

Spatial distribution of soil organic carbon by digital mapping: the case of the Medio Aguanaval river sub-basin

Distribución espacial de carbono orgánico del suelo mediante mapeo digital: caso subcuenca río Medio Aguanaval

Georgina Pérez-Rodríguez^{1*}; Armando López-Santos¹; Miguel Agustín Velásquez-Valle²; José Villanueva-Díaz³; Jorge Luis García-Rodríguez⁴

¹Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Carretera Gómez Palacio - Ciudad Juárez km 40, Bermejillo, Durango. C. P. 35230, MÉXICO.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Regional de Investigaciones Noreste. Carretera Saltillo-Zacatecas km 8.5, col. Hacienda, Buenavista, Saltillo, Coahuila, C. P. 25315, MÉXICO.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Canal Sacramento km 65, Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140, MÉXICO.

⁴Comisión Nacional de las Zonas Áridas. Carretera a Chapala núm. 655, El Álamo, San Pedro Tlaquepaque, Jalisco, C. P. 45560, MÉXICO.

*Corresponding author: giopr30@gmail.com, tel. 712 234 9780, 712 247 4531.

Abstract

Introduction: Carbon is found mainly in geological reservoirs, oceans, atmosphere and land. Soil organic carbon (SOC) is determined by the quantity and vertical distribution of vegetation, intrinsic soil properties and climate, but variability is influenced by anthropogenic interference. SOC stocks are not static; modeling their spatial, vertical and horizontal distribution involves the creation of baseline estimates to quantify these stocks.

Objective: To estimate the magnitude of SOC stocks in the Medio Aguanaval River sub-basin (ScRMA) and to analyze the sensitivity of four interpolation methods to minimize the error of digital mapping for the ScRMA.

Methodology: The study consisted of five stages: 1) search, download and analysis of soil data, 2) data processing, 3) selection of verification sites, 4) laboratory analysis and 5) processing of data from verification sites.

Results: SOC values ranged from 9 to 133 t·ha⁻¹, with a mean of 36.31 t·ha⁻¹ and standard deviation of 23.83 t·ha⁻¹. The ordinary exponential Kriging interpolator was the best representation for SOC of the ScRMA based on statistics. The results of the analysis of the verification sites yielded a mean SOC of 24.4 t·ha⁻¹.

Limitations of the study: Soil profile density for the region and the lack of information on bulk density.

Originality: The baseline distribution of SOC at the sub-basin level was used to analyze its dynamics.

Conclusions: The highest concentration of SOC (61 to 129 t·ha⁻¹) was found in the municipalities of Cuencamé and Santa Clara, while the lowest records (10 to 30 t·ha⁻¹) were located in the municipalities of Torreón and Viesca.

Resumen

Introducción: El carbono se encuentra principalmente en reservas geológicas, océanos, atmósfera y tierra. El carbono orgánico en el suelo (COS) está determinado por la cantidad y distribución vertical de la vegetación, las propiedades intrínsecas del suelo y el clima, pero su variabilidad es influenciada por la interferencia antrópica. Las reservas de COS no son estáticas, la modelación de su distribución espacial, vertical y horizontal requiere la creación de estimaciones de referencia para cuantificar dichas reservas.

Objetivo: Estimar la magnitud de los almacenes de COS en la subcuenca del río Medio Aguanaval (ScRMA) y analizar la sensibilidad de cuatro métodos de interpolación para minimizar el error del mapeo digital para la ScRMA.

Metodología: El estudio se realizó en cinco etapas: 1) búsqueda, descarga y análisis de datos edafológicos, 2) procesamiento de datos, 3) selección de sitios de verificación, 4) análisis de laboratorio y 5) procesamiento de datos de sitios de verificación.

Resultados: Los valores del COS presentaron un rango de 9 a 133 t·ha⁻¹, una media de 36.31 t·ha⁻¹ y una desviación estándar de 23.83 t·ha⁻¹. El interpolador Kriging ordinario exponencial representó mejor el COS de la ScRMA con base en sus estadísticos. Los resultados del análisis de los sitios de verificación arrojaron una media de 24.4 t·ha⁻¹ de COS.

Limitaciones del estudio: La densidad de perfiles edafológicos para la región y el vacío de información sobre la densidad aparente.

Originalidad: Se empleó la línea base de distribución del COS a nivel subcuenca para analizar su dinámica.

Conclusiones: En los municipios de Cuencamé y Santa Clara se encontró la mayor concentración de COS (61 a 129 t·ha⁻¹), mientras que los registros más bajos (10 a 30 t·ha⁻¹) se ubicaron en los municipios de Torreón

Keywords: SOC estimation, interpolation, SOC reserves, Geographic Information Systems.

Palabras clave: estimación de COS, interpolación, reservas de COS, Sistemas de Información Geográfica.

Please cite this article as follows (APA6): Pérez-Rodríguez, G., López-Santos, A., Velásquez-Valle, M.A., Villanueva-Díaz, J., & García-Rodríguez, J. L. (2021). Spatial distribution of soil organic carbon by digital mapping: the case of the Medio Aguanaval river sub-basin. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(2), 227-245. <http://dx.doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.03.055>

Received: March 19, 2021 / Accepted: August 20, 2021.



Ingeniería Agrícola
y Biosistemas

<https://revistas.chapingo.mx/inagbi/>

Introduction

Carbon (C) on the planet (43515 ± 10000 Pg) is found mainly in geological reservoirs (identified as carbon, gas and oil [5000 to 10000 Pg]), oceans (87 %, with a predominance of C-inorganic), atmosphere (2 %, mainly as carbon dioxide [CO₂]) and land (which includes soil and plant biomass [11 %]). Soil organic carbon (SOC) is estimated to be three times higher (1500 Pg) than that concentrated in aboveground vegetation (450 Pg) (García-Oliva *et al.*, 2006; Venter *et al.*, 2021; Zhuo-Dong *et al.*, 2021).

It has been extensively reported that SOC is determined by the quantity and vertical distribution of vegetation, intrinsic soil properties, and climate. However, the variability of SOC is influenced by anthropogenic interference, commonly carried out by soil manipulation practices (tillage, fertilization), vegetation modification (clearing, thinning, etc.) and livestock pressure, among others (Jobbagy & Jackson, 2000; García-Oliva *et al.*, 2006; Muñoz *et al.*, 2015; Batjes, 2016; Venter *et al.*, 2021; Zhuo-Dong *et al.*, 2021).

Venter *et al.* (2021) mention that since the beginning of livestock and agriculture (12000 years ago), land use changes and overgrazing have caused a loss of 116 Pg of C from the topsoil up to 2 m depth, where the main ecosystems affected are grasslands, savannas and croplands (22, 22 and 21 Pg, respectively). Even when in some areas there is an increase in SOC by appropriate interventions, such as the incorporation of green manures and restrictions on vegetation removal (Parras-Alcántara *et al.*, 2015; Mahajan *et al.*, 2021), net balance to date is negative, because overall losses are estimated at an average of 26 % (Venter *et al.*, 2021).

Because of the importance of SOC in soil functions and its interaction with the plant-atmosphere system, it is now considered as a universal indicator of soil safety and health (McBratney *et al.*, 2014; Mattina *et al.*, 2018; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2017a). In contrast, SOC loss is an indicator of soil degradation (Loayza *et al.*, 2020; Mahajan *et al.*, 2021), which is consistent with the behavior of moisture, and soil and air temperature (Gómez-Tagle *et al.*, 2003; López-Santos *et al.*, 2008). López-Santos *et al.* (2008) found that in soils poor in organic matter (< 3 %) and without vegetation protection, the behavior of energy in the topsoil (8 cm depth) is unpredictable, which is manifested in the increase in sensible heat.

In the Target 15.3 of the Sustainable Development Goals (SDGs) (FAO, 2017b), the SOC is considered as an indicator of biodiversity and resilience to climate change; this under the premise of promoting and achieving Land Degradation Neutrality (LDN), which

Introducción

El carbono (C) del planeta (43515 ± 10000 Pg) se encuentra principalmente en las reservas geológicas (identificadas como carbón, gas y aceite [5000 a 10000 Pg]), los océanos (87 %, con predominio de C-inorgánico), la atmósfera (2 %, primordialmente como dióxido de carbono [CO₂]) y la tierra (que incluye suelo y biomasa vegetal [11 %]). Se estima que el carbono orgánico del suelo (COS) es tres veces mayor (1500 Pg) que el concentrado en la vegetación aérea (450 Pg) (García-Oliva *et al.*, 2006; Venter *et al.*, 2021; Zhuo-Dong *et al.*, 2021).

Se ha documentado ampliamente que el COS está determinado por la cantidad y distribución vertical de la vegetación, las propiedades intrínsecas del suelo y el clima. No obstante, su variabilidad es influenciada por la interferencia antrópica, realizada comúnmente mediante prácticas de manipulación del suelo (laboreo, fertilización), modificación de la vegetación (desmonte, aclareo, etc.) y presión ganadera, entre otras (Jobbagy & Jackson, 2000; García-Oliva *et al.*, 2006; Muñoz *et al.*, 2015; Batjes, 2016; Venter *et al.*, 2021; Zhuo-Dong *et al.*, 2021).

Venter *et al.* (2021) mencionan que desde el inicio de la ganadería y la agricultura (hace 12000 años), los cambios de uso de suelo y el sobrepastoreo han provocado una pérdida de 116 Pg de C desde la capa superior del suelo hasta 2 m de profundidad, donde los principales ecosistemas afectados son pastizales, sabanas y tierras de cultivo (22, 22 y 21 Pg, respectivamente). Aun cuando en algunos territorios hay incremento del COS mediante intervenciones adecuadas, como la incorporación de abonos verdes y las restricciones en la remoción de la vegetación (Parras-Alcántara *et al.*, 2015; Mahajan *et al.*, 2021), el balance neto a la fecha es negativo, ya que se estiman pérdidas globales promedio de 26 % (Venter *et al.*, 2021).

