

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS EN ÁREAS PRODUCTIVAS DE LA REGIÓN DE AZUERO-PANAMÁ¹

José Ezequiel Villarreal-Núñez²; Iván Alexis Ramos-Zachrisson³

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue caracterizar las propiedades físico-químicas de los suelos de áreas productivas de la región de Azuero-Panamá, con la finalidad de elaborar mapas digitales que sirvan de apoyo para la toma de decisiones por expertos. El estudio se realizó desde el año 2015 hasta el 2018 en las provincias de Herrera y Los Santos. Se procedió con el muestreo georreferenciado de suelos entre 0 y 2 m de profundidad del perfil, una calicata cada 25 km², en un área total de 6150 km². Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), donde se procedió con el análisis de textura, pH, contenido de macro y micronutrientes, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje (%) de saturación de aluminio. Los mapas se elaboraron por medio del programa Quantum GIS 2.8.2., considerando los niveles críticos definidos por el IDIAP en 1987. Se elaboró una base de datos con los resultados de los análisis físicoquímicos de los suelos de los 262 perfiles muestreados y sus coordenadas georreferenciadas en el terreno. Se obtuvieron mapas para 12 propiedades de suelo. Se determinó la variabilidad en el contenido de arcilla desde 4% en Potuga-Parita, provincia de Herrera, hasta >50% en Nalú-Guararé, provincia de Los Santos. En Herrera, el 51% de los suelos tienen pH < 5,0 y 36% saturación de aluminio >25%. En Los Santos el 36% tenían pH entre 5,6 y 5,9 y 11% alta saturación de aluminio. Con excepción de la composición textural, las propiedades de los suelos en ambas provincias están siendo muy influenciadas por el manejo dado al suelo.

Palabras clave: Base de datos, calicatas, mapeo digital de suelos, propiedades del suelo, sistemas de información geográfica.

¹Recepción: 14 de marzo de 2023. Aceptación: 13 de marzo de 2024. Proyecto Zonificación Agroecológica de Suelos de Panamá.

²Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), Centro de Innovación Agropecuaria de Divisa (CIAD). Doctor Edafología. e-mail: jevilla38@gmail.com; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1317-1960>

³IDIAP, CIAD. Licdo. Programación de Sistemas. e-mail: jarz1103@gmail.com; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5939-070X>



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

CHARACTERIZATION OF SOILS IN PRODUCTIVE AREAS OF THE REGION OF AZUERO-PANAMA

ABSTRACT

The aim of the work was to characterize the physical-chemical properties of the soils of productive areas of the Azuero-Panama region, with the purpose of elaborating digital maps that serve as support for decision-making by experts. The study was carried out since the year 2015 until 2018 in the provinces of Herrera and Los Santos. The georeferenced sampling of soils between 0 and 2 m depth of the profile was carried out, one trial pit every 25 km², in a total area of 6,150 km². The samples were analyzed in the Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) Soils Laboratory, where texture, pH, macro and micronutrient content, organic matter, cation exchange capacity (CEC), aluminium saturation percentage (%) were analyzed. The maps were prepared using the Quantum GIS 2.8.2 program, considering the critical levels defined by the IDIAP in 1987. A database was prepared with the results of the physicochemical analyzes of the soils of the 262 sampled profiles and their georeferenced coordinates in the field. Maps for 12 soil properties were obtained. Great variability in clay content was determined from 4% in Potuga-Parita, province of Herrera, to >50% in Nalú-Guararé, province of Los Santos. In Herrera, 51% of the soils have pH < 5.0 and 36% have aluminum saturation >25%. In Los Santos, 36% had a pH between 5.6 and 5.9 and 11% high aluminum saturation. With the exception of the textural composition, the properties of the soils in both provinces are being greatly influenced by the management given to the soil.

Keywords: Database, digital soil mapping, geographic information systems, soil properties, trial pit.

INTRODUCCIÓN

El suelo es la parte más crucial de nuestro ecosistema y su funcionamiento en términos de producción de cultivos, filtración de agua, alojamiento y mantenimiento de la biodiversidad del suelo, secuestro y almacenamiento de carbono atmosférico, así como la producción de biomasa (Marion et al., 2022). Las funciones del suelo, a su vez, dependen de las propiedades del suelo, como la capacidad de retención de agua, los nutrientes disponibles, el contenido de materia orgánica del suelo, reserva de carbono, entre otros, que pueden ser representados por mapas de suelos (Adhikari y Hartemink, 2016).



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 necesidad de conocer la distribución geográfica de los suelos y de aprovechar este recurso en las actividades humanas, agrícolas y ganaderas ha impulsado una gran cantidad de investigaciones y metodologías para desarrollar estudios, análisis y sistemas predictivos de suelos. En las últimas décadas y con el auge de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), se ha impulsado el desarrollo y la utilización de nuevas tecnologías que permiten capturar datos espaciales, es decir, datos de una variable regionalizada o asociados a una localización en el espacio creando una serie de mapas digitales, unidos a una base de datos georreferenciada, que contiene toda aquella información referente a las propiedades de los suelos bajo estudio (Córdoba et al., 2016).

La característica más importante de la realización de un inventario del suelo como recurso, es determinar el patrón de cobertura de cada suelo (Mendez y Bertsch, 2012) para así caracterizarlo y presentarlo de una manera entendible a todos sus usuarios, para poder realizar predicciones numerosas, precisas y útiles para propósitos específicos, que permitan el uso adecuado del suelo según la caracterización de estos. Además, el manejo sostenible del suelo debe ser el principio rector tanto para la investigación como para el manejo del suelo caracterizado (Amundson et al., 2015).

El mapeo de suelos convencional ya no es capaz de producir suficientes datos, por ejemplo, para proporcionar entrada de datos físicos y químicos dentro de modelos de procesos hidrológicos y ecológicos, para producir mapas que ayuden en la toma de decisiones de autoridades, terratenientes o agricultores (Scull et al., 2003) o para apoyar el mapeo o modelado de procesos del suelo que están determinados por flujos de agua, nutrientes, carbono o energía dentro de los suelos (Arrouays et al., 2017; Hengl et al., 2014).

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), es un conjunto de elementos físicos y lógicos, de personas y metodologías, que interactúan de manera organizada, para adquirir, almacenar y procesar datos georreferenciados, para luego producir información útil en la toma de decisiones (Radilla, 2008; Mazundar, 2008; Villarreal y Ramos, 2024).



