

## MAPA DIGITAL DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE PANAMÁ<sup>1</sup>

*José Ezequiel Villarreal Núñez<sup>2</sup>; Iván Alexis Ramos Zachrisson<sup>3</sup>*

### RESUMEN

El objetivo fue elaborar un mapa digital del contenido de carbono orgánico en suelos de Panamá. Se utilizaron 837 registros de perfiles de suelo (0-0,30 m) muestreados entre 2010 y 2015, representativos de toda la República de Panamá y georreferenciados, así como un modelo digital de elevación que generó 34 covariables ambientales, utilizando el Software R y el Sistema de Información Geográfico SAGA. Con SAGA se generaron covariables ambientales a partir del modelo digital de elevación SRTM, para tener características del entorno. Con R se creó un subconjunto estimando la densidad aparente por muestra, el stock de Carbono en kg por m<sup>2</sup> y otras covariables, generando un nuevo subconjunto de datos. Se utilizaron los mejores cuatro componentes derivados del Modelo Digital de Elevación (MDE) y se definió una fórmula donde el carbono se describe como función de cuatro componentes principales. Se ajustó un modelo lineal generalizado mediante la interpolación regresión Kriging, resultando el mapa de carbono que predice un stock de 308,26 Teragramos de carbono orgánico del suelo en Panamá.

**Palabras claves:** Componentes principales, covariables, Kriging, Lenguaje R predictores.

---

<sup>1</sup>Recepción: 03 de marzo de 2023. Aceptación: 25 de septiembre de 2023. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) enmarcado en el *Proyecto de Mapas Nacionales de Carbono de la Alianza Mundial por el Suelo*.

<sup>2</sup>IDIAP. Centro de Innovación Agropecuaria Divisa (CIA Divisa). Doctor en Edafología.

e-mail: [jevilla38@gmail.com](mailto:jevilla38@gmail.com); ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1317-1960>

<sup>3</sup>IDIAP. CIA Divisa. Licenciado en Programación y Sistemas computacionales.

e-mail: [iarz1103@gmail.com](mailto:iarz1103@gmail.com)



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

## DIGITAL MAP OF ORGANIC CARBON CONTENT IN SOILS FROM PANAMA

### ABSTRACT

The aim was to develop a digital map of soil organic carbon content of Panama. A total of 837 records of soil profiles (0-0.30 m) obtained between 2010-2015 were used, being representatives of the entire Republic of Panama and georeferenced; as well as a digital elevation model of Panama from which 34 environmental covariates were generated, using the Software R and the SAGA Geographic Information System. With SAGA, environmental covariates were generated from the SRTM digital elevation model, to have environmental characteristics. With the R program, a subset was created estimating the apparent density per sample, the Carbon stock in kg per m<sup>2</sup> and others covariates, thus generating a new subset of data. The best four components derived from the Digital Elevation Model (DEM) were used and a formula was defined where carbon is described as a function of these four main components. Finally, a model was fitted using Kriging regression interpolation, assuming distribution based on a generalized linear model, giving as a result the carbon map and predicts a stock of 308.26 Teragrams of soil organic carbon in Panama.

**Keywords:** Covariates, Kriging, main components, predictors, R language.

### INTRODUCCIÓN

El carbono orgánico del suelo (COS) es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de materiales orgánicos, producido por los organismos vivos y puede persistir en el suelo durante décadas, siglos o incluso milenios.

El proceso de mineralización, al ser muy dinámico, puede ocasionar la pérdida de carbono en forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o metano (CH<sub>4</sub>), siendo emitido nuevamente a la atmósfera, por lo que es clave en el ciclo del carbono y constituye el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS) (Acevedo et al., 2021).

La materia orgánica entre sus principales funciones contribuye con el reciclaje de nutrientes, la estabilización de la estructura del suelo, la aireación, productividad, infiltración, humedad y almacenamiento de agua, entre otros aspectos esenciales que



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

garantizan la salud, fertilidad y la producción de alimentos (Ochoa et al., 2007; Cotler et al., 2007; Villarreal-Núñez et al., 2013).

La pérdida de COS es un indicador del grado de degradación del suelo, esto significa que, a mayor contenido de COS, la calidad y salud del suelo serán mayores frente a un suelo que presente un bajo contenido de COS (Loayza et al., 2020).

