

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS DE ZAPOPAN, JALISCO

Spatial Distribution of Organic Matter Content in Agricultural Soils of Zapopan, Jalisco

Daniel Ibarra Castillo¹, José Ariel Ruiz Corral², José Germán Flores Garnica² y Diego R. González Eguiarte^{3‡}

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue determinar la distribución espacial del contenido de materia orgánica (MO), variable asociada con la fertilidad en los suelos agrícolas, del municipio de Zapopan, Jalisco, México. Se realizaron muestreos "georreferenciados" de suelo, para su posterior análisis en laboratorio y determinación del contenido de MO. Los resultados del análisis se capturaron en una hoja de cálculo electrónica (Microsoft Excel) para integrar una base de datos georreferenciados, a partir de la cual se probaron dos métodos de interpolación espacial: Kriging ordinario (KO) y distancia inversa ponderada. Con base en el cuadrado medio del error (CME) y una validación cruzada, se seleccionó el método KO para generar una imagen raster del contenido de MO, a partir de la cual, mediante análisis espacial, se hicieron diferentes interpretaciones sobre el contenido de MO en estos suelos. Para ello, se utilizó el sistema de información geográfica (SIG) IDRISI32. Una vez que los resultados mostraron que el mejor método fue KO, se realizó el análisis espacial del contenido de MO y se observó que la totalidad de la superficie agrícola de Zapopan es de escaso contenido de MO en 51% de la superficie, donde el contenido de MO se ubica, incluso, en la categoría de muy pobre, lo cual afecta negativamente su fertilidad.

Palabras clave: mapas temáticos, interpolación espacial, geostatística, SIG.

¹ Universidad de Guadalajara-CUCBA-Departamento de Ciencias Ambientales Zapopan. 45100 Zapopan, Jalisco, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias CIRPAC-Guadalajara, Jalisco, México.

³ Universidad de Guadalajara-CUCBA-Departamento de Desarrollo Rural Sustentable Zapopan. 45100 Zapopan, Jalisco, México.

[‡] Autor responsable (drgonzal@cencar.udg.mx)

Recibido: julio de 2004. Aceptado: octubre de 2006.
Publicado en Terra Latinoamericana 25: 187-194.

SUMMARY

The objective of this research was to determine the spatial distribution of organic matter (OM) content, characteristic associated with soil fertility, in agricultural soils of Zapopan, Jalisco, Mexico. A geo-referenced soil sampling technique was used and OM content in the soil samples was analyzed in the laboratory. Laboratory results were compiled into a Microsoft Excel spreadsheet to integrate a geo-referenced data base, which was used to test two spatial interpolation techniques: Ordinary Kriging (OK) and Inverse Distance Weighting. According to Square Means of Error (CME) and a crossed validation, the OK was selected to generate an image raster of the content of OM. With this image and using spatial analysis it was possible to make different interpretations on the OM content by using the Geographical Information System (GIS), IDRISI32. Once the results showed that the best method was KO, the spatial analysis of OM content was carried out. Results showed that most of the agricultural soils of Zapopan have a scarce content of OM. In 51% of the soil surface, the OM content is in the category of very poor, which is associated with low soil fertility.

Index words: thematic maps, spatial interpolation, geostatistics, GIS.

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica (MO), además de ser un indicador de la fertilidad del suelo, mejora la estructura edáfica, la cual, a su vez, influye en la formación de micro y macroagregados, la continuidad de poros hacia la superficie y la infiltración de agua a todo el perfil (Sustaita *et al.*, 2000; Caravaca *et al.*, 2001). Por otra parte, mejora las condiciones de los suelos minerales; en los arenosos incrementa la capacidad de retención de agua y de nutrimentos, mientras que en los arcillosos los hace menos pesados y mejora su labranza (Edward, 2000). La MO actúa como la reserva principal de

nutrimentos del suelo (Navarro y Navarro, 2000) y permite que las partículas se agrupen en forma de agregados (Morgan, 1977); además, reduce considerablemente la erosión del suelo (Kirkby y Morgan, 1984), aumenta su fertilidad (por el contenido de humus), mejora la estructura e incrementa la captación de humedad (Havlin *et al.*, 1999).

