

Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia)

Spatial variability of physical and chemical properties in soils of the experimental farm in the Magdalena University (Santa Marta, Colombia)

José Rafael Vásquez Polo¹, Diosdado Baena García², Juan Carlos Menjivar Flores²

¹Profesor Auxiliar Universidad del Magdalena. Colombia. jose.quevas@yahoo.es

²Profesores Asociados. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, A.A. 237. Palmira, Valle del Cauca, Colombia.

Autor para correspondencia: dbaenag@palmira.unal.edu.co, jcmenjivarf@palmira.unal.edu.co

Recibido: 17-08-2010 Aceptado: 3-12-2010

Resumen

En suelos destinados a la actividad agrícola de la granja experimental de la Universidad del Magdalena, Santa Marta - Colombia (74° 07' Y 74° 12' longitud oeste y 11° 11' y 11° 15' latitud), se estudió la variabilidad espacial de las propiedades físicas: humedad gravimétrica, textura, densidad aparente (Da), resistencia a la penetración (RP) y conductividad hidráulica (KH) y químicas: Materia orgánica (MO), pH, CIC, N, P, K, Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, Cu, Zn, Fe, Mn, B), utilizando una grid o malla de 29m*29m con 184 puntos de muestreo. El análisis de los datos se realizó empleando enfoques univariado, geoestadístico y multivariado. El análisis estadístico de los resultados mostró gran variabilidad de las propiedades; la densidad aparente y el pH presentaron baja variación; los componentes texturales, la RP, Ca⁺², Mg⁺², Cu y B mostraron variación media, mientras que la humedad gravimétrica, KH, MO, K⁺, Na⁺, CIC, Zn, P, Mn y Fe, expresaron alta variación. Con el análisis Geoestadístico se visualizó y graficó la variabilidad de cada propiedad evaluada y se evidenció la existencia de moderada dependencia espacial en las propiedades excepto en los contenidos de arena, Ca⁺², CIC, P y Cu que revelan fuerte dependencia espacial. El índice de homogeneidad multivariado para los suelos en estudio fue bajo, siendo textura, Na⁺, B, Fe, K, pH, Ca y MO las propiedades con mayor contribución a la heterogeneidad. El análisis de clasificación permitió agrupar cuatro zonas con condiciones edáficas similares, las que se podrán utilizar para determinar el sistema de muestreo, número de muestras, tamaño y distribución de unidades experimentales y con ello facilitar la implementación de prácticas de manejo agronómico acordes con las características de cada zona.

Palabras claves: Variabilidad espacial, propiedades físicas y químicas, geoestadística, análisis multivariado, zonas homogéneas.

Abstract

We have studied the spatial variability of agricultural soils in the experimental farm at Magdalena University (Santa Marta, Colombia; 74° 07' - 74° 12' W, 11° 11' - 11° 15' N). Analyzed soil properties included: gravimetric soil moisture content, grain size analysis, bulk density, resistance to root penetration, hydraulic conductivity, organic matter content, pH, cation exchange capacity, total N and P, exchangeable cations (Ca⁺², Mg⁺², K⁺, Na⁺), metals (Cu, Zn, Fe, Mn) and B content. Sampling was based on a 29 x 29 m grid, resulting in 184 sampling points. Data analysis was done using

univariate, multivariate and geostatistical approaches. The analyzed soil properties showed different degrees of variability: bulk density and pH low variability; grain size, resistance to root penetration, divalent exchangeable cations (Ca^{+2} and Mg^{+2}), Cu and B intermediate variability; while moisture content, hydraulic conductivity, organic matter content, monovalent exchangeable cations (K^+ , Na^+), cation exchange capacity, Zn, P Mn and Fe a large variability. The geostatistical analysis revealed the presence of moderate spatial dependency, except for sand content, exchangeable Ca^{+2} , cation exchange capacity, P and Cu, which showed strong spatial dependency. The multivariate homogeneity index was low, being exchangeable Na^+ , B, Fe, K, pH and organic matter content the soil properties with larger contributions to heterogeneity. Classification analysis enabled to identify four areas with similar edaphic conditions, which will allow to establish the sampling strategy, number of samples, size and distribution of experimental units and thus to improve the implementation of agronomic management practices in agreement with the characteristics of the soils.