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

Hoy, la información precisa del suelo con alta resolución espacial tiene una gran demanda por parte de varias partes interesadas, incluido los científicos del suelo, planificadores del uso de la tierra, administradores ambientales y administradores de tierras agrícolas. Los levantamientos de suelo tradicional delimitan manualmente unidades discretas de suelo de tipo vectorial que son difíciles de actualizar, ya que existe la necesidad de repetir todo el procedimiento de producción que, en parte, es subjetivo y basado en el conocimiento experto (Adhikari y Hartemink, 2016).

Este método tradicional también requiere numerosas muestras de suelo y, por lo tanto, es costoso y requiere mucho tiempo. Aunque sea clásico los levantamientos de suelos son un prerrequisito fundamental para el mapeo digital de suelos (DSM por sus siglas en inglés), este último permite superar algunas limitaciones de los métodos clásicos utilizando métodos disponibles, información ambiental auxiliar distribuida espacialmente y SIG (Adeniyi et al., 2023).

Los mapas de fertilidad de suelo son una herramienta básica para una futura zonificación de cultivos. Permiten seleccionar zonas que presentan suelos con características adecuadas para un determinado cultivo complementariamente con información como el clima, topografía, uso actual del suelo, rendimiento, entre otros (Villarreal, 2018).

El Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP, 2006, Villarreal et al., 2013) publicó el documento titulado “Zonificación de Suelos por Niveles de Nutrientes”. En donde fueron presentados y entregados al sector agropecuario un total de 15 mapas zonificando el país basado en niveles críticos de diversos elementos en el suelo. Para ello, se utilizó los resultados de los análisis de suelos contenidos en la base de datos del Laboratorio de Suelos que comprendían más de 100,000 muestras de suelos, de las cuales, 19,100 contaban con sus respectivas coordenadas.

Estos mapas fueron confeccionados utilizando una escala de 1:2,000,000; por lo que su empleo para la toma de decisiones está un poco limitado. Además, los muestreos se realizaron tomando en cuenta únicamente la capa arable del suelo y no brindan



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

ninguna información sobre el comportamiento de las variables a lo largo del perfil (Villarreal et al., 2013).

La Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM, 2009), publicó el “Atlas de las Tierras Secas y Degradadas de Panamá” en donde establece que el 27% del territorio nacional se encuentra en esa situación y que en la misma viven cerca de medio millón de personas. Este territorio comprende el Arco Seco Panameño, localizado en la vertiente del Pacífico y que comprende desde San Carlos en la provincia de Panamá Oeste hasta Pedasí, en la provincia de Los Santos, cerca del 30% del territorio de la península de Azuero está comprendida dentro del llamado Arco Seco de Panamá. Esto obliga a conocer mejor las propiedades de estos suelos para lograr su mejor uso y aprovechamiento del agua.

El objetivo del trabajo fue caracterizar las propiedades físico-químicas de los suelos de áreas productivas de la región de Azuero, provincias de Herrera y Los Santos en la República de Panamá, para permitir elaborar mapas digitales que sirvan de apoyo para la toma de decisiones por expertos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en fincas de productores de las provincias de Herrera y Los Santos, República de Panamá, que abarcan un territorio de 6150 km², ubicados entre los 8°06'55 de latitud Norte y 80°57'24 de longitud Oeste.

Se procedió al muestreo georreferenciado de suelos entre 0 y 2 m de profundidad del perfil, siguiendo la metodología utilizada por el IDIAP (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos – Servicio de Conservación de Recursos Naturales [USDA-NRCS], 2010; IUSS-WRB, 2015), tratando de realizarla según uso del suelo y por cuenca hidrográfica. La densidad del muestreo se decidió luego de estudiar las fotografías aéreas de la región y de los polígonos que contenían suelos homogéneos.

El muestreo se realizó aleatoriamente en fincas localizadas, aproximadamente, cada 25 km² (5 km x 5 km). En cada sitio de muestreo, se elaboró una calicata o cajuela de hasta 2 m de profundidad, dependiendo de la profundidad del suelo. Se tomaron



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

muestras en los diferentes horizontes presentes, tratando de uniformizar entre 0 y 20 cm; 20 y 60 cm, 60 y 100 cm y más de 100 cm. En cada uno de estos se tomó una muestra representativa para la elaboración de mapas con una escala de 1:250,000 (Figura 1).