Dada la importancia del COS en las funciones del suelo y su interacción con el sistema planta-atmósfera, actualmente es considerado como un indicador universal de la seguridad y la salud de los suelos (McBratney *et al.*, 2014; Mattina *et al.*, 2018; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2017a). Por el contrario, la pérdida de COS es un indicador de degradación del suelo (Loayza *et al.*, 2020; Mahajan *et al.*, 2021), lo cual es concomitante con el comportamiento de la humedad, y la temperatura del suelo y del aire (Gómez-Tagle *et al.*, 2003; López-Santos *et al.*, 2008). López-Santos *et al.* (2008) encontraron que en suelos pobres en materia orgánica (< 3 %) y sin protección de la vegetación es impredecible el comportamiento de la energía en la capa superior del suelo (8 cm de profundidad), el cual se manifiesta en el incremento en el calor sensible.

is one of the three indicators considered as “trends in carbon stocks” (Orr et al., 2017; Laban et al., 2018). However, as mentioned above, due to multiple biotic and abiotic factors, including soil type, land use, and climatic conditions (Galicia et al., 2016), SOC stocks are not static, because they are subject to constant cycling among various sinks, in soil, vegetation, ocean, and atmosphere.

From the local, to the global scale, it is complicated to quantify SOC stocks. Therefore, FAO (2017c) compiled statistical methods based on Geographic Information Systems (GIS) to generate spatially distributed digital SOC maps (SOCDM), namely, to assess SOC considering uncertainty. This effort was aimed to support developing countries, such as those located in Latin America, because in several of them a scarcity or, in extreme cases, absence of soil data was detected (Guevara et al., 2018).

Guevara et al. (2018), as part of integration efforts of the SOC world map (<http://54.229.242.119/GSOCmap/>), elaborated the SOC DM of Latin America with a spatial resolution of 5 x 5 km. These authors used 11268 estimates (n) from 19 countries, out of the 46 that integrate the region. The largest contribution of soil data (88.1 %) was from Brazil (5616 n) and Mexico (4321 n); other countries such as Argentina (231 n), Colombia (166 n) and Venezuela (1.45 n) had a joint contribution of less than 5 %. For this purpose, they used the SCORPAN model previously described by McBratney et al. (2003). Guevara et al. (2018) mention that from that model they combined quantitative and qualitative empirical descriptions to establish the relationship between soils and spatially distributed predictors: $S_c = f(S, C, O, R, P, A, N)$ and $S_a = f(S, C, O, R, P, A, N)$; where S_c corresponds to soil classes and S_a can be any soil attribute or attributes (such as SOC), which will depend on the characteristics of soil (S), climate (C), organisms (O), relief (R), parent material (P), time (A) and physical space (N).

However, in the report by Guevara et al. (2018), SOC estimates for Latin America and the Caribbean still present uncertainties reflected in standard deviations above the mean values (Brazil = 3.23 ± 9.18 kg de SOC·m⁻²). Mexico reports an average SOC storage of 2.56 ± 1.49 kg·m⁻² (in a range from 0 to 35.55 kg·m⁻²), which represents a national average of about 7.68 t·ha⁻¹ of SOC considering a depth of 30 cm. Undoubtedly, these results are a breakthrough, so regional studies could reinforce the global effort from the local (Segura-Castruita et al., 2005), especially for arid and semi-arid regions where C sinks have been underestimated (Montaño et al., 2016).

Therefore, the objectives of the present study were to estimate the magnitude of SOC stocks in the Medio

En la Meta 15.3 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (FAO, 2017b), el COS se constituye como un indicador de la biodiversidad y de la resiliencia ante el cambio climático; esto bajo la premisa de promover y lograr la Neutralidad de Degradación de Tierras (NDT), que es uno de los tres indicadores considerados como “Tendencias en las reservas de carbono” (Orr et al., 2017; Laban et al., 2018). Sin embargo, como ya se ha mencionado, debido a múltiples factores bióticos y abióticos, incluyendo el tipo de suelo, uso de la tierra y condiciones climáticas (Galicia et al., 2016), las reservas de COS no son estáticas, pues están sometidas a ciclos constantes entre diversos sumideros, tanto en el suelo como en la vegetación, el océano y la atmósfera.

Desde la escala local, a la global, es complicado cuantificar los almacenes de COS. Por ello, la FAO (2017c) compiló los métodos estadísticos basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar mapas digitales de COS (MDCOS) de distribución espacial, específicamente para evaluar el COS considerando la incertidumbre. Este esfuerzo fue orientado para apoyar países en desarrollo, como los ubicados en América Latina, debido a que en varios de ellos se detectó escasez o, en casos extremos, ausencia de datos edafológicos (Guevara et al., 2018).

Guevara et al. (2018), como parte de los esfuerzos de integración del mapa mundial del COS (<http://54.229.242.119/GSOCmap/>), elaboraron el MDCOS de América Latina con una resolución espacial de 5 x 5 km. Dichos autores emplearon 11268 estimaciones (n) de 19 países, de los 46 que integran la región. La mayor aportación de datos edafológicos (88.1 %) fueron de Brasil (5616 n) y México (4321 n); otros países como Argentina (231 n), Colombia (166 n) y Venezuela (1.45 n) tuvieron una aportación conjunta de menos de 5 %. Para ello, utilizaron el modelo SCORPAN descrito previamente por McBratney et al. (2003). Guevara et al. (2018) mencionan que a partir de dicho modelo combinaron descripciones empíricas cuantitativas y cualitativas para establecer la relación entre los suelos y predictores espacialmente distribuidos: $S_c = f(S, C, O, R, P, A, N)$ y $S_a = f(S, C, O, R, P, A, N)$; donde S_c corresponde a las clases de suelo y S_a puede ser cualquier atributo o atributos del suelo (como el COS), lo cual estará en función de las características del suelo (S), del clima (C), de los organismos (O), del relieve (R), del material parental (P), del tiempo (A) y del espacio físico (N).

No obstante, en el reporte de Guevara et al. (2018), las estimaciones del COS de América Latina y el Caribe aún presentan incertidumbres reflejadas en desviaciones estándar muy por encima de los valores medios (Brasil = 3.23 ± 9.18 kg de COS·m⁻²). Para el caso de México, se reporta un almacén de COS promedio de 2.56 ± 1.49 kg·m⁻² (en un rango de 0 a 35.55 kg·m⁻²), lo cual

Aguanaval River sub-basin (ScRMA) and to analyze the sensitivity of four interpolation methods to minimize the digital mapping error for the ScRMA.

Materials and methods

Description of the study unit

The ScRMA was considered as the study unit, located in the Mesa del Centro province and in the sub-provinces Sierra and Llanuras del Norte, and Sierras and Lomeríos de Aldama and Río Grande, in an altitudinal range from 1400 to 2600 m a. s. l. The ScRMA is part of hydrological region 36, with an area of 8348 km² and located in the east of the state of Durango, northwest of the state of Zacatecas and southeast of the state of Coahuila (24.632° N and 103.260° W) (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 1998) (Figure 1).

The ScRMA includes part of the municipalities of Cuencamé, General Simón Bolívar, Santa Clara and San Juan de Guadalupe in Durango; Juan Aldama and Miguel Auza in Zacatecas, and Torreón and Viesca in Coahuila. The climate in this area is arid, with five subtypes: very arid semi-warm (BWhw), arid semi-warm (BSohw), semiarid temperate (BS1kw), arid temperate (BSokw) and semiarid semi-warm (BS1hw) (García, 1998). There is dominance of scrubland

representa un promedio nacional de alrededor de 7.68 t·ha⁻¹ de COS considerando una profundidad de 30 cm. Sin duda, estos resultados son un gran avance, por lo que estudios regionales podrían reforzar el esfuerzo global desde lo local (Segura-Castruita *et al.*, 2005), sobre todo para las regiones áridas y semiáridas donde se han subestimado los sumideros de C (Montaño *et al.*, 2016).

Con base en lo anterior, los objetivos de la presente investigación fueron estimar la magnitud de los almacenes del COS en la subcuenca del río Medio Aguanaval (ScRMA) y analizar la sensibilidad de cuatro métodos de interpolación para minimizar el error del mapeo digital para la ScRMA.

Materiales y métodos

Descripción de la unidad de estudio

Se consideró como unidad de estudio a la ScRMA ubicada en la provincia Mesa del Centro y en las sub-provincias Sierra y Llanuras del Norte, y Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande, en un rango altitudinal de 1400 a 2600 m s. n. m. La ScRMA es parte de la región hidrológica 36, con un área de 8348 km² y cuya ubicación está al oriente del estado de Durango, noroeste de Zacatecas y sureste de Coahuila (24.632° longitud norte y 103.260° latitud