Keywords: Spatial variability, physical and chemical properties, geostatistics, multivariate analysis and homogeneous zones.

Introducción

La dependencia espacial ha sido reconocida desde hace dos décadas para propiedades del suelo (Trangmar, Yost y Uehara 1985, citado por Obando 2006), y se manifiesta más fuertemente en las propiedades químicas (Webster 1985, citado por Ponce de León *et al.*, 1999). Las variaciones espaciales pueden estudiarse a través de técnicas geoestadísticas que permiten elaborar mapas y delimitar áreas de manejo homogéneo. Se ha estudiado la variabilidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que afectan la productividad de los cultivos, reportándose asociaciones entre éstas y el rendimiento, aunque dichas asociaciones dependen del rango de variación del parámetro y del rango en que éste afecta al rendimiento (Ortega y Flores, 1999). Para el estudio detallado de la variabilidad espacial de los suelos en las estaciones experimentales, no es factible el uso de la fotointerpretación como herramienta de mapeo, debido a que generalmente las unidades de suelos ocupan superficies pequeñas donde no hay límites obvios y donde los atributos de interés no se correlacionan con cambios visibles externamente (Burrough, 1986). En tales circunstancias es posible utilizar análisis geoestadístico, con uso del semivariograma y la interpolación para lograr un mapa iso-rítmico de atributos particulares (Burrough, citado por Giraldo y Mendoza, 2003). Sin embargo, el suelo es una entidad compleja que se caracteriza por la presencia de múltiples atributos, existiendo menor variabilidad en aquellas propiedades edáficas en

su condición natural, que cuando es sometido a uso y las propiedades que más se afectan por el manejo, serán las que presenten mayor variabilidad (Ovalles, 1992; Nielsen, Tillotson y Vieira 1983, Jaramillo, 2003). La granja Experimental de la Universidad del Magdalena, posee gran parte de su área destinada a la explotación agrícola haciendo posible la implementación de cultivos transitorios (hortalizas) y semiperennes (frutales de clima cálido). Siendo esta zona de alto impacto académico e investigativo, no se han realizado estudios que verifiquen la distribución espacial de las propiedades edáficas, lo cual hace imposible establecer el uso y manejo adecuados para el suelo. Por lo anterior, se hizo necesario evaluar la variabilidad espacial de las propiedades químicas y físicas de los suelos, a fin de agrupar zonas con condiciones edáficas similares y así asegurar el uso y manejo adecuados de los mismos.

El objetivo del presente trabajo fue caracterizar la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos de la Granja Experimental de la Universidad del Magdalena destinados a la docencia, la investigación y la extensión.

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló en la Granja Experimental de la Universidad del Magdalena, Santa Marta D.T.C.H, Colombia ($74^{\circ} 07'$ y $74^{\circ} 12'$ de longitud oeste y $11^{\circ} 11'$ y $11^{\circ} 15'$ de latitud norte), a 15 m.s.n.m, clima estepario tropical cálido y formación vegetal de bosque tropical seco, vegetación xerofítica, precipi-

tación media anual de 674mm, de carácter unimodal distribuida entre abril y noviembre, temperatura promedio de 28.5°C, humedad relativa 75% y vientos alisios del hemisferio norte (IDEAM, 2001). Los suelos de la granja son de origen aluvial, poco evolucionados con predominio de texturas gruesas, clasificados en el orden Entisoles y suborden Psamments (Lobato, 2003). Se realizó un muestreo preliminar de densidad aparente, pH y materia orgánica (propiedad de mayor variación) para determinar el tamaño de muestra, estableciendo dos transectos de 40m de longitud en direcciones ortogonales e intervalos de 5m. Con los valores obtenidos, se estimó el tamaño de muestra de 184 sitios, los cuales fueron distribuidos en el área de forma sistemática, utilizando un intervalo de muestreo de 29m*29m, sobre el mapa base del Campo Experimental, realizando observaciones en las intersecciones de la cuadrícula y georreferenciando cada punto con GPS 12 XL GARMIN (Figura 1) En los puntos de muestreo se