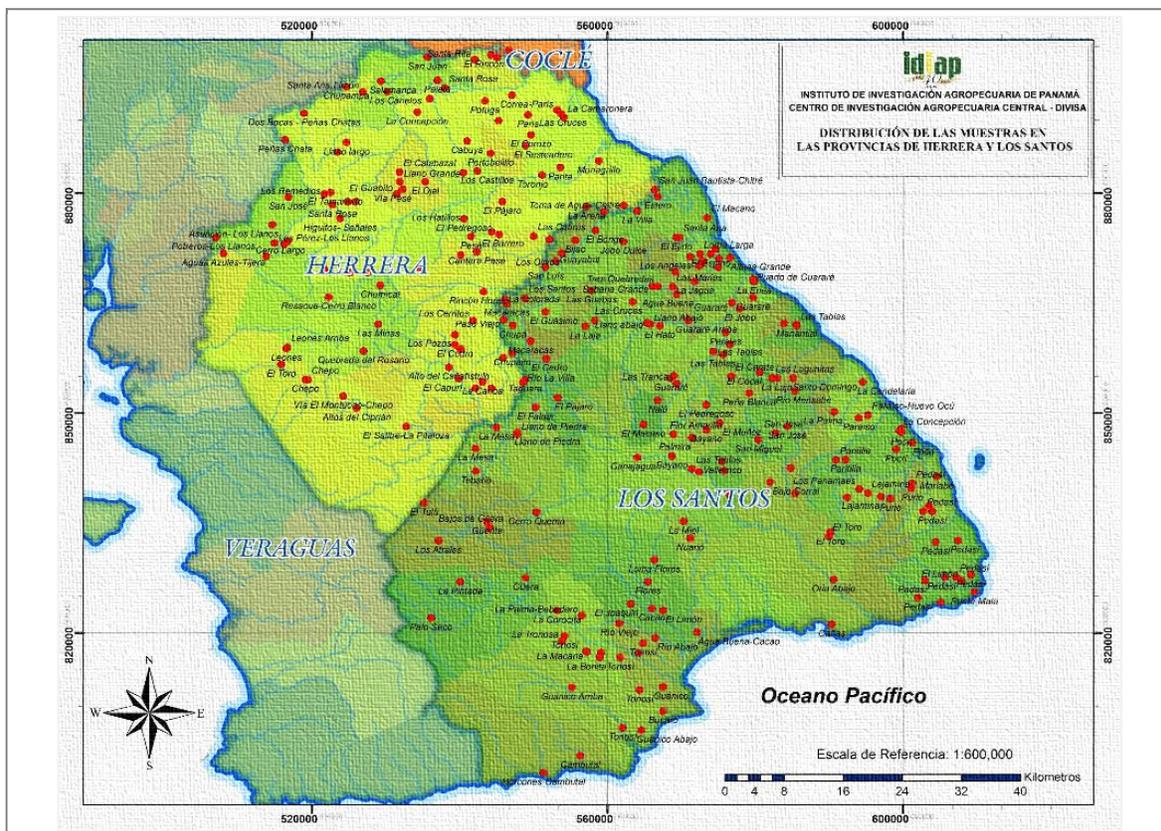


Figura 1. Distribución de las muestras en las provincias de Herrera y Los Santos, 2015-2018.

Las muestras colectadas fueron llevadas al Laboratorio de Fertilidad de Suelos del IDIAP, donde se procedió al análisis físico-químico de sus propiedades. Se midió el pH relación suelo:agua (1:2,5), textura del suelo (Bouyoucos), concentración de macro y micronutrientes (extraídos con Mehlich 1), materia orgánica (Walkley-Black), capacidad de intercambio catiónico (CIC) (acetato de amonio pH 7), Ca, Mg y Al extraíbles (KCl 1N), según metodología descrita por Teixeira et al. (2017).



Este trabajo está licenciado bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

En la elaboración de los mapas se utilizaron los niveles críticos definidos en el Laboratorio de Suelos del IDIAP mediante experimentos realizados en suelos de todo el país (Name y Cordero, 1987). Para la manipulación, procesamiento, análisis y visualización de los datos se utilizó el programa de libre acceso Quantum GIS 2.8.2. Se utilizó el método de interpolación inversa a la distancia (IDW por sus siglas en inglés).

Además, se creó una base de datos con todos los resultados de los análisis de las propiedades fisicoquímicas muestras de suelo de las 262 calicatas y las respectivas coordenadas georreferenciadas en el terreno.

Se elaboraron mapas digitales para 14 propiedades del suelo en cuatro profundidades distintas. Se realizaron correlaciones de Pearson entre las principales propiedades del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se elaboró una base de datos conteniendo los resultados de los análisis fisicoquímicos de los 262 perfiles de suelos caracterizados y sus coordenadas UTM. 162 calicatas elaboradas en la provincia de Los Santos y 100 en Herrera. Ejemplo resumido de esta base de datos se puede observar en el Cuadro 1. Según Pacciorett et al. (2020), diversos métodos de muestreo pueden ser usados para caracterizar sitios en estudios regionales. En este trabajo se extrajeron muestras a partir de las cuales se ajustaron modelos de regresión para explicar la variabilidad de una característica de interés en función de propiedades edáficas de los sitios muestreados. En términos generales, el muestreo de sitios en la ciencia de suelos puede orientarse hacia la recolección de datos con dos fines; el de estimar valores promedios poblacionales de una propiedad de interés, o de utilizar las muestras de valores en sitios no muestreados (modelos espacialmente explícitos).



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

Cuadro 1. Ejemplo de la base de datos de los perfiles de suelos caracterizados en las provincias de Herrera y Los Santos.

Lugar	Coordenadas UTM	Profundidad cm	pH 1:2,5	Arcilla %	P	K	Ca	Mg	Al
Parita	883530,23 N	0-20	5,4	16	1	0,45	4,6	1,8	0,1
		21-60	5,5	18	0,1	0,34	3,3	1,4	0,1
	553620,67 O	61-100	5,5	22	0,1	0,25	2,8	1,4	0,1
		> 100	5,5	22	0,1	0,16	2,2	0,4	0,1

Los mapas elaborados para 14 propiedades del suelo en cuatro profundidades distintas, reflejan que, con excepción de la composición textural, éstas son muy influenciadas por el manejo dado al suelo. Por ejemplo, tenemos: niveles de pH, contenido de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, materia orgánica, porcentaje de saturación de Al, densidad aparente del suelo.

Se observó variabilidad en el contenido de arcilla, desde 4% en Potuga-Parita-provincia de Herrera, hasta 50% en Nalú-Guararé-provincia de Los Santos (Figura 2), sobre todo a medida que se iba profundizando en el perfil (61 – 100 cm). En Herrera, 51% de los suelos presentan pH < 5,0, mientras que en Los Santos sólo el 36% tienen pH entre 5,6 y 5,9 (Figura 3). Es bueno mencionar que Herrera sólo mantiene el 3,5% de cobertura boscosa y Los Santos únicamente el 7% (Ministerio de Ambiente, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [ANAM-FAO-PNUD-PNUMA], 2015), este factor puede haber influido mucho en la pérdida de la capa fértil de los suelos y la degradación de esta propiedad.