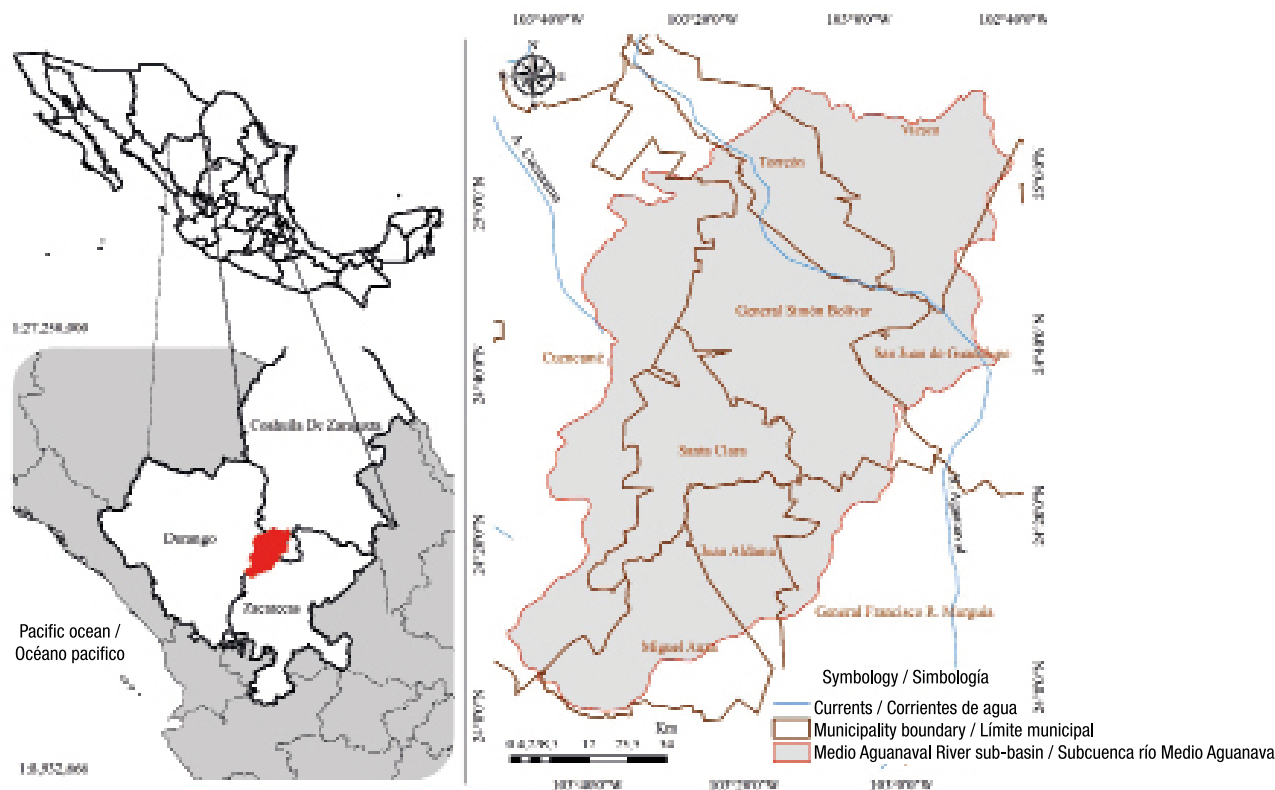


Figure 1. Study Unit: national, regional and sub-basin location of the Medio Aguanaval river.

Figura 1. Unidad de estudio: ubicación nacional, regional y subcuenca del río Medio Aguanaval.

(41 %) and rainfed agriculture, which is practiced in 20 % of the territory (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2016). Precipitation and annual temperature in this area range from 125 to 600 mm and from 16 to 22° C, respectively (Cuervo-Robayo et al., 2014). The ScrMA territory includes 12 main soil groups (MSG) and 39 subgroups, where Phaeozem, with loam or medium texture, stands out in more than 80 % of the area (INEGI, 2014a). The presence of topofoms such as mountain ranges, rolling hills, plateaus, plains, valleys and relieves is observed (Lugo-Hubp & Aceves-Quezada, 1992).

Stages of the research

Once the ScrMA was defined, delimited and characterized, the study considered five stages: 1) search, download and analysis of soil data, 2) data processing, 3) selection of verification sites, 4) laboratory analysis and 5) processing of data from verification sites.

Search and download of soil data

Soil data were collected from the national set consisting of 4418 soil profiles (composed of 14349 horizons or soil layers) classified by the World Reference Base for Soil Resources (WRB) and adapted by INEGI (2014b) as Series II. This vector set at a scale of 1:250 000 corresponds to historical data for more than 30 years (1970 to 2005), updated to 2010 (<https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#Descargas>). From the national set, 40 profiles (0.9 %) were extracted and analyzed in terms of density (n), horizontal (x, y) and vertical (z) distribution. To extract the representative information of the sub-basin, the limit defined by the ScrMA watershed, which is from 0 to 30 cm depth, was considered.

Data processing

The SOC value of the ScrMA was determined based on the procedure described by Bautista et al. (2016), using the Soil & Environment® (S&E) program (Skii: <https://www.actswithscience.com>), which allows the calculation of C stocks, as well as related environmental functions (such as soil quality and fertility). This program includes a template, where the information of the selected soil profiles was downloaded. The profile data represented the period from April 1992 to November 2005. The vector file of the profiles does not have data for bulk density (BD), so it was obtained by means of a hydraulic property estimator. For this purpose, the percentage values of clay and sand for each horizon of the profile were entered. Organic matter (OM) was calculated according to the Official Mexican Standards NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002).

oeste) (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 1998) (Figura 1).

La ScrMA integra parte de los municipios de Cuencamé, General Simón Bolívar, Santa Clara y San Juan de Guadalupe en Durango; Juan Aldama y Miguel Auza en Zacatecas, y Torreón y Viesca en Coahuila. El clima presente en esta zona es árido, con cinco subtipos: muy árido semicálido (BWhw), árido semicálido (BSohw), semiárido templado (BS1kw), árido templado (BSokw) y semiárido semicálido (BS1hw) (García, 1998). Hay dominancia de matorrales (41 %) y agricultura de temporal, la cual se practica en 20 % del territorio (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2016). La precipitación y la temperatura anual en esta zona es de 125 a 600 mm y de 16 a 22° C, respectivamente (Cuervo-Robayo et al., 2014). El territorio de la ScrMA integra 12 grupos de suelo principal (GSP) y 39 subgrupos, donde destaca el Phaeozem, con textura franco o media, en más del 80 % del área (INEGI, 2014a). Además, se observa la presencia de topofomas como sierras, lomeríos, mesetas, llanuras, valles y bajadas (Lugo-Hubp & Aceves-Quezada, 1992).

Etapas de la investigación

Una vez definida, delimitada y caracterizada la ScrMA, el desarrollo del estudio consideró cinco etapas: 1) búsqueda, descarga y análisis de datos edafológicos, 2) procesamiento de datos, 3) selección de sitios de verificación, 4) análisis de laboratorio y 5) procesamiento de datos de sitios de verificación.

Búsqueda y descarga de datos edafológicos

Los datos edafológicos se obtuvieron del conjunto nacional que consta de 4418 perfiles de suelos (integrados por 14349 horizontes o capas de suelo) clasificados por el sistema internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, por sus siglas en inglés) y adaptado por el INEGI (2014b) como Serie II. Este conjunto vectorial en escala 1:250 000 corresponde a los datos históricos de más de 30 años (1970 a 2005), con actualización al 2010 (<https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#Descargas>). Del conjunto nacional se extrajeron 40 perfiles (0.9 %), que fueron analizados en cuanto a su densidad (n), y distribución horizontal (x, y) y vertical (z). Para extraer la información representativa de la subcuenca, se consideró el límite definido por el parteaguas de la ScrMA, que es de 0 a 30 cm de profundidad.

Procesamiento de datos

El valor del COS de la ScrMA se determinó con base en el procedimiento descrito por Bautista et al. (2016), con fundamento en el programa Soil & Environment®

Soil properties used in the S&E program to calculate CO were volume of thick fragments (%), horizon thickness (dm), bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) and SOC content (%). Equation 1 was used to estimate SOC (Gallegos-Tavera et al., 2014).

$$SOC = \sum_{\text{horizonte}=i}^{\text{horizonte}=n} \left\{ \left[BD_i \times TH_i \left(1 - \frac{CR_i}{100} \right) \times C_i \times 100 \right] \right\} \quad (1)$$

where SOC is the organic carbon of the complete soil profile ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$), BD_i is the bulk density of horizon i ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), TH_i is the thickness of horizon i (dm), CR_i is the volume of thick fragments of horizon i (%) and C_i is the percentage of organic carbon of horizon i (%).

The properties analyzed in the laboratory that are indispensable for working with S&E are C, CIC, Ca, Mg, Na, K and pH (Gallegos & Bautista, 2015). SOC values were obtained, when integrating the template with the necessary data per profile into the program. These values were ordered and, together with the general information of each profile, an Excel database was created. Considering the number of soil profiles according to the surface of the ScRMA, an interpolation of SOC data was carried out with the four geostatistics available in the ArcGIS 10.1 program (IDW, Kriging, Natural Neighbor and Spline), and it was analyzed which of them generated the best interpolation based on their statistics. Finally, a map of the SOC distribution in the ScRMA was created.

Selection of verification sites

By using different thematic layers in ArcGIS 10.1 (such as land use, vegetation, soil types, climates and municipalities), in addition to accessibility, a greater representativeness was considered for the distribution of the SOC estimation verification sites. A total of 4 kg of soil were collected at each site, and unaltered samples were taken using steel cylinders to determine bulk density.

Laboratory analysis

The variables analyzed in the soil from the verification sites were pH (potentiometer), BD (kerosene), texture (Bouyoucos), electrical conductivity (EC, conductivity meter), cation exchange capacity (CEC, titration with NaCl) and organic matter (OM, Walkley and Black). The analyses were carried out in accordance with NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Processing of data from verification sites

SOC was estimated from soil OM, determined by the method proposed by Walkley and Black (1934). The Van Benmelen factor of 1.724 was used for the

(S&E) (Skiu: <https://www.actswithscience.com>), el cual permite calcular almacenes de C, así como las funciones ambientales relacionadas (como la calidad y fertilidad de los suelos). Dicho programa incluye una plantilla, en la cual se descargó la información de los perfiles edafológicos seleccionados. Los datos de los perfiles representaban el periodo de abril de 1992 a noviembre de 2005. El archivo vectorial de los perfiles no cuenta con datos para densidad aparente (D_a), por lo que ésta se obtuvo mediante un estimador de propiedades hidráulicas. Para ello, se ingresaron los valores porcentuales de arcilla y arena de cada horizonte del perfil. El cálculo de la materia orgánica (MO), se realizó conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002). Las propiedades del suelo utilizadas en el programa S&E para calcular el CO fueron: volumen de fragmentos gruesos (%), espesor de los horizontes (dm), densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y contenido del COS (%). La Ecuación 1 se utilizó para calcular el COS (Gallegos-Tavera et al., 2014).

$$COS = \sum_{\text{horizonte}=i}^{\text{horizonte}=n} \left\{ \left[Da_i \times TH_i \left(1 - \frac{CR_i}{100} \right) \times C_i \times 100 \right] \right\} \quad (1)$$

donde COS es el carbono orgánico del perfil completo de suelo ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$), Da_i es la densidad aparente del horizonte i ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), TH_i es el espesor de horizonte i (dm), CR_i es el volumen de fragmentos gruesos del horizonte i (%) y C_i es el porcentaje de carbono orgánico del horizonte i (%).