midieron las propiedades físicas (humedad, textura, densidad aparente, conductividad hidráulica y resistencia a la penetración) y químicas (MO, pH, CIC, N, P, K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , Cu, Zn, Fe, Mn, B) a 25 cm. de profundidad. Los análisis se realizaron según las metodologías descritas en el Manual de laboratorio de suelos y tejidos vegetales del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) 2006.

El análisis de la información se realizó con enfoque univariado, geoestadístico y multivariado. Para el análisis geoestadístico, se corrieron los datos en el programa GS+ (Geostatistics for the Enviromental Sciences Versión 5.1 de Gamma Design Software), se obtuvo el semivariograma experimental para cada propiedad y se estableció el modelo teórico de mejor ajuste, teniendo en cuenta como parámetros de decisión el coeficiente de determinación (R^2) y la suma de cuadrados de los residuales (RSS). Posteriormente se realizó el análisis de validación cruzada, mediante

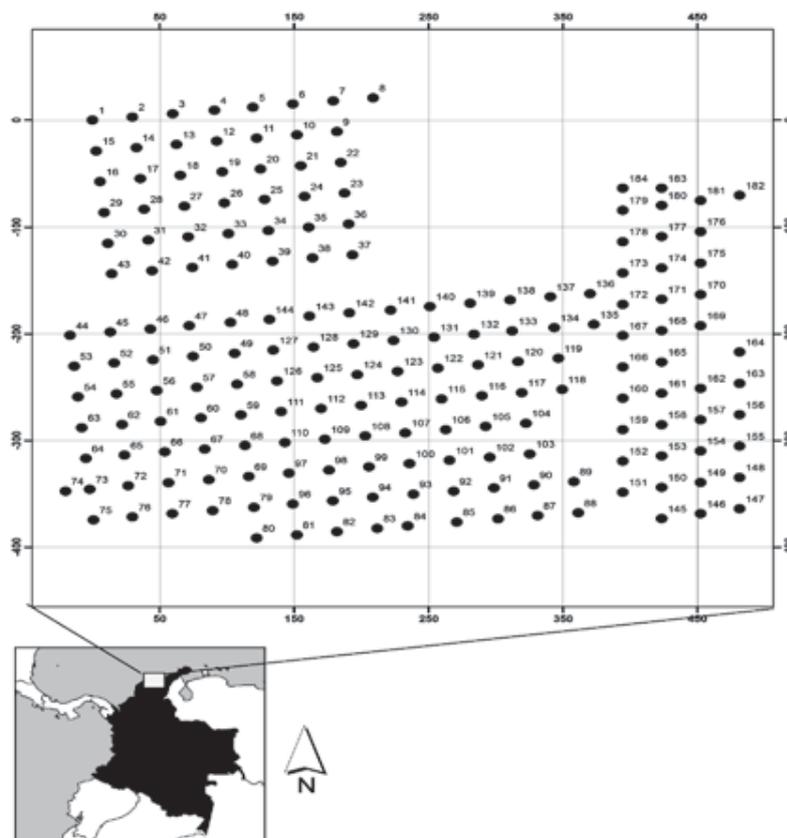


Figura 1. Demarcación de los sitios de muestreo, en la Granja Experimental de la Universidad del Magdalena.

el método de interpolación Kriging puntual, atendiendo la metodología sugerida por Moral 2004, que fue base para la construcción de mapas temáticos que permitió establecer la variabilidad espacial de las propiedades evaluadas. Para el análisis multivariado, se realizó análisis factorial de componentes principales a partir de los cuales se seleccionaron aquellos con valores propios mayores o iguales a uno, explicando así el mayor porcentaje de la variación total de los datos y análisis de clasificación o Clúster Análisis (método jerárquico) con utilización del algoritmo de Ward (mínima inercia), a fin de conformar grupos de suelos con características semejantes y delimitar zonas homogéneas.

