

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UN SUELO ACRISOL CULTIVADO CON CAÑA DE AZÚCAR.

SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF AN ACRISOL SOIL CULTIVATED WITH SUGAR CANE.

Sergio Salgado Velázquez¹, Sergio Salgado García², Francelino Augusto Rodrigues Jr³, David Palma López², Samuel Córdova Sánchez¹, Joaquín Alberto Rincón Ramírez² y Antonio López Castañeda¹.

¹Estudiante de ingeniería en Agronomía-División Académica de Ciencias de la Tierra Universidad Popular de la Chontalpa, ²Grupo MASCAÑA del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, ³Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. salgados@colpos.mx

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de un suelo Acrisol cultivado con caña de azúcar para establecer zonas específicas de manejo agronómico en el predio de nombre Andrés Cruz con una superficie de 100 ha, perteneciente a la Impulsora Agrícola A.C. Para ello se elaboró una malla regular equidistante a 100 m y con la función de navegación del GPS se ubicaron los puntos de muestreo en campo. Se colectó la muestra de suelo de 0 a 30 cm de profundidad. Las muestras se enviaron al laboratorio para su análisis. Las propiedades estudiadas fueron el pH, porcentaje de saturación de acidez (PSA), materia orgánica (MO), Fosforo (P-Olsen), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Zinc (Zn) y textura. Se realizó el análisis de la estadística clásica donde se encontró que el P-Olsen, K, Ca, Mg y Zn presentaron alta variabilidad. El PSA y Ca presentaron una variabilidad mediana, y el pH, MO, CIC, Arcilla, limo y Arena presentaron baja variabilidad. El análisis con el enfoque de la geoestadística permitió determinar que las propiedades del suelo pH, PSA; MO, K, Zn y arena presentaron alta dependencia espacial (<25%); y las propiedades P-Olsen, Ca, Mg, CIC, limo y arcilla presentaron moderada dependencia espacial (25-75%). Con los mapas generados por el método de kriging ordinario fue posible identificar áreas parciales con diferente variabilidad, así como la dirección de mayor variabilidad de la propiedad en función de la distancia. Con estos mapas fue posible realizar recomendaciones de manejo agronómico en función de la necesidad de cada zona de manejo específica cómo fue la recomendación de dosis de fertilizantes, dosis de cal dolomítica y, variedades tolerantes a la acidez, que toleran sequía y que toleran excesos de humedad en el suelo.

Palabras claves: geoestadística, kriging, semivariogramas, manejo específico, caña de azúcar.

Abstract

The objective of the present work was to evaluate the spatial variability of the physical and chemical properties of an Acrisol soil cultivated with sugar cane to establish specific areas of agronomic management in the property named Andrés Cruz with an area of 100 ha, belonging to the Impulsora Agricultural AC For this, a regular mesh was created equidistant to 100 m and with the GPS navigation function the sampling points were located in the field. The soil sample was collected from 0 to 30 cm depth. Samples were sent to the laboratory for analysis. The properties studied were pH, percentage of acid saturation (PSA), organic matter (OM), Phosphorus (P-Olsen), Potassium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Zinc . The analysis of classical statistics was performed where P-Olsen, K, Ca, Mg

and Zn were found to have high variability. The PSA and Ca presented a medium variability, and the pH, MO, CIC, Clay, Slime and Sand presented low variability. The analysis with the geostatistical approach allowed us to determine that soil properties pH, PSA; MO, K, Zn and sand presented high spatial dependence (<25%); And the P-Olsen, Ca, Mg, CIC, silt and clay properties presented moderate spatial dependence (25-75%). With the maps generated by the ordinary kriging method it was possible to identify partial areas with different variability, as well as the direction of greater variability of the property as a function of distance. With these maps it was possible to make recommendations of agronomic management according to the need of each specific management zone, as was the recommendation of doses of fertilizers, doses of dolomitic lime and acid tolerant varieties that tolerate drought and tolerate excesses of Moisture in the soil.

Key words: geostatistics, kriging, semivariograms, specific management, sugarcane.