Las propiedades analizadas en laboratorio indispensables para trabajar con S&E son C, CIC, Ca, Mg, Na, K y pH (Gallegos & Bautista, 2015). Al integrar en el programa la plantilla con los datos necesarios por perfil se obtuvieron los valores del COS. Estos valores se ordenaron y, junto con la información general de cada perfil, se creó una base de datos en Excel. Al considerar la cantidad de perfiles edafológicos respecto de la superficie de la ScRMA, se realizó una interpolación de los datos del COS con los cuatro geostadísticos que posee el programa ArcGIS 10.1 (IDW, Kriging, Natural Neighbor y Spline), y se analizó cuál de ellos generó la mejor interpolación con base en sus estadísticos. Finalmente, se elaboró un mapa de la distribución del COS en la ScRMA.

Selección de sitios de verificación

Al emplear diferentes capas temáticas en ArcGIS 10.1 (como uso de suelo, vegetación, tipos de suelo, climas y municipios), además de la accesibilidad, se consideró una mayor representatividad para la distribución de los sitios de verificación de estimaciones del COS. En cada sitio, se colectaron 4 kg de suelo, y se tomaron muestras inalteradas mediante cilindros de acero para determinar densidad aparente.

estimation, which results from the assumption that OM contains 58 % carbon ($1/0.58 = 1.724$). Subsequently, the estimate of total organic carbon (TOC) was determined from the following equation:

$$\text{TOC (\%)} = \frac{\text{OM (\%)}}{1.724} \quad (2)$$

Finally, the template was filled with the data from the verification sites, as explained in the data processing stage, to obtain the SOC value for each site. The database from the verification sites was built to create a thematic map (raster type) with SOC content based on an interpolation using the ArcGIS 10.1 program.

Results and discussion

SOC values obtained for the ScrMA ranged from 9 to 133 t·ha⁻¹, with a mean value of 36.31 t·ha⁻¹, and a standard deviation of 23.83 t·ha⁻¹, (Table 1). These values were obtained from information of soil profiles with depths of 12 to 30 cm; considered based on previous regional studies for the same depth range, which is where the highest SOC concentrations are found (Burke et al., 1989).

SOC concentrations varied in the ScrMA; 84.5 % of its extension values ≤ 50 t·ha⁻¹ were obtained, while 14.5 % of the surface area varied from 51 to 100 t·ha⁻¹, and almost 1 % had concentrations > 100 t·ha⁻¹. The first range of SOC concentrations (10 to 50 t·ha⁻¹) was distributed in 49.80 % of the scrubland area located in the central-northern portion of the sub-basin, specifically northeast of the municipality of Santa Clara, west of San Juan de Guadalupe, south of Viesca, southeast of Torreón and Simón Bolívar, and in a small portion north of Gral. Fco. R. Murguía. 19.63 % of the same concentration occurred in annual rainfed agricultural areas found in the southeastern part of the sub-basin, south of the municipality of Cuencamé, almost in the entirety of Miguel Auza, south of Simón Bolívar and in the center of Juan Aldama. The 11.5 % was found in areas of secondary scrubland vegetation, in some parts of the municipalities of Viesca, Torreón, San Juan de Guadalupe and Simón Bolívar. Finally, 10 % occurred in secondary grassland vegetation, in some parts of Juan Aldama, south of Simón Bolívar, Viesca, Cuencamé and Santa Clara. The remaining 9.66% corresponds to land use and vegetation with a distribution of less than 1 % each.

The second range of SOC (51 to 100 t·ha⁻¹) was found in the west of the sub-basin, where areas with secondary grassland vegetation had this concentration in 42.5 % of their surface, especially in the central-eastern part of Cuencamé and central-western part of Santa Clara. The 24.9 % was distributed in areas with annual rainfed agriculture, in the center-west of

Análisis de laboratorio

Las variables analizadas en el suelo proveniente de los sitios de verificación fueron pH (potenciómetro), Da (parafina), textura (Bouyoucos), conductividad eléctrica (CE, conductímetro), capacidad de intercambio catiónico (CIC, titulación con NaCl) y materia orgánica (MO, Walkley and Black). Los análisis se realizaron conforme a la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Procesamiento de datos de sitios de verificación

El COS se estimó a partir de la MO del suelo, la cual se determinó por el método propuesto por Walkley y Black (1934). Para la estimación se empleó el factor de Van Benmelen de 1.724, que resulta de la suposición de que la MO contiene 58 % de carbono ($1/0.58 = 1.724$). Posteriormente, la estimación del carbono orgánico total (COT) se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{COT (\%)} = \frac{\text{MO (\%)}}{1.724} \quad (2)$$

Finalmente, se llenó la plantilla con los datos de los sitios de verificación, tal como se explicó en la etapa de procesamiento de datos, para obtener el valor del COS de cada sitio. Se constituyó la base de datos de los sitios de verificación para realizar un mapa temático (tipo raster) del contenido de COS a partir de una interpolación con el programa ArcGIS 10.1.

Resultados y discusión

Los valores del COS obtenidos para la ScrMA estuvieron en un rango de 9 a 133 t·ha⁻¹, con un valor medio de 36.31 t·ha⁻¹ y una desviación estándar de 23.83 t·ha⁻¹ (Cuadro 1). Dichos valores se obtuvieron a partir de la información de los perfiles de suelo con profundidades de 12 a 30 cm; esto se consideró con base en estudios regionales previos para el mismo rango de profundidad, que es donde se encuentran las concentraciones más altas de COS (Burke et al., 1989).

Las concentraciones del COS fueron variables en la ScrMA; en 84.5 % de su extensión se obtuvieron valores ≤ 50 t·ha⁻¹, mientras que en 14.5 % de la superficie varío de 51 a 100 t·ha⁻¹, y en casi 1 % se encontraron concentraciones > 100 t·ha⁻¹. El primer rango de concentraciones de COS (10 a 50 t·ha⁻¹) se distribuyó en 49.80 % de la superficie de matorrales ubicados en la porción centro-norte de la subcuenca, específicamente al noreste del municipio de Santa Clara, al oeste de San Juan de Guadalupe, al sur de Viesca, sureste de Torreón y de Simón Bolívar, y en una pequeña porción del norte de Gral. Fco. R. Murguía. El 19.63 % de la misma concentración se presentó en áreas agrícolas de temporal anual encontradas en la parte sureste de la

**Table 1. Soil organic carbon, location and characterization of soil profiles (1992 to 2005).
Cuadro 1. Carbono orgánico en el suelo, ubicación y caracterización de los perfiles de suelo (1992 a 2005).**

Site/ Sitio	SOC (t·ha ⁻¹) / COS (t·ha ⁻¹)	West longitude / Longitud oeste	North latitude / Latitud norte	Municipality / Municipio	Type of climate / Tipo de clima	WRB ¹ classification / Clasificación WRB ¹	Elevation (m a. s. l.) / Altitud (m s. n. m.)	Pp (mm)	Vegetation / Vegetación	Slope / Pendiente
1	28.92	102° 43' 57.42"	25° 00' 56.50"	Viesca	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Cambisol	1 500	300	Scrubland / Matorral	3
2	13.53	103° 03' 28.76"	25° 05' 41.04"	Viesca	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Calcisol	1 450	300	Scrubland / Matorral	3
3	50.08	102° 50' 27.44"	25° 04' 35.88"	Viesca	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Calcisol	1 450	300	Scrubland / Matorral	3
4	20.27	103° 19' 53.49"	24° 55' 29.31"	Gral. Simón Bolívar	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Calcisol	1 450	300	Scrubland / Matorral	1
5	31.28	102° 54' 11.69"	24° 54' 25.27"	Viesca	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Calcisol	1 550	300	Scrubland / Matorral	1
6	39.23	103° 14' 08.05"	24° 54' 10.28"	Gral. Simón Bolívar	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Calcisol	1 350	300	Irrigation / Agric. de riego	1
7	21.98	103° 03' 14.32"	24° 49' 07.67"	Torreón	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Calcisol	1 450	300	Scrubland / Matorral	2
8	17.71	102° 53' 58.21"	24° 49' 26.67"	Viesca	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Calcisol	1 500	300	Scrubland / Matorral	1
9	42.64	103° 11' 24.19"	24° 45' 16.90"	Gral. Simón Bolívar	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Kastañozem	1 450	300	Irrigation / Agric. de riego	1
10	12.64	103° 13' 51.42"	24° 41' 55.09"	Gral. Simón Bolívar	Arid, semiwarm / Árido, semicálido	Calcisol	1 550	300	Irrigation / Agric. de riego	1
11	53.06	103° 30' 40.76"	24° 33' 03.28"	Santa Clara	Arid, semiwarm / Árido, semicálido	Chernozem	1 800	400	Rainfed / Agric. de temporal	2
12	9.03	103° 33' 45.44"	24° 07' 43.88"	Miguel Auza	Semi-arid, temperate / Semiárido, templado	Planosol	2 150	500	Gallery vegetation / Vegetación de galería	2
13	21.24	103° 14' 52.94"	24° 58' 38.80"	Torreón	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Leptosol	1 325	300	Scrubland / Matorral	40
14	30.12	103° 25' 41.33"	24° 57' 23.53"	Cuencamé	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Calcisol	1 470	300	Scrubland / Matorral	1
15	55.77	103° 06' 31.95"	24° 44' 07.77"	Gral. Simón Bolívar	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Calcisol	1 470	300	Scrubland / Matorral	2
16	36.39	103° 19' 45.77"	24° 32' 02.44"	Santa Clara	Arid, semiwarm / Árido, semicálido	Leptosol	1 748	400	Scrubland / Matorral	2

Table 1. Soil organic carbon, location and characterization of soil profiles (1992 to 2005). (cont.)
Cuadro 1. Carbono orgánico en el suelo, ubicación y caracterización de los perfiles de suelo (1992 a 2005). (cont.)