Este carbono puede ser liberado a la atmósfera si el suelo es trabajado inadecuadamente debido a prácticas agrícolas insostenibles. Algunas de estas prácticas pueden ser el riego y la labranza excesiva, el sobrepastoreo, la compactación, la pérdida de cobertura vegetal, el abuso en la aplicación de pesticidas y fertilizantes, así como a la producción de cultivos sin considerar la aptitud o capacidad del uso del suelo (Cotler et al., 2007).

Por el contrario, mediante prácticas sostenibles de gestión del suelo, que incluyen, la fertilización, riego eficiente y controlado, cobertura orgánica, siembra de cultivos considerando su aptitud natural y la reducción de la labranza, entre otros, el COS puede ser preservado para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y reducir los efectos del cambio climático (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2018).

El suelo es el mayor sumidero de carbono puesto que a 1 m de profundidad secuestra 1417 petagramos de carbono (Pg C), y a los 2 m 2500 Pg C, es decir que almacena aproximadamente dos veces más que la atmósfera (750 Pg C) y la vegetación (560 Pg C) (FAO, 2002; Bert et al., 2005). La capacidad de sumidero de carbono orgánico (COS) de los suelos agrícolas en Panamá y, en general, en el mundo puede verse afectada por las prácticas agropecuarias insostenibles que causan la pérdida del contenido de COS y, por ende, la degradación y erosión de los suelos. La pérdida de COS no solo afecta a la salud y productividad del suelo, sino que, también agrava los efectos del cambio climático. Sin embargo, no existe un conocimiento detallado acerca de la variabilidad espacial o de las emisiones asociadas a cambios de uso y cobertura del suelo (Scharlemann et al., 2014).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La variabilidad espacial y temporal del contenido de COS depende de la interacción de distintos factores formadores de suelo como la topografía, el clima, la vegetación y el uso y manejo de la tierra, así como de otras propiedades fisicoquímicas del suelo (Batjes, 2016).

La cartografía digital ofrece una aproximación flexible para generar predicciones espaciales de COS empleando los datos provenientes de descripciones de perfiles de suelo. Estas bases de datos generalmente son una combinación de diversos muestreos de suelo, de distintas investigaciones en diferentes periodos de tiempo (Minasny et al., 2013; Villarreal et al., 2013).

Actualmente con el apoyo de la FAO se ha creado la Alianza Mundial por el Suelo (AMS) y entre sus actividades está la de crear un mapa mundial de contenido de carbono en el suelo. Panamá no contaba con información al respecto y con el apoyo de datos tomados del Laboratorio de Fertilidad de Suelos del IDIAP y las técnicas digitales de mapeo se realizó este primer cálculo de contenido de carbono de 0 - 0,30 m de profundidad para que sirva como una primera estimación nacional.

El objetivo del trabajo fue elaborar un mapa en formato digital del contenido de carbono orgánico en suelos de Panamá.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración del mapa de carbono se utilizaron 837 registros de datos obtenidos de perfiles de suelo y barrenas (de 0 a 0,30 m de profundidad) efectuados en el periodo de 2010 a 2015 y registrados en la base de datos del Laboratorio de Suelos del Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), georreferenciados en grados decimales y un modelo digital de elevación de Panamá (SRTM) a partir del cual se generaron 34 covariables ambientales.

Se utilizó el software: Lenguaje R versión 3.4.0 y el Sistema de Información Geográfico SAGA. Con SAGA se generaron covariables ambientales a partir del modelo digital de elevación SRTM, para tener características del entorno, posiblemente



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

responsables de las actuales propiedades del suelo, buscando estimar el mapa de carbono con menos incertidumbre. Con el programa R se analizó los datos, eliminando registros incompletos y creando un subconjunto que tuviera solo las columnas o campos necesarios.

Para este subconjunto, se estimó la densidad aparente por muestra, se calculó el almacén o stock de Carbono en  $\text{kg m}^2$  y se concatenaron todas las covariables, creando así un nuevo subconjunto de datos. Luego fue convertido a puntos espaciales, se le asignó el Sistema de Coordenadas de Referencia de las covariables (CRS) y se recortó a los límites de nuestro país, con lo que se obtuvo la matriz para los cálculos.