Introducción

El análisis de la variabilidad espacial de las características de un campo, es uno de los pilares en los que se fundamenta la agricultura de precisión (Arango, 2004). Los suelos más evolucionados presentan menor variabilidad espacial; su identificación ayuda a mejorar el muestreo, el diseño de experimentos y la interpretación de los resultados, y presenta la posibilidad de manejar más eficientemente los recursos de producción, con menor riesgo de deterioro ambiental. Una característica dominante de los suelos es su heterogeneidad, aún en pequeñas áreas que podrían considerarse como homogéneas. Ésta induce una variabilidad en sus propiedades que puede llegar a ser de considerable magnitud y que puede afectar en mayor medida las generalizaciones y predicciones que se hagan con ellas. La variabilidad es una condición inherente a los suelos y su origen está influenciado tanto por condiciones naturales (variados factores y procesos pedogenéticos), como por condiciones inducidas por el uso y el manejo de los mismos (Jaramillo *et al.*, 2008). La variabilidad del suelo depende, aparte del tipo de suelo, de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando ha estado sometido a uso. Aquellas propiedades que más se alteran por el manejo del suelo serán las que presenten la mayor variabilidad (Ovalles, 1992).

Materiales y Métodos

Sitio experimental. El trabajo se llevó a cabo en un suelo Acrisol Cutánico (Endoarcílico, Férrico) cultivado con caña de azúcar desde hace cinco años, propiedad de la Impulsora Agrícola A.C., en el predio Andrés Cruz, ubicado en el ejido “La Esperanza” del municipio de Huimanguillo, Tabasco. La precipitación promedio anual es de 2356 mm, en los meses de febrero a mayo se presenta una temporada de sequía (276 mm), la temperatura mínima promedio es mayor a 20°C. El ciclo de cultivo es una resoca, que corresponde a la zafra 2015/16 (Salgado *et al.*, 2013c).

Sitios de muestreo. La superficie del predio es de 100 ha, se trazó una cuadrícula equidistante de 100 m en gabinete sobre la imagen satelital del área de estudio (Salgado *et al.*, 2010) para generar 100 nodos que se tomaron como puntos de muestreos y se delimitaron los polígonos que corresponden a las parcelas cultivadas con caña de azúcar. Esto se elaboró con la ayuda del sistema de información geográfica ArcMap V.9.3. La ubicación de los puntos de muestreo y los polígonos se cargaron al GPS Mobile Mapper 10.

Variabes de estudio. Las variables determinadas en laboratorio fueron: Textura, Reacción del suelo (pH), en agua relación 1:2, Porcentaje de saturación de acidez (PSA), Capacidad de intercambio catiónico (CIC), Materia orgánica (MO), Fosforo extraíble según Olsen (P), además de Potasio (K), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) intercambiabes y Zinc (Zn); con los métodos descritos en la NOM-021-RECNAT (2001). El porcentaje de saturación de acidez (PSA) se calculó con la ecuación 1:

$$PSA = (\text{Acidez meq/100 g}) / ((\text{Acidez} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}) \text{ meq/100g}) \times 100 \dots (1)$$

Análisis estadístico. Para las propiedades químicas, se realizó el análisis de la variabilidad de acuerdo con la estadística clásica, y se determinaron las medidas de tendencia central y dispersión. Con estas se calculó el número de muestras que se deben tomar para obtener el valor de cada parámetro, con una desviación (d) con respecto al valor medio, para lo cual se utilizó la ecuación 2 siguiente:

$$n = \frac{t^2_{\alpha, \infty} S^2}{d^2} \dots (2)$$

Dónde: n es el número de muestras a coleccionar para obtener el valor medio con una probabilidad del 95%; t es la distribución de t de Student; $\alpha = 0.05$; = infinitos grados de libertad; d = desviación con respecto al valor medio (Acevedo *et al.*, 2008).

Para determinar si los datos seguían una distribución normal se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y Kolmorov-Smirnov (Jaramillo, 2010). Los valores atípicos fueron determinados por la gráfica de cajas y bigotes, y estos fueron reemplazados por la media de los vecinos siguiendo la adopción de Jolliffe (2002).

Se realizó el análisis con el enfoque de la geoestadística, para lo cual se calcularon los valores de semivarianza experimental con la Ecuación 3.

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [\mathbf{Z}(\mathbf{X}_i) - \mathbf{Z}(\mathbf{X}_i + \mathbf{h})]^2 \dots (3)$$

Luego, se ajustó el semivariograma experimental al semivariograma teórico utilizando el método gráfico (Gotway y Hartford, 1996). El ajuste consiste en fijar un modelo matemático teórico conocido del semivariograma a los puntos del semivariograma experimental (Burrough, 1987; Rossi *et al.*, 1992; Maurer, 1994). Una vez conocido el modelo teórico y el valor de los parámetros del semivariograma experimental, se aplicó el método de interpolación de kriging, que fue utilizado para obtener los mapas de distribución de los valores de las variables en el área de estudio, utilizando el programa geoestadístico Vesper así como los módulos geoestadísticos de R y ArcGis v. 9.0.