Site/ Sitio	SOC (t·ha ⁻¹)/ COS (t·ha ⁻¹)	West longitude/ Longitud oeste	North latitude/ Latitud norte	Municipality/ Municipio	Type of climate/ Tipo de clima	WRB ¹ classification/ Clasificación WRB ¹	Elevation (m a. s. l.)/ Altitud (m s. n. m.)	Pp (mm)	Vegetation/ Vegetación	Slope/ Pendiente
17	133.72	103° 32' 46.08"	24° 42' 37.61"	Cuenca	Arid, temperate/ Árido, semicálido	Leptosol	2007	400	Scrubland/ Matorral	30
18	87.48	103° 28' 56.13"	24° 25' 21.60"	Santa Clara	Arid, semiwarm/ Árido, semicálido	Vertisol	1823	400	Grassland/ Pastizal	1
19	45.66	103° 11' 44.63"	24° 23' 08.86"	Juan Aldama	Semi-arid, temperate/ Semiárido, templado	Luvisol	1946	400	Scrubland/ Matorral	1
20	16.87	103° 38' 04.23"	24° 08' 42.46"	Cuenca	Semi-arid, temperate/ Semiárido, templado	Umbrisol	2105	600	Rainfed./Agric. de temporal	1
21	29.30	103° 35' 22.82"	23° 57' 30.91"	Sombretete	Semi-arid, temperate/ Semiárido, templado	Luvisol	2250	500	Rainfed./Agric. de temporal	1
22	10.83	102° 53' 00.43"	23° 56' 44.56"	Gral. Fco. R. Murguía	Arid, semiwarm/ Árido, semicálido	Calcisol	1843	400	Scrubland/ Matorral	10
23	28.60	103° 31' 12.49"	25° 11' 53.45"	Gral. Simón Bolívar	Very arid, semiwarm/ Muy árido, semicálido	Calcisol	1250	300	Scrubland/ Matorral	5
24	20.48	103° 08' 46.07"	25° 17' 34.75"	Viesca	Very arid, semiwarm/ Muy árido, semicálido	Calcisol	1200	200	Scrubland/ Matorral	4
25	12.28	102° 38' 17.09"	24° 39' 17.18"	San Juan de Guadalupe	Very arid, semiwarm/ Muy árido, semicálido	Regosol	1600	300	Scrubland/ Matorral	2
26	65.85	103° 42' 20.67"	24° 32' 22.29"	Cuenca	Semi-arid, temperate/ Semiárido, templado	Chernozem	2100	500	Rainfed./Agric. de temporal	1
27	41.27	103° 46' 02.88"	24° 23' 35.07"	Cuenca	Semi-arid, temperate/ Semiárido, templado	Phaeozem	2100	500	Irrigation/ Agric. de riego	1
28	25.84	102° 59' 07.95"	24° 22' 32.92"	Gral. Fco. R. Murguía	Arid, semiwarm / Árido, semicálido	Leptosol	1800	400	Scrubland/ Matorral	15
29	18.58	103° 18' 14.89"	24° 06' 22.75"	Miguel Auza	Semi-arid, temperate/ Semiárido, templado	Luvisol	2150	500	Rainfed./Agric. de temporal	1
30	25.12	102° 38' 47.63"	24° 59' 30.29"	San Juan de Guadalupe	Very arid, semiwarm	Calcisol	1413	300	Scrubland/ Matorral	1
31	13.00	102° 40' 48.31"	24° 42' 35.30"	San Juan de Guadalupe	Very arid, semiwarm/ Muy árido, semicálido	Solonetz	1526	300	Scrubland/ Matorral	0
32	42.16	102° 43' 41.64"	24° 38' 09.46"	San Juan de Guadalupe	Very arid, semiwarm/ Muy árido, semicálido	Leptosol	1589	300	Scrubland/ Matorral	50

Table 1. Soil organic carbon, location and characterization of soil profiles (1992 to 2005). (cont.)
Cuadro 1. Carbono orgánico en el suelo, ubicación y caracterización de los perfiles de suelo (1992 a 2005). (cont.)

Site / Sitio	SOC (t·ha ⁻¹) / COS (t·ha ⁻¹)	West longitude / Longitud oeste	North latitude / Latitud norte	Municipality / Municipio	Type of climate / Tipo de clima	WRB ¹ classification / Clasificación WRB ¹	Elevation (m a. s. l.) / Altitud (m s. n. m.)	Pp (mm)	Vegetation / Vegetación	Slope / Pendiente
33	26.69	103° 39' 37.26"	24° 49' 01.00"	Cuencamé	Arid, semiwarm	Leptosol	1675	400	Scrubland / Matorral	4
34	63.86	103° 47' 02.75"	24° 44' 54.21"	Cuencamé	Arid, temperate / Árido, semicálido	Phaeozem	1822	400	Scrubland / Matorral	20
35	22.89	103° 40' 12.78"	24° 38' 44.46"	Cuencamé	Arid, temperate / Árido, semicálido	Leptosol	1953	500	Scrubland / Matorral	15
36	53.55	103° 42' 39.16"	24° 43' 08.51"	Cuencamé	Arid, semiwarm / Árido, semicálido	Phaeozem	1805	400	Scrubland / Matorral	30
37	50.17	103° 49' 50.58"	24° 25' 55.69"	Cuencamé	Semiarid, temperate / Semiárido, templado	Phaeozem	2088	500	Rainfed / Agric. de temporal	1
38	56.67	103° 41' 16.07"	24° 21' 12.38"	Cuencamé	Semiarid, temperate / Semiárido, templado	Phaeozem	2052	500	Grassland / Pastizal	1
39	47.27	103° 50' 04.87"	24° 15' 45.29"	Cuencamé	Semiarid, temperate / Semiárido, templado	Phaeozem	2131	600	Rainfed / Agric. de temporal	1
40	30.19	102° 54' 06.67"	24° 16' 19.65"	Gral. Fco. R. Murguía	Arid, semiwarm / Árido, semicálido	Leptosol	1705	300	Scrubland / Matorral	25

¹WRB = World Reference Base for Soil Resources; Pp = precipitation. Source: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014a).

²WRB = Base Referencial Mundial del Recurso Suelo; Pp = precipitación. Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014a).

Santa Clara, and 22.9 % was in scrubland in the north-northwest part of Santa Clara. Finally, the third range ($> 100 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) was located west of the ScRMA, in areas of grassland and secondary grassland vegetation.

When comparing interpolators of the ArcGIS 10.1 program, it was found that IDW and Kriging had the best interpolation based on the basic statistics of mean and standard deviation (Table 2).

In the comparison of the powers of the IDW and Kriging interpolators, it was determined that exponential ordinary Kriging (KO) best represented the SOC values of the ScRMA based on the statistics obtained (Table 3).

subcuenca, al sur del municipio de Cuencamé, casi en la totalidad de Miguel Auza, el sur de Simón Bolívar y al centro de Juan Aldama. El 11.5 % se encontró en zonas de vegetación secundaria de matorral, en algunas partes de los municipios de Viesca, Torreón, San Juan de Guadalupe y Simón Bolívar. Por último, el 10 % se presentó en la vegetación secundaria de pastizal, en algunas partes de Juan Aldama, al sur de Simón Bolívar, Viesca, Cuencamé y Santa Clara. El 9.66 % restante corresponde a los usos de suelo y vegetación con distribución menor a 1 % cada uno.

El segundo rango de COS ($51 \text{ a } 100 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) se encontró el oeste de la subcuenca, donde las áreas con vegetación

Table 2. Comparison of interpolators to determine soil organic carbon (SOC).

Cuadro 2. Comparación de interpoladores para determinar el carbono orgánico en el suelo (COS).

No. profiles / Núm. de perfiles	Minimum SOC ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) / COS mínimo ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Maximum SOC ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) / COS máximo ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Interpolator / Interpolador	Minimum estimated SOC ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) / COS mínimo calculado ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Maximum estimated SOC ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) / COS máximo calculado ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Mean ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) / Media ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Standard Deviation / Desviación estándar
40	9.03	133.72	IDW	9.03	133.72	37.56	15.63
			KRIGING	15.35	113.82	38.51	12.72
			NATURAL NEIGHBOR	9.48	132.12	39.59	18.09
			SPLINE	-5.33	156.45	40.93	27.18

Table 3. Comparison between interpolator powers to determine soil organic carbon (SOC).

Cuadro 3. Comparación entre potencias de interpoladores para determinar el carbono orgánico en el suelo (COS).

Interpolator / Interpolador	Power /Potencia	Minimum estimated SOC ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) / COS mínimo calculado ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Maximum estimated SOC ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) / COS máximo calculado ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Mean ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) / Media ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Standard Deviation / Desviación estándar
IDW	P1	11	122	37.64	10.81
	P2	9	133	37.50	15.58
	P3	9	133	37.67	19.28
	P4	9	133	37.93	21.67
Kriging	Spherical K. O. /K. O. esférica	15	113	38.51	12.71
	Circular K. O. /K. O. circular	22	73	37.88	11.12
	Exponential K. O. * / K. O. exponencial*	10	129	38.17	12.35*
	Gaussian K. O. /K. O. Gaussian	16	106	38.10	8.67
	Linear K. O. /K. O. linear	23	65	37.89	10.26
	Linear K. U. with linear derivative / K. U. lineal con derivada lineal	16	61	35.07	9.24
Linear K. U. with quadratic derivative / K. U. lineal con derivada cuadrática	9	101	41.16	16.93	

Villatoro et al. (2008) compared IDW and Kriging interpolators, because they are the most used in spatial variation analysis studies, in an area of 2467 m² and georeferenced 61 points at a distance of 3.5 m from each other; soil samples were obtained at a depth of 0 to 15 cm at each point. The authors used the GS+ program for Windows for variogram analysis, interpolation and cross-validation. Interpolations were performed with soil pH, Ca, CEC and phosphorus (P) values, and they determined that, although both interpolators had similar performance, Kriging was superior in predicting better the variation of pH, Ca and CEC, while IDW was better with P.

