

Soil characteristics modeling of a sugarcane plantation in Veracruz, Mexico.

Miguel Cebada-Merino¹
Yasmin Crescencio-Andrade¹
Ricardo Serna-Lagunes*¹
José Luis Del Rosario-Arellano¹
Pablo Andrés-Meza¹
Ehdibaldo Presa-Parra¹
Gregorio Hernández-Salinas²
Julio Díaz-José¹
Otto Raúl Leyva-Ovalle¹

Abstract

The sugarcane crop production system requires environmental, water and soil requirements to be in an optimal range for adequate vegetative development and to increase productivity. Geostatistical modeling of soil characteristics is a diagnostic tool to guide soil management and promote maximum crop productivity. The objective of this study was to model soil characteristics, organic matter (OM; %), cation exchange capacity (CEC; $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$), hydrogen potential (pH; 1-14), nitrogen (N; %), calcium (Ca; $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$) bulk density (BD; $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) and electrical conductivity (EC; $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). In a 10 ha sugarcane field in Potrero Nuevo, Atoyac, Veracruz, $n = 40$ soil subsamples were obtained and OM, CEC, pH, N, C, BD and EC were determined according to the specifications of fertility, salinity and soil classification established by NOM-021-RECNAT-SEMARNAT-2000. The modeling maps of soil characteristics were developed with geographic information systems and *Kriging* interpolation. Soil samples analyzed varied in the concentration of soil characteristics, with the areas in the center of the property being those in the optimum ranges required by the crop. The mapping shows that soil characteristics have a variable availability and concentration. Gradual incorporation of organic matter would provide nutrients, moisture and improve soil conditions to increase crop productivity.

Keywords: Geographic Information Systems, Land degradation, *Saccharum officinarum*.

Modelación de las características edafológicas de un predio destinado al cultivo de caña de azúcar en Veracruz, México

Resumen

El sistema de producción del cultivo de la caña de azúcar precisa de requerimientos ambientales, hídricos y edafológicos en un rango óptimo para un adecuado desarrollo vegetativo y para aumentar la productividad. La modelación geoestadística de las características edáficas es un diagnóstico para orientar el manejo del suelo y propiciar la máxima productividad del cultivo. El objetivo del estudio fue modelar las características edáficas, materia orgánica (MO; %), capacidad de intercambio catiónico (CIC; $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$), potencial de hidrógeno (pH; 1-14), nitrógeno (N; %), calcio (Ca; $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$), densidad aparente (DA; $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y conductividad eléctrica (CE; $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). En un predio de 10 ha destinado al cultivo de caña de azúcar, en Potrero Nuevo, Atoyac, Veracruz, se obtuvieron $n = 40$ submuestras de suelo a las que se les determinó MO, CIC, pH, N, C, DA y CE de acuerdo con las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos que establece la NOM-021-RECNAT-SEMARNAT-2000. Los mapas de modelación de las características edáficas se desarrollaron con sistemas de información geográfica y la interpolación *Kriging*. Las muestras de suelo analizadas variaron en la concentración de las características edafológicas, siendo las áreas del centro del predio, las que se encuentran en los rangos óptimos que requiere el cultivo. En el mapeo se observa que las características edafológicas cuentan con una disponibilidad y concentración variable. Incorporar materia orgánica de manera gradual, aportaría nutrientes, humedad y mejoraría las condiciones del suelo para aumentar la productividad del cultivo.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica, degradación de suelo, *Saccharum officinarum*.

¹ Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Orizaba-Córdoba, Ver. México.

² Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, Veracruz, México.

*Corresponding author: rserna@uv.mx

Introduction

Sugarcane is a monocotyledonous plant belonging to the genus *Saccharum*, family Gramineae (Poaceae or Gramineae); (Amalraj & Balasundaram, 2006). It is cultivated in the form of complex hybrids (Edmé et al., 2006; Zhao et al., 2019; Zhao et al., 2022) where they involve up to six species of the 37 species comprising the genus, with only two species, *S. spontaneum* L. and *S. robustum* Brandes & Jesw. ex Grassl, are found in the wild (Mukherjee, 1957; Wang et al., 2022). Currently, sugarcane is cultivated in more than 100 countries. In 2019, this monocotyledonous plant was planted on 28.19 million hectares, with Brazil standing out in terms of area planted, followed by India, Thailand and Mexico, placing this country as the sixth largest producer. Of this area, around 2 billion tons were harvested, with average yields of 57.29 t·ha⁻¹ (OCDE-FAO, 2020).

In Mexico, sugarcane is grown in 16 states of Mexico (more than 500 000 ha), with Veracruz as the main producer (Figure 1a), with a sugar agribusiness represented by consortia of sugar mills distributed in 12 states of Mexico (Figure 1b), which generates a milling of up to 57 million tons of raw cane (CONADESUCA, 2019) and propitiates an economic spillover of 42 billion pesos (SIAP, 2021).

The sugarcane production system requires an optimal range of environmental, water and soil characteristics for vegetative development and for adequate yields to increase productivity (Ojeda-Bustamente et al., 2011). The challenge facing sugarcane cultivation today includes, among other things, creating improved varieties of sugarcane adapted to tropical conditions and dry climates, ensuring that the crop helps reduce soil fertility degradation caused by prolonged soil use due to years of tillage, decreased burning, excessive fertilization, and mechanization Principio del formulario

(Ribón-Carrillo et al., 2003), putting the well-being of sugarcane agriculture at risk. Therefore, soil characterization and modeling are a basic procedure that serves as a diagnostic to guide decision-making in agronomic management of this crop (Rivera et al., 2010).

Despite the technological advancements made in sugarcane cultivation over the past 500 years since its introduction to Veracruz, Mexico, a significant number of producers have not changed management practices such as continuous mechanized tillage, excessive use of fertilizers, pre-harvest burning and residue burning

Introducción

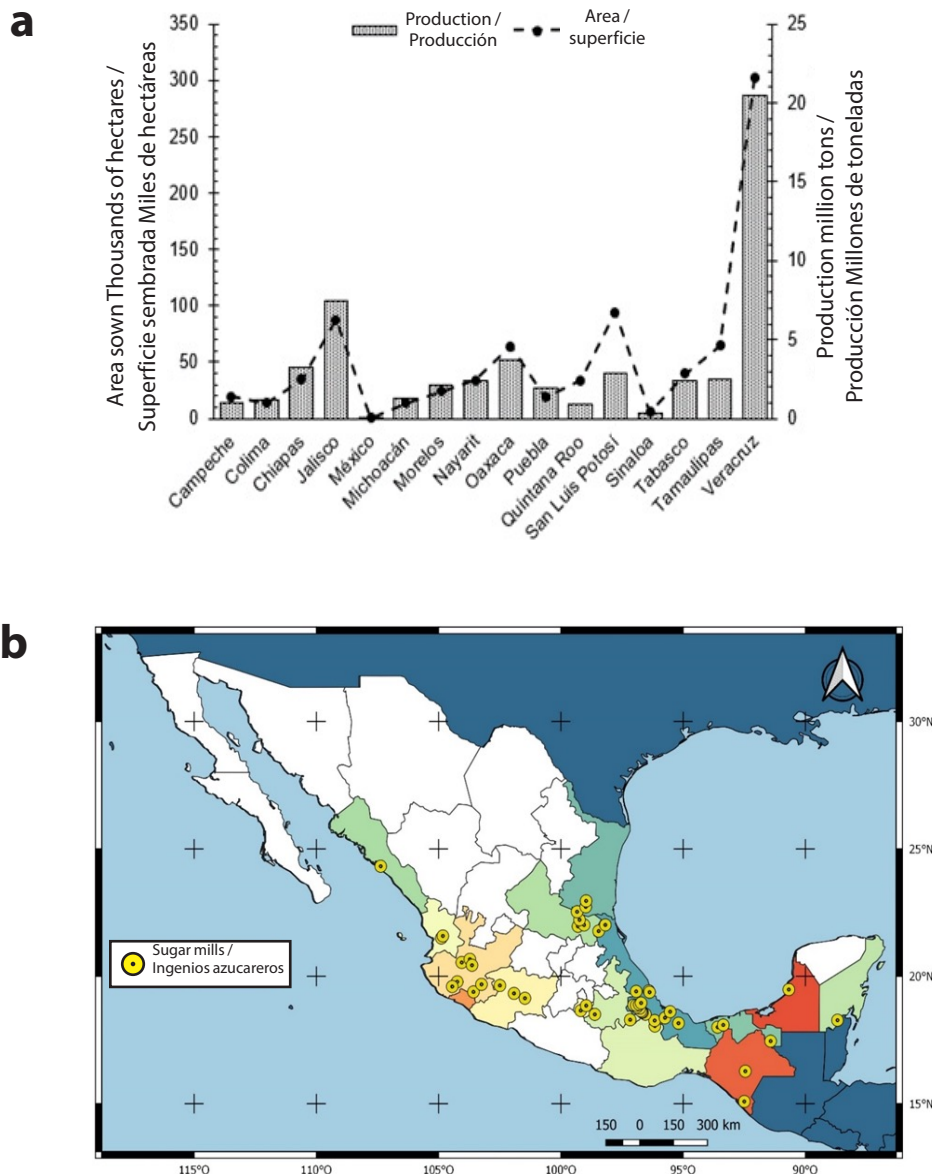
La caña de azúcar es una planta monocotiledónea del género *Saccharum*, familia de las gramíneas (Poaceae o Gramineae); (Amalraj & Balasundaram, 2006). Se cultiva en forma de híbridos complejos (Edmé et al., 2006; Zhao et al., 2019; Zhao et al., 2022) donde involucran hasta seis especies de las 37 que comprende el género, y de las cuales, solo dos especies, *S. spontaneum* L. y *S. robustum* Brandes & Jesw. ex Grassl, ocurren en estado silvestre (Mukherjee, 1957; Wang et al., 2022). En la actualidad, la caña de azúcar se cultiva en más de 100 países. En el año 2019, esta monocotiledónea se sembró en 28.19 millones de hectáreas, destacando Brasil en superficie sembrada, enseguida India, Tailandia y México, colocando a este país como sexto productor. De esta superficie, se cosecharon alrededor de 2 000 millones de toneladas, con rendimiento promedio de 57.29 t·ha⁻¹ (OCDE-FAO, 2020).