Resultados y discusión

Enfoque univariado. De acuerdo con el grado de variabilidad de cada propiedad, definido en términos del coeficiente de variación (CV%), se establecieron cuatro categorías de variables: relativamente homogéneas con $CV% < 20\%$ (Da y pH), moderadamente heterogéneas con $20 < CV% < 40\%$ (textura y Ca^{+2}), normalmente heterogéneas $40 < CV% < 60\%$ (RP, KH, MO, Mg^{+2} , Cu y B) y extremadamente heterogéneas $CV% > 60\%$ (humedad, K^+ , Na^+ , CIC, P, Zn, Mn e Fe). De lo anterior se deduce que con excepción del Ca^{+2} y el pH, las propiedades químicas de los suelos de la granja presentan niveles de variación altos, asociados con una evidente heterogeneidad en toda el área de estudio. Los valores de densidad aparente determinados por el método del terrón parafinado (IGAC, 2006) en promedio pueden considerarse de normales a ligeramente altos para suelos de textura media; sin embargo, la propiedad no tiene variación significativa entre sitios de muestreo, posiblemente debido al efecto del uso y manejo y a las condiciones ambientales (baja precipitación y altas temperaturas) de la época seca en que se realizó el muestreo. El 69.6% de los sitios presentan predominio de textura franco arcillo arenosa, evidenciando la intergradación de texturas gruesas a medias, propiedad de los suelos de origen aluvial (Lobato, 2003). El promedio de humedad (3%), evidencia las condiciones climáticas imperantes en la época de muestreo. La resistencia a la penetración con

promedio de 2.1 MPa se presenta en niveles relativamente limitantes para los cultivos (Salamanca, 2000), mientras que la conductividad hidráulica con promedio de 1.58cm/h se califica como lenta a moderada. De acuerdo con las consideraciones de Ortega y Flores, 1999 y del Manual de Laboratorio del ICA 1992, el pH osciló entre ligeramente alcalino y alcalino, con máximo de 9.7 muy alcalino, situación extremadamente limitante para el desarrollo adecuado de los cultivos y mínimo de 6.8. De acuerdo con los valores promedio, las propiedades químicas se pueden estratificar de la siguiente manera: niveles de bajo a medio: MO, Fe, medio: Cu, Zn, CIC y alto: bases, P, Mn y B (Cuadro 1).

Análisis de la variabilidad enfoque geoestadístico. Teniendo en cuenta lo enunciado por Cambardella *et al.*, 1994, citados por Oliveira *et al.*, 1999 y Mejía (2007), el contenido de arena presentó una fuerte dependencia espacial lo cual es válido si se tiene en cuenta que los cambios texturales entre muestras vecinas son mínimos. Con excepción de las propiedades Ca, CIC, P y Cu con débil dependencia espacial, las propiedades restantes presentaron porcentajes de nugget relativo entre 25%-75% que corresponde a una moderada dependencia espacial. El alcance o rango efectivo, dentro del cual se mantiene la dependencia espacial varió de una propiedad a otra. La densidad aparente, la resistencia a la penetración, limo, conductividad hidráulica, pH, MO, CIC, Zn, Mn y el Fe presentan un alcance mayor a la máxima longitud del lote y por tanto, la dependencia espacial para estas propiedades se manifiesta a lo largo y ancho del mismo. Los semivariogramas para las propiedades físicas y químicas presentan estructuras diferentes de dependencia espacial, puesto que en ningún caso la semivarianza es constante en función de la distancia. Se observan además diferencias en los parámetros geoestadísticos y comportamiento característico de poblaciones entremezcladas (Reichert, 1985), debido a la presencia de condiciones de suelo diferentes a nivel de detalle en el área de estudio. Los modelos teóricos de mejor ajuste en la mayoría de los casos fueron el esférico y el exponencial (Cuadro 2), lo cual permite afirmar que las

Cuadro 1. Estadística descriptiva para las propiedades físicas y químicas. Granja Experimental de la Universidad del Magdalena.