Una correlación entre las covariables (posibles predictores) y el Carbono, permitió observar que existen muchos predictores parecidos entre sí (redundantes), por lo que se utilizó el método de componentes principales. Se utilizaron los mejores cuatro componentes derivados del Modelo Digital de Elevación (MDE) y fue definida una fórmula donde el carbono se puede describir como una función de esos cuatro componentes principales. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$\text{COS}_{\text{reserva}} = p * \text{DA} * (\text{C}_{\text{total}} - \text{C}_{\text{mineral}}) * \text{FC}_{\text{pd}}$$

Donde: COS = reserva de COS ( $\text{kgm}^2$ )

Ctotal y Cmineral = Contenido total y mineral (o inorgánico) de C ( $\text{gg}^{-1}$ ) a considerar para suelos calcáreos y así la combustión seca ocurre normalmente a altas temperaturas (de lo contrario Ctotal = Cmineral)

P = profundidad del horizonte

DA = Densidad aparente ( $\text{kgm}^{-3}$ )

FC = Factor de corrección de pedregosidad (1 - % piedras/100)

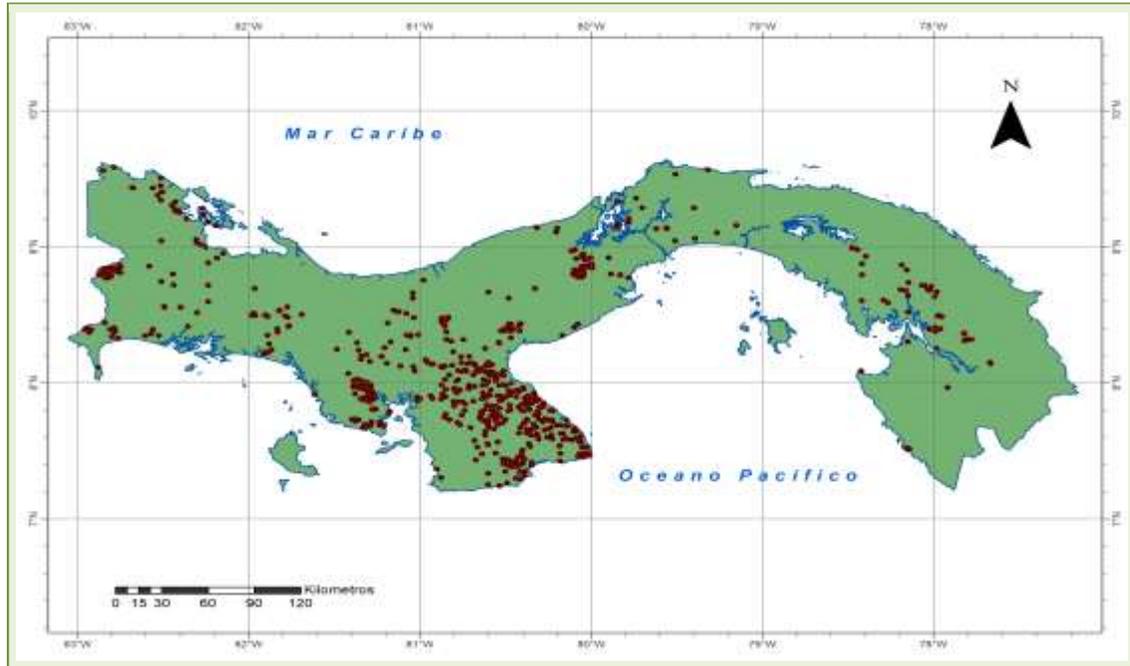
Finalmente, se ajustó un modelo mediante la interpolación regresión Kriging, asumiendo una distribución Gaussiana basada en un modelo lineal generalizado. Convertido a imagen tipo Raster se obtuvo el mapa digital predictivo de COS en suelos de Panamá.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se elaboró un mapa para mostrar la localización y distribución aproximada de los 837 datos de COS obtenidos en trabajos realizados previamente por el IDIAP y almacenados en la base de datos del Laboratorio de Fertilidad de Suelos del IDIAP (Figura 1).