Interpolation was represented in nine classes to better visualize the SOC distribution (Figure 2). It was observed that values higher than 50 t·ha⁻¹ are distributed from the central zone towards the west, belonging, in a larger area, to the state of Durango, where lithosol, xerosol and chernozem soil types are

secundaria de pastizal poseen dicha concentración en 42.5 % de su superficie, particularmente en la zona centro-este de Cuencamé y centro-oeste de Santa Clara. El 24.9 % se distribuyó en áreas con agricultura de temporal anual, al centro-oeste de Santa Clara, y el 22.9 % se presentó en matorral en la parte nor-noroeste de Santa Clara. Finalmente, el tercer rango (> 100 t·ha⁻¹) se ubicó al oeste de la ScRMA, en zonas de pastizal y vegetación secundaria de pastizal.

Al comparar los interpoladores del programa ArcGIS 10.1 se encontró que IDW y Kriging presentaron la mejor interpolación en función a los estadísticos básicos de la media y la desviación estándar (Cuadro 2).

En la comparación de las potencias de los interpoladores IDW y Kriging, se determinó que Kriging ordinario exponencial (KO) representó mejor los valores del COS de la ScRMA con base en los estadísticos obtenidos (Cuadro 3).

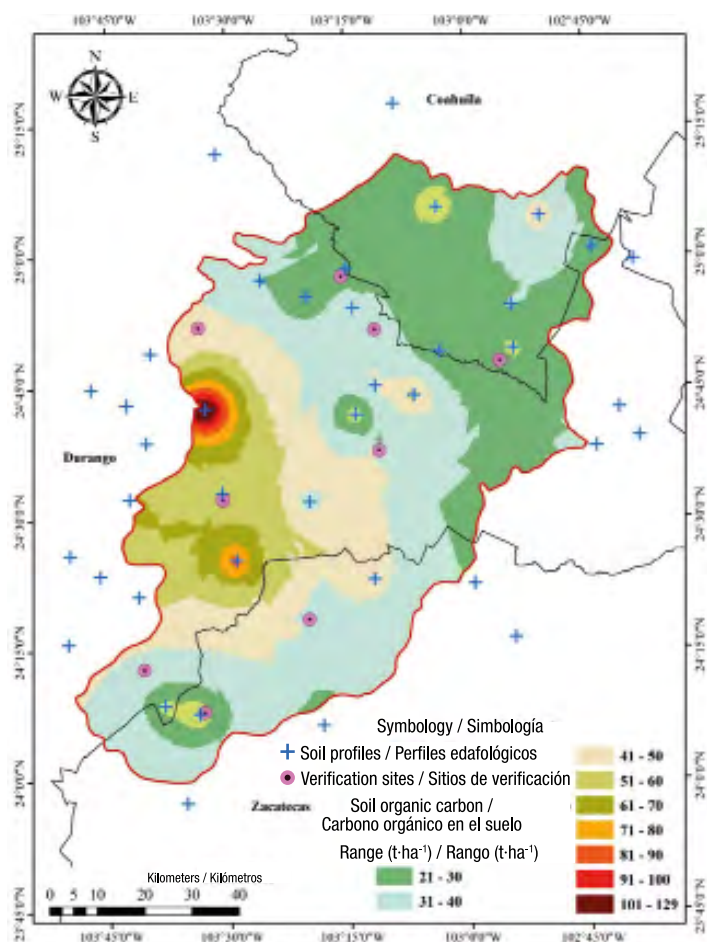


Figure. 2. Soil organic carbon (SOC) in the Medio Aguanaval river sub-basin obtained using the Kriging interpolator.

Figura. 2. Carbono orgánico del suelo (COS) en la subcuenca del río Medio Aguanaval obtenido mediante el interpolador Kriging.

**Table 4. Soil organic carbon (SOC) at verification sites (October 2019).
Cuadro 4. Carbono orgánico del suelo (COS) en sitios de verificación (octubre 2019).**

Site/ Sitio	SOC (t·ha ⁻¹)/ COS (t·ha ⁻¹)	West longitude/ Longitud oeste	North latitude/ Latitud norte	Municipality/ Municipio	Type of climate/ Tipo de clima	WRB ¹ classification/ Clasificación WRB ¹	Elevation (m a. s. l.)/ Altitud (m s. n. m.)	Pp (mm)	Vegetation/ Vegetación	Slope/ Pendiente
1	11.00	103° 33' 09.80"	24° 07' 56.20"	Miguel Auza	Semiárid, temperate/ Semiárido, templado	Phaeozem	2156	300	Scrubland vegetation with natural grassland/ Veg. Sec. Arb. de pastizal natural	1
2	21.84	103° 40' 40.80"	24° 12' 51.60"	Cuencamá	Semiárid, temperate/ Semiárido, templado	Umbrisol	2170	300	Scrubland vegetation of natural grassland/ Veg. Sec. Arb. de pastizal natural	1
3	27.35	103° 30' 38.80"	24° 32' 16.30"	Cuencamá	Semiárid, temperate/ Semiárido, templado	Chernozem	1652	300	Rainfed/ Agric. de temporal	2
4	11.65	103° 10' 59.30"	24° 37' 46.00"	Simón Bolívar	Arid, semiwarm/ Árido, semicálido	Phaeozem	1664	300	Shrubland/ Matorral	1
5	6.37	103° 33' 33.80"	24° 51' 59.50"	Cuencamá	Arid, semiwarm/ Árido, semicálido	Calcisol	1610	300	Scrubland/ Matorral	1
6	8.92	102° 55' 42.10"	24° 47' 59.80"	Simón Bolívar	Very arid, semiwarm/ Muy árido, semicálido	Calcisol	1476	300	Veg. Sec. Arb. de matorral/ Veg. Sec. Arb. de matorral	1
7	40.10	103° 19' 56.50"	24° 18' 32.50"	Juan Aldama	Semiárid, temperate/ Semiárido, templado	Chernozem	2023	300	Rainfed/ Agric. de temporal	1

Table 4. Soil organic carbon (SOC) at verification sites (October 2019). (cont.)
Cuadro 4. Carbono orgánico del suelo (COS) en sitios de verificación (octubre 2019). (cont.)

Site/ Sitio	SOC (t·ha ⁻¹) / COS (t·ha ⁻¹)	West longitude / Longitud oeste	North latitude / Latitud norte	Municipality / Municipio	Type of climate / Tipo de clima	WRB ¹ classification / Clasificación WRB ¹	Elevation (m a. s. l.) / Altitud (m s. n. m.)	Pp (mm)	Vegetation / Vegetación	Slope / Pendiente
8	41.84	103° 11' 27.30"	24° 51' 38.80"	Simón Bolívar	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Calcisol	1 386	300	Mesquite forest / Bosque de mezquite	1
9	50.53	103° 15' 30.90"	24° 57' 47.10"	Torreón	Very arid, semiwarm / Muy árido, semicálido	Leptosol	1 404	300	Scrubland / Matorral	3

¹WRB = World Reference Base for Soil Resources; Pp = precipitation. Source: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014a).

¹WRB = Base Referencial Mundial del Recurso Suelo; Pp = precipitación. Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014a).

found. This zone is dominated by desert microphyllous and rosetophyllous scrub, natural grassland and secondary natural grassland vegetation, with a rainfall of 400 to 600 mm.

The lowest SOC concentration is distributed in the south part of Coahuila and the northeast part of Zacatecas. Vela-Correa et al. (2012) reviewed the reported SOC concentrations to have a general reference and be able to classify them into high and low, according to their values. These authors concluded that there is no reference where a general hierarchy of SOC is established, so they considered the limits of the intervals according to the maximum and minimum values of C concentration obtained in the soil analyses.

Segura-Castruita et al. (2005) estimated the SOC content in the surface horizon (0 to 20 cm) of 4583 soil samples and generated a raster map by interpolation. They found values ranging from 0.2 to 493 t·ha⁻¹, which they divided into five classes. The values corresponding to the sub-basin area ranged from 25 to 50 t·ha⁻¹, which agrees with the results of this study, with a mean of 36 t·ha⁻¹. Similarly, the results agree with a study by FAO (2017a), where they produced a global organic carbon map with one-kilometer resolution using samples obtained at a depth of 0 to 30 cm. In that study, ScRMA presented SOC values of 25 to 40 t·ha⁻¹, and in this study a mean of 24.4 t·ha⁻¹ was obtained in the analysis of ScRMA verification sites (Table 4).

It is important to consider that the number of sites sampled for verification was low (nine sites), although these were representative of the different soil types and uses, compared to the 40 sites analyzed from the INEGI soil profiles, where the mean obtained was 36 t·ha⁻¹. Nevertheless, the results obtained with soil sampling in the ScRMA were no different from those reported by both FAO (2017a) and Segura-Castruita et al. (2005). Regarding the precision of the estimates made, the ECM (mean squared error) statistic was

Villatoro et al. (2008) compararon los interpoladores IDW y Kriging, por ser los más utilizados en estudios de análisis de variación espacial, en un área de 2467 m² y georreferenciaron 61 puntos a una distancia de 3.5 m entre sí; las muestras de suelo las obtuvieron a una profundidad de 0 a 15 cm en cada punto. Dichos autores utilizaron el programa GS+ para Windows para el análisis de variogramas, la interpolación y la validación cruzada. Las interpolaciones las realizaron con valores de pH, Ca, CIC y fósforo (P) del suelo, y determinaron que, aunque ambos interpoladores tuvieron un desempeño similar, Kriging fue superior al predecir de mejor manera la variación de pH, Ca y CIC, mientras que el IDW fue mejor con el P.

La interpolación se representó en nueve clases con el fin de visualizar mejor la distribución del COS (Figura 2). Se observó que valores superiores a 50 t·ha⁻¹ se distribuyen de la zona centro hacia el oeste, perteneciente, en mayor superficie, al estado de Durango, donde se encuentran los tipos de suelo litosol, xerosol y chernozem. En esta zona predomina la vegetación de matorral desértico micrófilo y rosófilo, pastizal natural y vegetación secundaria de pastizal natural, con una precipitación de 400 a 600 mm.

La menor concentración del COS se distribuye en la zona sur del estado de Coahuila y parte noreste de Zacatecas. Vela-Correa et al. (2012) revisaron las concentraciones reportadas del COS con el fin de tener una referencia general y poder clasificarlas, en altos y bajos, de acuerdo con sus valores. Estos autores concluyeron que no existe una referencia donde se establezca alguna jerarquización general del COS, por lo cual consideraron los límites de los intervalos en función de los valores máximos y mínimos de concentración de C obtenidos en los análisis de suelo.