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

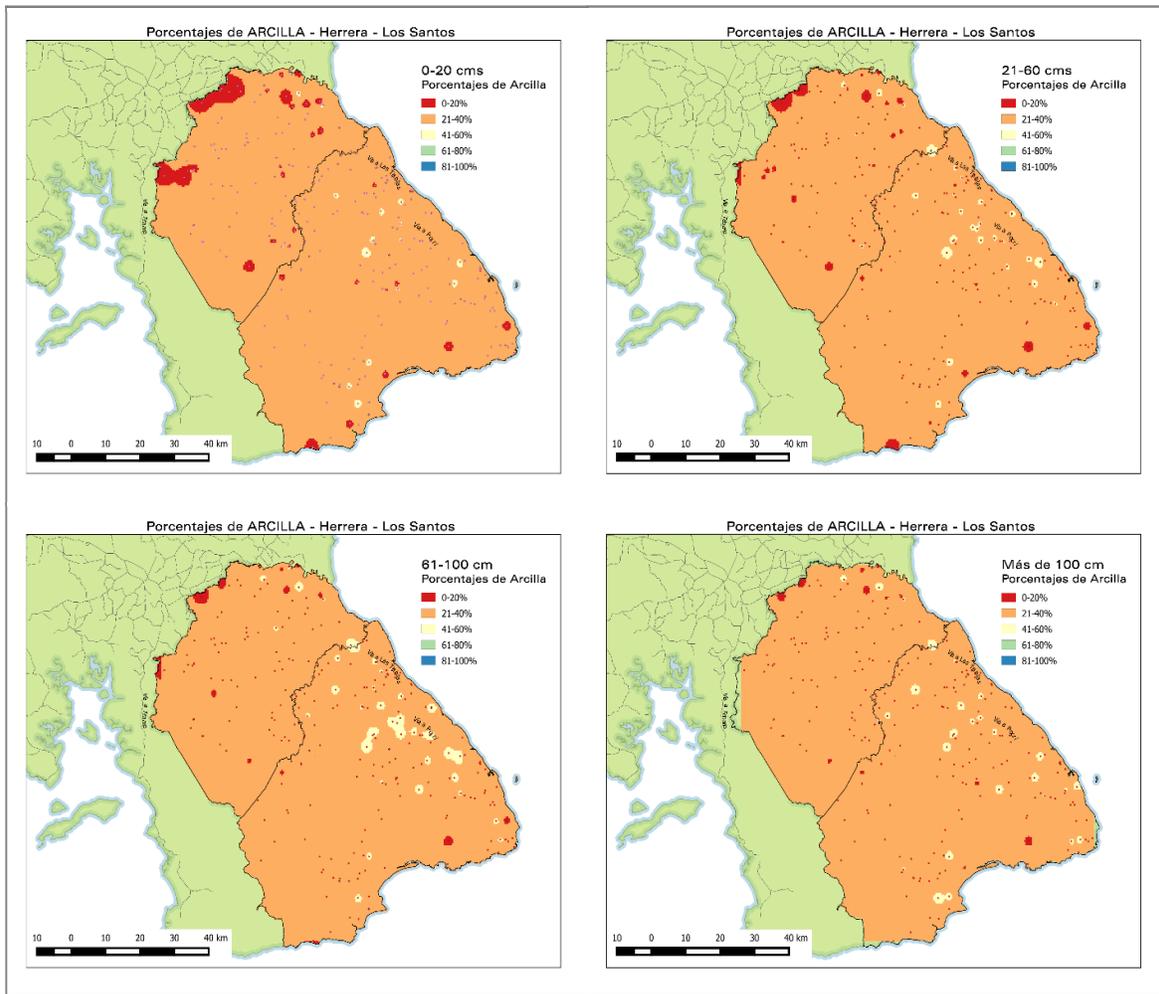


Figura 2. Contenido de arcilla en perfiles de suelo de las provincias de Herrera y Los Santos (0 – 20 cm; 21 – 60 cm; 61 – 100 cm; > 100 cm).

En Herrera se encontró que el 36% de sus suelos presentaban Saturación de Al > 25%, cuando la profundidad era mayor de 21 cm, alcanzando más del 60% en profundidades mayores de 100 cm, lo que convierte estos suelos en poco aptos para cultivos con baja tolerancia a la toxicidad por Al. En Los Santos únicamente 11% tenían alta saturación de Al (Figura 4).



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

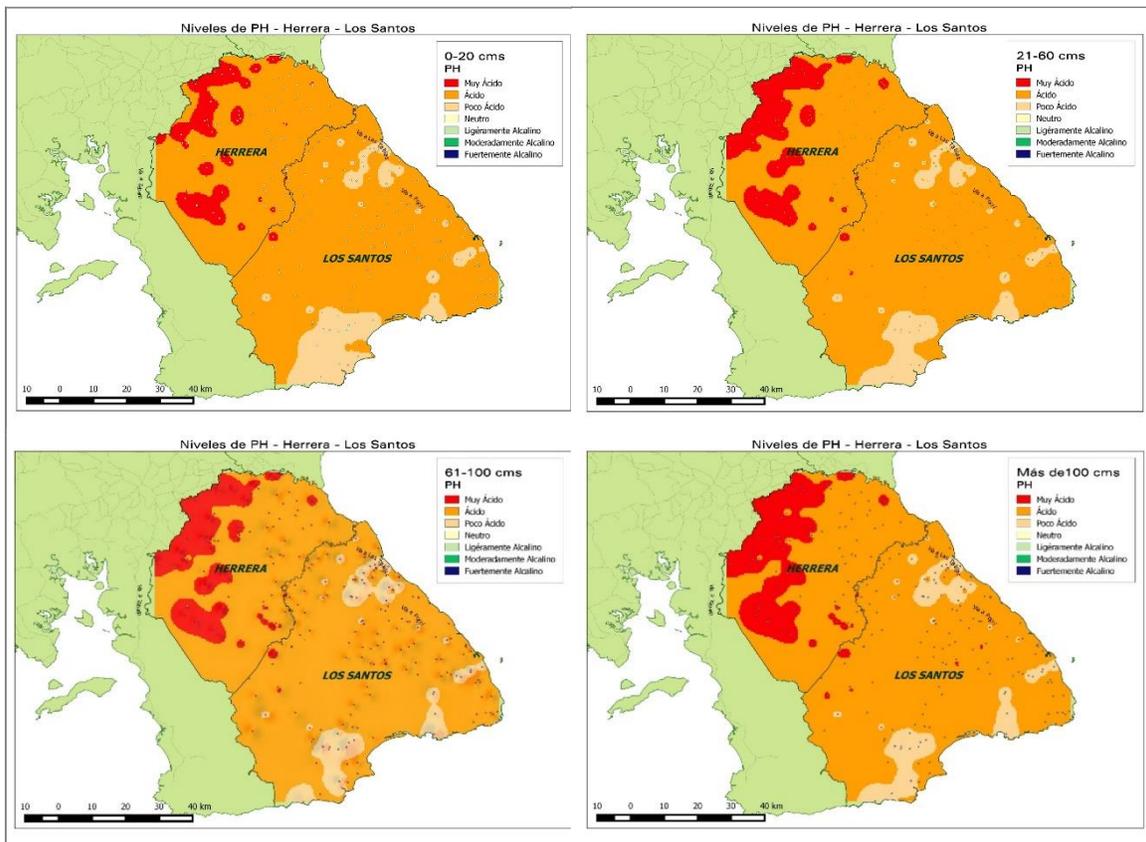


Figura 3. pH de los perfiles de suelos en las provincias de Herrera y Los Santos (0 – 20 cm; 21 – 60 cm; 61 – 100 cm; > 100 cm).