Los suelos de las áreas agrícolas del municipio de Zapopan son predominantemente Regosoles (SEMADES, 2006) y se caracterizan por una textura arenosa y un bajo contenido de MO (Fundación Produce Jalisco, 2000). Este contenido de MO se compensa con la adición de fertilizantes químicos y no es un obstáculo para que la región se considere una de las zonas agrícolas más productivas del país, en condiciones de temporal; porque en la región se conjugan suelos profundos con alta capacidad de almacenamiento de humedad y un régimen de lluvias favorable, tanto en cantidad como en distribución a lo largo del año. Sin embargo, el poco contenido de MO influye de manera negativa en una pobre estructura de los suelos regionales (Sustaita *et al.*, 2000), lo cual los convierte en altamente susceptibles a la erosión, tanto eólica como hídrica (Kirkby y Morgan, 1984). Así, se genera un serio problema de conservación del recurso suelo para la región, lo que ha motivado la ejecución de programas encaminados a sanear los suelos y mejorar su sostenibilidad. Para orientar de manera adecuada programas de esta índole, se requiere de un diagnóstico cuantitativo y ágil sobre la situación de la MO, en el suelo. De aquí que el objetivo del presente estudio fue determinar, mediante el uso de diferentes SIG, la distribución espacial del contenido de MO, lo que permitirá inferir sobre algunas condiciones de la fertilidad de los suelos agrícolas en la región de estudio.

Por lo general, evaluar el estado actual de un recurso edáfico en una región determinada implica caracterizar su distribución espacial, con fundamento en muestreos de campo y un proceso de interpolación geográfica, mediante el cual se generan imágenes o mapas temáticos (Flores *et al.*, 2002; Anguiano *et al.*, 2003). Dos de los procedimientos de interpolación geográfica de mayor uso son la distancia inversa ponderada (DIP) (Hartkamp *et al.*, 1999) y el método Kriging ordinario (KO) (Brus *et al.*, 1996). El método DIP es el método de interpolación que más se utilizó, debido a la sencillez de sus cálculos. Sin embargo, el método KO ha probado su utilidad y ventaja sobre la mayoría de los métodos de interpolación, en la descripción de la distribución espacial de variables geológicas y edáficas, como fósforo disponible, potasio

intercambiable y pH (Webster y McBratney, 1987). Brus *et al.* (1996) compararon seis métodos para estimar propiedades de suelos en puntos no muestreados y reportaron que Kriging fue el más confiable, al mostrarse como más consistente al interpolar diferentes variables. Dicha consistencia se evidenció tanto al trabajar con un muestreo libre, como con uno estratificado por tipo de suelo. Las ventajas de KO derivan de su capacidad de proveer el mejor estimador insesgado (Olea, 1991).

El método Kriging se basa en la teoría de variables regionalizadas, desarrollada en la década de los años 1960 por Matheron (Hemyari y Nofziger, 1987), y utiliza semivariogramas, los cuales son una medida de la correlación espacial entre observaciones hechas en varios puntos, lo que, a su vez, describe la función de varianza sobre una distancia en incremento. Para esto se requiere formar pares de observaciones. Cuando se utiliza el semivariograma, la atención se enfoca sobre las diferencias entre las observaciones, por lo que el peso de éstas cambia, de acuerdo con el arreglo espacial de las muestras. El método KO utiliza una combinación lineal de pesos en puntos conocidos $\sum \lambda_i Y_i$, para estimar el valor en un punto desconocido, donde Y_i son las variables evaluadas en las localidades de observación, λ_i son los pesos Kriging (Hartkamp *et al.*, 1999).

El método DIP calcula un valor para sitios no muestreados, utilizando un promedio ponderado de valores de sitios cercanos sí muestreados. La ponderación está dada por una función inversamente proporcional a la distancia entre el punto a estimar y el punto muestreado (De la Mora *et al.*, 2004).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la zona agrícola del municipio de Zapopan, la cual se ubica predominantemente en el valle de Zapopan, entre 20°50'54.4" y 20°41'24.03" N y 103° 24' 19.83" y 103° 33' 23.17" O, con una altitud promedio de 1600 m (INEGI, 2001). La precipitación pluvial anual media es 979 mm, distribuida entre los meses de mayo a octubre, siendo julio el mes más lluvioso, con 251 mm; la temperatura media es de 19.7 °C y el período de mayo a julio es el trimestre más cálido (Ruiz *et al.*, 2003a). En la región predominan los suelos del tipo Regosol, ya que cubren más de 90% de la superficie agrícola (SEMADES, 2006). Los Regosoles son suelos formados a partir de materiales no consolidados, de textura arenosa. Se caracterizan por no presentar capas distintas. En general, son claros y se parecen a la roca

que los subyace, cuando no son profundos. Muchas veces están acompañados de afloramiento de rocas o tepetate y son de susceptibilidad variable a la erosión (FAO, 1985).

Inicialmente, el área agrícola del municipio de Zapopan se delimitó tomando como fuente las imágenes vectoriales de uso del suelo correspondientes al Proyecto de Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Jalisco (SEMADES, 2006). Con esta fuente y mediante el uso del Sistema de Información Geográfica SIG IDRISI32 (Eastman, 1999), se estimó una superficie agrícola de 21 037.71 ha (de 1980 a 1990). Sin embargo, durante el trabajo de muestreo en campo, se observó que una proporción de esta superficie ya no es de uso agrícola, por lo que se realizó un levantamiento de la superficie agrícola real mediante geoposicionamiento, utilizando el sistema de posicionamiento global (GPS) Garmin XL-12. Como producto del trabajo de geoposicionamiento del área, se determinó que la superficie agrícola del municipio de Zapopan, en el año 2003, fue de 11 871.41 ha; la diferencia entre las dos

superficies obedece al desarrollo urbano en las últimas dos décadas (Figura 1).