En México, la caña de azúcar se cultiva en 16 estados de la República mexicana (más de 500 000 ha), siendo el estado de Veracruz, el principal productor (Figura 1a), con una agroindustria azucarera representada por consorcios de ingenios azucareros distribuidos en 12 estados de la República mexicana (Figura 1b), lo que genera una molienda de hasta 57 millones de toneladas de caña bruta (CONADESUCA, 2019) y propicia una derrama económica de 42 mil millones de pesos (SIAP, 2021).

El sistema productivo de la caña de azúcar requiere de un rango óptimo de factores ambientales, hídricos y de características edafológicas para el desarrollo vegetativo y para un adecuado rendimiento que aumente su productividad (Ojeda-Bustamente et al., 2011). El reto que enfrenta el cultivo en la actualidad, es entre otras, generar variedades de caña mejoradas y adaptadas a condiciones tropicales y climas secos, que el cultivo contribuya a disminuir la degradación de la fertilidad del suelo causada por el uso prolongado del suelo por años de laboreo, disminución de la quema y exceso de fertilización y mecanización (Ribón-Carrillo et al., 2003), esto pone en riesgo el bienestar de la agricultura asociada a la caña, por lo que, una caracterización y modelación edafológica es un procedimiento básico, que sirve como diagnóstico, para orientar la toma de decisiones en el manejo agronómico del cultivo (Rivera et al., 2010).

Figure 1. a) Sugarcane area-productive capacity ratio in Mexico for the 2019-2020 agricultural cycle, irrigation + rainfed mode. **b)** Sugar mills present in Mexico that process sugarcane.

Figura 1. a) Relación superficie-capacidad productiva de caña de azúcar en México, en el ciclo agrícola 2019-2020, modalidad riego + temporal. **b)** Ingenios azucareros presentes en México que procesan la caña de azúcar.



Compiled by: Del Rosario–Arellano (2021) with data from CONADESUCA (2019) and SIAP (2021).
Elaboró: Del Rosario–Arellano (2021) con información del CONADESUCA (2019) y SIAP (2021).

(Ortiz-Laurel et al., 2012). Burning and re-burning are practices commonly used in sugarcane cultivation as methods to control weeds, reduce dry plant material, lower harvesting costs, remove leftover residues, and ease soil preparation for replanting. However, these practices also have negative consequences, including erosion of organic matter, loss of beneficial soil fauna, and

El cultivo de caña de azúcar llegó a Veracruz, México, hace más de 500 años y a pesar del desarrollo tecnológico generado, una proporción importante de productores no han cambiado la forma de manejo como el constante laboreo mecanizado, el uso excesivo de fertilizantes, la quema previa a la cosecha y la quema de residuos (Ortiz-Laurel et al., 2012). La

alterations in soil structure due to increased dryness and erosion, particularly on sloped land (Bernal-Fundora and Hernández-Jiménez, 2017).

When agricultural residue burning and re-burning are applied, especially alongside mechanized harvesting, they lead to modifications in soil properties. These modifications are evident in the decrease of organic matter, increased compaction, and variations in pH, among others, which are now known as global soil changes (Aguilar-Rivera et al., 2013). Furthermore, following the removal of forested areas to establish sugarcane cultivation, the soil, initially containing 6 to 10% organic matter, begins to decrease to 3 to 4 %, without accounting for the additional loss of organic matter due to burning during harvesting (SAGARPA, 2017). These changes lead to various problems, including organic matter loss, physical degradation of nutrients, soil structural instability due to compaction, disorganization of pore space, decreased density of the arable layer, alterations in moisture regime, and reduced fertility. Consequently, the efficiency of water utilization and nutrient uptake by plants from the soil is diminished, making it difficult for plants to access water and nutrients properly (Soca et al., 2016).

The extraction of nutrients by sugarcane cultivation and the continuous loss of organic matter from the soil due to abiotic factors, along with the ongoing soil depletion, are factors contributing to the continual decline in agricultural yield of the crop (Cabrera and Zuaznábar, 2010). In this regard, studying the variation in soil characteristics and their influence on the crop's productivity is a fundamental procedure for guiding decision-making in agronomic management (Resende and Coelho, 2014). Digital soil mapping through Geographic Information Systems (GIS) enables the mapping of physical and chemical characteristics by interpolating real values. This represents a diagnostic tool for identifying different areas within a property that require attention regarding nutrition (Hernández and Montaña, 2020).

Therefore, the objective of this study was to model soil characteristics (Ca, EC, CEC, CIC, DenA, P, Mg, Mo, N and pH) of a 10-ha sugarcane field in Veracruz, Mexico. The information generated is a useful input for agronomic decision making for sugarcane crops and to complement technical recommendations to improve crop productivity.

quema y requema son prácticas implementadas en el cultivo de caña, ya que sirve como método de control de malezas, disminuye el material vegetal seco, reduce los costos de cosecha, se eliminan los residuos sobrantes y se facilita la preparación del suelo para la replantación; sin embargo, ocasionan la erosión de materia orgánica, pérdida de la fauna edáfica benéfica y cambios de la estructura del suelo por un mayor desecamiento y erosión, especialmente en terrenos con pendiente (Bernal-Fundora y Hernández-Jiménez, 2017).

Cuando se aplica la quema y requema de los residuos agrícolas y, además, si la cosecha se realiza de forma mecanizada, ocurren modificaciones de las propiedades del suelo, manifestadas en la disminución de materia orgánica, el aumento de la compactación y variaciones del pH, entre otras, lo que constituye y actualmente se conoce, como cambios globales del suelo (Aguilar-Rivera et al., 2013). Además, después de la remoción del área boscosa para el establecimiento del cultivo de la caña de azúcar, el suelo con un contenido de materia orgánica de entre 6 y 10 % comienza a disminuir de 3 a 4 %, esto sin considerar la pérdida de materia orgánica por la quema para realizar la cosecha (SAGARPA, 2017). Esto ocasiona problemas como la pérdida de materia orgánica, la degradación física de los nutrientes, desestabilidad estructural del suelo debido a su compactación, la desorganización del espacio poroso, la disminución en la densidad de la capa arable, se originan cambios en el régimen de humedad, la fertilidad y la eficiencia en el aprovechamiento del agua se ven disminuidas, dificultando que las plantas utilicen agua y nutrientes del suelo de forma adecuada (Soca et al., 2016).