Segura-Castruita et al. (2005) determinaron el contenido de COS en el horizonte superficial (0 a 20 cm) de

Table 5. Descriptive statistics of soil profiles and verification sites in the Medio Aguanaval River sub-basin (ScRMA).

Cuadro 5. Estadísticos descriptivos de los perfiles edáficos y de los sitios de verificación en la subcuenca del río Medio Aguanaval (ScRMA).

Number of sites/ Número de sitios	Mean (t·ha ⁻¹)/ Media (t·ha ⁻¹)	Mean square error (t·ha ⁻¹)/ Error cuadrático medio (t·ha ⁻¹)	Coefficient of variation (%)/ Coeficiente de variación (%)
40 (soil profiles)/ 40 (perfiles edafológicos)	36.31	23.83	65.64
9 (verification sites)/ 9 (sitios de verificación)	24.40	16.41	67.27

calculated for the SOC data of the analyzed profiles and verification sites (23.83 and 16.41 t·ha⁻¹, respectively), and the coefficient of variation for the same data (65.64 and 67.27 %, respectively) (Table 5).

The highest concentration of SOC is found in natural grassland areas, annual irrigated and annual rainfed agriculture, and desert microphilous scrubland that belongs to the central part, which corresponds to the state of Durango (1600 to 2200 m a. s. l.).

Mondal et al. (2017) estimated the distribution of SOC in varied categories of slope, soil, and land use, and observed that SOC concentration is higher in low areas and for clay soils of lands with agricultural vocation. These authors also reported that SOC stock decreases with greater slope, and that clay has the highest carbon content in soil categories.

SOC information refers mainly to temperate and tropical regions (Segura-Castruita et al., 2005), because arid and semi-arid regions have been poorly studied. Montaña et al. (2016) and Yescas-Coronado et al. (2018) mention that spatio-temporal heterogeneity of these regions is influenced by environmental conditions, plant community type, and land use, which together affect carbon stocks and fluxes.

Several authors indicate that climate, via temperature and precipitation, plays a dominant role in SOC accumulation (Grigal & Ohmann, 1992; Batjes, 1999; Yigini & Panagos, 2016; Batjes, 2016; FAO, 2017c; FAO, 2019). Furthermore, it has been determined that soils of rainforests, mangroves and mountain mesophyll forests contribute more than 100 Mg·ha⁻¹ of CO, while grasslands, desert and thorn forest contribute less than 30 Mg·ha⁻¹ of CO. On the other hand, when relating the main land uses with SOC content, it was established that soils used for intensive livestock have the highest SOC content (> 80.0 Mg·ha⁻¹), followed by forest soils (> 75.0 Mg·ha⁻¹), while irrigated agricultural soils have the lowest amount of this compound (40.8 Mg·ha⁻¹) (Segura-Castruita et al., 2005).

Therefore, low SOC concentrations (10 to 30 t·ha⁻¹) in ScRMA are distributed mainly in the northeastern part of the zone, where the dominant vegetation is scrubland (desert) and secondary scrubland vegetation. Precipitation ranges from 125 to 400 mm, and the climate is very arid and semi-warm. SOC concentrations can be attributed to the low contribution of organic matter to the soil by vegetation and aridity of the area, promoting SOC loss.

Conclusions

ScRMA dominated by semiarid conditions showed an estimated mean value of 36.31 t·ha⁻¹ of SOC. In terms

4583 muestras de suelo y generaron un mapa ráster mediante interpolación. Dichos autores encontraron valores desde 0.2 hasta 493 t·ha⁻¹, los cuales dividieron en cinco clases. Los valores correspondientes al área de la subcuenca fluctuaron de 25 a 50 t·ha⁻¹, lo cual concuerda con los resultados de este estudio, con media de 36 t·ha⁻¹. De manera similar, los resultados coinciden con un estudio de la FAO (2017a), en donde elaboraron un mapa de carbono orgánico mundial con resolución de un kilómetro mediante muestras obtenidas en una profundidad de 0 a 30 cm. En dicho estudio, la ScRMA presentó valores de COS de 25 a 40 t·ha⁻¹, y en el presente trabajo se obtuvo una media de 24.4 t·ha⁻¹ en el análisis de los sitios de verificación de la ScRMA (Cuadro 4).

Es relevante considerar que el número de sitios muestreados para la verificación fue bajo (nueve sitios), aunque éstos fueron representativos de los diferentes tipos y usos de suelo, comparado con los 40 sitios analizados de los perfiles edafológicos del INEGI, donde la media obtenida fue de 36 t·ha⁻¹. A pesar de ello, los resultados obtenidos con el muestreo de suelo en la ScRMA no difirieron de los reportados tanto por la FAO (2017a) como por Segura-Castruita *et al.* (2005). Respecto de la precisión de las estimaciones realizadas, se calculó el estadístico ECM (error cuadrático medio) para los datos del COS de los perfiles analizados y de los sitios de verificación (23.83 y 16.41 t·ha⁻¹, respectivamente), y el coeficiente de variación para los mismos datos (65.64 y 67.27 %, respectivamente) (Cuadro 5).

La mayor concentración del COS se encuentra en zonas de pastizal natural, de agricultura de riego anual y temporal anual, y de matorral desértico micrófilo perteneciente a la parte central, que corresponde al estado de Durango (1600 a 2200 m s. n. m.).

Mondal *et al.* (2017) estimaron la distribución del COS en categorías variadas de pendiente, suelo y uso del suelo, y observaron que la concentración del COS es mayor en áreas bajas y en suelos arcillosos de tierras con vocación agrícola. Además, estos autores reportaron que la reserva del COS disminuye con mayor pendiente, y que en las categorías de suelo, la arcilla posee el mayor contenido de carbono.

La información disponible del COS se refiere principalmente a regiones templadas y tropicales (Segura-Castruita *et al.*, 2005), debido a que las regiones áridas y semiáridas han sido poco estudiadas. Montaña *et al.* (2016) y Yescas-Coronado *et al.* (2018) mencionan que la heterogeneidad espacio-temporal de estas regiones se ve influenciada por las condiciones ambientales, el tipo de comunidad vegetal y el uso del suelo, que en su conjunto afectan los almacenes y flujos del carbono.

of distribution, the municipalities with the highest SOC concentration were Cuencamé and Santa Clara, while the lowest records were found in Torreón. This interspatial variation depends on climatic and soil variables and the type of management of the area, where the highest SOC content is generated in sites with higher precipitation and soil depth.

The main limitation in this research was the lack of information on apparent density, which affected the precision of SOC reserve estimates. Therefore, and based on the development of this study, it was estimated that at a density of 0.6 % sampling, uncertainty decreased from 23.83 to 16.41 t·ha⁻¹ (ECM) in this heterogeneous ecosystem.

Acknowledgments

The authors thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the scholarship granted to the first author during her master's degree to carry out the research. The authors also thank the *Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas* of the *Universidad Autónoma Chapingo* for the opportunity to pursue graduate studies, and special thanks to the anonymous reviewers for their contribution to this manuscript.

End of English version

References / Referencias

- Batjes, N. H. (1999). *Management options for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil*. International Soil Reference and Information Centre. <https://www.isric.org/sites/default/files/NRP410200031.pdf>
- Batjes, N. (2016). Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, 269, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.034>
- Bautista, F., Gallegos, A., & Pacheco, A. (2016). *Análisis de las funciones ambientales de los suelos con datos de perfiles (Soil & Environment)*. Skiu. https://www.researchgate.net/publication/301221721_Análisis_de_las_funciones_ambientales_de_los_suelos_con_datos_de_perfiles_Soil_Environment
- Burke, I. C., Yonker, C. M., Parton, W. J., Cole, C. V., Flach, K., & Schimel, D. S. (1989). Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 53(3), 800-805. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300030029x>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (1998). *Subcuencas hidrológicas, escala 1: 1,000,000*. CONABIO. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Diversos autores indican que el clima, a través de la temperatura y la precipitación, juega un papel preponderante en la acumulación del COS (Grigal & Ohmann, 1992; Batjes, 1999; Yigini & Panagos, 2016; Batjes, 2016; FAO, 2017c; FAO, 2019). Además, se ha determinado que los suelos de selvas húmedas, manglares y bosques mesófilos de montaña aportan más de 100 Mg·ha⁻¹ de CO, mientras que los pastizales, matorrales xerófilos y matorrales espinosos aportan menos de 30 Mg·ha⁻¹ de CO. Por otra parte, al relacionar los principales usos del suelo con el contenido de COS, se estableció que los suelos destinados a la ganadería intensiva tienen el contenido de COS más elevado (> 80.0 Mg·ha⁻¹), seguido de los suelos forestales (> 75.0 Mg·ha⁻¹), mientras que los suelos con agricultura de riego presentan la menor cantidad de este compuesto (40.8 Mg·ha⁻¹) (Segura-Castruita et al., 2005).

Considerando lo anterior, concentraciones bajas de COS (10 a 30 t·ha⁻¹) en la ScRMA se distribuyen principalmente en la parte noreste de la zona, donde la vegetación dominante es el matorral (micrófilo y rosétofilo) y vegetación secundaria de matorral. El rango de precipitación de dicha zona va de 125 a 400 mm, y el tipo de clima es muy árido y semicálido. Las concentraciones de COS se pueden atribuir a la baja aportación de materia orgánica al suelo por parte de la vegetación y a la aridez del área, la cual promueve la pérdida de COS.

Conclusiones

La ScRMA dominada por condiciones semiáridas mostró un valor medio estimado de 36.31 t·ha⁻¹ de COS. En cuanto a la distribución, los municipios con mayor concentración de COS fueron Cuencamé y Santa Clara, mientras que los registros más bajos se presentaron en Torreón. Esta variación interespatial depende de las variables climáticas, edáficas y el tipo de manejo al que ha estado sujeta el área, donde el mayor contenido de COS se genera en sitios con mayor precipitación y profundidad de suelo.