Para el muestreo se partió del mapa del programa del área agrícola del municipio de Zapopan y, por medio del Arc View SIG 3.2, se estableció un diseño sistemático con base en una plataforma de proyección de cuadrícula UTM (Universal Transverso de Mercator), con distancia cada 900 m entre sitios de muestreos georreferenciados, generando 242 sitios a muestrear. Se tomaron 242 muestras de suelo en igual número de sitios; de éstas, en el laboratorio, se analizaron únicamente 105, debido a que al revisar información cartográfica actualizada, se observó que el área representada por las muestras restantes ya estaba invadida por la mancha urbana. De esta forma, la superficie total comprendida por el estudio fue de 11 871.41 ha de uso agrícola. El distanciamiento entre muestras se estableció de acuerdo con los siguientes criterios: a) el antecedente de que los suelos regionales son típicamente pobres en MO, con base en muestreo de campo y análisis de laboratorio;

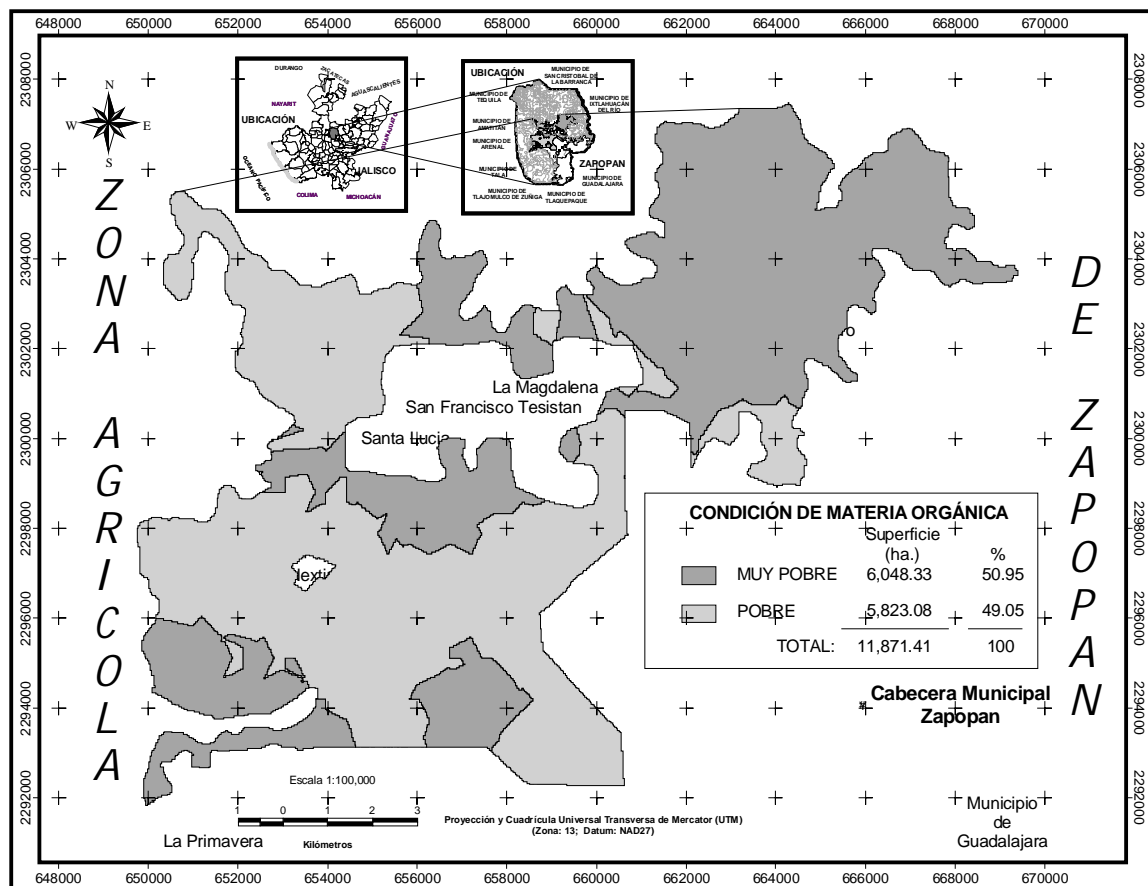


Figura 1. Localización del área de estudio y distribución espacial del contenido de materia orgánica, en la zona agrícola del municipio de Zapopan, Jalisco.

