

SELECCIÓN DE UN DISEÑO DE MUESTREO EN PARCELAS EXPERIMENTALES A PARTIR DEL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS SUELOS

Zenaida Lozano P.¹, Carlos Bravo², Francisco Ovalles², Rosa Mary Hernández², Belkys Moreno², Luis Piñango² y José Gregorio Villanueva¹

RESUMEN

Con el propósito de identificar la estructura de variación espacial de algunas propiedades del suelo y optimizar el muestreo para el monitoreo de los cambios en dichas propiedades por efecto del manejo se utilizaron datos provenientes de un muestreo sistemático en dos suelos de características contrastantes de los llanos centrales de Venezuela. Uno de los suelos evaluados es de textura arcillosa clasificado como Vertisol e identificado como San Pablo (SPA) y otro de textura arenosa clasificado como Entisol e identificado como La Iguana (IGU). Las variables consideradas fueron la resistencia a la penetración, contenido de carbono orgánico, pH, fósforo disponible y contenidos de arena, limo y arcilla. Los datos provenientes de los dos sitios experimentales fueron sometidos a análisis estadístico y geoestadístico. Los resultados indican que los semivariogramas presentaron un alcance que fluctuó entre 14 y 32 m en IGU y de 21 a 55 m en SPA. Los valores de los atributos de suelo evaluados presentaron una dependencia espacial moderada, ya que el efecto “nugget” relativo fluctuó, para la mayoría de las variables, entre 25 y 75%. El estudio de la variabilidad espacial fue útil para el establecimiento de un muestreo que permitió evaluar los cambios temporales producidos en el suelo por efecto del manejo.

Palabras clave adicionales: Análisis exploratorio, análisis geoestadístico, propiedades del suelo, muestreo de suelos

ABSTRACT

Selecting a the sampling design in experimental plots on the basis of the study of the spatial soil variability

Data obtained by using a systematic sampling in two contrasting soils in the Venezuelan central plains were used to identify the spatial soil variation and to optimize the sample design for monitoring changes induced by soil management. One of the soils was a clayey classified as a Vertisol (San Pablo); the other was a sandy soil, classified as an Entisol (La Iguana). The evaluated properties were penetration resistance, organic carbon content, available phosphorus, pH, sand, silt and clay contents. Statistical and geostatistical analyses were applied. Results indicated that the semivariograms had a range that fluctuated from 14 to 32 m in La Iguana, and from 21 to 55 m in San Pablo. The soil properties had a moderate spatial dependence and, the relative nugget effect varied from 25 to 75% for most of them. This information was useful for establishing the sampling design to evaluate the temporal changes on soil properties as a result of the soil management.

Additional key words: Exploratory analysis, geostatistical analysis, soil properties, soil sampling

INTRODUCCIÓN

Para la detección de los cambios temporales en las características de los suelos, producto de las prácticas de manejo, se recurre a la realización de muestreos en la zona sujeta a estudio. Así, la variabilidad espacial de los suelos hace necesaria la realización de un diseño de muestreo de tal forma que la medición de los cambios temporales no se confunda con la variación espacial del terreno evaluado. Pocos estudios contemplan la evaluación

de la variabilidad espacial de los sitios muestreados, principalmente por la gran cantidad de muestras necesarias, lo que afecta los costos del proyecto. Sin embargo, un inadecuado diseño de muestreo combinado con un insuficiente número de muestras colectadas puede ocasionar en sesgo en la estimación de los parámetros a evaluar, restándole validez a los resultados (Arrouays et al., 2000).

La geoestadística es útil para describir la estructura de la variación espacial de las

Recibido: Marzo 25, 2003

Aceptado: Marzo 23, 2004

¹ Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela (UCV). Apdo. 4579. Maracay. Venezuela.
email: lozanoz@agr.ucv.ve

² Universidad Nacional Experimental “Simón Rodríguez” (UNESR). Av. J.M. Vargas. Santa Fe, Caracas. Venezuela.

características del suelo y optimizar el diseño de muestreo para el monitoreo de sus cambios temporales (Oliver, 1987). En la geoestadística se toma en cuenta la dependencia espacial que existe entre observaciones separadas por una determinada distancia y cuya tasa de cambio puede ser estimada por la semivarianza, la cual es la varianza promedio entre observaciones vecinas espacialmente separadas a una misma distancia (Cassel et al., 2000) y se calcula por la siguiente expresión:

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

donde Z es la variable regionalizada, $Z(x_i)$ y $Z(x_i+h)$ son los valores de las observaciones en los sitios x_i y x_i+h y N es el número de pares separados a una distancia h .

La semivarianza es una medida de la similitud entre observaciones, a mayor similitud menor semivarianza. El gráfico de semivarianza contra distancia se conoce como semivariograma y contiene la información de la variable regionalizada (función que describe un fenómeno geográficamente distribuido) en términos de magnitud, escala y forma general. El semivariograma contiene información sobre la zona de influencia o zona en la que existe dependencia espacial, condiciones de anisotropía y la continuidad de la variable en el espacio (Ovalles, 1992).

Los parámetros de los modelos de los semivariogramas proporcionan la información espacial para la interpolación por el método de Kriging, que es una técnica de interpolación que usa la dependencia espacial existente entre las observaciones para estimar los valores de una variable en lugares no muestreados, sin sesgo y con mínima varianza (Cassel et al., 2000). En el Kriging, el valor estimado es la suma lineal de los pesos de las observaciones próximas y éstos son estimados por un análisis espacial geoestadístico basado en el semivariograma. Para la estimación se utiliza la siguiente expresión:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad [1]$$

donde $Z(x_0)$ es el valor estimado del atributo Z en el sitio x_0 ; λ_i es el peso aplicado al valor de cada observación ubicada en la vecindad (x_i) de x_0 , $Z(x_i)$ representa el valor de las observaciones vecinas al

sitio x , y n es el número de muestras vecinas al sitio x .

Los pesos utilizados son función del semivariograma, especialmente de la varianza aleatoria o "nugget", de la configuración de los puntos de muestreo y del lugar de la estimación, dándole más peso a los puntos más cercanos. La suma de los pesos debe ser igual a 1 para que los estimadores sean insesgados y tener una mínima varianza de estimación. Ésta es utilizada como un indicativo de la confiabilidad de los estimados. La precisión de las estimaciones se ve afectada por la varianza aleatoria, por la estructura de variación y por la intensidad de muestreo (Oliver, 1987).