El contenido de materia orgánica es bajo en ambas provincias. Se observa en la Figura 5 que en la región de Tonosí se pueden encontrar zonas con valores medios de contenido de materia orgánica (2,1% a 6,0%), pero en ningún punto se lograron obtener valores altos (> 6,1%). El manejo inadecuado de los suelos, aunado a prácticas como la quema y deforestación que traen como consecuencia la erosión y pérdida de la capa arable ha agravado esta situación en ambas provincias.



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

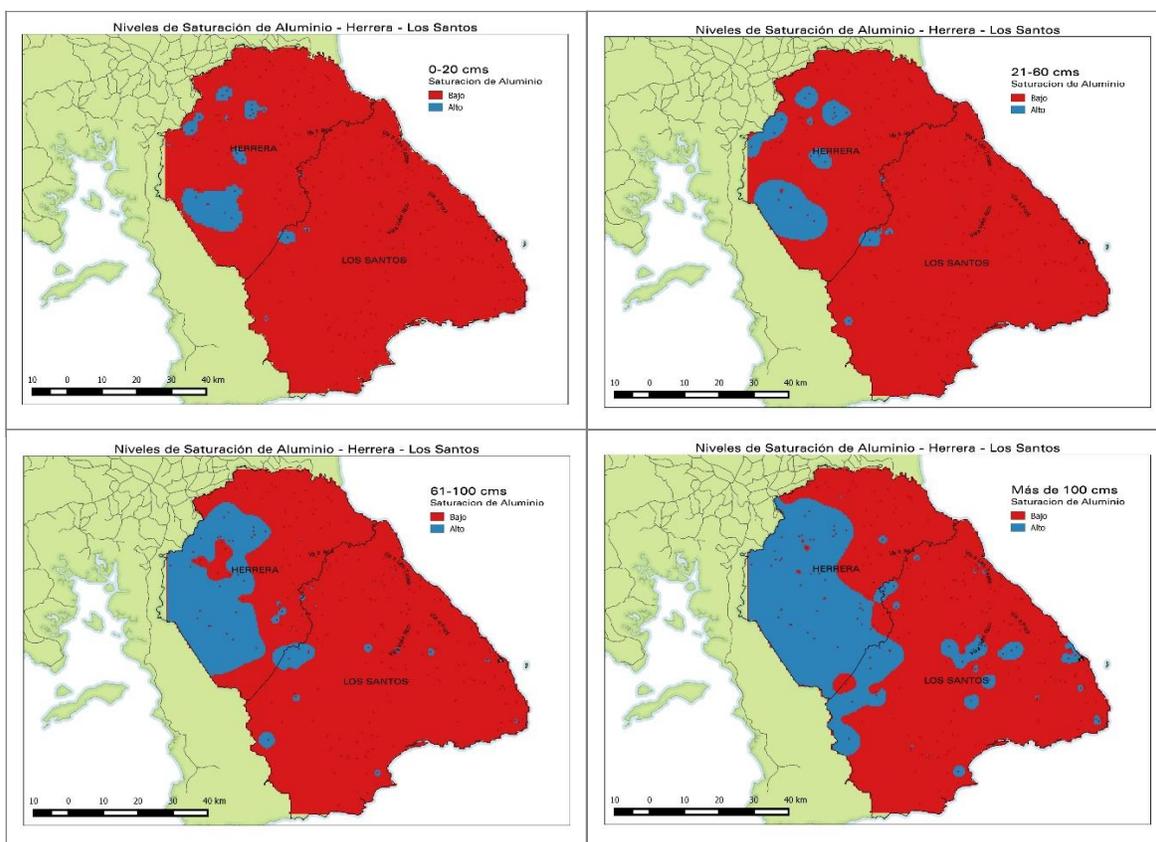


Figura 4. Porcentaje de saturación de aluminio en perfiles de suelos de las provincias de Herrera y Los Santos (0 – 20 cm; 21 – 60 cm; 61 – 100 cm; > 100 cm).

Como es característico en suelos tropicales el contenido de fósforo disponible (Figura 6) es muy bajo o casi nulo en todos los suelos pues, gran parte del fósforo se encuentra fijado o adsorbido en los cristales de las arcillas caolinita y haloisita, las más comunes en la región (Jaramillo, 1991), óxidos de hierro y aluminio, favorecido por el pH ácido de los suelos. Sólo una pequeña región en Tonosí presenta niveles medios de fósforo disponible, lo que concuerda con los mapas de fertilidad elaborados a nivel nacional por Villarreal et al., 2013; y Villarreal et al., 2017.

Igualmente, se observa que el contenido de fósforo disponible disminuye a medida que se va profundizando en el perfil del suelo.