b) predominan los suelos de tipo Regosol, con un horizonte orgánico disminuido por la erosión hídrica y eólica, muy dinámicas en la zona (Ruiz *et al.*, 2003b); c) un muestreo previo de la MO (en 25 ha) a intervalos de 50, 100, 250 y 500 m, realizado en el año 2002, dentro del marco de este mismo trabajo, y el cual reportó poca variabilidad en el contenido de MO, aun a 500 m como distancia de muestreo; d) recursos económicos limitados para el muestreo y análisis de laboratorio. El muestreo se realizó en una sola toma, a una profundidad de 0 a 60 cm, localizando los sitios de muestreo con el GPS ya descrito. Las muestras colectadas se turnaron al Laboratorio de Física y Química de Suelos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), para la determinación del contenido de MO, por el método de Walkley-Black - Norma Oficial Mexicana 021 (Norma Oficial Mexicana 021, 2000). Los resultados del análisis de laboratorio se capturaron en una hoja de cálculo, para integrar una base de datos georreferenciada.

Se utilizó la matriz de datos georreferenciados de contenido de MO para desarrollar un proceso de interpolación espacial, considerando dos métodos: KO y DIP. Estos dos métodos de interpolación se ejecutaron mediante el sistema geoestadístico GS+ ver. 5.1 (Gamma, 2001). La interpolación con el método KO permite convertir los datos de la variable de estudio (en este caso MO) en superficies continuas (Burrough y McDonnell, 1998); se puede calcular mediante la ecuación siguiente (De la Mora *et al.*, 2004):

$$\tilde{Z}_{KO}(x_0) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot Z(x_i) \quad (1)$$

donde: $\tilde{Z}_{KO}(x_0)$ = valor estimado de KO en el sitio no muestreado x_0 ; I_i = ponderación para el punto de muestreo i en el sitio x_i ; $Z(x_i)$ = valor de la variable Z (en este caso % MO), para un punto de muestreo i , en el sitio x_i ; n = número de puntos de muestreo. La varianza de KO se calcula con la expresión:

$$S_{KO}^2(x_0) = C(x_0, x_0) - \sum_{i=1}^n I_i \cdot C(x_i, x_0) + m \quad (2)$$

donde: $S_{KO}^2(x_0)$ = varianza de KO en el sitio no muestreado x_0 ; $C(x_0, x_0)$ = covarianza del punto a estimar en el sitio x_0 , consigo mismo; $C(x_i, x_0)$ = covarianza del punto de muestreo en el sitio x_i y el punto a estimar en el sitio x_0 . Los valores de MO se interpolaron con base en

KO, con la finalidad de obtener superficies continuas de valores. Para esto se obtuvo el variograma de los datos. El variograma es la herramienta básica del método KO y se utiliza para modelar la correlación espacial entre observaciones (Czaplewski *et al.*, 1994). La variación espacial definida por el variograma se modeló con el objetivo de utilizar los modelos generados para estimar los valores de contenido de MO en los sitios que no se muestrearon.

El método DIP se basa en el cálculo de un valor para sitios no muestreados, para lo cual utiliza un promedio ponderado de valores de sitios cercanos que sí se muestrearon. La ponderación es producto de una función inversamente proporcional a la distancia entre el punto a estimar y el punto muestreado, como se expresa en la siguiente función lineal (De la Mora *et al.*, 2004):

$$\hat{b}^*(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^P} b(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^P}} \quad (3)$$

donde: $\hat{b}^*(x_0)$ = valor estimado en el sitio no muestreado x_0 ; $b(x_i)$ = valor observado en el sitio x_i ; d_i^P = distancias desde cada sitio muestreado hacia el sitio no muestreado a estimar; P = exponente de distancia (el cual se define iterativamente hasta lograr el mínimo error medio); n = número de sitios muestreados. En este estudio se probaron tres niveles de ponderación de DIP: DIP simple (exponente de distancia igual a 1); DIP cuadrático (exponente de distancia igual a 2); DIP cúbico (exponente de distancia igual a 3).

El ajuste de los métodos de interpolación se probó mediante un procedimiento de validación cruzada, el cual se ejecutó desde el sistema GS+ Versión 5.1, y consiste en la generación de residuales que representan la diferencia entre valores observados y estimados. Estos últimos se generan removiendo el valor muestreado de un sitio en particular, después de lo cual su valor se estima con base en los restantes sitios (Isaaks y Srivastava, 1989).

Se calculó el cuadrado medio del error (CME) de los residuales para identificar cuál de los métodos de interpolación se ajustó mejor a los datos de MO. En este sentido, se selecciona el que presenta un menor valor de CME (De la Mora *et al.*, 2004). El CME resume

estadísticos que incorporan tanto el sesgo como la dispersión de la distribución del error ($CME = \text{varianza} + \text{sesgo}^2$), el cual se calcula de la forma siguiente (Isaaks y Srivastava, 1989):

$$CME = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n r^2 \quad (4)$$

donde: CME = cuadrado medio del error; n = número de sitios muestreados y r = residuales (diferencia entre los valores estimados y los valores observados).