Uno de los métodos más utilizados es el de interpolación por Kriging, que tiene las ventajas de ser un interpolador exacto, ya que los valores estimados en los puntos de observación coinciden con los valores medidos.

Los objetivos de este trabajo fueron estudiar la variabilidad espacial de corto alcance de algunas características de suelos seleccionados en dos sitios experimentales y optimizar la toma de muestras para el monitoreo de los cambios a largo plazo de las variables seleccionadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron dos sitios experimentales ubicados en la zona oriental del estado Guárico, Venezuela, cuyos suelos se corresponden a un Vertisol, Ustoxic Quartzipsamments, isohipertérmico, silicio, cubierto, ubicado en la Estación Experimental La Iguana (IGU) cerca de la población de Santa María de Ipire y un Entisol, Typic Haplusterts, arcilloso, mixto, isohipertérmico, ubicado en la finca San Pablo (SPA) cerca de la población de Valle de la Pascua. Los datos se obtuvieron a través de un muestreo sistemático realizado en lotes seleccionados con un área de 120 x 50 m en IGU y de 120 x 40 m en SPA, considerando en ambos casos una distancia de muestreo de 10 m (Ovalles, 1991; 1992) para un total de 78 y 65 observaciones en IGU y SPA, respectivamente. Las muestras se colectaron en el primer horizonte identificado en cada suelo que correspondió a una profundidad de 0 a 0,15 m en IGU y de 0 a 0,10 m en SPA.

A nivel de campo se evaluó la resistencia a la penetración (RP) con un penetrómetro de impacto de punta cónica. Previo al análisis de laboratorio

las muestras fueron secadas al aire, cernidas por un tamiz de 2 mm y homogenizadas determinándose el carbono orgánico (CO) por el método de combustión húmeda sulfocrómica de Walkley y Black, pH en relación suelo:agua 1:2, fósforo disponible (P) extraído con la solución de Olsen y detectado por el método colorimétrico del molibdato-ácido ascórbico y contenidos de arcilla (0-2 µm) (A), limo (2-50 µm) (L) y arena (50-200 µm) (a) por el método de Bouyoucos.

Los datos provenientes del campo y del laboratorio fueron sometidos a un análisis exploratorio univariado para obtener la media, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, Kurtosis, asimetría, valores máximos y mínimos y cuartiles. Se utilizó la metodología de Tukey (1977) de determinación de cercas internas y externas empleando el rango intercuartil para detectar valores atípicos (Rey y Ovalles, 2000a). En este estudio se consideró como atípicos aquellos valores localizados fuera de las cercas externas. Para el análisis estadístico se utilizó el programa Geo-EAS (Englund y Sparks, 1991).

Para el análisis geoestadístico se asignó una coordenada relativa (X y Y) a cada punto de muestreo.

Tomando como origen de los ejes el vértice suroeste de los rectángulos de 120 x 40 m en SPA y de 120 x 50 m en IGU. Para este análisis se utilizó el programa Variowin (Pannatier, 1994) y se calculó para cada variable la semivarianza total y en distintas direcciones (0°, 45°, 90° y 135°).

A partir de estos resultados se elaboraron los semivariogramas experimentales graficando la semivarianza contra los incrementos de la distancia de muestreo. Los semivariogramas se ajustaron a modelos teóricos por el método de los mínimos cuadrados.

A partir de los modelos ajustados se obtuvo el alcance o rango de dependencia espacial, el umbral o sill y la varianza aleatoria o varianza “nugget”, los cuales constituyen los parámetros de los modelos de variación espacial para los atributos de suelo evaluados.

Se calcularon los semivariogramas en las direcciones E-O (0°), NE-SO (45°), N-S (90°) y NO-SE (135°) y con estos datos se construyeron gráficos de alcance y umbral en todas las direcciones, a objeto de detectar la presencia de anisotropía así como la dirección de mayor variación y la de menor, que por lo general, se

corresponde con la dirección perpendicular a la primera (Odeh et al., 1990). La dirección de mayor variación y la dirección perpendicular a ella sirvieron de base para el cálculo del radio de anisotropía.

Para estimar los valores de las variables en sitios no muestreados, se utilizó el Kriging ordinario puntual. Éste asume que las medias locales no están necesariamente relacionadas con la media de la población y las observaciones vecinas se utilizan para realizar las estimaciones. Adicionalmente, el Kriging puntual proporciona una mejor estimación de la variación a distancias cortas, conveniente en el caso de lotes experimentales (Ovalles, 1991). Se utilizó una distancia de 5 m entre las observaciones y los puntos de estimación, así como los parámetros de los semivariogramas generales ajustados para cada variable evaluada. Posteriormente se realizaron mapas de isolíneas para los atributos de los suelos.

Con el radio de anisotropía y los mapas de isolíneas se determinó el tamaño y dirección más apropiado para los lotes en ambos sitios experimentales, a fin de garantizar que las observaciones realizadas dentro de las parcelas presentaran la menor variación posible. Finalmente, para estimar el número de muestras u observaciones requeridas para obtener una estimación del atributo de suelo avaluado a un nivel de precisión especificado se utilizó la siguiente expresión:

$$n = \frac{t^2 CV^2}{r^2} \quad [3]$$

donde: n es el número de muestras o repeticiones, CV es el coeficiente de variación, r es el rango aceptable de precisión (error permitido) y t es el valor de Student para la probabilidad o nivel de confianza deseado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis estadístico

Los resultados del análisis exploratorio para los suelos en IGU y en SPA se presentan en el Cuadro 1. Se evidencia que muchas variables presentaron una distribución cercana a la normal con valores de asimetría y Kurtosis próximos a 0 y 3, respectivamente, valores característicos de la distribución normal. Por otra parte, el radio de la media y la mediana se aproximan a 1. Para

tratar de lograr la normalidad de los datos en aquellas variables que no la presentaban, se realizaron transformaciones, pero éstas no lograron normalizar los datos, por lo tanto los análisis siguientes se realizaron sin transformaciones. El análisis permitió establecer que sólo el suelo en IGU presentó valores atípicos para pH y CO.