Resultados y Discusión

Análisis de las propiedades físicas y químicas con el enfoque de la estadística clásica

Indica que el pH presentó la menor variabilidad (7.9%), seguido por el contenido de arena (11.2%), contenido de arcilla (24.7%), contenido de limo (34.1%), MO (34.8%), CIC (42.8%); variabilidad intermedia porcentaje de saturación de acidez (54.2%), Al (54.5%), Acidez (57.6%) e H (68.3%), y la más alta variabilidad la presentaron el Zn (458.4%), el P-Olsen (246.9%), el K (111.6%), Mg (115.5%) y el Ca (99%). Los valores de variabilidad observados son similares a los que señalan Acevedo *et al.* (2008), con menor variabilidad pH (3.7%) y la MO (25.5%); y con la mayor variabilidad el P-Olsen

(53.6%) y el K (70%). Al respecto Palma-López *et al.* (2015), determinaron que en suelos Acrisoles de la sabana de Huimanguillo, Tabasco; el coeficiente de variación (CV) fue alto para todos los elementos analizados, lo que muestra la alta variabilidad existente en el suelo para estos macros y microelementos. En el caso de la MO, el coeficiente de variación del 27% se considera adecuado para estudios de campo. Los altos coeficientes de variación observados en algunas variables se deben al manejo irregular al que ha estado sometido el predio Andrés Cruz.

La mayoría de las propiedades muestreadas presentaron una distribución donde las medias y las medianas eran similares, revelando así distribuciones que eran solo ligeramente asimétricas a excepción del PSA, MO, Al y Arcilla. En todas las propiedades estudiadas la kurtosis fue mayor a 2 excepto para la Acidez e H, mostrando un sesgo hacia la derecha. Esta asimetría es mayor para P-Olsen, K, Zn y Mg. Con respecto al Skewness solamente la MO, CIC, PSA, Acidez, H, Al y los porcentajes de arena, limo y arcilla se encontraron valores muy cercanos a cero. Esto refleja un claro comportamiento asimétrico de las distribuciones de los datos, razón por la cual se pensaría que las distribuciones no se ajustarían a la normal. Para corroborar lo anterior se realizaron las pruebas de bondad de ajuste de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov (Acevedo *et al.*, 2008). De las dos pruebas solamente coincidió que la MO y el porcentaje de arcilla, se ajustaron a una distribución normal.

Análisis geoestadístico de las propiedades físicas y químicas del suelo

Los propiedades físicas y químicas del suelo se sometieron a un análisis de geoestadística y fueron interpolados en una cuadrícula de 100 m por kriging ordinario usando ArcGis 9.3 (Rodríguez *et al.*, 2013a). Para todas las propiedades, los variogramas se ajustaron considerando la distribución como isotrópica. Antes del kriging, se seleccionaron los variogramas mejor ajustados basándose en el error cuadrático medio (RMSE) y los criterios de Akaike (AIC) usando VESPER 1.6 (Minasny *et al.*, 1999). Además, se calculó el Índice de Dependencia Espacial (SDI), que es la relación entre la varianza del efecto nugget y el sill (Cambardella *et al.*, 1994) para cada variograma y expresado como porcentaje (Tabla 1).

Es posible observar que en este estudio pH, MO, PSA, K, Zn y contenido de arena presentaron una SDI que se considera alto según Cambardella *et al.* (1994), y moderada para las otras propiedades del suelo.

Kriging

La distribución de la variabilidad de las propiedades químicas y físicas del suelo se presenta en las Figura 2 (ESRI, 2012), y la validación cruzada a todos los semivariogramas ajustados y los errores de predicción se presentan en el Tabla 1.

Potencial de Hidrógeno (pH). La clase más alta de pH (>4.8), se ubica de norte hacia el noroeste del predio Andrés Cruz y representa la menor superficie (Figura 1 a). La segunda clase (<4.3) ocupa el resto de la superficie. En las zonas de manejo agronómico existe una diferencia entre ellas de 0.5 unidad de pH. No obstante, de que ambas clases de pH se clasificaron como fuertemente ácido (<5.0), lo cual restringe la disponibilidad de los nutrientes en el suelo (Letelier, 1967), y no refleja el efecto de la aplicación anual de 1 t/ha de cal dolomítica de los últimos cinco años realizado por la Impulsora Agrícola A.C.(IA).