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

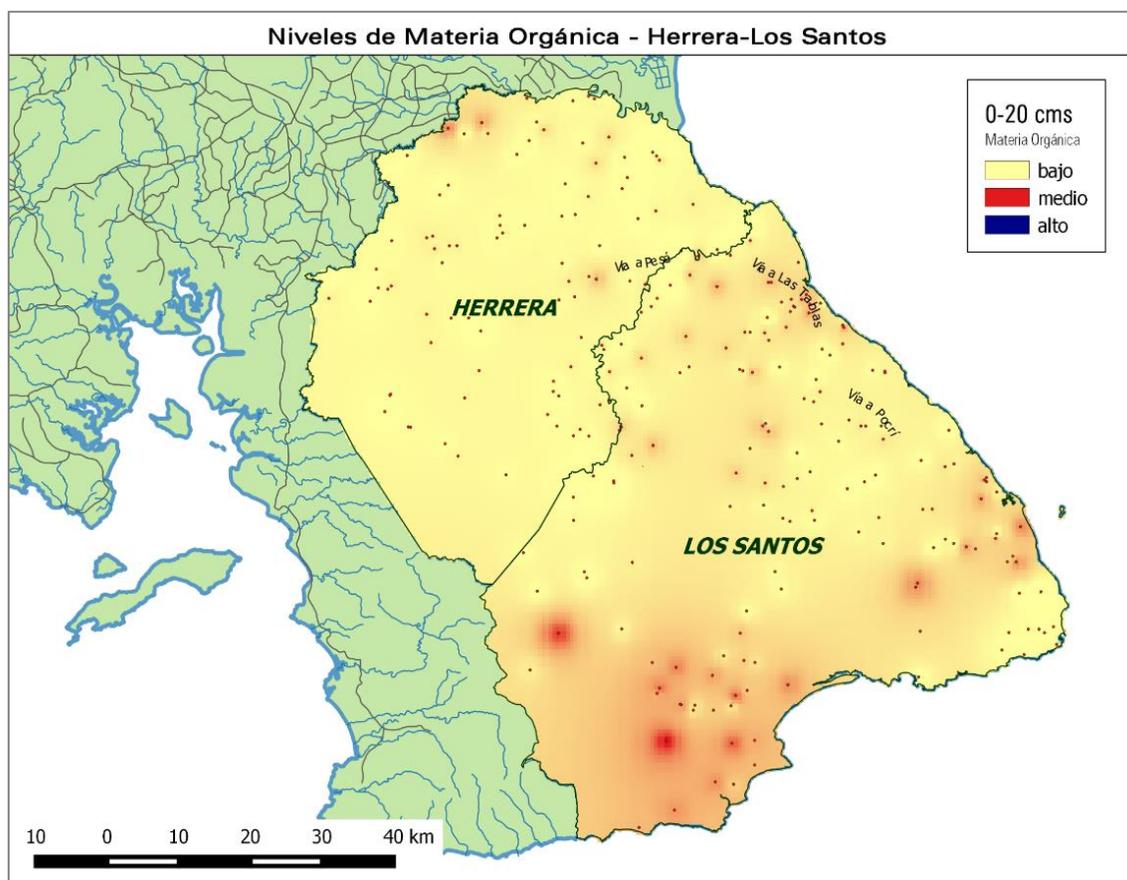


Figura 5. Contenido de materia orgánica en perfiles de suelos de las provincias de Herrera y Los Santos (0 – 20 cm).

El contenido de potasio (Figura 7), calcio (Figura 8), magnesio (Figura 9) y zinc (Figuras 10) se concentró básicamente en los primeros 20 cm del perfil del suelo en todos los sitios estudiados, por esta razón solo se presenta los mapas correspondientes a esta profundidad. Sin embargo, es notorio que en muchos sitios dentro de Arco Seco y en el distrito de Tonosí se pueden encontrar niveles medios y altos de potasio, calcio y magnesio.

En el caso del potasio (Figura 7), ambas provincias presentaron suelos con niveles medios (44 a $151 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) incluso muchos suelos con alto contenido de potasio en la zona de Arco Seco, igualmente en el área de Cacao, Guánico, Cambutal en Tonosí.



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

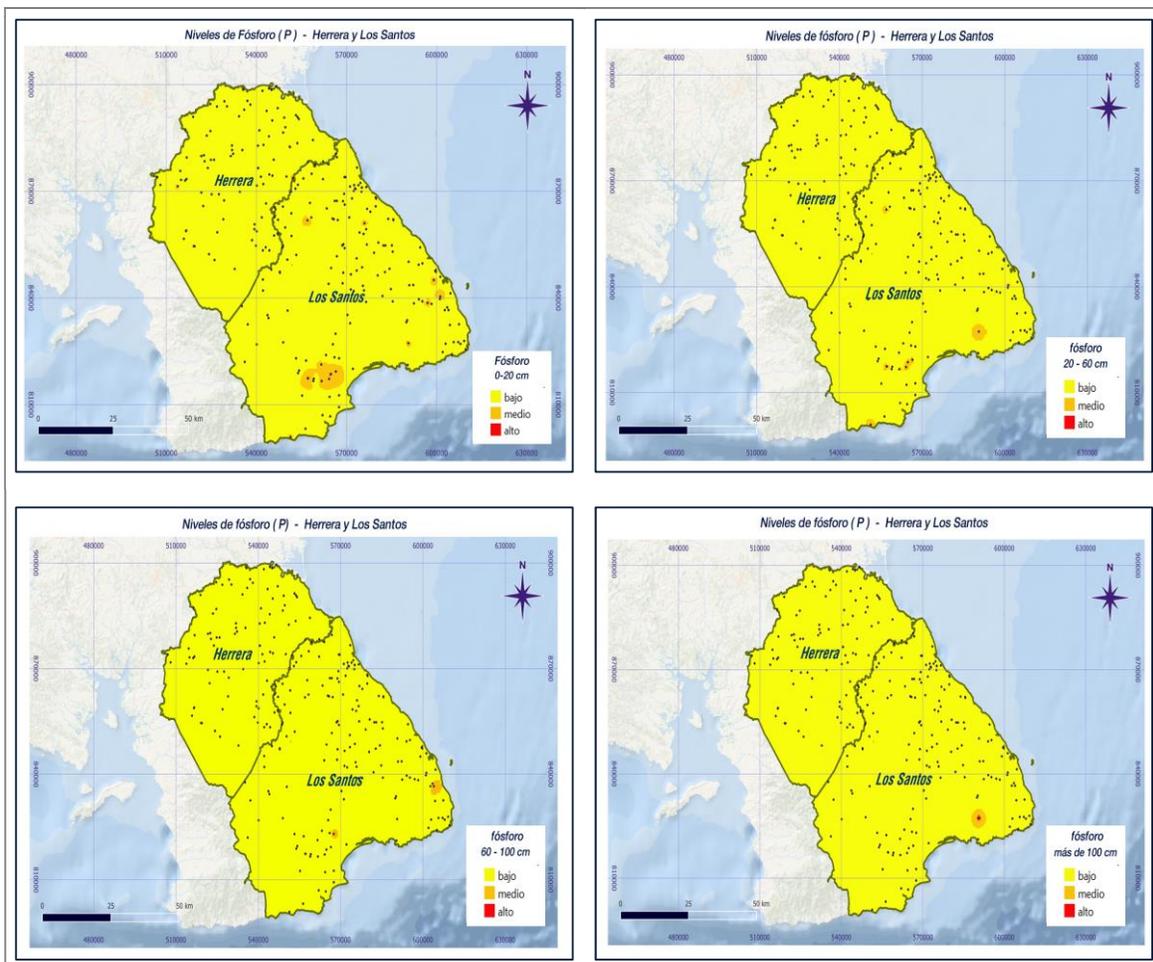


Figura 6. Contenido de fósforo disponible en perfiles de suelos de las provincias de Herrera y Los Santos (0 – 20 cm; 21 – 60 cm; 61 – 100 cm; > 100 cm).