Las variables con mayor variación, expresada en términos del CV, fueron RP, P y A en ambos suelos. Esta variación se podría explicar en SPA por la ubicación de la parcela en un relieve suavemente ondulado, donde la pérdida y acumulación de materiales debido a la erosión laminar son procesos importantes que afectan las propiedades del suelo.

Cuadro 1. Parámetros estadísticos de las características evaluadas en dos suelos del estado Guárico

Lugar	Parámetros	RP (kPa)	A (%)	L (%)	a (%)	pH	CO (%)	P (mg·kg ⁻¹)
SPA	Media	3468	29,56	23,94	46,50	5,30	0,75	7,22
	Mediana	4129	28,83	22,39	48,78	5,36	0,77	6,42
	Desviación	2006	9,77	5,05	10,43	0,27	0,13	3,03
	CV (%)	48,58	33,89	22,56	21,38	5,07	17,20	47,20
	Asimetría	0,87	0,14	0,34	0,56	1,06	0,29	0,29
	Kurtosis	3,06	1,86	0,09	2,73	3,47	2,29	2,89
	Mínimo	1300	11,69	8,31	32,00	5,00	0,54	1,28
	Máximo	9539	47,49	37,56	78,50	6,20	1,11	14,73
	Q1	2601	20,51	18,94	41,12	5,15	0,66	4,06
	Q3	5203	36,77	25,01	55,75	5,49	0,87	8,35
IGU	Paso	3902	24,39	9,12	21,94	0,51	0,32	6,44
	Media	3613	1,75	7,00	91,25	5,30	1,02	5,10
	Mediana	3906	2,11	7,50	90,39	5,30	1,07	5,82
	Desviación	1863	1,37	2,03	29,4	0,30	0,35	2,72
	CV (%)	47,70	65,14	27,06	3,25	5,61	32,99	46,75
	Asimetría	1,24	0,43	0,72	-0,81	2,14	1,22	0,56
	Kurtosis	5,05	2,08	3,23	2,88	10,19	9,24	2,39
	Mínimo	1156	0,00	3,00	82,25	4,85	0,08	1,44
	Máximo	10695	5,00	13,75	95,25	6,65	2,67	12,97
	Q1	2601	0,75	5,75	88,62	5,12	0,89	3,69
IGU	Q3	4625	3,00	8,50	92,50	5,40	1,19	7,73
	Paso	3035	3,38	4,12	5,81	0,41	0,45	6,07

RP = resistencia a la penetración; A = arcilla; L = limo; a = arena; CO = carbono orgánico; P = fósforo; Q₁ = primer cuartil; Q₃ = tercer cuartil; Paso = 1,5 (Q₃ - Q₁).

Las pérdidas de arcilla (A) generalmente se producen en la parte más alta y se depositan en la más baja, lo que afecta el contenido de humedad, la RP, el contenido de materia orgánica, nutrientes disponibles y otros atributos de relevancia (Rey y Ovalles, 2000a; 2000b). En IGU la mayor dispersión de estas variables posiblemente se debe al origen deposicional del suelo (médano), que por ser un suelo virgen presenta mayor heterogeneidad (Onofiok, 1993).

Semivariogramas

Del análisis de los semivariogramas generales de las variables estudiadas en ambos suelos (Figuras 1, 2, 3 y 4) se aprecia un carácter

transicional, es decir, se presentó un incremento en la semivarianza con el incremento en la distancia hasta un máximo (umbral) donde la semivarianza se hace estable, ocurriendo una transición de una condición de dependencia espacial a una donde ésta desaparece, y está marcada por el alcance o rango. Otras variables como RP y P en IGU, RP, A y CO en SPA, adicional al carácter transicional, presentaron semivariogramas anidados que indican la ocurrencia de dependencia espacial en los cambios en esos atributos a diferentes escalas. Este anidamiento se refleja por la presencia de estructura espacial a distancias mayores que la correspondiente al alcance inicial.

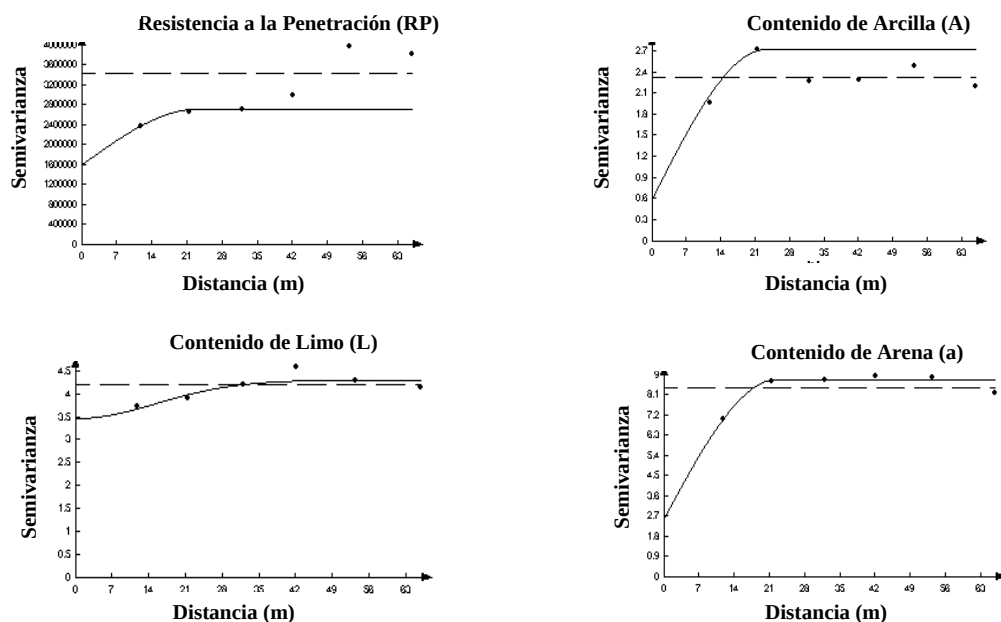


Figura 1. Semivariogramas generales de la Resistencia a la Penetración y los contenidos de Arcilla, Limo y Arena en el suelo de La Iguana (IGU).