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Moda	C.V.	S
H	0.6	44.2	2.3	1.5	179.8	4.2
Da	1.2	1.8	1.5	1.5	11.4	0.2
A	24.4	75.9	55.8	56.4	20.4	11.4
Ar	11.4	42.6	23.7	32.3	26.1	6.2
L	4.9	43.7	20.5	18.8	34.1	7.0
Res	0.2	6.0	2.1	3.0	48.2	1.0
KH	0.3	7.1	1.6	1.7	54.1	0.9
pH	6.8	9.7	8.3	8.3	6.1	0.5
MO	0.0	7.4	3.1	1.3	54.5	1.7
C ⁺²	4.7	18.2	11.4	11.0	25.0	2.9
Mg ⁺²	1.0	10.7	3.3	2.3	43.0	1.4
K ⁺	0.0	3.4	0.9	0.7	66.3	0.6
N ⁺	0.0	9.2	1.0	0.0	157.6	1.6
CIC	4.6	159.0	11.4	8.3	101.1	11.6
P	0.0	1785.0	158.1	53.0	212.7	336.3
Cu	0.2	6.0	2.0	1.0	50.8	1.0
Zn	0.0	36.2	1.7	0.1	207.1	3.5
Mn	1.4	153.3	30.6	11.0	70.7	21.6
Fe	0.1	274.0	20.2	2.1	179.6	36.3
B	0.1	2.5	0.7	0.8	46.2	0.3

Cuadro 2. Modelos teóricos ajustados a los semivariogramas experimentales para evaluar la variabilidad espacial. Granja Experimental de la Universidad del Magdalena.

Variable	Modelo	Efecto Nugget Co	Sill Co+C	Rango Efectivo (m)	Nugget Rel (%)	R ²
H	Esférico	10.75	21.51	210.9	50	0.96
Da	Exponencial	0.02	0.05	910.9	50	0.81
A	Esférico	49.9	136.8	155.2	0.63	0.92
Ar	Esférico	9.21	40.75	109	77	0.97
L	Esférico	33.3	66.61	697.2	50	0.9
Re	Exponencial	0.85	1.72	594.3	50	0.68
KH	Esférico	0.55	1.11	1010.9	50	0.8
pH	Exponencial	0.2	0.4	1048	50	0.76
MO	Esférico	1.34	5.68	1010.9	75	0.98
C ⁺²	Esférico	1.9	8.98	151	77	0.98
Mg ⁺²	Esférico	1	2	348	50	0.88
K ⁺	Exponencial	0.19	0.41	109.7	53	0.97
N ⁺	Esférico	1.99	3.99	387	50	0.51
CIC	Gausiano	84		639.3	82	0.64
P	Gausiano	45	208	300.8	78	0.88
Cu	Exponencial	0.2	1.12	47.8	77	0.94
Zn	Esférico	6.18	17.85	810.9	65	0.65
Mn	Exponencial	3.6	7.5	963	51	0.86
Fe	Esférico	8.89	20.68	1010.9	57	0.72
B	Exponencial	0.08	0.15	370.9	50	0.57

variables estudiadas cumplen con la hipótesis de fuerte estacionalidad, dado que sus modelos son acotados (Samper y Carrera, 1990).

