CONCLUSIONES

No se presentó correlación significativa entre la producción de las palmas, representada por el peso de racimos cosechados el día del muestreo de los suelos, y las propiedades edáficas evaluadas, probablemente debido a que los niveles en que éstas se encuentran están por encima de los valores críticos del cultivo y a que las plantas, por su edad, ya llegaron a la etapa de estabilización en sus requerimientos nutricionales.

Las propiedades edáficas presentaron menor dependencia espacial en el lote sembrado en 1971 que en el de 2001, probablemente como consecuencia de un proceso de homogenización de ellas debido al manejo sostenido de la fertilización en el primer lote durante mucho más tiempo que en el segundo.

Los semivariogramas teóricos mostraron una alta dispersión de los puntos alrededor del modelo teórico establecido para las propiedades edáficas evaluadas, sobre todo en el lote de 1971, que puede interpretarse como una alta inestabilidad en la variabilidad de las mismas, probablemente asociada a la mayor variabilidad aleatoria presente en este lote. Este comportamiento hace difícil modelar el comportamiento de dichas variables y puede generar dificultades para implementar prácticas de agricultura de precisión en estos lotes.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por la realización de los análisis correspondientes.

REFERENCIAS

- ARANGO L. (2004). Efecto de la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas del suelo relacionadas con la producción de forraje del pasto ángleton (*Dichanthium aristatum* (Poir) C. E. Hubbard). Tesis Maestría en Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 78 p.
- 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. Am. J.* 58:1501-1511.
- CASTAÑEDA D. (2011). Evaluación de métodos estadísticos para el desarrollo de una propuesta de manejo por sitio específico para banano. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 129 p.
- CASTRIGNANÒ A., GIUGLIARINI L., RISALITI R., MARTINELLI N. (2000). Study of spatial relationships among some soil physico-chemical

- properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics. *Geoderma* 97: 39-60.
- DIGGLE P. J., RIBEIRO P. J. (2007). *Model-based geostatistics*. New York: Springer Science. 228 p.
- ESPINOSA J. (2000). Manejo de nutrientes en agricultura por sitio específico en cultivos tropicales. *Informaciones Agronómicas*. (39): 9-13.
- GALLARDO A., MAESTRE F. T. (2008). Métodos geoestadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos, 215-272 pp. En: MAESTRE F. T., ESCUDERO A., BONET A. (eds.). *Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: Métodos y aplicaciones*. Universidad Rey Juan Carlos. Editorial Dykinson S.L. Madrid.
- INDUPALMA-CENIPALMA. (2008). *Levantamiento Detallado de Suelos Indupalma*. Santafé de Bogotá. 261 p.
- JARAMILLO J. D. F. (2014). *El suelo: Origen, Propiedades, Espacialidad*. 2a. ed. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 555 p.
- JARAMILLO J. D. F. (2012a). Variabilidad espacial de algunas propiedades de un Mollisol de clima cálido seco de Antioquia (Colombia). *Agron. 20(2)*: 7 - 17.
- JARAMILLO J. D. F. (2012b). Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias* 1(1): 73-87.
- JARAMILLO J. 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 J. 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. 71 p.
- MARTÍNEZ L. (2003). Bases para evaluar la fertilidad del suelo en Agricultura de Precisión, 139-152 pp. En: TRIANA M., SILVA R., GÓMEZ M., PEÑALOSA, G. (eds). *Manejo integral de la fertilidad del suelo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo - Comité Regional de Cundinamarca y Boyacá. Bogotá.
- MUNÉVAR F. (2001). Fertilización de la palma de aceite para obtener altos rendimientos. *Palmas* 22(4): 9-17.
- 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. FONAIAPCENIAP-IIAG. Instituto de Investigaciones Agrícolas Generales. Serie B. Maracay, Venezuela.
- OWEN E. (1994). Fertilización de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq) con elementos secundarios en varios suelos de Colombia. *Palmas* 15(3): 25-39.
- OWEN E. (1992). Fertilización de la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq) en Colombia. *Palmas* 13(2): 39-64.
- 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.
- PIERCE F., NOWAK M. (1999). Aspects of precision agriculture. *Adv. in Agron.* 67: 1-85.
- SUN B., ZHOU S., ZHAO Q. (2003). Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma* 115: 85-99.
- WEBSTER R., OLIVER M. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England. 315 p.