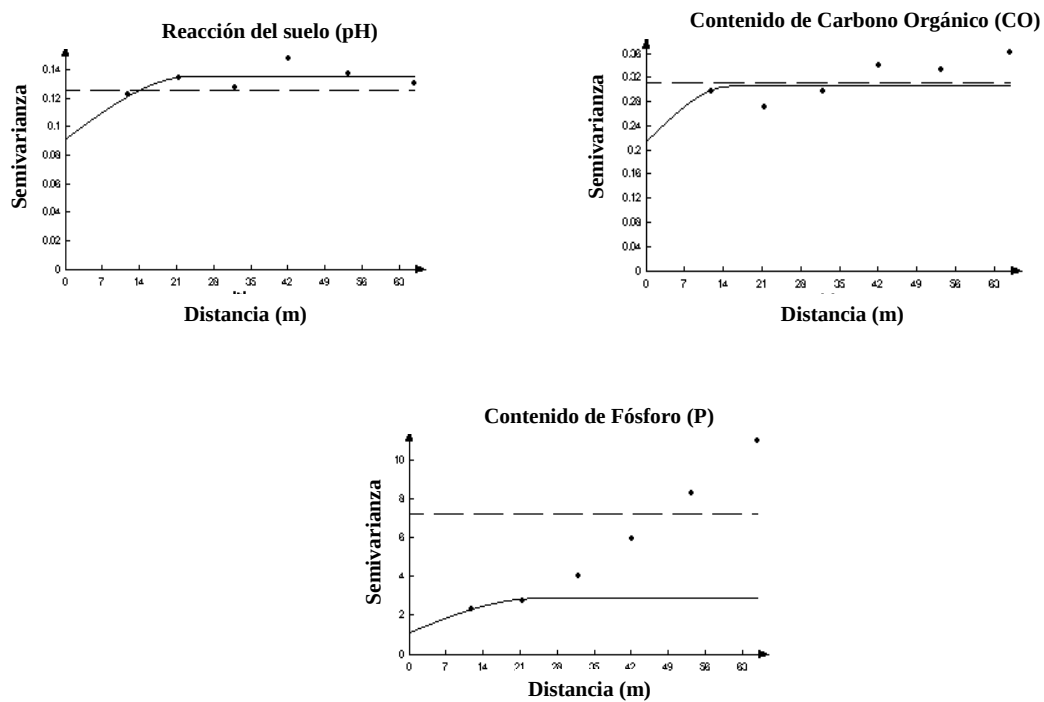


Figura 2. Semivariogramas generales de la Reacción (pH) y los contenidos de Fósforo y Carbono Orgánico en el suelo de La Iguana (IGU).

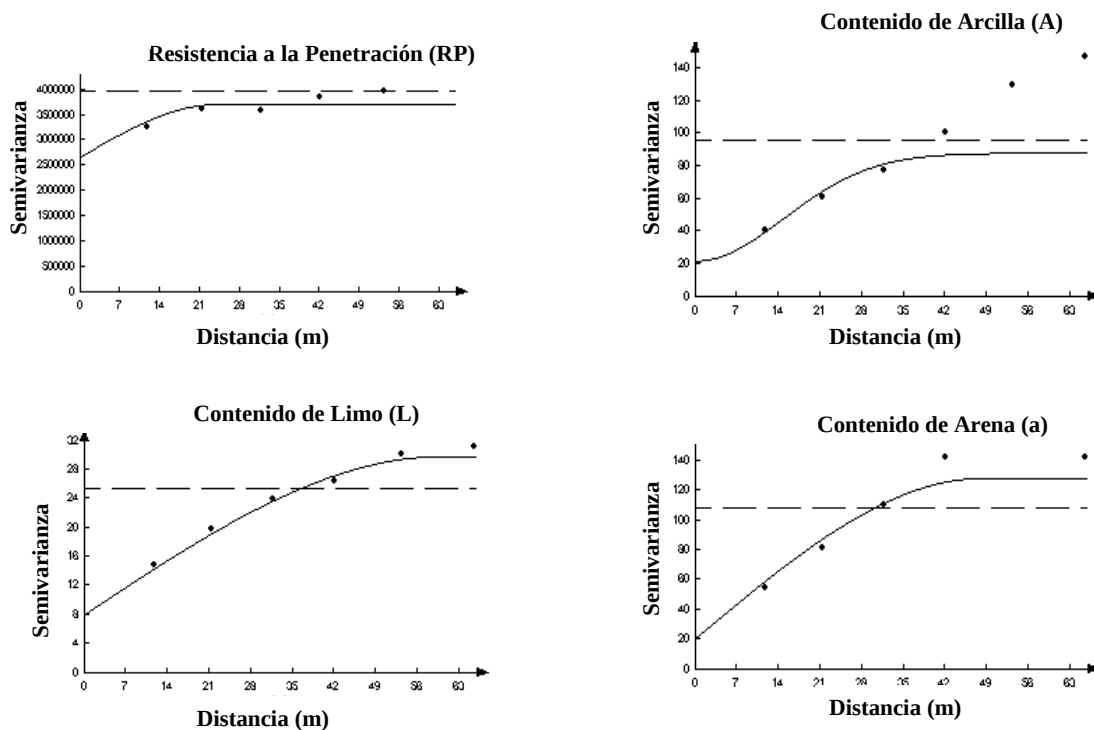


Figura 3. Semivariogramas generales de la Resistencia a la Penetración y los contenidos de Arcilla, Limo y Arena en el suelo de San Pablo (SPA).

