

Revisión de literatura

Calidad de suelo en el cultivo de banano: evaluación, desafíos y oportunidades*

Jose Pablo Vargas-Fernández^{1/**}, Lidieth Uribe-Lorío², Ronald Romero-Calderón³, Jorge Armando Leiva-Sanabria⁴

*Este trabajo formó parte de una investigación bibliográfica para la tesis de maestría del Programa de estudio del Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en suelos de la Universidad de Costa Rica del primer autor.

**Autor para correspondencia. Correo electrónico: jose.vargasfernandez@ucr.ac.cr

¹Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Suelos y Foliares. Centro de Investigaciones Agronómicas, Escuela de Agronomía, San José, Costa Rica.

²Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.

³Fresh Del Monte Produce, San José, Costa Rica.

⁴Universidad de Costa Rica, Sede Guanacaste, Escuela de Agronomía, San José, Costa Rica

DOI: <https://doi.org/10.15517/hw9rs878>

Recibido el 21 de octubre del 2024; Aceptado el 29 de mayo del 2025

Resumen

Introducción. El banano es una de las frutas más importantes a nivel mundial, tanto en términos de exportación como de consumo. Ocupa, aproximadamente, 12 millones de hectáreas en suelos tropicales y subtropicales del mundo. Existen evidencias científicas del deterioro de la calidad del suelo en los sistemas de producción de banano, por lo que el manejo del suelo se convierte en un desafío importante para la sostenibilidad de esta actividad. **Objetivo.** Analizar y sintetizar los estudios disponibles de la calidad del suelo, indicadores y metodologías utilizados para su evaluación en sistemas de producción de banano. **Desarrollo.** Se realizó una búsqueda bibliográfica de artículos científicos relacionados con la calidad del suelo en el cultivo de banano en Costa Rica y en otros países productores. Esta investigación bibliográfica expone el contexto y los desafíos de la actividad bananera, se describe el concepto de la calidad del suelo y su relación con la productividad y sostenibilidad, y las evidencias del deterioro en plantaciones de banano. Además, esta revisión presenta las principales metodologías y las particularidades de las investigaciones disponibles en sistemas de producción de banano en Costa Rica y en otros países productores en el mundo. Finalmente, se presentan las oportunidades para futuras evaluaciones e investigación sobre la calidad del suelo en el cultivo de banano.

Conclusiones. La calidad del suelo es crucial para la sostenibilidad y productividad del cultivo de banano, el monocultivo intensivo ha causado su deterioro. Las metodologías actuales integran indicadores químicos, físicos y biológicos, pero persisten vacíos en la evaluación integral de los efectos del monocultivo. Se destaca la necesidad de estandarizar metodologías y desarrollar índices regionales para mejorar la gestión y sostenibilidad de los suelos bananeros en Costa Rica.

Palabras clave: sostenibilidad; productividad; salud de suelo; indicadores; índices.

Literature review

Abstract

Soil quality in banana cultivation: assessment, challenges and opportunities

Introduction. Bananas are one of the most important fruits globally, both in terms of export and consumption. They occupy approximately 12 million hectares of tropical and subtropical soils worldwide. Scientific evidence highlights the degradation of soil quality in banana production systems, making soil management a critical challenge for the sustainability of this activity.

Objective. To analyze and synthesize the available studies on soil quality, indicators, and methodologies used for its evaluation in banana production systems. **Development.** A bibliographic review of scientific articles related to soil quality in banana cultivation was conducted, focusing on Costa Rica and other banana-producing countries. This review outlines the context and challenges of banana production, describes the concept of soil quality and its relationship with productivity and sustainability, and highlights evidence of soil degradation in banana plantations. Furthermore, it discusses key methodologies and the specific characteristics of existing research in banana production systems in Costa Rica and worldwide. Finally, it identifies opportunities for future evaluations and research on soil quality in banana cultivation.

Conclusions. Soil quality is essential for the sustainability and productivity of banana cultivation, yet intensive monoculture practices have led to its degradation. Current methodologies integrate chemical, physical, and biological indicators, but significant gaps remain in the comprehensive evaluation of monoculture effects. The standardization of methodologies and the development of regional indices are critical to improving the management and sustainability of banana soils in Costa Rica.