Análisis multivariado. Análisis factorial por componentes principales. El análisis permitió reducir el conjunto original de variables de la siguiente manera: Variables físicas: se retuvieron tres variables sintéticas

(Factor 1, 2 y 3 cuyos valores propios fueron mayores de 1) que explican en conjunto 72% de la variabilidad total. Variables químicas: Se retuvieron cuatro variables sintéticas (Factor 1, 2, 3 y 4 cuyos valores propios fueron mayores de 1) que explican en conjunto, el 66% de la variabilidad total. Las propiedades físicas con la mayor contribución a la con-

formación del primer componente principal (Factor 1) fueron: contenido de arena, limo y arcilla. Este Factor 1 sintetiza la variación de los suelos en su composición textural. Las propiedades físicas con la mayor contribución a la conformación del segundo componente principal (Factor 2) fueron Da y KH. Mientras que el Factor 3 está explicado en mayor proporción por humedad y RP. Las propiedades químicas de mayor importancia en la construcción del primer factor (Factor 1) fueron Fe, Mn, CIC, MO y el pH. Las variables de más peso en la construcción del segundo componente (Factor 2) a su vez fueron: Ca⁺², K⁺¹ y B. En el Factor 3, Na⁺ y Mg⁺² y por último las variables P, Na⁺ y CIC, para el Factor 4. Con la información georreferenciada de los componentes principales para las propiedades físicas y químicas, se realizaron análisis geoestadísticos y se obtuvieron mapas de distribución espacial para cada propiedad estudiada. Destacando que para la parte central de la granja, los valores altos de resistencia a la penetración están relacionados a su vez con posibles problemas de compactación. En cuanto al análisis realizado a las variables químicas, el mapa del componente uno indica que valores de pH cercanos a la neutralidad están asociados en gran parte con altos contenidos de Mn, Fe, Cu, CIC y

altos contenidos de MO, lo que sugiere como estrategia de manejo, elevar los contenidos de MO a fin de atenuar el efecto de los altos valores de pH limitantes en la actividad agrícola. La diferencia entre el índice de homogeneidad multivariado (IHM) y el índice de homogeneidad multivariado parcial (IHMp), mide la contribución de cada variable a la heterogeneidad del lote. En su orden, las propiedades físicas con mayor contribución a la heterogeneidad del suelo son: textura (arena 2.2, limo 1.84, arcilla 1.63), conductividad hidráulica (1.47), densidad aparente (1.45) contenido de humedad gravimétrica (1.22) y resistencia a la penetración (1.21), por otro lado, las propiedades químicas con mayor contribución a la heterogeneidad del suelo son, en su orden: Na⁺ (6.53), B (5.84), Fe (4.92), K⁺ (4.74), pH (4.7), Ca⁺² (4.3), MO (4.16), Mg⁺² (3.9), P (3.8), Mn (3), Cu (2.84), CIC (2.8) Zn (0.6). A través del análisis de clasificación se determinaron las zonas homogéneas (Cuadro 3).

Los niveles de pH predominantes en las cuatro condiciones de suelo limitan la absorción de nutrientes por los cultivos, en este sentido los valores de los macro y micro nutrientes (considerados altos en la descripción de cada clúster), se deben analizar con detenimiento y mucho cuidado al realizar cualquier recomendación ya que solo representan los

Cuadro 3. Características de las zonas relativamente homogéneas, determinadas para la Granja Experimental de la Universidad del Magdalena.

Variable	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Color en el mapa	Amarillo	Azul	Rojo	Violeta
Humedad	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Media
Da	Un poco limitante	Limitante	Limitante	Limitante
RP	Un poco limitante	Un poco limitante	Un poco limitante	Normal
KH	Moderada	Moderadamente lenta	Moderadamente lenta	Moderadamente lenta
pH	Moderadamente alcalino	Moderadamente alcalino	Fuertemente alcalino	Moderadamente alcalino
MO	Media	Baja	Media	Media
Ca+2	Alto	Alto	Alto	Alto
Mg+2	Alto	Medio	Alto	Medio
K+	Alto	Alto	Alto	Medio
Na+	Bajo	Bajo	Alto	Bajo
CIC	Media	Bajo	Media	Baja
P	Alto	Muy alto	Alto	Muy alto
Cu	Medio	Medio	Medio	Medio
Zn	Medio	Bajo	Medio	Bajo
Mn	Alto	Alto	Alto	Alto
Fe	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
B	Alto	Alto	Alto	Alto
Textura	FARa	FA	FAR	FA