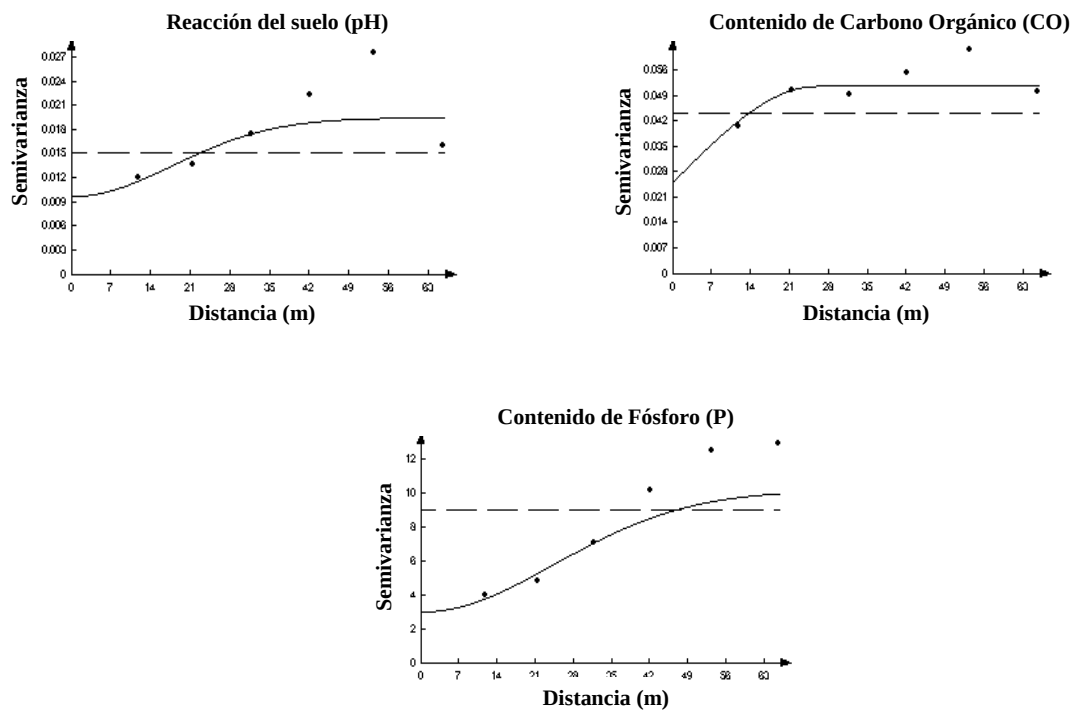


Figura 4. Semivariogramas generales de la Reacción (pH) y los contenidos de Fósforo y Carbono Orgánico en el suelo de San Pablo (SPA).

El alcance de los semivariogramas generales fue menor en IGU (14 a 32 m) que en SPA (21 a 55 m). Todos presentaron un claro componente “nugget”, lo que sugiere la presencia de una microvariabilidad no explicada por la distancia del muestreo utilizada (Arrouays et al., 2000). La proporción de la varianza aleatoria con respecto al umbral es conocida como efecto “nugget” relativo, cuya magnitud es una expresión del grado de dependencia espacial que existe entre las observaciones de la variable considerada (Cambardella et al., 1994). El efecto “nugget” relativo fue de 62, 50, 81, 33, 69, 69 y 48% en IGU mientras que en SPA fue de 74, 25, 27, 15, 48, 54, y 30% para los atributos RP, A, L, a, pH, CO y P, respectivamente. Esto indica que los cambios en los valores de todos los atributos de suelo evaluados en IGU presentaron una moderada dependencia espacial, ya que están comprendidos entre 25 a 75%. En SPA con la excepción del porcentaje de arena que tiene una

alta dependencia espacial (efecto “nugget” relativo menor a 25%), la variabilidad de los demás atributos evaluados presentó una moderada dependencia espacial.

En relación al umbral, con excepción de RP en IGU, éste fue similar a la varianza de la muestra mientras que en SPA, para la mayoría de las variables, el umbral fue ligeramente mayor a la varianza de la muestra, lo cual es indicativo de la presencia de una varianza finita con ausencia de tendencias locales que se refleja por la dependencia espacial encontrada.

Para verificar si las características evaluadas presentaban o no una variación isotrópica se procedió a ajustar los modelos en las direcciones establecidas y a estimar los parámetros de los semivariogramas: varianza aleatoria, umbral y alcance. Estos resultados se presentan en los Cuadros 2 y 3 para los suelos en SPA e IGU, respectivamente.

Cuadro 2. Parámetros de los semivariogramas direccionales para las variables evaluadas en el suelo de San Pablo (SPA)

Variable	Dirección	Modelo	Varianza aleatoria (Co)	Umbral (Co + C _i)	Alcance (m)
Resistencia a la penetración	0°	Esférico	2,47 x 10 ⁶	3,71 x 10 ⁶	21
	45°	Esférico	2,88 x 10 ⁶	3,52 x 10 ⁶	25
	90°	Gausiano	2,00 x 10 ⁶	3,95 x 10 ⁶	18
	135°	Esférico	2,28 x 10 ⁶	3,96 x 10 ⁶	48
Arcilla	0°	Esférico	0,95	54,15	24
	45°	Gausiano	0,95	83,60	40
	90°	Gausiano	11,40	66,49	22
	135°	Esférico	3,80	75,05	26
Limo	0°	Esférico	1,04	13,00	21
	45°	Esférico	0,52	20,54	27
	90°	Esférico	9,36	27,30	35
	135°	Gausiano	6,24	24,44	31
Arena	0°	Esférico	1,10	83,60	27
	45°	Gausiano	1,10	82,50	28
	90°	Esférico	11,0	89,10	25
	135°	Esférico	15,40	114,40	35
pH	0°	Esférico	0,05	0,06	23
	45°	Gausiano	0,05	0,08	60
	90°	Esférico	0,04	0,09	23
	135°	Esférico	0,02	0,08	33
Carbono orgánico	0°	Esférico	0,03	0,04	11
	45°	Esférico	0,02	0,06	39
	90°	Gausiano	0,01	0,04	20
	135°	Esférico	0,02	0,31	26
Fósforo	0°	Esférico	0,63	5,76	36
	45°	Gausiano	2,60	6,91	45
	90°	Gausiano	3,78	12,78	66
	135°	Gausiano	3,51	11,43	52
Promedio					30

Cuadro 3. Parámetros de los semivariogramas direccionales para las variables evaluadas en el suelo de La Iguana (IGU).