Keywords: sustainability; productivity; soil health; indicators; indices.

Introducción

El banano es una de las frutas más importantes a nivel mundial, tanto por su consumo como por su impacto en el comercio internacional (Martínez-Solórzano y Rey-Brina 2021). Más de 12 millones de hectáreas se han dedicado a la industria bananera a nivel mundial (Stoorvogel y Segura 2018). En Costa Rica, el cultivo de esta fruta inició hace 150 años, se concentra en la región Huetar Atlántica y constituye uno de los principales productos de exportación agrícola, con un promedio de 127 millones de cajas exportadas en el año 2023 (CORBANA 2024).

A pesar de la importancia de esta actividad, su sostenibilidad enfrenta diversos desafíos, incluyendo la dependencia del monocultivo, el uso intensivo de agroquímicos para controlar plagas y enfermedades, y las consecuencias del cambio climático, como huracanes e inundaciones que afectan las zonas productoras (FAO 2023). Otro importante desafío es el manejo del suelo, clave para la sostenibilidad, ya que su calidad influye directamente en la productividad agrícola (Biswas *et al.* 2023, Juhos *et al.* 2016).

La literatura ha registrado algunos reportes a nivel nacional e internacional sobre el abandono de plantaciones y reducción en los rendimientos, atribuido a la disminución de la calidad del suelo (Delgado *et al.* 2010, Serrano 2005, Serrano *et al.* 2006, Rosales *et al.* 2010, Villarreal *et al.* 2013, Zúñiga *et al.* 2009). Por lo tanto, se han realizado estudios sobre la calidad del suelo en otras regiones, que no siempre son aplicables a las condiciones locales, y otras a nivel nacional con el objetivo de estudiar y clasificar la calidad del suelo en plantaciones bananeras y otros cultivos asociados, mediante el uso de índices de calidad de suelo y la comparación de diversos indicadores físicos, químicos y biológicos (Cornwell 2014, Serrano *et al.* 2006, Vargas-Fernández 2024).

El objetivo de esta revisión fue analizar y sintetizar los estudios disponibles de la calidad del suelo en sistemas de producción de banano, su impacto en la productividad y sostenibilidad.

La industria del banano: importancia y desafíos

El banano es una de las frutas más exportadas y consumidas en el mundo, y uno de los motores del comercio a nivel mundial (Martínez-Solórzano y Rey-Brina 2021). Se desarrolla en suelos tropicales y subtropicales del mundo, incluyendo diversas variedades (Stoorvogel y Segura 2018). En los países productores, esta actividad se desarrolla en sistemas de producción que van desde el monocultivo extensivo hasta sistemas de subsistencia (Stoorvogel y Segura 2018). La fruta del banano posee cualidades alimenticias particulares que lo convierten en un alimento con un potencial estratégico en la seguridad alimentaria mundial (Martínez-Solórzano y Rey-Brina 2021).

La actividad bananera en Costa Rica es una de las más antiguas, se inició de la mano de la construcción del ferrocarril y se orientó hacia un modelo de monocultivo extensivo (Segura *et al.* 2018). Actualmente, el cultivo de banano para exportación, de la variedad del grupo Cavendish, se desarrolla en 42 151 ha (CORBANA 2024). El banano es uno de los tres principales productos de exportación agrícola del país, por lo que esta actividad tiene un importante impacto socioeconómico a nivel nacional, principalmente en el Caribe costarricense (CORBANA 2024). La sostenibilidad de un sistema agrícola se refiere a su capacidad para mantener la productividad y eficiencia de manera indefinida (Schreefel *et al.* 2024). A nivel mundial, la industria bananera enfrenta importantes desafíos para asegurar sus necesidades futuras, particularmente, debido al uso intensivo de biocidas y al predominio del mono-cultivo (Vellema y Jansen 2018). En Costa Rica, el cultivo de banano no es una excepción, este enfrenta retos significativos para preservar rendimientos rentables y garantizar la sostenibilidad a largo plazo (Bellamy 2013). El análisis realizado por algunos autores sobre el sistema de producción convencional banano ha señalado importantes cambios necesarios para orientarlo a uno más sostenible (Bebber 2023, Bellamy 2013, Bezard *et al.* 2023, FAO 2024).