La extracción de nutrientes por el cultivo de caña de azúcar y la pérdida continua de materia orgánica que sufre el suelo por factores abióticos y el empobrecimiento continuo del suelo son factores que causan la disminución continua en el rendimiento agrícola del cultivo (Cabrera y Zuaznábar, 2010). En este sentido, el estudio de la variación de las características edáficas del suelo y su influencia en el potencial productivo del cultivo, es un procedimiento básico para orientar la toma de decisiones en el manejo agronómico (Resende y Coelho, 2014). La cartografía digital de suelos por medio de los sistemas de información geográfica (SIG) permiten el mapeo de las características físico-

Materials and Methods

The study was conducted in the locality of Potrero Nuevo, municipality of Atoyac, Veracruz, Mexico (18° 52' 19.1"N; 96° 51' 20.3"W; altitude: 860 m). This region has a warm sub-humid climate with an average temperature and precipitation of 23°C and 1 500 mm annually, respectively (INEGI, 2021). The area comprises quaternary soils and cretaceous sedimentary rocks, predominantly Vertisols and Leptosols. Sampling was carried out on a 10-hectare plot designated for sugarcane cultivation (Figure 2), owned by a cooperative farmer who requested a fertility diagnosis of his plot. Sugarcane has been cultivated on the plot for over 10 years, involving stages such as germination or emergence, tillering or growth with fertilization of 1.5 kg of urea per furrow, and maturation. For harvesting, burning is applied, followed by manual cutting of the cane, which is then transport-

químicas mediante interpolación de los valores reales, esto representa un diagnóstico de las distintas áreas de un predio que se deben atender en cuanto a nutrición (Hernández y Montaña, 2020).

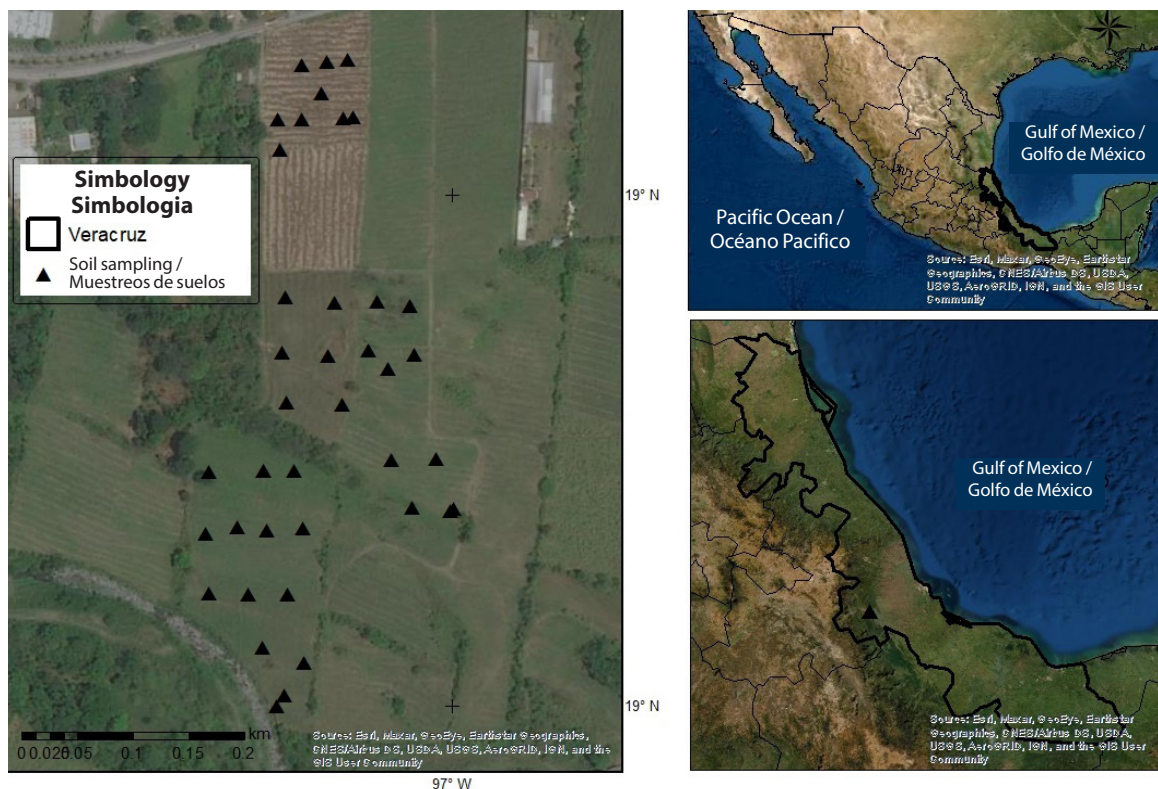
Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue modelar las características edafológicas (Ca, CE, CIC, DA, P, Mg, MO, N y pH) de un predio de 10 ha destinado al cultivo de caña de azúcar en Veracruz, México. La información generada es un insumo útil para la toma de decisiones de índole agronómico para cultivos de caña de azúcar y para complementar las recomendaciones técnicas que inducen la mejora de la productividad del cultivo.

Materiales y métodos

Este estudio se realizó en la localidad Potrero Nuevo, municipio de Atoyac, Veracruz, México (18° 52' 19.1"N; 96° 51' 20.3"W; altitud = 860 m), la región

Figure 2. Geographic location map of the studied property in the municipality of Atoyac, Veracruz, created in ArcMap® v. 10.8 software with an ESRI® User Community USDA satellite image; the blue line shows the location and boundary of the studied property; black triangles (left) indicate the location of the soil subsamples.

Figura 2. Mapa de ubicación geográfica del predio estudiado en el municipio de Atoyac, Veracruz, desarrollado en el software ArcMap® v. 10.8 con una imagen satelital ESRI® User Community USDA; en línea azul se presenta la ubicación y el límite del predio estudiado; triángulos negros (izquierda) señala la ubicación de las submuestras de suelo.



ed by a tractor-mounted loader to a cane truck, and re-burning is performed afterwards.

The surface of this property was sampled from a network of quadrants 50 m long by 20 m wide, from which a total of $N = 100$ quadrants were obtained; from these, $n = 40$ quadrants were randomly selected where soil sampling would be carried out. The soil sample in each quadrant was collected at a depth of 0-20 cm, 2 kg of soil was extracted from the monolith, deposited in plastic bags and recorded following the model for the integral evaluation of soils, which establishes the specifications for the study, sampling and analysis according to NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). At the Soil Laboratory of the Faculty of Biological and Agricultural Sciences, Orizaba-Córdoba region, Universidad Veracruzana, the following soil characteristics were evaluated: organic matter (OM; %), cation exchange capacity (CEC; $\text{cmol}(+)\text{-kg}^{-1}$), hydrogen potential (pH; 1-14), nitrogen (N; %), calcium (Ca; $\text{cmol}(+)\text{-kg}^{-1}$), bulk density (BD; $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) and electrical conductivity (EC; $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), according to the specifications of fertility, salinity and soil classification established by NOM-021-RECNAT-SEMARNAT-2000 (Diario Oficial de la Federación, 2002).

For spatial modeling of soil characteristics, ArcMap® version 10.8 (ESRI, 2016) GIS software was used. For this purpose, a database was created in Excel® software with the values of the soil parameters obtained in the laboratory for each subsample. For visualization in the GIS, the database was converted to a vector file (shapefile = shp) using DIVA GIS® software (Hijmans et al., 2004; Hijmans et al., 2012). The delimitation of the study area was carried out using Google Earth Pro® software, generating a *.kml extension and converted to a raster file with the support of the conversion function (ArcMap® v 10.8). The soil properties of each subsample were subjected to the Kriging interpolation method or Gaussian process regression method, which is based on a theory that assumes that spatial variation in soil characteristics is statistically homogeneous across the surface. This algorithm is related to the term Best Linear Unbiased Prediction (BLUP) because it reduces the error variance in prediction and is based on geostatistics or the "art of modeling spatial data" to forecast unknown values from known values (Castro et al., 2010).

When implementing the technique for modeling soil characteristics, the spatial behavior of each soil characteristic was considered, taking into account

presenta un clima cálido subhúmedo con temperatura y precipitación de 23 °C y 1 500 mm promedio anual (INEGI, 2021), y presenta suelos del cuaternario y rocas sedimentarias del cretácico de tipo vertisol y leptosol. El muestreo se realizó en un predio de 10 ha destinadas al cultivo de la caña de azúcar (Figura 2), el cual pertenece a un agricultor cooperante que solicitó realizar un diagnóstico de la fertilidad de su parcela. En el predio, se ha desarrollado el cultivo por más de 10 años, y contempla la etapa de germinación o emergencia, amacollamiento o crecimiento con fertilización de 1.5 kg de urea/surco y maduración, y para la cosecha, se aplica la quema, se realiza el corte manual de la caña, misma que se transporta con aladora del tractor hacia el camión cañero, y se aplica requema.