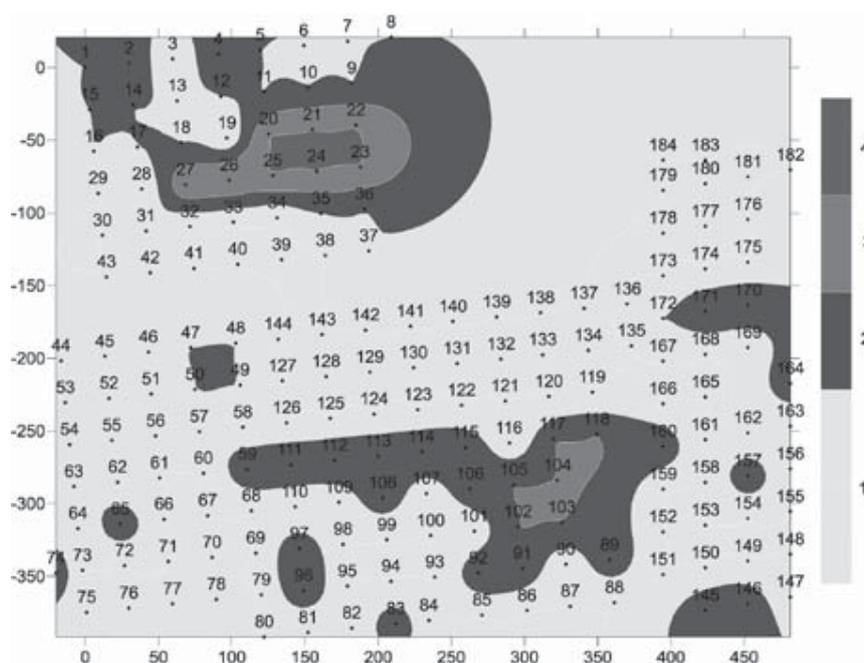


Figura 2. Zonas resultantes del análisis de clasificación en el área de estudio, de la Granja Experimental de la Universidad del Magdalena.

contenidos de la fase intercambiable del suelo y podrían enmascarar posibles deficiencias o toxicidades que se manifiesten en los cultivos que se proyecten, por esta razón, para evaluar la fertilidad física y química de las cuatro condiciones de suelo agrupadas es necesario complementar la información determinando los cationes y aniones en solución, carbonatos, bicarbonatos, porosidad, infiltración, contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Conclusiones

La variabilidad espacial de los atributos del suelo en el lote experimental es alta, siendo mayor en las propiedades químicas que en las físicas; con excepción del Ca^{+2} y el pH, las propiedades químicas de los suelos de la granja presentan niveles de variación altos, asociados con una evidente heterogeneidad en toda el área de estudio. El separado arena presentó una fuerte dependencia espacial lo cual es válido si se tiene en cuenta que los cambios texturales entre muestras vecinas son mínimos. Con excepción de las propiedades Ca^{+2} , CIC, P y Cu con débil dependencia espacial, las propiedades restantes mostraron una moderada dependencia espacial.

La densidad aparente, la resistencia a la penetración, limo, conductividad hidráulica, pH, MO, CIC, Zn, Mn y el Fe presentan un alcance mayor a la máxima longitud del lote (entre 594 m y 1010 m) y por tanto la dependencia espacial para estas propiedades se manifiesta a lo largo y ancho del lote.