El calcio presentó un nivel medio y alto en las dos provincias. Se observa en la Figura 8 que cerca de un 50% de los suelos de la provincia de Los Santos presentan concentraciones altas de calcio, lo que explica los niveles elevados de pH en estos suelos.

En la provincia de Los Santos se concentra especialmente al suroeste de ésta, además en los distritos de Guararé, Las Tablas, y en el distrito de Los Santos en zonas cercanas a La Espigadilla, Agua Buena y San Agustín. En la provincia de Herrera los distritos de Chitré, Parita y Santa María presentan niveles altos de calcio. Solamente en



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

las zonas con mayor elevación sobre el nivel de mar (El Montuoso, Las Minas) se observan sitios con bajos niveles de Ca coincidiendo con los suelos más ácidos de la región.

Para el magnesio (Figura 9), ambas provincias presentan suelos con elevado contenido de magnesio intercambiable. Con excepción de los suelos del distrito de Las Minas y parte de Los Pozos, en Herrera, parte norte del distrito de Macaracas, Guararé, Pocrí, parte de Pedasí y la zona de la serranía del Canajagua en la provincia de Los Santos, el resto presenta elevado contenido de magnesio.



Figura 7. Contenido de potasio disponible en perfiles de suelos de las provincias de Herrera y Los Santos (0 – 20 cm).

El zinc es un nutriente escaso en 90% de los suelos de Panamá (Villarreal et al., 2013). Se observa en la Figura 10 que ambas provincias presentan la misma tendencia que a nivel nacional, concentrando los niveles medios de zinc en la región de Tonosí donde abundan los suelos del orden vertisol con mayor contenido de materia orgánica (Villarreal et al., 2017).



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



Figura 8. Contenido de calcio intercambiable en perfiles de suelos de las provincias de Herrera y Los Santos (0 – 20 cm).

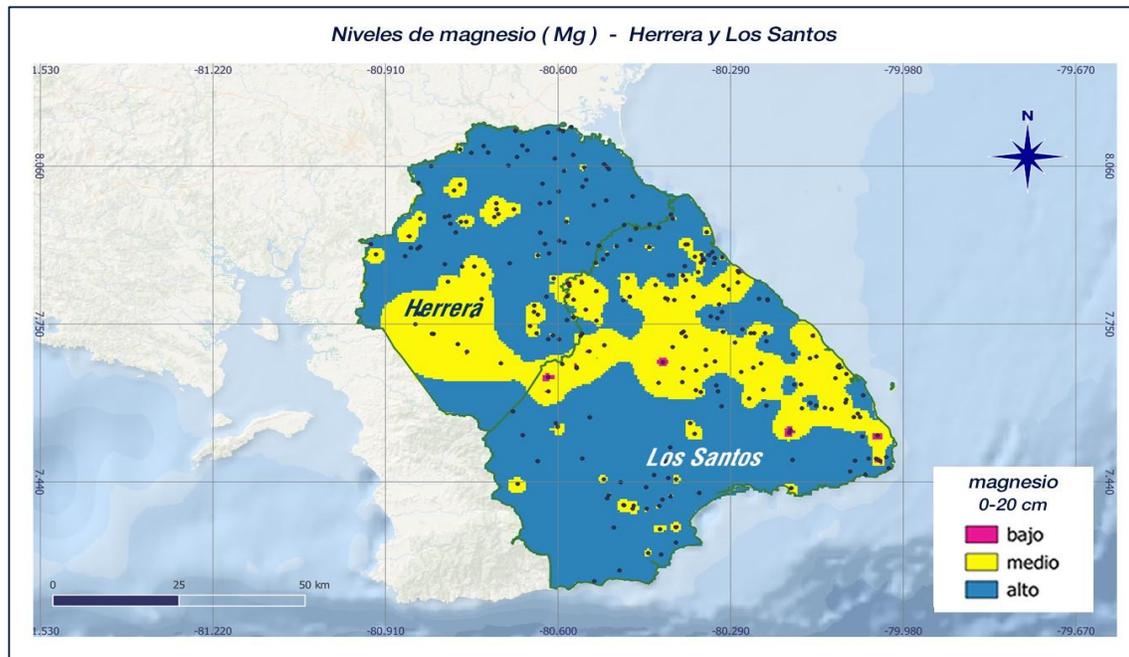


Figura 9. Concentración de magnesio intercambiable en perfiles de suelos de las provincias de Herrera y Los Santos (0 – 20 cm).



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



Figura 10. Contenido de zinc en perfiles de suelos de las provincias de Herrera y Los Santos (0 – 20 cm).

Se realizaron correlaciones de Pearson entre algunas de las principales propiedades de los suelos de la región de Azuero, encontrando que había correlaciones altamente significativas entre algunas propiedades como, por ejemplo: correlación negativa entre el porcentaje de saturación de bases y porcentaje de saturación de aluminio. Igualmente, negativa entre porcentaje de saturación de aluminio con pH; positivas entre contenido de arcilla y materia orgánica, contenido de arcilla y porcentaje de saturación de bases, pH con la CIC.

Esto viene a demostrar la importancia que se le debe dar al manejo sostenible del suelo para mejorar estas propiedades que son interdependientes, ya que, si una se deteriora provoca la degradación de otras, afectando la fertilidad del suelo.



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

Cuadro 2. Correlaciones de Pearson obtenidas entre algunas propiedades del suelo.

PROPIEDAD	DENS. APAR.	Fe	CIC	SATUR. DE BASES	SAT. DE AL	ARCILLA	MATERIA ORGÁNICA
pH	0,43	-0,78*	0,92*	0,98**	-0,95**	0,34	0,61*
Materia orgánica	-0,75	0,11	0,88**	0,83*	-0,45	0,82*	--
Arcilla	-0,66*	0,81*	0,92**	0,62	0,88*	--	--
Sat. de Al	0,18	0,82*	-0,86*	-0,97*	--	--	--
Sat. de bases	0,36	-0,76*	0,99**	--	--	--	--
CIC	0,14	0,48	--	--	--	--	--
Fe	0,23	--	--	--	--	--	--

Dens. Apar: densidad aparente; CIC: capacidad de intercambio catiónico; Satur. de bases: saturación de bases; Sat de Al: saturación de aluminio.