La superficie del predio se muestreo a partir de una red de cuadrantes de 50 m de largo por 20 m de ancho, de las cuales, se obtuvo un total de $N = 100$ cuadrantes; de estos, se eligieron aleatoriamente, $n = 40$ cuadrantes donde se realizarían el muestreo de suelo. La toma muestra de suelo en cada cuadrante se recolectó a una profundidad de 0-20 cm, del monolito se extrajo 2 kg de tierra, que se depositaron en bolsas de plástico y fueron registradas siguiendo el modelo para la evaluación integral de los suelos, que establece las especificaciones para el estudio, muestreo y análisis según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). En el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias región Orizaba-Córdoba, Universidad Veracruzana, se evaluaron las siguientes características edáficas: materia orgánica (MO; %), capacidad de intercambio catiónico (CIC; $\text{cmol}(+)\text{-kg}^{-1}$), potencial de hidrógeno (pH; 1-14), nitrógeno (N; %), calcio (Ca; $\text{cmol}(+)\text{-kg}^{-1}$), densidad aparente (DA; $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y conductividad eléctrica (CE; $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), de acuerdo con las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos que establece la NOM-021-RECNAT-SEMARNAT-2000 (Diario Oficial de la Federación, 2002).

Para la modelación espacial de las características edafológicas, se utilizó el SIG ArcMap® versión 10.8 (ESRI, 2016). Para ello, se creó una base de datos en el software Excel® con los valores de los parámetros edáficos obtenidos en el laboratorio para cada submuestra. Para su visualización en el SIG, la base de datos se convirtió a un archivo vectorial (shapefile

a distance of 150-250 m between subsamples. This establishes a dependent relationship between the geographical space among the subsample points (Wampler et al., 2013). The values obtained are derived from a linear combination of the original points with the known data. As a result, larger and more compact areas are formed around the maximum values of the soil characteristic, reducing the degree of fit regarding the distribution of soil characteristic and positioning it in a more predictive and realistic environment. The Kriging method assumes a spatial correlation between the variable data and projects onto the space a layer with a range of values on a color scale with an intensity gradient, associated with a 95% probability distribution (Villatoro et al., 2008).

Results and discussion

Table 1 shows the analyses of the soil characteristics sampled, where each soil subsample analyzed in this study had values with important variations; for example, the variation in the concentrations of OM, CEC, pH, N, Ca, BD and EC, were variable in different locations of the plot, while in the subsamples that were close to the boundaries of the property, a decrease was noted. The subsamples that had better soil characteristics were concentrated in the central zone of the plot sampled in this study; specifically, samples 21 to 26 showed soil characteristics that surpassed the values presented by the samples at the ends of the plot (subsamples 1 and 40, for example) (Table 1).

Organic matter exhibited significant variation across the medium to low concentration ranges, with a central zone showing medium to high values (Figure 3a). This variability could be attributed to a combination of physical, chemical, and biological factors affecting the decomposition of organic residues in the soil's surface layer, as well as the application and distribution of amendments by the producer (Julca-Otiniano et al., 2006). It's important to note that in the studied plot, sugarcane burning precedes harvesting, making roots the primary source of organic matter for the soil. However, depending on the sugarcane variety and crop cycle, 2.2 to 5.5 t·ha⁻¹ of roots are integrated into the soil (Navarro-Vázquez et al., 2019). Nonetheless, with proper fertilization and complete utilization of sugarcane harvest residues, soil organic matter content can be maintained at a stable 3.0 %, ensuring fertility, mois-

= shp) con el software DIVA GIS® (Hijmans et al., 2004; Hijmans et al., 2012). La delimitación del área de estudio se llevó a cabo con el software Google Earth Pro®, generando una extensión *.kml y convertida a un archivo raster con apoyo de la función *conversion* (ArcMap® v 10.8). Las propiedades del suelo de cada submuestra se sometieron al método de interpolación espacial *Kriging* o método de regresión de procesos Gaussianos, el cual se basa en una teoría que presupone que la variación espacial en las características edáficas es estadísticamente homogénea a lo largo de la superficie, este algoritmo se relaciona con el término del Mejor Predictor Lineal Insegado (MPLI), debido a que reduce la varianza del error en la predicción, y está basado en geoestadística o "arte de modelizar datos espaciales" para pronosticar valores desconocidos a partir de valores conocidos (Castro et al., 2010).

Al implementar la técnica de modelación de las características edáficas se tuvo en cuenta el comportamiento espacial de cada característica edafológica, al considerar una distancia de 150-250 m entre submuestras, esto genera una relación dependiente entre el espacio geográfico que hay entre los puntos de las submuestras (Wampler et al., 2013). Los valores obtenidos se consiguen por combinación lineal de los puntos origen con el dato conocido. Como resultado quedan áreas mayores y más compactas alrededor a los valores máximos del carácter edafológico, por lo que el grado de ajuste con respecto a la distribución del carácter edafológico es menor, situándose en un entorno más predictivo y real. El método del *Kriging* presupone una correlación espacial entre los datos de la variable y proyecta en el espacio una capa con un rango de valores en una escala de color con un gradiente de intensidad, asociada a una probabilidad de distribución del 95 % (Villatoro et al., 2008).

Resultados y discusión

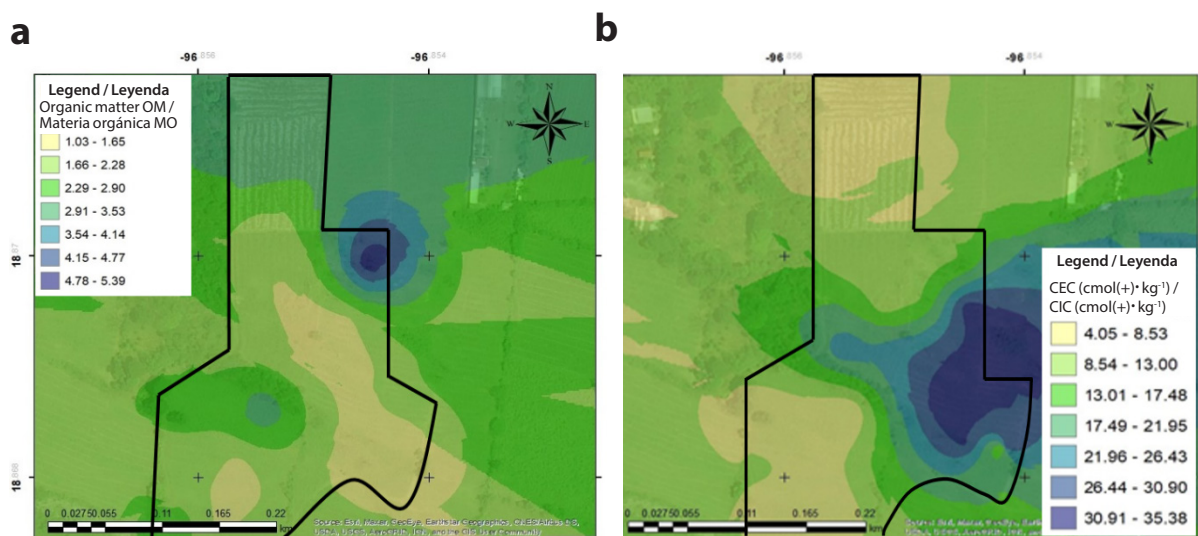
Los análisis de las características del suelo muestreado se presentan en el Cuadro 1, donde cada submuestra de suelo analizada en este estudio presentó valores con importantes variaciones; por ejemplo, la variación en las concentraciones de MO, CIC, pH, N, Ca, DA y CE, fueron variables en diferentes ubicaciones del predio, mientras que en las submuestras

Table 1. Soil characteristics of subsamples evaluated in a sugarcane field in Potrero Nuevo, municipality of Atoyac, Veracruz
Cuadro 1. Características edafológicas de submuestras de suelo evaluadas en un predio destinado al cultivo de caña de azúcar en Potrero Nuevo, municipio de Atoyac, Veracruz