El método de interpolación de mejor ajuste se utilizó para generar una imagen raster del contenido de MO en el módulo de análisis de superficie del SIG IDRISI32. A partir de esta imagen y utilizando este mismo SIG, se realizaron análisis de la variación espacial de la MO en el área agrícola de Zapopan, para determinar el estado de la fertilidad de los suelos regionales con la clasificación propuesta por Moreno-Dahme (González *et al.*, 1996).

La descripción de las condiciones de fertilidad, según Moreno-Dahme (González *et al.*, 1996), son las siguientes:

- a) Muy pobre. Conduce a la pérdida de los suelos y limita el desarrollo de los cultivos, debido a la baja presencia de MO humificada en el suelo.
- b) Pobre. Esta condición restringe con severidad la conservación y productividad de los suelos, con riesgo a la pérdida del suelo; la pobre fertilidad disminuye el desarrollo de los cultivos.
- c) Mediano. Los suelos con mediano porcentaje de MO contribuyen con una regular fertilidad para el desarrollo de los cultivos, limitando la conservación y productividad de los suelos.
- d) Rico. Los suelos ricos en MO se asocian con una fertilidad adecuada de los suelos y contribuyen a su conservación, así como al buen desarrollo y productividad de los cultivos.
- e) Muy rico. Los suelos muy ricos en MO corresponden a una alta fertilidad, la cual contribuye de manera significativa a la conservación y productividad de los suelos, mejora sus características de aprovechamiento, e incrementa la productividad y el desarrollo de los cultivos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con respecto a los valores de contenido de MO obtenidos en los muestreos de campo, se apreció que, en promedio, el contenido de MO en el área de estudio es de 1%, pero se presentan valores tan bajos como

0.07%. Estos resultados coinciden de manera aproximada con muestreos realizados en el año 2000 (Fundación Produce Jalisco, 2000), en los que, en promedio, se obtuvo un valor de 1.1% de MO, con un mínimo de 0.1%, para 17 muestreos dentro del área de estudio.

En el Cuadro 1 se aprecia que cerca de la mitad de los muestreos correspondieron a una condición de muy pobre, con valores de MO inferiores a 1%, mientras que prácticamente la otra mitad de los muestreos se clasificaron con un contenido de MO pobre, esto es entre 1.0 y 1.99%. Solamente 3 de los 105 muestreos reportaron una condición media de MO, con un contenido entre 2.0 y 2.99%.

Lo anterior señala, en términos generales, una condición de pobreza de MO en los suelos agrícolas de Zapopan, situación que coincide con reportes previos sobre la región (Fundación Produce Jalisco, 2000).

Con respecto al análisis de la distribución espacial de los valores de MO, al interpolar los valores muestrales de MO con los métodos KO y DIP, y al validar las estimaciones de estos métodos mediante el procedimiento de validación cruzada y la comparación del valor del cuadrado medio del error (Cuadro 2), se establece que los métodos de interpolación espacial se comportaron de manera similar. Sin embargo, se aprecia que el método KO fue ligeramente superior. En la Figura 2 se muestra el variograma isotrópico del contenido de MO; es claro que este variograma representa una clara y definida estructura espacial, según Sahin y Hassan (1998). El semivariograma cumple con el objetivo de determinar los parámetros que se utilizaron en la interpolación (Journel y Huijbregts, 1978); así, el semivariograma representa el modelo teórico que es herramienta básica de apoyo a la técnica de interpolación espacial KO. Existe una tendencia a la variabilidad espacial, según los resultados, sobre

Cuadro 1. Condición del suelo, por su contenido de materia orgánica, en la zona agrícola del municipio de Zapopan, Jalisco.

Materia orgánica	Condición del suelo	Superficie	Superficie agrícola
%		ha	%
< 1	Muy pobre	6 048.33	50.95
1 a 1.99	Pobre	5 823.08	49.05
2 a 2.99	Medio	0.00	0.00
3 a 3.99	Rico	0.00	0.00
≥ 4	Muy rico	0.00	0.00
Total		11 871.41	100.00

Cuadro 2. Valores del cuadrado medio del error (CME) para dos técnicas de interpolación, Kriging ordinario (KO) y tres modalidades de distancia inversa ponderada (DIP) al estimar el contenido de materia orgánica del suelo.