CONCLUSIONES

- Gran parte de la región de Azuero conocida como el Arco Seco de Panamá, presenta suelos de mediana fertilidad, pero debido al manejo inadecuado al que está sometido se están degradando sus propiedades, aumentando en algunas regiones la alta saturación de aluminio.
- Las zonas altas presentan en su mayoría suelos ácidos y elevada rocosidad, siendo estos factores favorables para mantenerlos bajo una cobertura forestal.
- El bajo contenido de materia orgánica de los suelos de la región de Azuero podría comprometer la sostenibilidad de la producción y acelerar su degradación.



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

REFERENCIAS

- Adeniyi, O.D., Brenning, A., Bernini, A., Brenna, S., y Maerker, M. (2023). Digital mapping of soil properties using ensemble machine learning approaches in an Agricultural lowland area of Lombardy, Italy. *Land*, 12(2), 494. <https://doi.org/10.3390/land12020494>
- Adhikari, K., y Hartemink, A.E. (2016). Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma*, (262), 101 – 111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Autoridad Nacional del Ambiente. (2009). Atlas de las tierras secas y degradadas de Panamá. Unidad de Cambio Climático y Desertificação. Panamá, 78 pp. <https://bdigital.binal.ac.pa/bdp/Atlas%20%20de%20la%20tierras%20secas%20y%20degradadas.pdf>
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., y Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1261071>
- Arrouays, D., Lagacherie, P., Hartemink, A.E. (2017). Digital soil mapping across the globe. *Geoderma Regional*, 9, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.03.002>
- Córdoba, M., Bruno, C., Costa, J. L., y Balzarini, M. (2016). Variabilidad espacial del suelo a escala de lote y su relación con los rendimientos. *RIA* 42 (1), 47 – 53. <http://www.scielo.org.ar/pdf/ria/v42n1/v42n1a08.pdf>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos – Servicio de Conservación de Recursos Naturales. (2010). *Clave para la Taxonomía de los Suelos*. USDA, NRCS. Onceava edición. 374 pp. <https://nrcspad.sc.egov.usda.gov/DistributionCenter/pdf.aspx?productID=878>



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

Hengl, T., de Jesus, J. M., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Ribeiro, E., Samuel-Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J. G. B., Walsh, M. G., Gonzalez, M. R., y Bond- Lamberty, B. (2014). SoilGrids1km—global soil information based on automated mapping. *PLoS One* 9 (8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105992>

Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. (2006). *Zonificación de suelos de Panamá por niveles de nutrientes*. IDIAP. Panamá. 24pp. <https://proyectos.idiap.gob.pa/uploads/adjuntos/Zonificacion-de-suelos-de-Panama-IDIAP.pdf>

IUSS Working Group WRB. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014, actualización 2015*. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma. 206 pp. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dea292cb-370d-46c7-a44d-59a617953c3b/content>

Jaramillo, S. (1991). *Pedones de campo y estaciones experimentales del IDIAP*. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. Panamá. 70 pp.

Marion, L. F., Schneider, R., Cherubin, M. R., Stolzenberg, G., Wiesel, P. G., Da Costa, A. B., y Alcayaga, E. (2022). Development of a soil quality index to evaluate agricultural cropping systems in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 218, 105293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105293>

Mazudar, S. (2008). *Geographic information systems in the application of precision agriculture for sustainable sugarcane production in the republic of Panama*. Master's Thesis, McGill University, Montreal, QC, Canada. Available online: <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/6q182n86q>



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

Mendez, J. C., y Besrtsch, F. (2012). *Guía para la interpretación de fertilidad de suelos de Costa Rica*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, Universidad de Costa Rica. <http://www.suelos.ucr.ac.cr/htdocs/accs/>

Ministerio de Ambiente, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2015). *Mapa de cobertura y uso de la tierra 2012*. Programa de Colaboración de las Naciones Unidas para la reducción de emisiones de la deforestación y la degradación de bosques en los países en desarrollo ONU-REDD, Programa Nacional Panamá. 89 pp.
<https://www.un-redd.org/sites/default/files/2021-10/Mapa%20cobertura%20boscosa%20y%20uso%20tierra%202012%20-%20Informe%20Final.pdf>

Name, B., y Cordero, A. (1987). *Recomendaciones para la fertilización de suelos hojas guías por cultivo*. En: Compendio de resultados de investigación presentados en la jornada científica. XII Aniversario del IDIAP. IDIAP Región Central. Divisa.

Pacciorett, P. A., Giannini, F., y Balzarini, M. G. (2020). Muestreo de sitios a escala regional para mapeo digital basado en propiedades del suelo. *Ciencia del Suelo*, 38(2), 310 – 320. <https://doaj.org/article/b13093fb13154e9fa5d0a03bf097ce5a>

Radilla, F. (2008). *Modelado de datos para base de datos espaciales. Caso de estudio: sistemas de información geográfica*. Tesis de maestría en ciencias, especialidad en ingeniería eléctrica. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Departamento de Computación. México, D.F. 134 pp. Recuperado marzo de 2023.
<https://www.cs.cinvestav.mx/TesisGraduados/2008/tesisFlorRadilla.pdf>

Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O. A., y McArthur, D. (2003). Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography*, 27(2), 171–197.
<https://doi.org/10.1191/0309133303pp366ra>



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

Teixeira, P.C., Donagenma, G.K., Fontana, A., y Teixeira, W.G. (2017). *Manual de métodos de análise do solo*. 3 ed. Rev. e ampl. Brasília, DF. EMBRAPA, 574pp.

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>

Villarreal, J. E., y Ramos, I. A. (2024). Mapa digital del contenido de carbono orgánico en suelos de Panamá. *Ciencia Agropecuaria*, N°38, 164 – 175.

<http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/632>

Villarreal, J. E. (2018). Mapas de fertilidad como herramienta para zonificación de suelos en Panamá. IPNI. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 31(3), 32 – 39.

<http://ipni.net/publication/ia-lacs.nsf>

Villarreal, J. E., Ramos, I. A., Villalaz, J. A., y Santo, A. (2017). *Clasificación taxonómica y caracterización físico-química de los suelos de la región de Azuero-Panamá*. X Congreso de Suelos de Costa Rica. Libro de resúmenes, San José, Costa Rica.

<https://www.sueloscr.com/congreso/>

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>



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