Sample / Muestra	Coordinates / Coordenadas		Soil characteristics Características edafológicas								
	Latitude / Latitud	Longitude / Longitud	OM / MO	CEC / CIC	pH	N	Mg	Ca	CE	BD / DA	P
1	18.871983	-96.855642	4.7	16.0	7.9	0.6	0.5	7.5	20.7	1.0	124.93
2	18.872116	-96.855504	4.4	7.0	7.9	0.1	3.64	5.72	77.4	1.0	178.52
3	18.872187	-96.855290	3.5	3.4	7.9	0.2	13.1	18.2	2.6	1.7	122.39
4	18.872244	-96.855476	3.2	2.2	7.9	0.0	4.56	7.44	22.8	1.0	101.99
5	18.866702	-96.842638	3.4	6.0	7.9	0.2	0.52	3.38	54.5	1.4	79.03
6	18.866702	-96.842638	2.7	4.0	7.9	0.3	0.52	3.38	36.4	1.3	109.64
7	18.866702	-96.846380	3.7	8.0	7.9	1.0	1.04	6.76	43.0	1.7	285.67
8	18.866197	-96.846323	2.7	7.0	7.9	0.0	5.2	5.75	108.6	1.2	89.23
9	18.871449	-96.855253	3.9	6.0	7.9	0.4	4.25	5	44.9	0.8	99.43
10	18.866197	-96.846323	3.8	6.6	7.9	0.1	4	11	66.0	1.3	188.72
11	18.865433	-96.836942	1.3	10.2	6.6	0.1	2	7.8	63.7	0.9	499.96
12	18.865433	-96.836942	1.3	11.2	7.7	0.2	3.64	3.5	42.7	1.7	17.92
13	18.865433	-96.836942	3.0	11.6	6.9	0.1	2.5	3.5	41.9	2.6	28.00
14	18.865433	-96.836942	8.2	13.6	7.4	0.1	2	7.2	53.3	1.8	173.43
15	18.865433	-96.836942	0.0	17.6	6.4	0.1	0.48	6.44	36.4	1.8	5.04
17	18.865433	-96.836942	-1.3	13.6	6.0	0.1	1	6.72	28.1	2.9	221.89
18	18.867890	-96.855232	2.7	32.8	7.3	0.1	1.44	8.16	123.5	3.0	153.01
19	18.868290	-96.855266	0.0	25.0	4.6	0.1	8.16	2	74.7	2.2	5.16
20	18.868347	-96.855682	0.7	25.2	4.5	0.1	23	6.5	88.7	2.2	12.70
21	18.868449	-96.856158	0.7	23.0	7.3	0.1	20.5	6.72	81.7	2.3	15.25
22	18.868853	-96.856018	1.3	35.4	5.6	0.1	19.5	5.76	96.3	3.2	10.15
23	18.868891	-96.855935	2.0	31.2	5.6	0.0	19.6	6.24	51.6	3.0	163.21
24	18.868820	-96.855249	0.7	31.4	4.7	0.1	18.2	5.5	111.1	4.6	15.25
25	18.868552	-96.855531	1.3	31.0	4.7	0.1	10	7.5	98.5	2.9	25.45
26	18.871170	-96.855878	0.7	13.0	5.6	0.3	20.5	7.2	111.1	0.7	247.46
27	18.868918	-96.855205	3.1	5.0	5.3	0.5	2.8	9.88	16.1	1.7	28.00
28	18.863622	-96.825888	1.8	6.2	5.4	1.1	5.2	6.24	25.5	3.1	5.16
29	18.869405	-96.855600	0.0	10.8	5.2	0.7	3.48	6.24	35.1	2.6	2.61
30	18.863622	-96.825888	5.4	4.0	5.1	0.3	0.52	6.76	30.3	1.0	68.82
31	18.869804	-96.855659	1.3	9.6	4.7	0.5	1.04	5	42.2	2.4	10.26
32	18.870144	-96.855140	2.7	6.0	4.7	0.5	2.5	7.5	21.1	1.0	7.59
33	18.863622	-96.825888	0.3	6.4	4.7	0.5	2.5	12.5	21.7	1.3	22.90
34	18.870348	-96.855518	2.0	11.2	4.9	0.4	22.5	5.28	20.4	1.8	186.17
35	18.870456	-96.855015	3.4	4.2	5.3	0.4	0.96	5.28	18.9	1.7	2.49
36	18.870728	-96.854925	0.7	4.8	5.0	0.1	5.2	5.2	15.8	2.6	10.15
37	18.870345	-96.855641	2.2	6.0	5.1	0.1	1.04	6.76	43.7	1.7	33.11
38	18.870643	-96.855689	3.2	5.4	5.3	0.4	3.85	8.64	38.0	1.0	104.54
39	18.871221	-96.855450	3.0	5.0	5.8	0.4	2.88	6.68	16.3	1.2	107.04
40	18.867967	-96.824783	0.4	4.6	5.4	0.1	1.5	6	24.1	1.3	168.31

Figure 3. Map of the percentage of OM (a) and CEC (b) in the sugarcane plot located in the town of Potrero Nuevo, municipality of Atoyac, Veracruz, Mexico.

Figura 3. Mapa del porcentaje de MO (a) y CIC (b) en la parcela con cultivo de caña de azúcar ubicada en la localidad de Potrero Nuevo, municipio de Atoyac, Veracruz.



ture retention, and soil structure preservation (Armida-Alcudia et al., 2020). This underscores the importance of minimizing sugarcane burning and incorporating harvest residues into the soil, as variations in organic matter across different areas of the plot can impact soil fertility.

The CEC of the studied plot reveals that a significant portion of the parcel has medium to very low soil ability to retain cations, nutrient availability, and quantity for crops. The areas with blue tones indicate high values due to the presence of clay, forming clay loam and silt loam textural classes (Figure 3b).

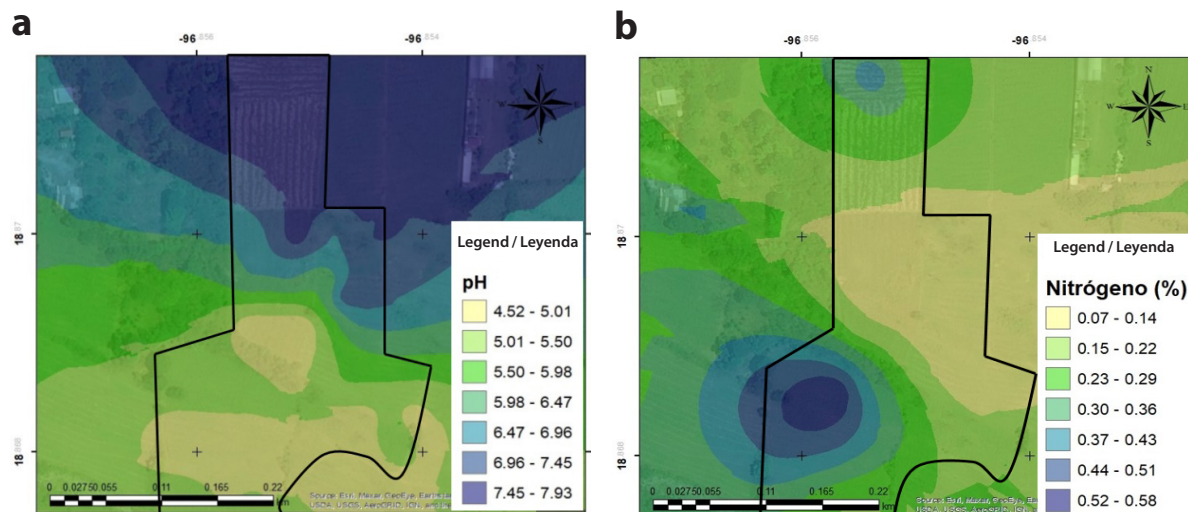
pH was found to be in the optimum range (6–7 units), a range expected when the application of nitrogen and phosphate fertilizers is frequent, because it contributes to the regulation of soil pH (Chinea-Horta and Rodríguez-Izquierdo, 2021), a favorable condition in the nutritional management of sugarcane crops in the studied plot (Figure 4a). Some alternatives to this condition could be the incorporation of exchangeable bases such as Ca, Mg, K and Na, which would help reduce acidity and increase alkalinity (Arroyo et al., 2022). Amendments based on calcium and magnesium oxide, hydroxide or carbonate can improve the aggregation of particles that affect a good development of the structure, allowing favorable conditions of aeration and humidity (Arroyo et al., 2022).

que se encontraban cercanas a los límites del predio, se notó una disminución en estas. Las submuestras que presentaron mejores características edafológicas del suelo se concentraron en la zona central del predio muestreado en este estudio; específicamente las muestras de la 21 a la 26, presentan características del suelo que superaron los valores que presentaron las muestras de los extremos del predio (submuestras 1 y 40, por ejemplo) (Cuadro 1).