La principal limitación en esta investigación fue el vacío de información de la densidad aparente, la cual afectó la precisión de las estimaciones de reservas de COS. Por ello, y con base en el desarrollo del trabajo, se estimó que a una densidad de 0.6 % de muestreo, la incertidumbre disminuyó de 23.83 a 16.41 t·ha⁻¹ (ECM) en este ecosistema heterogéneo.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada al primer autor durante la maestría para llevar a cabo la investigación, a la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la

- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). *Temperatura media anual en México (1910-2009), escala: 1:1, 000,000*. CONABIO. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/tman13gw.html>
- Galicia, L., Gamboa-Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez-Vergara, B., Peña-Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1-29. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100001&lng=es&tIng=es
- Gallegos, A., & Bautista, F. (2015). "Soils and Environment" un software para evaluar las funciones ambientales de los suelos. In: Paz, F., Wong, J., & Torres, A. R. (Eds), *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2015* (pp. 236-243). Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Colegio de Postgraduados, la Universidad Autónoma Chapingo y el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. https://www.researchgate.net/publication/301650937_Serie_Sintesis_Nacionales_ESTADO_ACTUAL_DEL_CONOCIMIENTO_DEL_CICLO_DEL_CARBONO_Y_SUS_INTERACCIONES_EN_MEXICO_SINTESIS_A_2015
- Gallegos-Tavera, Á., Bautista, F., & Álvarez, O. (2014). Software para la evaluación de las funciones ambientales de los suelos (Assofu). *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(1), 237-249. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.11.060>
- García, E. (CONABIO). (1998). 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García), escala 1:1,000,000, México. CONABIO. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>
- García-Oliva, F., Hernández, G., & Gallardo-Lancho, J. F. (2006). Comparison of ecosystem C pools in three forests in Spain and Latin America. *Annals of Forest Science*, 63(1), 519-523. <https://doi.org/10.1051/forest:2006034>
- Gómez-Tagle, C. A., Chávez-Huerta, Y., Morales-Manilla, L. M., Díaz-Fernández, E., Gómez-Tagle, A. F., & Zepeda-Castro, H. (2003). Predicción espacial de carbono orgánico edáfico superficial en zonas forestales mediante análisis digital de terreno y SIG: uso de la radiación solar potencial. *Foresta Veracruzana*, 5(2), 49-55.
- Grigal, D. F., & Ohmann, L. F. (1992). Carbon storage in upland forests of the Lake States. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3), 935-943. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030042x>
- Guevara, M., Olmedo, G. F., Stell, E., Yigini, Y., Aguilar-Duarte, Y., Arellano-Hernández, C., Arévalo, G., Arroyo-Cruz, C. E., Bolívar, A., ... Vargas, R. (2018). No silver bullet for digital soil mapping: country-specific soil organic carbon estimates across Latin America. *Soil*, 4(3), 173-193. <https://doi.org/10.5194/soil-4-173-2018>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014a). *Conjunto de datos vectoriales edafológicos. Serie II (Continuo Nacional)*, escala: 1:250,000. INEGI. <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/eda250s2gw>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014b). *Conjunto de datos vectoriales de perfiles de suelo. Serie II (Continuo Nacional)*, escala: 1:250,000. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Serie VI (Capa Unión)*, escala 1: 250,000. INEGI. <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/usv250s6gw>
- Jobbagy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423-436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDO SO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDO SO]2.0.CO;2)
- Laban, P., Metternicht, G., & Davies, J. (2018). *Biodiversidad de suelos y carbono orgánico en suelos: cómo mantener vivas las tierras áridas*. IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2018.03.es>
- Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C., & Jiménez, W. (2020). Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas*, 29(2), 1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>
- López-Santos, A., Zermeño-González, A., Cadena-Zapata, M., Gil-Marín, J. A., Cornejo-Oviedo, E., & Ríos-Camey, M. S. (2008). Impacto de la labranza en el flujo energético de un suelo arcilloso. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 203-213. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57313050002>
- Lugo-Hubp, J., & Aceves-Quezada, F. (1992). *El relieve como atractivo natural. Tomo II. Atlas Nacional de México (1990-1992)*. Instituto de Geografía, UNAM. <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/reatn4mgw>
- Mahajan, G. R., Das, B., Manivannan, S., Manjunath, B. L., Verma, R. R., Desai, S., Kulkarni, R. M., Latare, A. M., Sale, R., Murgaonkar, D., Patel, K. P., Morajikar, S., Desai, A., Barnes, N., & Mulla, H. (2021). Soil and water conservation measures improve soil carbon sequestration and soil quality under cashews. *International Journal of Sediment Research*, 36(2), 190-206. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.07.009>
- Mattina, D., Erdogan, H. E., Wheeler, I., Crossman, N. D., Cumani, R., & Minelli, S. (2018). *Default data: methods and interpretation. A guidance document for the*

Fin de la versión en español

=====

Nacional), escala: 1:250,000. INEGI. <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/eda250s2gw>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014b). *Conjunto de datos vectoriales de perfiles de suelo. Serie II (Continuo Nacional)*, escala: 1:250,000. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Serie VI (Capa Unión)*, escala 1: 250,000. INEGI. <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/usv250s6gw>

Jobbagy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423-436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDO SO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDO SO]2.0.CO;2)

Laban, P., Metternicht, G., & Davies, J. (2018). *Biodiversidad de suelos y carbono orgánico en suelos: cómo mantener vivas las tierras áridas*. IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2018.03.es>

Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C., & Jiménez, W. (2020). Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas*, 29(2), 1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>

López-Santos, A., Zermeño-González, A., Cadena-Zapata, M., Gil-Marín, J. A., Cornejo-Oviedo, E., & Ríos-Camey, M. S. (2008). Impacto de la labranza en el flujo energético de un suelo arcilloso. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 203-213. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57313050002>

Lugo-Hubp, J., & Aceves-Quezada, F. (1992). *El relieve como atractivo natural. Tomo II. Atlas Nacional de México (1990-1992)*. Instituto de Geografía, UNAM. <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/reatn4mgw>

Mahajan, G. R., Das, B., Manivannan, S., Manjunath, B. L., Verma, R. R., Desai, S., Kulkarni, R. M., Latare, A. M., Sale, R., Murgaonkar, D., Patel, K. P., Morajikar, S., Desai, A., Barnes, N., & Mulla, H. (2021). Soil and water conservation measures improve soil carbon sequestration and soil quality under cashews. *International Journal of Sediment Research*, 36(2), 190-206. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.07.009>

Mattina, D., Erdogan, H. E., Wheeler, I., Crossman, N. D., Cumani, R., & Minelli, S. (2018). *Default data: methods and interpretation. A guidance document for the*

- 2018 UNCCD reporting. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). https://prais.unccd.int/sites/default/files/helper_documents/3-DD_guidance_EN.pdf
- McBratney, A. B., Mendonça-Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- McBratney, A., Field, D. J., & Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>
- Mondal, A., Khare, D., Kundu, S., Mondal, S., Mukherjee, S., & Mukhopadhyay, A. (2017). Spatial soil organic carbon (SOC) prediction by regression kriging using remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 20(1), 61-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.004>
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García-Oliva, F., García-Sánchez, R., Maya, Y., Perroni, Y., Siebe, C., Tapia-Torres, Y., Troyo, E., & Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 39-59. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57344471003>
- Muñoz, M. A., Faz, A., & Mermut, A. R. (2015). Soil carbon reservoirs at high-altitude ecosystems in the Andean Plateau. In: Öztürk, M., Hakeem, K. R., Faridah-Hanum, I., & Efe, R. (Eds.), *Climate change impacts on high-altitude ecosystems* (pp. 135-153). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12859-7_4
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017a). *GSP Guidelines for sharing national data/information to compile a Global Soil Organic Carbon (GSOC) map*. Pillar 4 Working Group. <http://www.fao.org/3/bp164e/bp164e.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017b). *Liberación del potencial del carbono orgánico del suelo. Documento de resultados*. FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017c). *Soil Organic Carbon: the hidden potential*. FAO. <http://www.fao.org/3/I6937EN/i6937en.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). *Recarbonization of global soils*. FAO.
- Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo, S. V., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S., & Welton, S. (2017). *Scientific conceptual framework for land degradation neutrality. A report of the science-policy interface*. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- Parras-Alcántara, L., Lozano-García, B., Brevik, E. C., & Cerdá, A. (2015). Soil organic carbon stocks assessment in Mediterranean natural areas: A comparison of entire soil profiles and soil control sections. *Journal of Environmental Management*, 155, 219-228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.039>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. SEMARNAT. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Segura-Castruita, M. A., Sánchez-Guzmán, P., Ortiz-Solorio, C. A., & Gutiérrez-Castorena, M. C. (2005). Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 21-28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57323103>
- Vela-Correa, G., López-Blanco, J., & Rodríguez-Gamiño, M. L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 77, 18-30. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n77/n77a3.pdf>
- Venter, S. Z., Hawkins, H. J., Cramer, M. D., & Mills, A. J. (2021). Mapping soil organic carbon stocks and trends with satellite-driven high resolution maps over South Africa. *Science of the Total Environment*, 771, 145384. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145384>
- 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. https://www.mag.go.cr/rev_agr/v32n01-095.pdf
- Walkley, A., & Black, A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Yescas-Coronado, P., Álvarez-Reyna, V. P., Segura-Castruita, M. A., García-Carrillo, M., Hernández-Hernández, V., & González-Cervantes, G. (2018). Variabilidad espacial del carbono orgánico e inorgánico del suelo en la Comarca Lagunera, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 591-610. <https://doi.org/10.18268/bsgm2018v70n3a2>
- Yigini, Y., & Panagos, P. (2016). Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. *Science of the Total Environment*, 557-558, 838-850. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.085>
- Zhuo-Dong, J., Qiu-Bing, W., Brye, K. R., Adhikari, K., Fu-Jun, S., Zhong-Xiu, S., Si, C., & Owens, P. R. (2021). Quantifying organic carbon stocks using a stereological profile imaging method to account for rock fragments in stony soils. *Geoderma*, 385, 114837. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114837>