Porcentaje de saturación de acidez (PSA). El PSA de 0-20 coincide con la clase más alta del pH del suelo lo cual reflejaría menor toxicidad del Al para el cultivo de caña de azúcar. El valor deseable de PSA para el cultivo de caña de azúcar es de 10 a 25 % (Salgado *et al.*, 2013b). El PSA de 20-40 ocupa

la mayor superficie en el predio Andrés Cruz y se distribuye suroeste, sur y noreste (Figura 1 b). El PSA de 40-60 se distribuye de suroeste a sureste en el predio. Los últimos PSA también coinciden con el menor pH. Lo anterior refuerza la idea de mejorar el programa de encalado, realizando aplicaciones de cal dolomítica de 1.0 y 1.5 t ha⁻¹ para las zonas de pH >4.8 y <4.3, respectivamente; complementada con 0.5 t de yeso (CaSO₄), esta sal es soluble y permite que el calcio pase a mayor profundidad del suelo (Kingston *et al.*, 2007; Vitti *et al.*, 1992). Lo que permitiría reducir la toxicidad del Al intercambiable y mejorar la disponibilidad de los nutrimentos.

Las variedades que se cultivan en el predio son la Mex 69-290 y CC01-1940 que toleran excesos de humedad, y su rendimiento estimado varía de 60 a 75 t ha⁻¹ y 70 t ha⁻¹, respectivamente; con riegos de auxilio y una dosis de fertilizante 199.6-35.17-92.4 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O aplicada en forma fraccionada (a los 30 y 60 días después de la siembra). Si se reduce el PSA y se mejora la disponibilidad de los nutrientes, es factible reducir la dosis de N a 120 kg ha⁻¹, procurando que su aplicación sea mecanizada para evitar las pérdidas del nitrógeno por volatilización y escurrimiento superficial. Así mismo, se recomienda establecer variedades generadas en suelos ácidos de otras regiones cañeras, como la SP 70-1284 que está adaptada a baja fertilidad y tolera la acidez del suelo (Salgado *et al.*, 2013a).

Materia orgánica (MO). Las clases de MO <5.0 y >5.0 indican que el contenido de MO en el predio Andrés Cruz se considera rico y muy rico (Figura 1 c), de acuerdo a la clasificación de Tavera (1995) y similar a lo reportado por Palma-López *et al.* (2015); quienes encontraron contenidos de MO de ricos (3 a 5 %) a muy ricos (>5.0 %) en suelos Acrisoles de la sabana de Huimanguillo, Tabasco. La riqueza de MO en estos suelos se atribuye a la acidez del suelo que reduce la mineralización. Conservar la MO asegura el suministro de nutrientes al suelo a largo plazo razón por la cual se recomienda realizar cosecha mecanizada en verde y evitar el laboreo intensivo como el uso de arado y rastreo pesado, para evitar la erosión hídrica de la capa superficial del suelo.

Fosforo (P-Olsen). La clase baja de P (<5.5) se distribuye de sur a noroeste y en el este. La clase media de P (5.5-11.0) se distribuye de suroeste al oeste, y otra región de sureste al noroeste y al noreste (Figura 1 d); dentro de ella se ubica la clase alta de P (>11.0, CSTPA, 1980). La clase media y alta reflejan la acumulación de fosforo a través de la fertilización química. Sin embargo, IA aplica la dosis 199.6-35.17-92.4 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, lo cual no explicaría la acumulación de fosforo a la profundidad de 0 a 30 cm en los últimos cinco años. Para asegurar una nutrición sustentable con fosforo se sugiere aplicar la dosis 100, 80 y 60 kg/ha de P₂O₅ para las zonas de bajo, medio y alto contenido de fosforo en el suelo.

Potasio (K). Por los bajos contenidos de K con fines de manejo agronómico se generan dos recomendaciones de fertilización para el cultivo de caña de azúcar 100 y 80 kg ha⁻¹ de K₂O para las clases de <0.2 y 0.2-0.3, y 0.3-0.5 meq/100 g, respectivamente ((Figura 1 e). Los bajos contenidos de potasio del predio Andrés Cruz coincide con lo reportado por Salgado *et al.* (2016) para suelos Acrisoles cultivados con cítricos, e indica que la dosis de K₂O aplicada al cultivo de caña de azúcar no ha generado una acumulación de este elemento en el suelo. Dada la textura franco arenosa se recomienda fraccionar la aplicación de K al igual que la de N para evitar pérdidas.

Calcio (Ca). Las clases de Ca se clasifican como bajas (2.0-5.0 meq/100 g) y muy bajas (<2.0 meq/100 g). La clase baja de Ca se ubica al norte del predio Andrés Cruz y coincide con la clase más alta de pH, y guarda una relación lineal (Figura 1 f). La clase muy baja ocupa la mayor superficie y coincide con la clase de menor pH. Los bajos contenidos de Ca de estos suelos son propios a su naturaleza de acuerdo a Salgado *et al.* (2010), y similar a lo indicado por Palma-López *et al.* (2015), quienes reportaron contenidos de Ca bajos con valores de <2.0 meq/100g para suelos Acrisoles de la sabana de

Tabla 1. Criterios de selección de modelo, características y errores de predicción de los modelos de los semivariogramas seleccionados para las propiedades físicas y químicas del suelo.