La materia orgánica varió en gran proporción entre los rangos de medio a bajo porcentaje de concentración, resaltando una zona central con valores de medio a alto (Figura 3a). Esta variación puede obedecer a factores físicos, químicos y biológicos que influyen en la descomposición de los restos orgánicos acumulados en la capa superficial del suelo, así como las enmiendas y distribución de estas que el productor suele hacer (Julca-Otiniano et al., 2006). Cabe recordar que, en la parcela bajo estudio, se practica la quema antes de cosechar la caña de azúcar, de modo que el aporte más importante de MO al suelo son las raíces, aunque dependiendo de la variedad y ciclo de cultivo, se incorporan al suelo de 2.2 a 5.5 t·ha⁻¹ de raíces (Navarro-Vázquez et al., 2019). Sin embargo, en condiciones de buena fertilización y utilización completa de los residuos provenientes de la cosecha de caña de azúcar, se mantiene estable el contenido de MO en el suelo en un 3.0 %, permiti-

Figure 4. Map of pH (a) and N in % (b) in the sugarcane cultivation plot in Potrero Nuevo locality, municipality of Atoyac, Veracruz

Figura 4. Mapa de pH (a) y N en % (b) en la parcela con cultivo de caña de azúcar en la localidad de Potrero Nuevo, municipio de Atoyac, Veracruz.



Changes in the soil, such as acidity, are provoked when there is an accumulation of precipitation, a predominant condition in the municipality of Atoyac, where an annual average of 3 200 mm is recorded (Cruz-Tobón et al., 2023). In this condition, at soil level, the decomposition of OM predominates in the form of organic and inorganic acids (such as H_2SO_4 and HNO_3 , which are powerful reservoirs of H^+ , as well as hydrated oxides such as iron and aluminum), which is why the map shows the presence of dominant zones with an acidic character. Soil exposure to high temperatures increases mineralization and decreases humus formation. Excess moisture not only leads to a substrate soil with poor air flow but also facilitates the deposition of bases. Consequently, low pH values will prevail in the soil's surface layer, affecting the accumulation of organic matter (Aponte et al., 2020). In this study, it can be observed that areas with low organic matter values are proportional to those with low pH.

Nitrogen levels ranging from 0.07 to 0.14 (Figure 4b) indicate deficiency, as the optimal range for cultivation is 2.00-2.60 %. This deficiency leads to nitrogen loss through physical, chemical, and biological processes influenced by environmental factors like temperature, pH, and CEC. Nitrogen is crucial for the adsorption of amino acids, proteins, and other organic components derived from soil organic matter mineralization. Its low

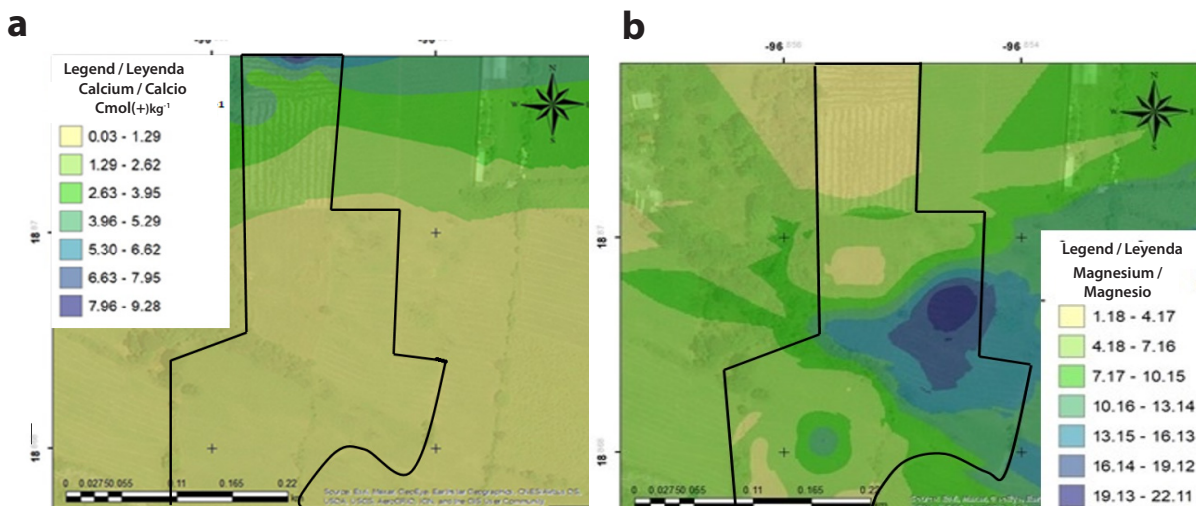
tiendo mantener la fertilidad, retener la humedad y conservar la estructura del suelo (Armida-Alcudia et al., 2020). Esto evidencia la necesidad de evitar hasta donde sea posible la quema de caña e incorporar al suelo los residuos de cosecha, ya que la variación de la MO en diferentes áreas de la parcela, afectaron la fertilidad del suelo.

La CIC del predio estudiado muestra que una importante extensión de la parcela cuenta con valores de media a muy baja habilidad del suelo para retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes al cultivo. Las zonas con tonalidades azules indican valores altos debido a la presencia de arcilla, conformando clases texturales franco arcilloso y franco limosos (Figura 3b).

El pH se encontró en el rango óptimo (6 -7 unidades), un rango esperado cuando la aplicación de fertilizantes nitrogenados y fosfatados es frecuente, pues contribuye a la regulación del pH del suelo (Chinea-Horta y Rodríguez-Izquierdo, 2021) condición favorable en el manejo nutrimental del cultivo de caña en el predio estudiado (Figura 4a). Algunas alternativas a tal condición puede ser la incorporación de bases intercambiables como Ca, Mg, K y Na, que ayudarían a la reducción de la acidez y aumento de la alcalinidad (Arroyo et al., 2022). Enmiendas a base de óxido, hidróxido o carbonato de calcio y magnesio, puede mejorar la agregación de las partículas

Figure 5. Map of Calcium (a) and Magnesium (b) in the sugarcane plot in the locality of Potrero Nuevo, municipality of Atoyac, Veracruz

Figura 5. Mapa de Calcio (a) y Magnesio (b) en la parcela con cultivo de caña de azúcar en la localidad de Potrero Nuevo, municipio de Atoyac, Veracruz



concentration manifests in leaf yellowing, reduced vigor, and yield reduction (Montenegro et al., 2022).

As shown in Figure 5a, most of the evaluated surface exhibits low calcium levels, likely due to insufficient replenishment of the nutrient in the fertilization program. Calcium is essential for the physiological stability of plant tissues, promotes the formation of strong cell walls, and is vital for the integrity of cell membranes. Sugarcane extracts large amounts of this nutrient from the soil, leading to its depletion and acidification, especially in regions with high rainfall. It is recommended to use live agricultural lime with deep plowing and incorporation into the soil one month before planting. This helps prevent calcium deficiency in the plant and improves pH conditions (Miranda et al., 2021).

Figure 5 b shows the different levels of magnesium in the soil of the sampled area, and the values in ranges from high to very low, in the southern zone the steep slopes would be subject to water erosion, since, in this case, it plays an important role, since sometimes it is flooded when the river level rises. In general, there is a predominant surface with a considerable nutrient deficiency, a condition favored by low CEC and pH values. Areas with high values of this ion should be considered, where there may be bad practices in terms of fertilizer distribution, or where nutrient demand is not uniform due to a variation in planting density (Arias-Cedeño et al., 2021).

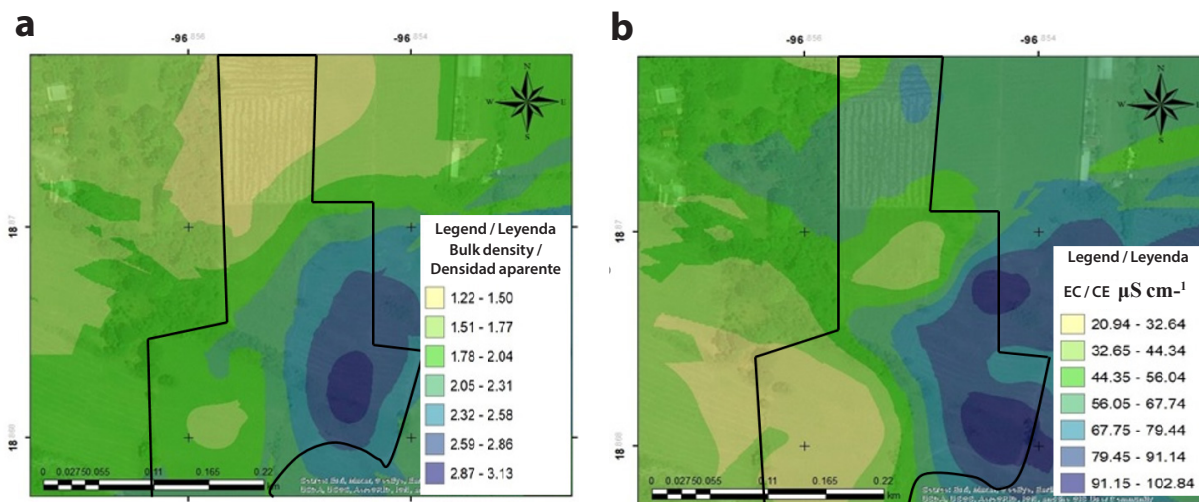
que inciden en un buen desarrollo de la estructura, permitiendo favorables condiciones de aireación y humedad (Arroyo et al., 2022).