**Figura 1. Puntos donde fueron muestreados los suelos para elaborar el mapa. Panamá, 2010-2015.**

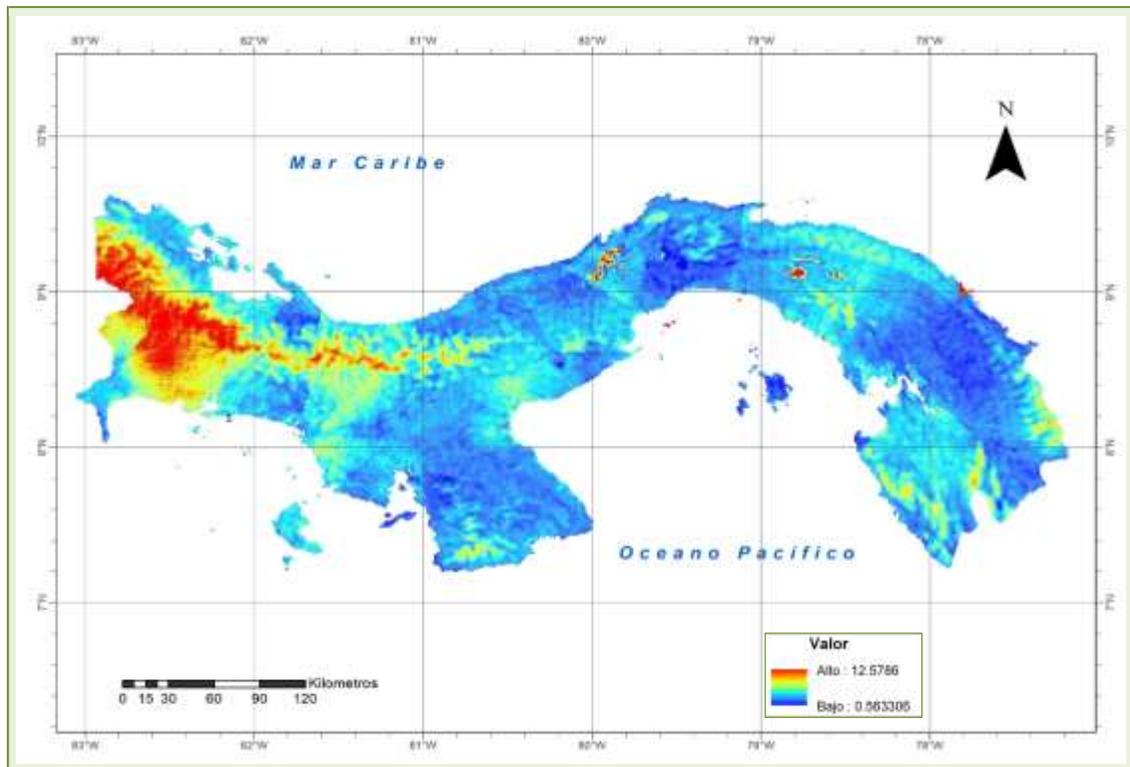
Para predecir el COS con la mayor exactitud se correlacionaron 34 covariables ambientales. Obteniéndose correlaciones positivas entre el COS con covariables relacionadas con precipitación ( $r^2 > 0,78$ ), topografía (pendiente del terreno y elevación) ( $r^2 > 0,69$ ;  $> 0,72$ , respectivamente), radiación potencial ( $r^2 > 0,53$ ), sensoramiento remoto basado en índice de vegetación ( $r^2 > 0,51$ ) y correlaciones negativas entre COS y evapotranspiración ( $r^2 > -0,62$ ), variabilidad espacial ( $r^2 > -0,55$ ) y variables relacionadas con la temperatura ( $r^2 > -0,59$ ) siguiendo la metodología empleada por Guevara et al. (2018).

Se encontró que los suelos de Panamá tienen una reserva total de 308 Tg de COS, lo que considerando la extensión territorial de Panamá (75,512 km<sup>2</sup>), representa aproximadamente 4,08 t km<sup>-2</sup> (Figura 2).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

El mapa muestra que la región conocida como tierras altas hacia la frontera con Costa Rica, con suelos de origen volcánico, posee la mayor reserva de COS en el país y sigue a través de la cordillera central (Figura 2). Igualmente, se puede apreciar elevadas reservas en la cuenca del Canal de Panamá, en Darién, frontera con Colombia, que posee una gran reserva forestal, sin embargo, las zonas agrícolas ubicadas en la región central del país presentan baja reserva de COS.