Con el análisis de componentes principales de las variables físicas y químicas evaluadas en el presente estudio, se conformaron tres y cuatro componentes principales respectivamente que explicaron el 72% y 66% de la variación, siendo las variables textura, Na^+ y pH las que más influyen en la diferenciación de las condiciones de suelos.

Los enfoques univariado, multivariado y geoestadístico para el análisis de información, son herramientas que utilizadas individualmente o en conjunto ayudan en el análisis de la variabilidad espacial de los atributos del suelo y así, sus potencialidades o limitantes. Además, el mapa de zonas homogéneas debe constituirse entonces en instrumento de ayuda que guíe la toma de decisiones a fin de implementar prácticas acordes con las características físicas y químicas específicas (Figura 2).

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a las Directivas de la Universidad del Magdalena, por la financiación del proyecto, a través del Fondo para la Investigación Fonciencias.

Referencias

- Burrough, P. A. 1986. Soil variability: a late 20th century view. *Soils and Fertilizers*. 56 (5): 529-562.
- Cambardella, C. A.; Moorman T. B.; Konopka, A. E. 1994. Field scale variability in central Iowa soils. *Soil Sci*. 58:1501-1511.
- Giraldo, S.; Mendoza, A. 2003 Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas de los lotes experimentales destinados a los cultivos de hortalizas en el CEUNP. 57p.
- Instituto colombiano agropecuario. 1992. Manual del Laboratorio de Suelos y Aguas. 350p.
- Instituto colombiano de hidrología y meteorología, IDEAM. 2001. Sección de meteorología sinóptica aeronáutica. Datos diarios. Estación Simón Bolívar Santa Marta, Magdalena: IDEAM (mimeografiado).
- Instituto geografico agustin codazzi. 2006. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 400p.
- Jaramillo, D. 2003. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. p 553-572
- Lobato, R. 2003. Mapa taxonómico de los suelos de la Universidad del Magdalena. 36p.
- Mejia, A. 2007. Variabilidad espacial de las Propiedades Físicas y Químicas en un área productiva de palma africana (*Elaeis guineensis* L). Tesis de grado para optar al título de Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Pasto. 171p
- Moral, F. J. 2004. Aplicación de la geostatística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*. Vol 13, No. 1, pp. 78-86. Disponible en Internet: <http://www.aet.org/> ecosistemas/041/documentos/Revision3.doc [Consultada: 10 Enero. 2006.]
- Nielsen, D. R.; Tillotson, P. M.; Vieira, S. R. 1983. Analysing field measured soil water properties. *Agr. Water. Manag.* Amsterdam. v 6, p.93-109.
- Obando Moncayo, A. *Et al.* 2006. Variabilidad Espacial de Propiedades Químicas Y Físicas En Un Typic Udivitrands, Arenoso de la Región Andina Central Colombiana. En revista Facultad de Agronomía. Universidad Nacional sede Medellín. Vol 59, No. 1 p. 3217-3235.
- Oliveira, J. J. *Et al.* 1999. Variabilidad espacial de propiedades químicas en un solo salino-sódico. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 23: 783-789.
- Ortega, R. Flores, L. 1999. Introducción al manejo sitio - específico. Ministerio de Agricultura. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (ed.) En Agricultura de precisión. CRI Quilamapu-Chile. p13-46.
- Ovalles, F. 1992. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Maracay. 44 p.
- Ponce, D., *et al.* 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.
- Reichart, C. 1985. Variabilidad espacial (e Temporal) de solos. *Procesos de transferencia no Sistema Solo-Planta-Atmosfera*. Cuarta edición. Fundacao Cargill. p. 391-417.
- Salamanca, A. 2000. Influencia de las características físicas del suelo y su interacción con las condiciones climáticas en el comportamiento y calidad del *Desmodium heteracarpum subsp. Ovalifolium* (OHASHI) en tres regiones de Colombia. Tesis de grado para optar el título de ingeniero agrónomo. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 170p
- Samper, J., Carrera, L. 1990. *Geoestadística*. CIMNE. Barcelona. España. 484p.