Los cambios en el suelo como la acidez se provocan cuando existe acumulación de precipitación, condición predominante en el municipio de Atoyac, donde se registra un promedio anual de 3 200 mm (Cruz-Tobón et al., 2023). En tal condición, a nivel del suelo, predomina la descomposición de MO en forma de ácidos orgánicos e inorgánicos (como el H_2SO_4 y HNO_3 que son potentes reservorios de H^+ , así también los óxidos como el hierro y el aluminio), es por ello, que en mapa se denota la presencia de zonas dominantes con carácter de acidez. La exposición del suelo a temperaturas altas aumenta la mineralización y disminuye la formación de humus, así también; el exceso de humedad además de provocar un medio con deficiente flujo de aire en el sustrato suelo, facilitará la deposición de bases, de esta forma, predominarán valores de pH bajos en la parte superficial del suelo afectando la acumulación de materia orgánica (Aponte et al., 2020), ya que en este estudio se puede apreciar que las zonas valores bajos de MO son proporcionales a los de pH.

Se observan porcentajes de nitrógeno de 0.07-0.14 (Figura 4b), lo que indica ausencia, ya que el rango óptimo para el cultivo es de 2.00-2.60 %. Esto conlleva a la pérdida de N son los procesos físico-

Figure 6. Map of Bulk Density (a) and Electrical Conductivity (b) in the sugarcane cultivation plot in Potrero Nuevo locality, municipality of Atoyac, Veracruz

Figura 6. Mapa de Densidad aparente (a) y Conductividad eléctrica (b) en la parcela con cultivo de caña de azúcar en la localidad de Potrero Nuevo, municipio de Atoyac, Veracruz.



Regarding bulk density, the plot is characterized in the range from 1.22 to 3.13 g·cm⁻³ (Figure 6 a). This coincides with the projection of the OM variable, since the same zones where high values were observed coincide, due to the formation of aggregates and, with this, the increase of porosity in the soil (Sánchez-Vera, 2003). On the other hand, as the southern area of the evaluated surface is observed, the bulk density tends to increase, a condition that could be attributed to soil disintegration due to low levels of organic matter or to compaction phenomena derived from mechanization practices (Serna, 2019).

The electrical conductivity (EC) values are influenced by the concentration of dissolved salts, the higher the EC, the greater the salinity present. Figure 6b shows the concentration of soluble salts, with values below 1 μS·cm⁻¹ considered negligible for salinity, a condition prevailing across the evaluated surface, as its highest value is 102.84 μS·cm⁻¹ (Sotomayor et al., 2018).

Conclusions

There is a considerable variation in conditions for each soil variable evaluated. Neutral pH values prevail, a condition that, in addition to affecting the availability of nutrients for plants, often significantly alters the stability conditions of organic matter. The latter is present at low to very low levels over most of the surface, conditioning the formation of aggregates and thereby

químicos y biológicos, afectada por el factor ambiente, como la temperatura, pH y la CIC. El N facilita la adsorción de aminoácidos, proteínas y otros componentes orgánicos de mineralización de la materia orgánica del suelo, su baja concentración se refleja en el amarillamiento de las hojas, pérdida de vigor y reducción del rendimiento (Montenegro et al., 2022).

Como se muestra en la Figura 5 a, la mayor parte de la superficie evaluada presenta niveles bajos de calcio, muy posiblemente debida a una deficiente reposición del nutrimento en el programa de fertilización. El calcio es responsable de la estabilidad fisiológica del tejido vegetal, promueve la formación de las paredes celulares fuertes y es vital para la integridad de las membranas celulares. La caña de azúcar extrae del suelo grandes cantidades de este nutrimento ocasionando su agotamiento y acidificación, en especial en regiones de alta precipitación por lluvias. Se recomienda cal agrícola viva con aplicación de volteo e incorporar en el suelo un mes antes de la siembra, eso ayuda a prevenir la deficiencia de calcio en la planta y mejorar las condiciones de pH (Miranda et al., 2021).

En la Figura 5 b, se observan los diferentes niveles de magnesio en el suelo del área muestreada, y los valores en rangos de alto a muy bajo, en la zona sur las pendientes pronunciadas estarían sujetas a erosión hídrica, ya que, en este caso, juega un papel im-

decreasing porosity, a relationship that corresponds to very high apparent density values. Similarly, the cation exchange capacity has been affected, showing values below the ideal, making it difficult to retain base nutrients such as Ca^{++} and Mg^{++} . Organic matter weakly binds to cations; clays with a high exchange capacity tend to bind bivalent cations such as Ca^{++} and Mg^{++} . In areas where CEC values are low to medium, they can be increased by incorporating organic matter, creating amendment programs or reintroducing sugarcane harvest residues.

The maps generated as a result of the spatial interpolation by the Kriging method allowed a considerable appreciation of the soil properties evaluated for the study area, identifying those that should be given priority attention for restoration. The steeper relief in the lower part of the plot would reflect the low level of organic matter; in general, steep slopes would be subject to erosion influenced by runoff, which, in this case, seems to play an important role, since, in the rainy season, it is usually flooded.

End of English version

References / Referencias

- Aguilar-Rivera, N., Olvera-Vargas, L. A., & Galindo-Mendoza, G. (2013). Evaluación de aptitud de tierras al cultivo de caña de azúcar en la Huasteca Potosina, México, por técnicas geomáticas. *Revista de Geografía Norte Grande*. 55: 141-156.
- Amalraj, V. A., & BALASUNDARAM, N. (2006). On the taxonomy of the members of '*Saccharum complex*'. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 53: 35-41.
- Aponte, A. R., Acosta, E. H., Gómez, A. L. S., Alfaro, C. A. T., Luna, D. V., & Díaz, G. C. (2020). Fertilidad y producción de caña de azúcar en Hueyapan de Ocampo, Veracruz, México. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*. 8(1): 56-65.
- Arias-Cedeño, Q., López-Sánchez, R., Sainz-Rosales, L. R., Verdecia-Casanova, M. V., & Eichler-Löbermann, B. (2021). Potencial fertilizante de cenizas de bagazo de caña de azúcar de industrias azucareras. *Revista Cubana de Química*. 33(3): 452-466.
- Armida-Alcudia, L., Osorio-Acosta, F., José-Pablo, R., & Luna, S. R. (2020). Propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de suelos con caña de azúcar y

portante, pues en ocasiones se suele inundar cuando el nivel del río se incrementa. De forma general, predomina una superficie con una deficiencia considerable del nutrimento, condición favorecida por los valores bajos de CIC y de pH. Se debe tomar en cuenta las zonas con valores altos de este ion, en donde posiblemente se tengan malas prácticas en cuanto a la distribución del fertilizante, o bien, que la demanda nutrimental no sea uniforme por una variación en la densidad de plantación (Arias-Cedeño et al., 2021).

En cuanto a Densidad Aparente, el predio se encuentra caracterizado en el rango que va de 1.22 a $3.13 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Figura 6 a). Esto coincide con la proyección de la variable de MO, ya que coinciden las mismas zonas donde sus valores fueron altos, esto debido a la formación de agregados y, con ello, el incremento de la porosidad en el suelo (Sánchez-Vera, 2003). Por otro lado, en la medida que se va observando la zona sur de la superficie evaluada, la densidad aparente suele ir incrementando, condición que podría atribuirse a una disgregación del suelo producto de los bajos niveles de materia orgánica o bien por fenómenos de compactación derivado de las prácticas de mecanización (Serna, 2019).

Los valores de conductividad eléctrica (CE), son influenciados por la concentración de sales disueltas, a mayor CE mayor es la salinidad presente. La Figura 6 b muestra la concentración de sales solubles con valores por debajo de $1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ se consideran despreciables de salinidad, situación que prevalece en la superficie evaluada ya que su valor más alto es de $102.84 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Sotomayor et al., 2018).