Método	CME
Kriging ordinario	0.23509
Distancia inversa ponderada (Exponente 1)	0.24508
Distancia inversa ponderada (Exponente 2)	0.24648
Distancia inversa ponderada (Exponente 3)	0.24880

el contenido de MO. Para A_0 (rango) representa la distancia hasta donde existe correlación espacial para la variable en cuestión y se ubicó aproximadamente a 31 100 m, distancia máxima entre los pares de sitios en la que existe correlación espacial entre los mismos (De la Mora *et al.*, 2004). Para *sill* ($C_0 + C$ o meseta) es el parámetro que se ajusta a los puntos de mayor valor del semivariograma (Journel y Huijbregts, 1978), donde existe correlación espacial (De la Mora *et al.*, 2004) y estabilidad en su semivariograma; constituye una estructura espacial definida en relación con la variabilidad espacial de los datos obtenidos para MO (Armstrong y Carignan, 1997) y resulta en un valor de 0.45280. Para *nugget* (C_0) define una discontinuidad a partir del origen de la gráfica (Samra *et al.*, 1989) y presenta un valor 0.19490. Para el modelo teórico, el de mejor ajuste para la variable MO fue el modelo exponencial, modelo que significa dependencia espacial (Samra *et al.*, 1989). De aquí que se decidiera utilizar el método Kriging con que se generó la imagen raster de contenido de MO, dado que presentó el menor valor de CME y es el método

considerado como el mejor estimador lineal insesgado (Olea, 1991). La Figura 3 muestra la imagen raster de contenido de MO obtenida mediante la interpolación con KO. En ella se aprecia la distribución espacial de los valores de MO en la superficie agrícola de Zapopan. Se advierte que los valores de contenido de MO varían de 0.43 a 1.67%. Estos valores extremos difieren ligeramente de los valores originales de muestreo, debido a que ya son valores generados a partir de un modelo. Sin embargo, la información de esta imagen ratifica el diagnóstico preliminar del Cuadro 1, en el sentido de que, en términos generales, la condición de fertilidad de los suelos de Zapopan, con respecto al contenido de MO, se ubica entre pobre y muy pobre, lo cual evidencia una coincidencia razonable entre los valores representados por la interpolación por KO y los valores reales obtenidos de las muestras analizadas.

Los bajos contenidos de MO que se presentan, en general, pueden explicarse en función de diferentes factores, entre ellos la textura del suelo, por la repercusión que ésta tiene en los procesos de erosión. Resultados de esta misma investigación reflejan texturas ligeras en más de 90% de la superficie estudiada, lo cual, de acuerdo con Kirkby y Morgan (1984), predispone al suelo a una erosión que, a su vez, reduce la MO en la capa arable (Toy *et al.*, 2002). Sin embargo, de acuerdo con Fundación Produce Jalisco (2000), la erosión en la región es sólo leve o moderada, lo cual se explica por ser una zona sensiblemente plana. De esta manera, los bajos valores de MO en la región oriente deberían atribuirse a una menor capacidad productiva que, de acuerdo con un diagnóstico preliminar de esta misma

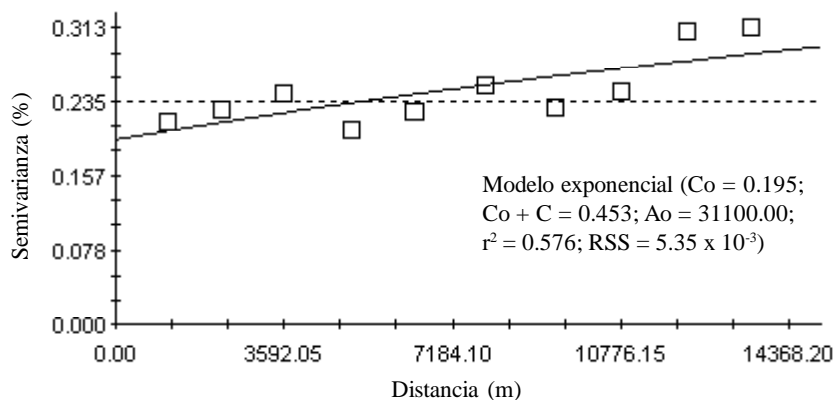


Figura 2. Variograma isotrópico del contenido de materia orgánica en el área agrícola del municipio de Zapopan, Jalisco.