Variable	Criterios de selección del modelo		Modelo	Nugget (Co)	Partial sill (C)	Sill (Co+C)	Rango (Ao)	Errores de predicción del modelo				SDI (%)
	RMSE	AIC						1	2	3	4	
pH	0.00147	-412.4	Gaussiano	0.01695	0.94205	0.959	1312.6	0.3647	0.3898	0.01121	1.058	2
PSA (%)	0.08418	-40.98	Esférico	0	1.002	1.002	106.2	1.056	1.065	0.00689	1.007	0
MO (%)	0.002589	-264.3	Exponencial	0	0.08229	0.08229	30.6	2.221	1.87	-0.00866	0.8413	0
P (ppm)	0.0893	-37.7	Esférico	0.2597	0.2193	0.479	752.2	5.826	4.506	-0.002739	0.8192	54
K (meq/100 g)	0.00106	-302.9	Gaussiano	0	0.004991	0.004991	135.4	0.05136	0.05528	0.01006	1.071	0
Ca (meq/100 g)	0.02315	-121	Gaussiano	0.2185	0.14024	0.35874	212	0.5456	0.5321	-0.006719	0.9776	61
Mg (meq/100 g)	0.007032	-200.4	Gaussiano	0.05861	0.04077	0.09938	155.7	0.7387	0.7795	0.007127	1.046	59
CIC (Cmol (+) kg-1)	0.006069	-209.8	Gaussiano	0.1247	0.07015	0.19485	122.9	7.495	5.463	0.01205	0.7335	64
Zn (ppm)	0.000792	-340.1	Gaussiano	0.006309	0.148991	0.1553	954	0.1165	0.1194	-0.0131	1.025	4
Arena (%)	0.0004298	-379.2	Exponencial	0	0.005807	0.005807	77.27	4.446	4.194	-0.002766	0.9598	0
Limo (%)	0.01242	-210.8	Esférico	0.08828	0.05052	0.1388	575.8	7.812	6.061	0.01106	0.7827	64
Arcilla (%)	0.002263	-272.9	Gaussiano	0.04531	0.03393	0.07924	349.6	4.939	4.594	-0.004042	0.9417	57

1. Error medio estandarizado; 2. Error cuadrático medio; 3. Error estándar promedio y 4. Error cuadrático medio estandarizado.