Conclusiones

Se aprecia una considerable variación de condiciones para cada variable edáfica evaluada. De forma general, predominan valores neutros de pH, condición que además de afectar la disponibilidad de nutrimentos para las plantas, suele alterar de forma considerable las condiciones de estabilidad de la materia orgánica. Esta última, se presenta en niveles de bajos a muy bajos en mayor parte de la superficie, condicionando la formación de agregados y con ello la disminución de la porosidad, relación que guarda valores de densidad aparente muy altos. Del mismo modo, la capacidad de intercambio catiónico ha sido afectada, ya que muestra valores por debajo de lo

- maíz bajo condiciones de riego y lluviosas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 23(3):75.
- Arroyo, E. A., Sanzano, A., Rojas Quinteros, H. C., & Navarro di Marco, J. P. (2022). Estado de fertilidad de los suelos cañeros de Tucumán, Argentina: materia orgánica, nitrógeno y pH del suelo. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*. 99(1):37-42.
- Bernal-Fundora, A., & Hernández Jiménez, A. (2017). Influencia de diferentes sistemas de uso del suelo sobre su estructura. *Cultivos Tropicales*. 38(4):50-57.
- Cabrera, J. A., % Zuaznábar, C. R. (2010). Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. i. balance del carbono. *Cultivos Tropicales*. 31(1):5-13.
- Castro, F. da S., Pezzopane, J. E. M., Cecílio, R. A., Pezzopane, J. R. M., & Xavier, A. C. (2010). Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola y Ambiental*, 2006, 14: 871-880. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662010000800012>
- China-Horta, A., & Rodríguez-Izquierdo, L. (2021). Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ingeniería Agrícola*, 2021, 11(1):3-8.
- CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). (2019). 6 to informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México, zafras 2009–2010/2019. CONADESUCA, México.
- Cruz-Tobón, M., Hernández-Rosas, F., Silva-Rojas, H. V., Serna-Lagunes, R., Rodríguez-Lagunes, D. A., & Llarena-Hernández, R. C. 2023. Daño por *Diatraea* spp. (Lepidoptera: Crambidae) en la región cañera Córdoba-Golfo, Veracruz. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 14 (8): ME:e3371. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i8.3371>
- Diario Oficial de la Federación. 2022. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT.
- Edmé, S. J., Glynn, N. G., & Comstock, J. C. (2006). ideal dificultando la retención de nutrientes base como Ca^{++} y Mg^{++} . La materia orgánica enlaza en forma débil a los cationes, las arcillas con gran capacidad de intercambio tienden a enlazar los cationes bivalentes como el Ca^{++} y el Mg^{++} , en las zonas que predominan con valores bajos a medios de CIC pueden incrementarse con la incorporación de materia orgánica creando programas de enmiendas o reincorporación de residuos de cosecha de la caña de azúcar.
- Los mapas generados producto de la interpolación espacial por el método *Kriging* permitieron apreciar considerablemente las propiedades edáficas evaluadas para la zona de estudio, identificando aquellas que deberán tener una atención prioritaria para su restauración. El relieve más pronunciado en la parte baja del terreno reflejaría el bajo nivel de materia orgánica, por lo general, pendientes fuertes estarían sujetas a erosión influenciada por escurrimientos, que, en este caso, parece jugar un papel importante, ya que, en temporada de lluvias, se suele inundar.
- Fin de la versión en español*
-
- Genetic segregation of microsatellite markers in *Saccharum officinarum* and *S. spontaneum*. *Heredity*, 2006, 97(5):366-375.
- ESRI. (2016). "ArcGis Desktop: Release 10.4." Redlands: Environmental Systems Research Institute.
- Hernández, P. R. D., & Montañó, C. J. (2020). Manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. Escuela Agrícola Panamericana.
- Hijmans, R. J., Guarino, L., & Mathur, P. (2012). *Divagis: version 7.5*. Berkeley: Lizard Tech, Inc. and the University of California.
- Hijmans, R. J., Guarino, L., Bussink, C., Mathur, P., Cruz, M., Barrentes, I., & Rojas, E. *Divagis*. (2022). Sistema de Información Geográfica para el Análisis de Datos de Distribución de Especies. Manual en Español. LizardTech, Inc., Copyright© 1995-1998, LizardTech, Inc.; University of California, Patente U.S. No. 5,710,835. International Plant Genetic

- Resources Institute (IPGRI), UC Berkeley Museum of Vertebrate Zoology. 83 p.
- INEGI. 2021. Atoyac, Veracruz. Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Veracruz. Gobierno del Estado de Veracruz.
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (arica)*. 24(1): 49-61. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292006000100009>
- Madero-Morales, E., Ramírez Alzate, J. A., Albán, Á., Escobar, B. Y., García, L. F., & Peña Artunduaga, M. E. (2011). Compactación de suelos cultivados con caña de azúcar en la zona sur del Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*. 60(3): 244-251.
- Miranda, R., Marza, R., Calle, J. L., Choque, C., Mendoza, M., & Aparicio, J. J. (2021). Aptitud del uso de suelo para el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en la localidad de Tumupasa, Municipio de San Buenaventura-La Paz. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*. 8(1): 25-36.
- Montenegro, S. P., Pulido, S. Y., & Mina, J. (2022). Fijación biológica de nitrógeno en caña de azúcar: una alternativa a gases nitrogenados efecto invernadero. *Agricolae & Habitat*. 5(1), 40-57.
- Mukherjee, S. K. (1957). Origin and distribution of *Saccharum*. *Botanical Gazette*. 119(1): 55-61.
- Navarro-Vásquez, M., Florida-Rofner, N., y Navarro-Vásquez, L. (2019). Atributos físicos y materia orgánica de oxisols en sistemas de producción de caña de azúcar. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 2019, 21(2): 89-99.
- OCDE-FAO. (2020). *Perspectivas Agrícolas 2020-2029. 5 Azúcar*. OCDE iLibrary. Disponible en: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/1412899c-es/index.html?itemId=/content/component/1412899c-es>
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., & Montero-Martínez, M. J. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45(1): 1-11.
- Ortiz-Laurel, H., Salgado-García, S., Castelán-Estrada, M., & Córdova-Sánchez, S. (2012). Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2012, 3(SPE4): 767-773.
- Resende, A. V., & Coelho, A. M. (2014). Muestreo para mapeo y manejo de la fertilidad del suelo. En: *Manual de agricultura de precisión. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur*. pp. 47-57.
- Ribón-Carrillo, M. A., Salgado García, S., Palma-López, D. J., & Lagunes-Espinoza, L. D. C. (2003). Propiedades químicas y físicas de un vertisol cultivado con caña de azúcar. *Interciencia*, 28(3): 154-159.
- Rivera, N. A., Mendoza, G. G., Martínez, J. F., & Servin, C. C. (2010). Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 11(2): 144-154.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Caña de azúcar mexicana*. SAGARPA. México.
- Sánchez-Vera, G. (2003). Densidad aparente en un vertisol con diferentes agro sistemas. *Interciencia*. 28(6), 347-351.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Fecha del Diario Oficial de la Federación: 31 de diciembre de 2002.
- Serna, J. C. D. (2019). Relación espacial entre propiedades de suelos y estrés hídrico en caña de azúcar en la hacienda Churimal-Roldanillo-Valle del Cauca, Colombia. *Suelos Ecuatoriales*. 49(1 y 2): 65-74.
- SIAP. (2021). *Caña de azúcar. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera-Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*. México.
- Soca, R., Rojas, J., Willems, L., Ocola, C., Fernández, R., & Pérez, J. (2016). Identificación de las tierras degradadas por la salinidad del suelo en los cultivos de caña de azúcar mediante imágenes de satélite. *Revista de Investigación de Física*, 19(1): 1-9.

- Sotomayor, C., Morandini, M., Sanzano, G. A., & Quinteros, H. C. R. (2018). Efecto de la aplicación de vinaza en propiedades químicas y físicas del suelo. *Revista Industrial y Agrícola Tucumán*, 2018, 95(1): 27-33.
- Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*. 32(1): 95-105.
- Wampler, P. J., Rediske, R. R., & Molla, A. R. (2013). Using ArcMap, Google Earth, and Global Positioning Systems to select and locate random households in rural Haiti. *International Journal of Health Geographics*, 2013, 12(1): 1-8.
- Wang, T., Fang, J., & Zhang, J. (2022). Advances in sugarcane genomics and genetics. *Sugar Tech*. 24: 354-368.
- Zhao P., H. Xia J. Liu, C. Wu, J. Zhao, K. Yang, F. Zan, X. Chen, J. Li, L. Yao, H. Yang, W. Qin, L. Zhao, & Z. Wu. (2019). Registration of 'YZ081609' Sugarcane. *Journal of Plant Registrations*, 13(3): 362-367. doi: 10.3198/jpr2018.10.0068crc.202212(11): 1789.