**Figura 2. Mapa de contenido de carbono orgánico de suelos de Panamá.**

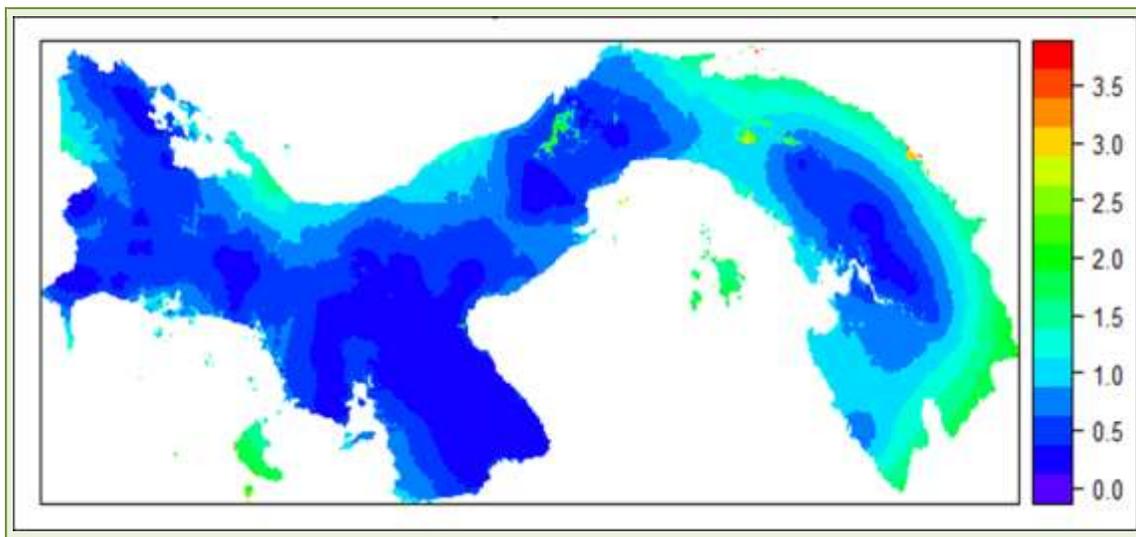
La zona central del país se caracteriza por tener suelos ácidos en su mayoría pertenecientes al orden ultisol, pobres en materia orgánica, pH ácido a muy ácido. Además, es una zona donde se práctica la ganadería y agricultura extensiva. Con pocas excepciones, son suelos mal manejados sometidos a la acción de monocultivos, quemadas constantes, mal uso de los agroquímicos, aplicación de pocas prácticas de conservación de suelos (Villarreal et al., 2013).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La mayor reserva de COS se localiza en los suelos de origen volcánico, en la región denominada de Tierras Altas en la provincia fronteriza con Costa Rica (Figura 2). Estos suelos poseen una capa orgánica profunda comparado con el resto del país (Villarreal et al., 2013), sin embargo, reciben un manejo con prácticas poco apropiadas, como dosis excesivas de agroquímicos, malas prácticas de preparación y casi nulo empleo de prácticas de conservación de suelos (Herrera et al., 2021). Sin embargo, se puede notar, en la actualidad, el surgimiento de movimientos y agrupaciones de productores que practican una agricultura más ecológica ayudando a conservar sus suelos, minimizando las pérdidas por erosión, consecuentemente mejorando la calidad de sus cosechas (Santamaría y González, 2017).

En algunas áreas del país muy alejadas o montañosas, representados como zonas con mayor incertidumbre coinciden con las áreas donde no se pudo tomar muestras o que cuentan con una baja representatividad. Lugares como la península de Azuero, Chiriquí y la región central de Panamá, aparecen con una baja incertidumbre, por la alta representatividad del muestreo (Figura 3).



**Figura 3. Mapa de incertidumbre o error.**

Respecto a la incertidumbre el mapa resultante indica que el error fue bajo ( $< 0,5$ ) en aquellas zonas donde se contaba con un mayor número de muestras representativas de suelo, como por ejemplo el caso de la región de Azuero, Veraguas, Chiriquí, Panamá



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Oeste. Por el contrario, fue más elevado (> 2,0 a 2,5) en áreas de difícil acceso como la frontera de Panamá con la República de Colombia, la Comarca Guna Yala, isla de Coiba, norte de la Comarca Ngäbe Buglé, donde el volumen de muestras representativas era muy bajo o casi nulo (Figura 3).

En general el 85% de las zonas productivas (zona central y occidental del país, cuenca del Canal de Panamá) estuvo bien representada. Según Vargas et al. (2017) la cuantificación de la incertidumbre en las estimaciones de reserva de COS debe considerarse como prioritaria para evitar sesgos, subestimaciones y sobreestimaciones en los cálculos.

Este trabajo arroja información importante para facilitar la formulación de políticas públicas relacionadas con estrategias de mitigación del Cambio Climático y manejo sostenible del recurso suelo.

La información suministrada representa un primer paso para recomendar un uso racional del suelo en áreas muy afectadas por sequías, zonas vulnerables al cambio climático o suelos muy degradados por el uso constante y mal manejo. A la vez, para propiciar leyes e incentivos que estimulen a los productores al empleo de prácticas agroecológicas en sus suelos de tal manera que se pueda ir recuperando su capa orgánica y mejorando las propiedades biológicas, físicas y químicas de estos.