2. $SDI = [Co / (Co + C)] \times 100$

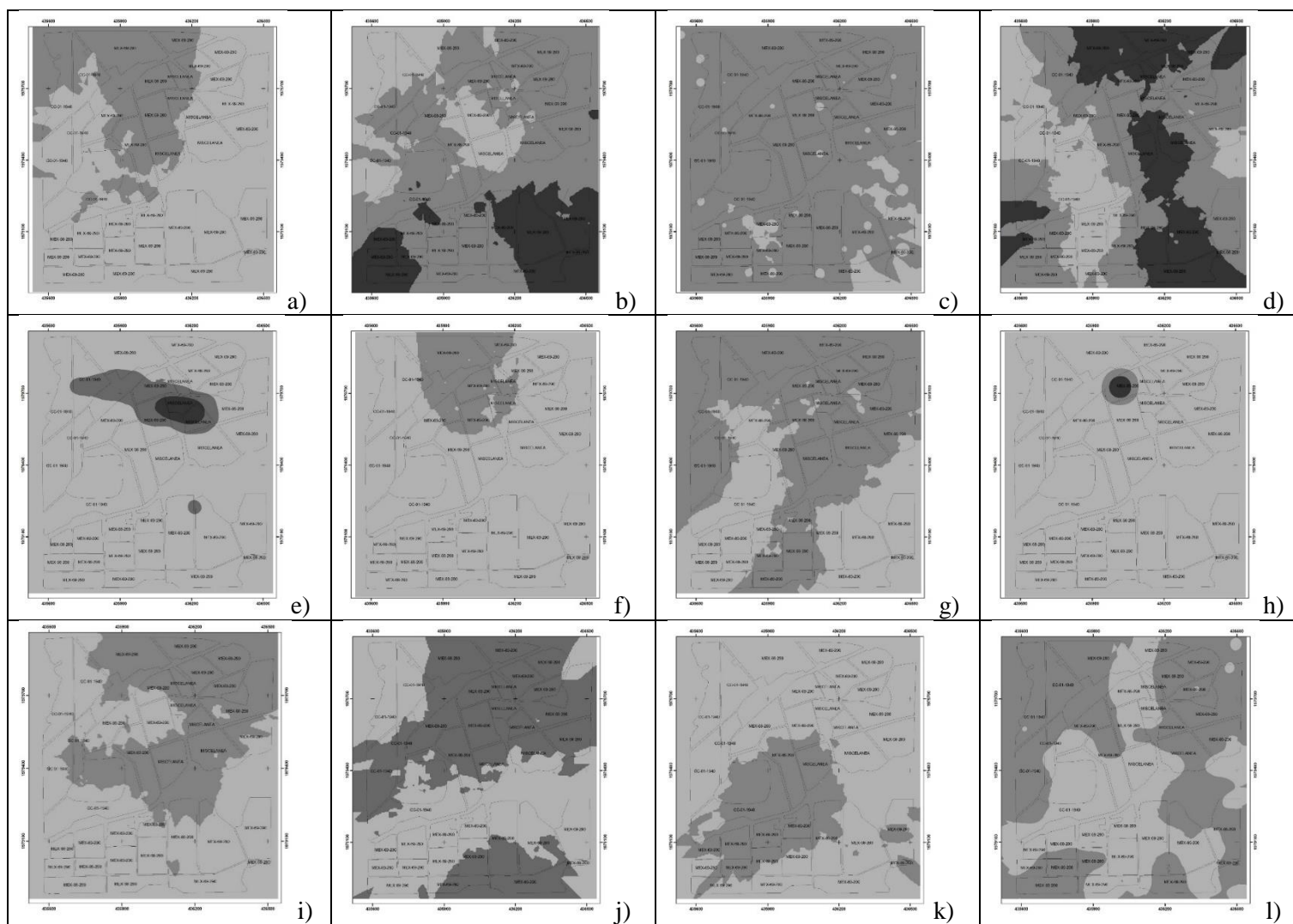


Figura 1. Mapas generados por el método de interpolación kriging: a) pH, b) PSA, c) MO, d) Fosforo, e) Potasio, f) Calcio, g) Magnesio, h) Zinc, i) CIC, j) Arcilla, k) Limo y l) Arena.

Huimanguillo, Tabasco. Lo cual refuerza la idea de mejorar el programa de encalado de IA, ya que las aplicaciones previas de cal dolomítica, no se reflejan en un incremento en el contenido de Ca en estos suelos.

Magnesio (Mg). Las clases de Mg se clasifican como bajas (0.5-1.0 meq/100 g) y muy bajas (<0.5 meq/100 g). La clase baja de Mg se ubica de norte a sur cubriendo la mayor superficie del predio Andrés Cruz y coincide con la clase más alta de pH y la clase más alta de Ca. La clase muy baja ocupa la menor superficie y coincide con la clase de menor pH y de Ca (Figura 1g). Los bajos contenidos de Mg de estos suelos son propios a los acrisoles de Huimanguillo, Tabasco (Salgado *et al.*, 2010; Palma-López *et al.*, 2015). Lo anterior, refuerza la idea de mejorar el programa de encalado de IA, ya que las aplicaciones previas de cal dolomítica, no se reflejan en un incremento en el contenido de Mg en estos suelos.

Zinc (Zn). La clase deficiente (<0.5 ppm, Viets y Lindsay, 1973) ocupa la mayor superficie y coincide con los valores reportados para los Acrisoles cultivados con Cítricos (Salgado *et al.*, 2016) y Acrisoles cultivados con Piña (Salgado *et al.*, 2010). La clase marginal (0.5-1.0 ppm) contiene a la clase adecuada (>1.0 ppm) y juntas ocupan una superficie menor a 2 ha y están situadas hacia el norte del predio Andrés Cruz (Figura 1h). Dada la pobreza de Zinc en estos suelos es necesario aplicar 20 kg ha⁻¹ de Zn ya que este elemento contribuye a incrementar el rendimiento de azúcar de 1.0 a 1.5 ton ha⁻¹ (Salgado *et al.*, 2013a)

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). La clase baja de CIC (5.0-15.0 meq/100 g) ocupa la mayor superficie del predio Andrés Cruz y se distribuye en forma de V de sur a noroeste y hacia el este (Figura 1i). También se asocia con las clases bajas de pH, PSA, Ca y Mg. La clase media (15.0-25.0 meq/100 g) se distribuye del centro del predio hacia el noreste. La clase baja de CIC indica que los suelos Acrisoles son de baja fertilidad, con presencia de arcillas tipo 1:1 (Palma *et al.*, 2015 y Zavala *et al.*, 2014). Lo cual confirma que es necesaria la aplicación de humus en forma de compostas para incrementar la CIC.