Variable	Dirección	Modelo	Varianza aleatoria (Co)	Umbral (Co + C ₁)	Alcance (m)
Resistencia a la penetración	0°	Gausiano	1,26 x 10 ⁶	3,39 x 10 ⁶	20
	45°	Gausiano	1,99 x 10 ⁶	3,28 x 10 ⁶	34
	90°	Gausiano	2,14 x 10 ⁶	3,36 x 10 ⁶	66
	135°	Esférico	2,27 x 10 ⁶	2,44 x 10 ⁶	28
Arcilla	0°	Esférico	0,05	1,85	24
	45°	Esférico	0,46	2,19	23
	90°	Esférico	0,61	1,88	21
	135°	Esférico	0,80	1,88	22
Limo	0°	Gausiano	0,74	4,27	23
	45°	Gausiano	1,64	4,96	27
	90°	Gausiano	0,82	4,18	28
	135°	Gausiano	1,52	4,18	28
Arena	0°	Esférico	0,08	8,51	32
	45°	Esférico	6,19	10,32	28
	90°	Esférico	6,19	8,94	23
	135°	Esférico	5,25	8,35	24
pH	0°	Esférico	0,01	0,04	36
	45°	Esférico	0,04	0,07	45
	90°	Esférico	0,03	0,05	28
	135°	Esférico	0,02	0,36	30
Carbono orgánico	0°	Esférico	0,23	0,28	34
	45°	Esférico	0,24	0,29	35
	90°	Esférico	0,27	0,32	15
	135°	Esférico	0,27	0,34	17
Fósforo	0°	Esférico	0,80	1,90	23
	45°	Esférico	1,61	2,92	24
	90°	Esférico	1,53	3,35	22
	135°	Esférico	1,53	2,99	25
Promedio					29

Los semivariogramas observados o experimentales se ajustaron a los modelos esférico y gaussiano, con un mayor rango de variación (alcance) para la mayoría de las variables en SPA en las direcciones 45° y 135°, mientras que en IGU para las variables físicas (RP, A, L y a) la mayor distancia de dependencia espacial se presentó en las direcciones 0° y 90° y para las químicas en las direcciones 45° y 135°.

Al considerar todas las direcciones, el rango de dependencia espacial promedio en SPA fue de 30 m y en IGU de 29 m. En términos generales, se observó que los alcances variaron de acuerdo a la dirección, lo que indica la ocurrencia de una variación que es dependiente de la dirección, correspondiéndose el eje de anisotropía con la dirección en que se presenta el mayor alcance, es decir, la dirección de mayor continuidad espacial.

La variación espacial en función de la dirección tiene como base la génesis de los suelos sobre lo cual sería importante profundizar.

Para la mayoría de los atributos evaluados en SPA, la dirección de variación es coincidente,

pero no ocurre lo mismo en el caso de IGU, que es un suelo virgen, por lo que puede establecerse que el manejo del suelo influye sobre este comportamiento.

Al calcular el radio de anisotropía para SPA (Cuadro 4) y para IGU (Cuadro 5) se aprecia para el primero un radio mayor de 1,35 y para el segundo un radio de 1,00. Estos radios son considerados como pequeños si se comparan con los reportados por Trangmar et al. (1985) y McBratney y Webster (1986) los cuales están mayormente en el rango de 1,3 a 4,0. La anisotropía puede estar relacionada a la microvariabilidad que introducen ciertos procesos, como es el caso de la fertilización diferencial o los procesos biológicos que actúan a nivel de microescala (McBratney, 1992).

El radio de anisotropía es útil para establecer no sólo la dirección sino también la dimensión que debería tener la parcela experimental. En SPA es importante la evaluación del porcentaje de A, por ser un atributo estable y clasificar el suelo como Vertisol. Este porcentaje presentó

una mayor variación en la dirección NE-SO, igualmente el radio de anisotropía promedio se aproximó al radio del porcentaje de A. En

consecuencia, se recomienda establecer un lote de 30 x 40 m, con el eje mayor orientado en la dirección NE-SO.

Cuadro 4. Radio de anisotropía de las variables en el suelo de San Pablo (SPA)

Variable	Dirección	Varianza aleatoria (Co)	Umbral (Co + C ₁)	Alcance (m)	Radio de anisotropía
Resistencia a la penetración	135°	2,28 x 10 ⁶	3,96 x 10 ⁶	48	1,30
	45°	2,88 x 10 ⁶	3,52 x 10 ⁶	25	
Arcilla	45°	0,95	83,60	40	1,00
	135°	3,80	75,05	26	
Limo	90°	9,36	27,30	35	1,35
	0°	1,04	13,00	21	
Arena	135°	15,40	114,40	35	1,03
	45°	1,10	82,50	28	
pH	45°	0,05	0,08	60	1,00
	135°	0,02	0,08	33	
Carbono Orgánico	45°	0,02	0,06	39	0,71
	135°	0,02	0,31	26	
Fósforo	90°	3,78	12,78	66	1,35
	0°	0,63	5,76	36	

Cuadro 5. Radio de anisotropía de las variables en el suelo de La Iguana (IGU)

Variable	Dirección	Varianza aleatoria (Co)	Umbral (Co + C ₁)	Alcance (m)	Radio de anisotropía
Resistencia a la penetración	90°	2,14 x 10 ⁶	3,36 x 10 ⁶	66	0,99
	0°	1,26 x 10 ⁶	3,39 x 10 ⁶	20	
Arcilla	0°	0,05	1,85	24	1,00
	90°	0,61	1,88	21	
Limo	90°	0,82	4,18	28	1,00
	0°	0,74	4,27	23	
Arena	0°	0,08	8,51	32	0,97
	90°	6,19	8,94	23	
pH	45°	0,04	0,07	45	0,62
	135°	0,02	0,36	30	
Carbono orgánico	45°	0,24	0,29	35	0,48
	135°	0,27	0,34	17	
Fósforo	135°	1,53	2,99	25	1,00
	45°	1,61	2,92	24	

Para el caso de IGU es importante la evaluación del porcentaje de a, por ser un atributo estable y clasificar el suelo como Entisol. Este porcentaje presentó una mayor variación en la dirección E-O, adicionalmente el radio de anisotropía promedio está cercano al del porcentaje de a. Sobre esta base se recomienda establecer un lote de 29 x 29 m, o cuya mayor longitud se oriente en dirección E-O. De esta forma se puede garantizar que la variabilidad definida en cada parcela no afecte los resultados de la evaluación las propiedades estudiadas.

Kriging

En los mapas de isolíneas elaborados en base a los valores estimados por Kriging se aprecia que en SPA la variable RP presentó valores entre 1000

y 9000 kPa, A entre 10 y 45%, L entre 8 y 36% y a entre 30 y 74%, destacándose valores más altos de A hacia el noroeste del área de estudio (Figura 5). La distribución de A se relacionó con el relieve, los valores más altos se ubicaron en el área más baja, posiblemente debido al proceso de erosión laminar señalado anteriormente. Al evaluar la distribución espacial de los valores de RP se observó que éstos se relacionaron con los mayores valores de L, lo que es indicativo del efecto que tiene el contenido de L sobre la estabilidad de la estructura superficial. De las variables químicas (Figura 6) se aprecia que el pH varió entre 5,10 y 5,85, P de 1 a 14 mg·kg⁻¹ y CO de 0,5 a 1,5 % con valores mayores hacia el centro del área de estudio. El pH y CO coincidieron con la variación de A en sentido NE-SO.