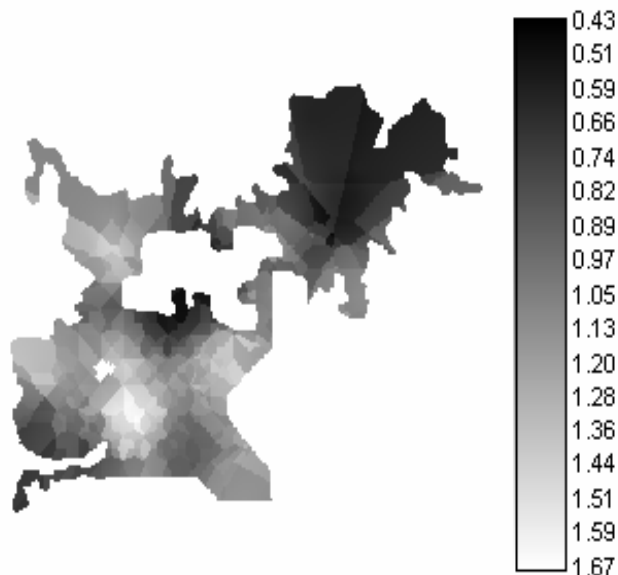


Figura 3. Contenido de materia orgánica (%) en el área agrícola de Zapopan, Jalisco.

investigación, estaría obedeciendo a una menor profundidad de estos suelos. Adicionalmente, ha influido la práctica de una agricultura a base de cultivos esquilmanes (Ruiz *et al.*, 1997). De cualquier manera, es claro y entendible que la región haya sufrido un adelgazamiento del horizonte orgánico, de por sí reducido en este tipo de suelos (FAO, 1985); este adelgazamiento, a su vez, seguirá propiciando erosión, mientras no se utilicen sistemas adecuados de manejo para conservar los agregados del suelo de manera sostenible (Toy *et al.*, 2002).

Aunque, en términos generales, los valores de MO son de escasa variación en el área de estudio, sí se detectaron diferencias que permitieron clasificarlos.

Al reclasificar los valores espaciales de MO que se muestran en la Figura 3, se hizo la diferenciación de la siguiente manera (Figura 1): la condición de MO "muy pobre" corresponde a 6048.33 ha y se concentra básicamente en la porción noreste del área de estudio, mientras que la condición "pobre" prevalece en 5823.08 ha y tiende a concentrarse en la zona suroeste (Cuadro 1). Tanto el mapa de la Figura 3 como el de la Figura 1 representan una contribución al ordenamiento de diferentes programas gubernamentales (Anguiano *et al.*, 2003), instrumentados desde hace varios años en la región de estudio, para incrementar el contenido de MO. La utilidad de los mapas estriba en que discriminan áreas, de acuerdo con su contenido de MO.

CONCLUSIONES

- El contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan se encuentra predominantemente por debajo del valor máximo observado (1.99%).
- El método Kriging ordinario se mostró ligeramente superior al resto de los métodos, al realizar la interpolación espacial del contenido de materia orgánica, y define adecuadamente una de las componentes de fertilidad del suelo.
- El muestreo en campo y la descripción de la variación espacial del contenido de materia orgánica permitieron valorar su contenido en los suelos del área agrícola de Zapopan y definir dos estratos relacionados con la fertilidad: muy pobre y pobre contenido de materia orgánica, correspondiendo aproximadamente 50% de la superficie agrícola a cada una de estas categorías.
- El mapa de distribución espacial del contenido de materia orgánica constituye una herramienta que puede utilizarse ahora, y en el futuro, para tomar decisiones en relación con el diseño y la instrumentación de programas de incremento del contenido de materia orgánica de los suelos de ésta y otras regiones.

LITERATURA CITADA

- Anguiano C., J., J. J. Alcántar R., J. A. Ruiz C., I. J. González A., I. Vizcaíno V., R. Regalado R. y C. de la Mora O. 2003. Recursos edafo-climáticos para la planeación del sector productivo en el estado de Michoacán. Libro Técnico 1. INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán, México.
- Armstrong, M. et J. Carignan. 1997. Géostatistique linéaire, application au domaine minier. École de Mines de Paris. Paris, Francia.
- Brus, D. J., J. J. de Gruijter, B. A. Marsman, R. Visschers, A. K. Bregt, A. Breeuwsma, and J. Bouma. 1996. The performance of spatial interpolation methods and chloropleth maps to estimate properties at points: a soil survey case study. *Environmetrics* 7: 1-16.
- Burrough, P. A. and R. A. McDonnell. 1998. Principles of geographical information systems. Clarendon Press. Oxford, UK.
- Caravaca, F., A. Lax, and J. Albaladejo. 2001. Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse-amended semiarid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1235-1238.
- Czaplewski, R. L., R. M. Reich, and W. A. Bechtold. 1994. Spatial autocorrelation in growth of undisturbed natural pine stands across Georgia. *For. Sci.* 40: 314-328.
- De la Mora O., C., J. G. Flores G., J. A. Ruiz C. y J. García V. 2004. Modelaje estocástico de la variabilidad espacial de la calidad de agua en un ecosistema lacustre. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 20: 99-108.
- Eastman, J. R. 1999. Idrisi32. Guide to GIS and image processing. Volume I. Clark Labs. Clark University. Worcester, MA, USA.