Arcilla, limo y arena. Las clases de arcilla generaron dos zonas de manejo agronómico (Figura 1j), donde el mayor contenido de arcilla (20-25%) está asociado a los suelos Acrisoles y Gleysoles y, el menor contenido de arcilla (15-20%) al suelo Cambisol, lo cual coincide por lo reportado por Salgado *et al.* (2010). Las clases de limo generaron dos zonas de manejo agronómico (Figura 2k). Las clases de arena generaron dos zonas de manejo agronómico (Figura 1l). La clase baja de arena (<50%) contiene la clase alta de limo. Los porcentajes medios obtenidos de arcilla, limo y arena, fueron de 19.65, 21.33 y 58.97, respectivamente, por lo que de acuerdo al triángulo de texturas de Buckman y Brady (1995) se clasifica como franco-arenosa. Esto es similar a lo reportado por Salgado *et al.* (2016), quienes reportaron porcentajes medios de 33, 14 y 53, respectivamente para arcilla, limo y arena, en plantaciones de cítricos establecidas en suelos Acrisoles de la sabana de Huimanguillo. Al respecto Palma *et al.* (2015), encontraron porcentajes medios de 23, 14 y 63, respectivamente, para arcilla, limo y arena, en plantaciones de eucalipto establecidas en suelos acrisoles de la sabana de Huimanguillo. Por lo que se observa que los suelos Acrisoles de la sabana de Huimanguillo predomina en mayor cantidad el porcentaje de arena lo que ocasiona poca retención de humedad en los primeros 30 cm de profundidad del suelo, siendo necesario aplicar riego de auxilio en la época de secas que abarca desde el mes de febrero a mayo; y reducir el laboreo intensivo para evitar la erosión. La textura franca arenosa requiere de variedades como Mex 68-P-23 y SP 70-1284 que son tolerantes a sequía y en las partes bajas la variedad RD 75-11 que tolera excesos de humedad (Salgado *et al.*, 2013c).

Conclusiones

El análisis de la estadística clásica determinó que el P-Olsen, K, Ca, Mg y Zn presentaron alta variabilidad. El PSA y Ca presentaron una variabilidad mediana, y el pH, MO, CIC, Arcilla, limo y Arena presentaron baja variabilidad. El uso de técnicas geoestadísticas permitió detectar y establecer zonas de manejo agronómico específicas para el cultivo de caña de azúcar en el predio Andrés Cruz perteneciente a la Impulsora Agrícola. Por lo tanto, se acepta la hipótesis general. El análisis con el enfoque de la geoestadística permitió determinar que las propiedades del suelo pH, PSA; MO, K, Zn y arena presentaron alta dependencia espacial (<25%); y las propiedades P-Olsen, Ca, Mg, CIC, limo y arcilla presentaron moderada dependencia espacial (25-75%). Con los mapas generados por el método de kriging ordinario fue posible identificar áreas parciales con diferente variabilidad, así como la dirección de mayor variabilidad de la propiedad en función de la distancia. Con estos mapas fue posible realizar recomendaciones de manejo agronómico en función de la necesidad de cada zona de manejo específica como fue la recomendación de dosis de fertilizantes, dosis de cal dolomítica y, variedades tolerantes a la acidez, variedades que toleran sequía y excesos de humedad en el suelo.

Referencias

- Acevedo, D. C.; Álvarez S., Hernández A. M. E., Maldonado T. M., Pérez G. R. y Castro B. R. 2008. Variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. *Terra Latinoamericana*, Octubre-Diciembre, 317-324.
- Arango, L. 2004. Efecto de la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas del suelo relacionadas con la producción del forraje del pasto ángleton (*Dichanthium aristatum (Poir) C. E. Hubbard*). Tesis Maestría en Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 78 p.
- ArcGIS, E. S. R. I. (2012). 10.1. Redlands, California: ESRI.
- Buckman, H. y Brady, N. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Barcelona: Editorial Montaner y Simon, 1977, 590 pp.
- Burrough, P. 1987. Spatial aspects of ecological data. pp. 213-251. In: R. H. G. Jongman, C. J. F. ter Braak, and O. R. F. van Tongeren (eds.). *Data analysis in community and landscape ecology*. Pudoc. Wageningen, The Netherlands.
- Cambardella, C. A., T. B. Moorman, J. M. Movack, T. B. Parkin, D. L. Karlen, R. F. Turco, & A. E. Knopka. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1240Y1248.
- CSTPA. Council on Soil Testing and Plant Analysis. 1980. *Handbook on reference methods for soil testing*. Athens, GA.
- Jaramillo, D. F. J. (2010). Dependencia espacial de algunas propiedades químicas superficiales del suelo y de algunas variables de producción en cultivos de crisantemo bajo invernadero. *Revista Científica UDO Agrícola*, 10(1), 60-67.
- Jaramillo, D., González, H., & Álvarez, F. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-mecánicas de suelos de textura pesada. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 3(2), 10-19.
- Kingston, G., J.H. Meyer., A. L. Garside., K.F. NG Kee Kwong., A. Jeyabal and G.H. Korndörfer. 2007. Better management practices in sugarcane fields. In: *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.*, Vol. 26:3-16.
- Letelier, A.E. 1967. *Manual de fertilizantes para Chile*. Banco del Estado. Santiago, Chile.
- Maurer, B. A. 1994. *Geographical population analysis*. Blackwell. Oxford, UK.
- Minasny, B., A. B. Mcbratney, AND B. M. Whelan. 1999. *VESPER Version 1.6*. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Sydney, Australia.