En IGU la RP varió de 1000 a 10.500 kPa, A de 0,5 a 3,9%, L de 3 a 13% y a de 85 a 92% (Figura 7). De las variables químicas se destaca un rango de pH entre 4,9 y 6,1, P de 1 a 12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ y CO de 0 a 2,2% (Figura 8). Las variables en IGU no presentaron un patrón claramente definido, lo que refleja una menor dependencia espacial en los valores de los atributos estudiados, por lo que las parcelas experimentales deben ser de menor tamaño a las que se ubiquen en SPA. Sin embargo, el porcentaje de a presentó una distribución distinta en el sentido de tener un patrón menos intrincado, lo cual es importante por ser uno de los atributos físicos que más influye en el comportamiento del suelo. En el centro del área estudiada se presentaron los mayores valores de

pH y CO, la cual posiblemente corresponda con un sitio de quema años antes de la realización de este estudio, por lo que se sugiere excluir esta área de las parcelas experimentales.

Finalmente, se obtuvo el número óptimo de muestras para cada variable, con niveles de precisión de 95 al 70 % (Cuadro 6). Es obvio que el número de muestras requeridas disminuye con el nivel de precisión, siendo las variables pH y CO las que requieren menor número de muestras individuales u observaciones. En base a los resultados se sugiere coleccionar de 10 a 12 muestras por parcela experimental en aquellos parámetros más variables como RP, A y P, mientras que en los menos variables como a, pH y CO se puede disminuir el número de muestras individuales hasta cinco por parcela.

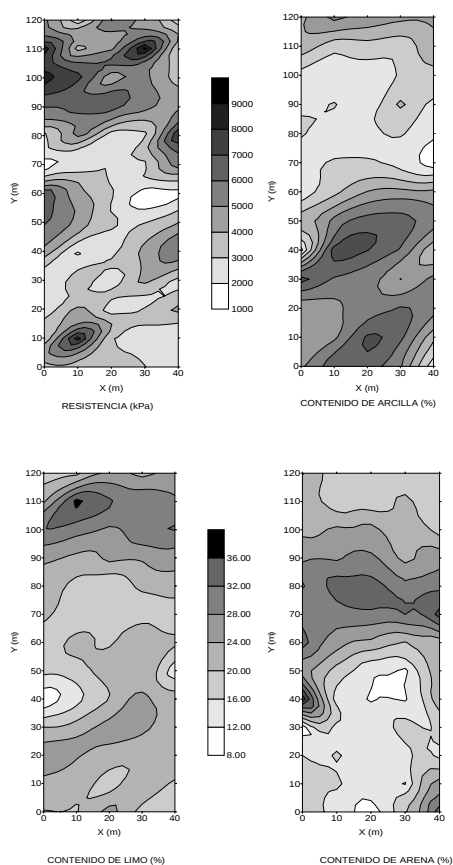


Figura 5. Distribución espacial de la resistencia a la penetración y los contenidos de arcilla, limo y arena en el suelo de San Pablo.

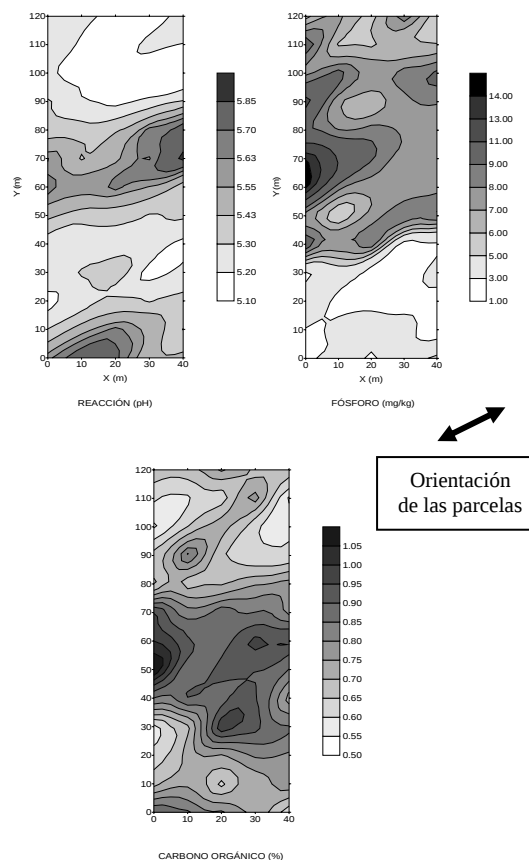


Figura 6. Distribución espacial de la reacción (pH) y los contenidos de fósforo y carbono orgánico en el suelo de San Pablo.

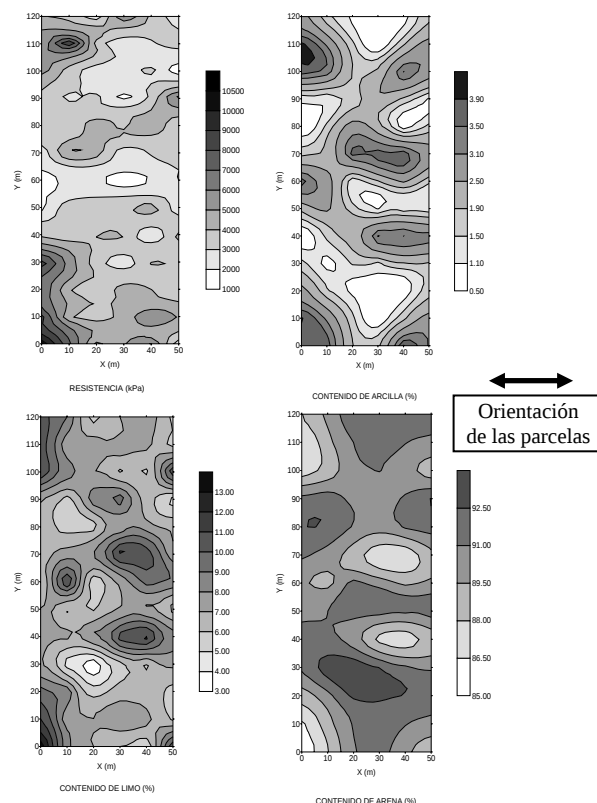


Figura 7. Distribución espacial de la resistencia a la penetración y los contenidos de arcilla, limo y arena en el suelo de La Iguana.