- Edward, J. P. 2000. La ciencia del suelo y su manejo. Paraninfo. Madrid, España.
- FAO. 1985. Mapa mundial de los suelos (1:5 000 000) FAO-UNESCO Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Leyenda revisada. Roma, Italy.
- Flores L., H. E., K. F. Byerly M., J. J. Aceves R. y J. A. Ruiz C. 2002. Diagnóstico del sistema de producción de agave con énfasis en problemas fitosanitarios. pp. 63-95. *In: Análisis agroecológico del Agave tequilana* Weber var. Azul con énfasis en problemas fitosanitarios en Jalisco. Publicación Especial 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Pacífico Centro-C.E. Altos de Jalisco. Tepatitlán, Jal., México.
- Fundación Produce Jalisco. 2000. Base de datos de muestreos de suelo en campo en las áreas agrícolas del estado de Jalisco. Archivos electrónicos. Fundación Produce Jalisco. Guadalajara, Jalisco, México.
- Gamma. 2001. Geostatistics for the Environmental Sciences (GS+) Release 5.1.1. Gamma Design Software. Plainwell, MI, USA.
- González A., I. J., J. A. Ruiz C., J. G. López A., L. Mena H., R. A. Martínez P., J. A. Camarena B., M. H. Pérez B., V. Vázquez V. y R. Villa H. 1996. Diagnóstico del potencial agroecológico para caña de azúcar en áreas de ampliación del Ingenio de Puga, en el estado de Nayarit. Publicación Especial 1. INIFAP-CIRPAC. Tepic, Nayarit, México.
- Hartkamp, A. D., K. de Beurs, A. Stein, and J. W. White. 1999. Interpolation techniques for climate variables. NRG-GIS Series 99-01. CIMMYT. Mexico, D. F.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale, and W. L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. 6th ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Hemyari, P. and D. L. Nofziger. 1987. Analytical solution for punctual kriging in one dimension. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 268-269.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001. Modelo digital de elevación escala 1:50 000. *In: Modelos digitales de elevación*. INEGI. Aguascalientes, Ags., México.
- Isaaks, E. H. and R. M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Journel, A. G. and A.V. Huijbregts. 1978. Mining geostatistics. Academic Press. New York NY, USA.
- Kirkby, M. J. y R. P. C. Morgan. 1984. Erosión de suelos. Limusa. México, D. F.
- Morgan, R. P. C. 1977. Soil erosion in the United Kingdom. Cranfield Institute of Technology. Occasional Paper 4. Cranfield, UK.
- Navarro B., S. y G. Navarro G. 2000. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Norma Oficial Mexicana 021 (PROY-NOM-021-RECNAT). 2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Estados Unidos Mexicanos - Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México, D.F.
- Olea, R. A. 1991. Geostatistical glossary and multilingual dictionary. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Ruiz C., J. A., H. E. Flores L., R. A. Martínez P., D. R. González E. y L. Nava V. 1997. Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el Distrito de Desarrollo Rural de Zapopan, Jalisco. Folleto Técnico 5. INIFAP-CIRPAC-C.E. Centro de Jalisco. Tlajomulco de Zúñiga, Jal., México.
- Ruiz C., J. A., I. J. González A., J. Anguiano C., I. Vizcaíno V., D. Ibarra C., J. Alcalá G., S. Espinosa V. y H.E. Flores L. 2003a. Estadísticas climatológicas básicas para el estado de Jalisco (Período 1961-2000). Libro Técnico INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Centro de Jalisco. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México.
- Ruiz C., J. A., I. J. González A., J. R. Regalado R., J. Anguiano C., I. Vizcaíno V. y D.R. González E. 2003b. Recursos edafoclimáticos para la planeación del sector productivo en el estado de Jalisco. Libro Técnico 2. INIFAP. CIRPAC. Guadalajara, Jalisco, México.
- Sahin, A. and H. M. Hassan. 1998. Enhancement of permeability variograms using outcrop data. *Arabian J. Sci. Eng.* 23: 137-144.
- Samra, J. S., H. S. Gill, and V. K. Bhatia. 1989. Spatial stochastic modeling of growth and forest resource evaluation. *For. Sci.* 35: 663-676.
- SEMADES (Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable). 2006. Ordenamiento ecológico territorial del estado de Jalisco. Última modificación, 27 de julio de 2006. <http://www.semades.jalisco.gob.mx/06/ordenamiento.htm> (Consulta: noviembre 28, 2006)
- Sustaita, R. F., V. Ordaz Ch., C. A. Ortiz S. y F. de León G. 2000. Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debidos al uso agrícola. *Agrociencia* 34: 379-386.
- Toy, T. J., G. R. Foster, and K. G. Renard. 2002. Soil erosion (Processes, prediction, measurement, and control). John Wiley. New York, NY, USA.
- Webster, R. and A. B. McBratney. 1987. Mapping soil fertility at Broom's Barn by simple kriging. *J. Sci. Food Agric.* 38: 97-115.