- NOM-021-RECNAT. 2001. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2001. 75 p.
- Ovalles, F. 1992. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAPCENIAP-IIAG. Maracay. 44 p.
- Palma-López, D. J., Salgado-García, S., Martínez Sebastián, G., Zavala-Cruz, J., & Lagunes-Espinoza, L. D. C. (2015). Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de Eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(5), 163-172.
- Rodrigues, JR.F.A., Graziano M.P.S., Junqueira F.H.C., Ferreira B.E.G., & Pelegrini C.D.G. 2013a. Correlation Between Chemical Soil Attributes and Sugarcane Quality Parameters According to Soil Texture Zones. *Soil Science*, 178(3): 125-128.
- Rossi, R. E., Mulla, D.J., Journel, A.G., & Eldon, H.F. 1992. Geostatistical tools for modelling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecol. Monogr.* 62: 277–314.
- Salgado, G.S., Lagunes, E.L.C., Núñez, E.R., Ortiz, G.C.F., Bucio, A.L., & Aranda, I.E.M. 2013a. CAÑA DE AZUCAR: Producción sustentable. BBA, Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa. México, D.F. 520 p. ISBN: 9786077150916.
- Salgado, G.S., Palma López, D.J., Zavala, C.J., Ortiz, G.C.F., Castelan, E.M., Lagunes, E.L.C., Guerrero, P.A., Ortiz, C.A.I., & Cordova, S.S. 2010. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes (SIRDF): en la zona Piñera de Huimanguillo, Tabasco. Colegio de postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México.
- Salgado, G.S., Palma-López, D.J., Castelan, E.M., Lagunes, E.L.C., & Ortiz, L.H. 2013b. Manual para muestreo de suelos, plantas y aguas e interpretación de análisis para la producción sostenible de alimentos. Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México.
- Salgado-García S, D. J. Palma-López, J. Zavala-Cruz, L.C. Lagunes-Espinoza, M. Castelán-Estrada, C. F. Ortiz-García, J. F. Juárez-López., O. Ruiz-Rosado., L. Armida-Alcudia., Y J. A. Rincón-Ramírez. 2013c. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes en caña de azúcar (SIRDF): Ingenio Presidente Benito Juárez. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 84 p.
- Salgado-García, S., Palma-López, D. J., Zavala-Cruz, J., Córdova-Sánchez, S., Cástelan-Estrada, M., Del Carmen Lagunes-Espinoza, L. & Moreno-Caliz, E. (2016). Programa de fertilización sustentable para plantaciones de cítricos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(9), 345-356.
- Tavera S., G. 1995. Criterios para la interpretación y aprovechamiento de los reportes de laboratorio para las áreas de asistencia técnica. Publicación 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Delegación La Laguna, Coahuila, Mexico.
- Viets, F. G., & Lindsay, W. L. (1973). Testing soils for zinc, copper, manganese and iron. *Soil Testing and Plant Analysis* (Editors: LM Walsh and J Beaton) Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin. pp153-172.
- Vitti, G.C., J. Mazza A., H. Pereira S., e J.L. Dematte I. 1992. Resultados experimentales do uso de gesso na agricultura caña-da-acucar. In: II seminário sobre o uso do gesso na agricultura. IBRAFOS, Piracicaba, SP, Brasil.pp.191-224.
- Zavala Cruz, J., Salgado García, S., Marín Aguilar, Á., Palma López, D. J., Castelán Estrada, M., & Ramos Reyes, R. (2014). Transecto de suelos en terrazas con plantaciones de cítricos en Tabasco. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 1(2), 123-137.