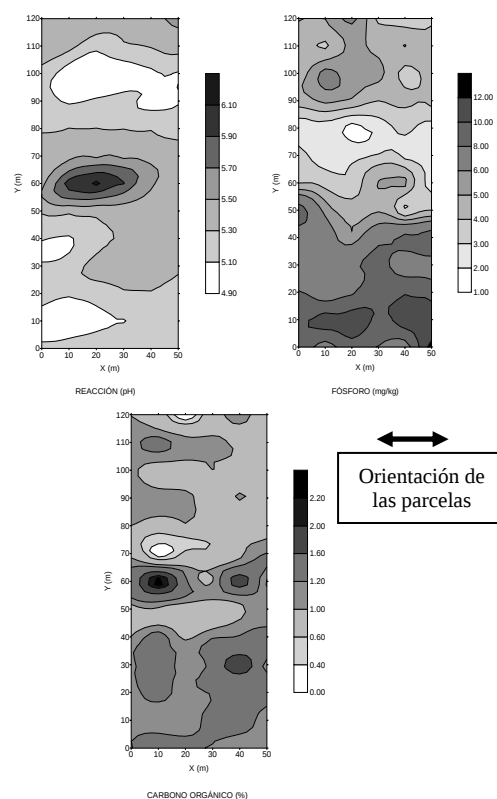


Figura 8. Distribución espacial de la reacción (pH) y los contenidos de fósforo y carbono orgánico en el suelo de La Iguana.

Cuadro 6. Número de muestras individuales adecuadas para las variables evaluadas en San Pablo (SPA) y La Iguana (IGU). Estadístico $t = 1,997$

Lugar	Variable	Estadístico t	C.V. (%)	Rango de precisión aceptable			
				r = 5	r = 10	r = 20	r = 30
SPA	RP	1,997	48,6	377	94	24	10
	Arcilla	1,997	33,9	183	46	11	5
	Limo	1,997	22,9	81	20	5	2
	Arena	1,997	21,4	73	18	5	2
	pH	1,997	5,1	4	1		
	CO	1,997	17,2	47	12	3	1
	Fósforo	1,997	47,2	355	89	22	10
IGU	RP	1,997	47,7	363	91	23	10
	Arcilla	1,997	65,1	676	169	42	19
	Limo	1,997	27,1	116	29	7	3
	Arena	1,997	3,2	2			
	pH	1,997	5,6	5	1		
	CO	1,997	33,0	174	43	11	5
	Fósforo	1,997	46,8	349	87	22	10

RP = resistencia a la penetración, CO = carbono orgánico

CONCLUSIONES

Este estudio de la variabilidad espacial de los suelos fue útil para discutir el rango y origen del patrón de variación de atributos como

resistencia a la penetración, contenidos de las partículas arcilla, limo y arena, la reacción del suelo (pH) y los contenidos de carbono orgánico y fósforo disponible. También permitió determinar el tamaño óptimo y orientación de las parcelas

experimentales y el número de muestras necesarias para evaluar los parámetros adecuadamente.

RECONOCIMIENTO

Al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT) por el apoyo financiero a través del proyecto S1-97001360. Al Sr. José Quiterio Matos y a la Universidad "Simón Rodríguez" por facilitar los sitios de evaluación en la Finca San Pablo y la Estación Experimental La Iguana, respectivamente.

LITERATURA CITADA

1. Arrouays, D., S. Martin, A. Lepretre y H. Bourennane. 2000. Short-range spatial variability of metal content in soil on a one hectare agricultural plot. *Communication Soil Science and Plant Analysis* 31: 387-400.
2. Cambardella, C., T. Moorman, J. Novak, T. Parkin, D. Karlen, R. Turco y E. Konopka. 1994. Field scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
3. Cassel, D.K., O. Wendroth y D.R. Nielsen. 2000. Assessing spatial variability in an Agricultural Experiment Station Field: Opportunities arising from spatial dependence. *Agronomy Journal* 92: 706-714.
4. Englund, E. y A. Sparks. 1991. Geo-EAS 1.2.1 User's Guide, US-EPA Report # 600/8-91/008. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory. Las Vegas, NV. 98 p.
5. McBratney, A.B. 1992. On variation, uncertainty and informatics in environmental soil management. *Australian Journal of Soil Research* 30: 913-935.
6. McBratney, A.B. y R. Webster. 1986. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science* 37:617-639.
7. Odeh, I.O.A., A.B. McBratney y D.J. Chittleborough. 1990. Design of optimal sampling spacings for mapping soil using fuzzy-k-means and regionalized variable theory. *Geoderma* 47: 93-122.
8. Oliver, M. 1987. Geostatistics and its application to soil science. *Soil and Management* 3(1):8 - 19.
9. Onofiok, O.E. 1993. Determining spatial and temporal variations of organic matter in a tropical soil using different sampling schemes. In: K. Mulongoy y R. Merckx (eds.). *Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture*. International Institute for Tropical Agriculture. Leuven. pp. 65-74.
10. Ovalles, F. 1991. Evaluación de la variabilidad de los suelos a nivel de parcelas, para el establecimiento de lotes experimentales en el estado Cojedes. *Agronomía Tropical* 41(1-2): 5-19.
11. Ovalles, F. 1992. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAP, Instituto de Investigaciones Agrícolas Generales. Maracay. Serie B. 44 p.
12. Pannatier, I. 1994. Variowin, V 2.3. Institute of Mineralogy, University of Lausanne. Switzerland.
13. Rey, J.C. y F. Ovalles. 2000a. Efecto de técnicas exploratorias de los datos en estimaciones Kriging de propiedades del suelo. *Agronomía Tropical* 51: 81-106.
14. Rey, J.C. y F. Ovalles. 2000b. Transferencia del modelo de variación de suelos entre dos áreas análogas. *Agronomía Tropical* 50: 567-587.
15. Trangmar, B.B., R.S. Yost y G. Uehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy* 38: 45-94.
16. Tukey, J. 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison - Wesley Editorial. Reading, Massachusetts.