## CONCLUSIONES

- El mapa predictivo de contenido de carbono orgánico del suelo de la República de Panamá es un logro muy importante, realizado con el apoyo de la Alianza Mundial por el Suelo de la FAO.
- Este mapa ofrece información valiosa para los tomadores de decisiones, al igual que para investigadores, estudiantes y técnicos agrícolas y ambientales que deseen planificar la recuperación de zonas degradadas e incentivar prácticas agroecológicas de conservación de suelos en el país.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

- Representa un primer esfuerzo para estimar las existencias de COS de 0 a 0,30 m en Panamá.

## REFERENCIAS

- Acevedo, I., Sánchez, A., y Mendoza, B. (2021). Evaluación del nivel de degradación del suelo en dos sistemas productivos en la depression de Quibor. I. Análisis multivariado. *Bioagro*, 59, 59 - 66. <http://www.doi.org/10.51372/bioagro331.7>
- Batjes, N. H. (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>
- Bert, M., Ogunlade, D., Coninck, H., y Loos, M. (2005). La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Resumen para responsables de políticas y resumen técnico. Grupo Intergubernamental de Expertos (IPCC), Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. Cambridge University Press, 66pp. <https://www.ipcc.ch › 2018/03 › ar4-wg3-spm-sp>. Consultado el 01 de marzo de 2022
- Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S. y Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos como un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83, 5 - 71.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la Tierra*. World Soil Resources Reports 96. Roma, Italia. 61 pp. <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap). Technical Report. Roma, Italia. 162 pp. <http://www.fao.org/3/I8891 EN/i8891en.pdf>
- Guevara, M., Olmedo, G. F., Stell, E., Yigini, Y., Agiolar, Y., Hernández, C. A., Arévalo, G. E., Arroyo-Cruz, C. E., Bolívar, A., Bunning, S., Bustamante, N., Cruz-Gaistardo, C. O., Dávila, F., Acqua, D., Encina, A., Figueredo H., Fontes, F., Hernández, J. A.,



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Ibelle, A. R., Loayza, V., Manueles, A. M., Mendoza F., Olivera, C., Osorio, R., Pereira, G., Prieto, P., Ramos, I. A., Rey, J. C., Rivera, R., Rodríguez-Rodríguez, J., Roopnarine, R., Rosales, A., Rosales, K. A., Schulz, G. A., Spence, A., Vasquez, G. M., Vargas, R. R. y Vargas, R. (2018). *No Silver Bullets on Digital Soil Mapping: Country Specific Soil Organic Carbon Estimates across Latin America*. SOIL, 4, 173-193. <https://doi.org/10.5194/soil-4-173-2018>

Herrera, R., Collantes, R., Caballero, M. y Pittí, J. (2021). Caracterización de fincas hortícolas en Cerro Punta, Chiriquí, Panamá. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 23 (4), 200-209. DOI: [10.18271/ria.2021.329](https://doi.org/10.18271/ria.2021.329)

Minasny, B., McBratney, A. B., Malone, B. P., y Wheeler, I. (2013). Digital mapping of soil carbon. *Advances in Agronomy* 118, 1 - 47. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.890437>

Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C., y Jiménez, W. (2020). Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas*, 29(1), 1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>

Scharlemann, J. Tanner, E., Hiederer, R., y Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1), 81-91. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>

Ochoa, V., Hinojosa, B., Gómez-Muñoz, B. y García-Ruiz, R. (2007). Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Ini. Inv.* 2, 1-10.

Santamaría, J. y González, G. (2017). La agroecología en Panamá.: su contribución a la sostenibilidad de modos de vida y a la persistencia de la agricultura familiar. *Agroecología*, 10 (2), 29-38. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/300801>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Villarreal, J. E., Name, B. y Espino, R. A. (2013). Zonificación de suelos de Panamá en base a niveles de nutrientes. *Ciencia Agropecuaria*, N°21, 71-89.

<http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/184>

Villarreal-Núñez, J., Pla-Sentis, I., Agudo-Martínez, L., Villalaz-Pérez, J., Rosales, F. y Pocasangre, L. (2013). Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 301-315.

[https://www.academia.edu/52122541/%C3%8Dndice\\_de\\_calidad\\_del\\_suelo\\_en\\_%C3%A1reas\\_cultivadas\\_con\\_banano\\_en\\_Panam%C3%A1](https://www.academia.edu/52122541/%C3%8Dndice_de_calidad_del_suelo_en_%C3%A1reas_cultivadas_con_banano_en_Panam%C3%A1)



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)