Las estimaciones mundiales pronostican un incremento en las exportaciones de banano Cavendish hacia los principales mercados, lo que implica un aumento en la producción y su eficiencia (Martínez-Solórzano y Rey-Brina 2021). El incremento en la eficiencia productiva va a requerir modificaciones y ajustes en las prácticas de manejo del suelo, el principal recurso que sostiene la productividad (Stoorvogel y Segura 2018). Existe una fuerte relación entre calidad de suelo, productividad y sostenibilidad (Biswas *et al.* 2023, Doran y Parkin 1994), no obstante, a nivel mundial, la gran diversidad de cultivares, sistemas de producción, condiciones de suelo y clima son un reto para la adopción de prácticas para asegurar la sostenibilidad (Staver 2018).

El cambio climático es otro de los desafíos más significativos. A este fenómeno, se atribuyen los desastres naturales experimentados en los últimos años en zonas de Centroamérica dedicadas a la producción de banano, como huracanes e inundaciones, y las irregularidades en los patrones de precipitación en las principales regiones productoras del mundo (FAO 2023), que han afectado importantes áreas de producción y ponen en riesgo la sostenibilidad de la actividad (Varma y Bebber 2019). Otros desafíos prioritarios son las plagas y enfermedades que afectan el banano. Entre ellas, destaca la Sigatoka negra, enfermedad foliar causada por el hongo *Pseudocercospora fijiensis* (Noar *et al.* 2022); la marchitez por *Fusarium*, causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical (Das *et al.* 2023), la cual está presente en América Latina, en Colombia, Perú y Venezuela; el moko o marchitez bacteriana, causada por *Ralstonia solanacearum* (Blomme *et al.* 2017); y el nemátodo fitoparásito *Radopholus similis* (Torres-Asuaje *et al.* 2023). Su incidencia y severidad se han relacionado con aspectos de manejo y desequilibrios de la salud y calidad del suelo (Segura *et al.* 2018).

Calidad de suelo: concepto y relevancia para la producción sostenible

En este trabajo, la calidad del suelo se define como la capacidad de un suelo determinado para funcionar, dentro de los límites naturales o gestionados del ecosistema, para sostener la productividad de animales y plantas, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y apoyar la salud humana (Karlen *et al.* 1997). Naturalmente, todos los suelos tienen la habilidad de funcionar, sin embargo, unos funcionan mejor que otros para ciertos usos (Lal 1998). Actualmente, la definición de la calidad del suelo abarca las propiedades inherentes, definidas por los factores formadores del suelo, y su naturaleza dinámica, influenciada por los procesos biológicos y el manejo antrópico (Bünemann *et al.* 2018).

El concepto de calidad de suelo ha experimentado una serie de cambios desde un preconcepto, registrado por las dinastías Xia y Zhou (2070-256 AC), los pensadores romanos, Varro, Catón y Columella (Karlen *et al.* 2019), y la cultura precolombina Cabécar en Costa Rica (Sandoval 2023), como la aptitud del suelo para el crecimiento de las plantas. A partir de estos registros, el concepto se enriqueció con diversos estudios que resaltaron la importancia de añadir materia orgánica para mejorar la estructura del suelo y reducir la erosión (Karlen *et al.* 2019). En la década de 1970, debido a la fuerte dependencia de la mecanización y los fertilizantes sintéticos, la calidad del suelo adquirió un enfoque utilitario con una orientación clara hacia la productividad, considerándose un suelo de calidad como aquel capaz de producir maíz, soja y trigo bajo condiciones de manejo intensivo (Karlen *et al.* 2019) (**Figura 1**).

A partir de la década de 1990, incrementó la conciencia sobre la necesidad de un cambio de enfoque en la evaluación de la calidad del suelo (Bünemann *et al.* 2018). En este contexto, ocurrió uno los cambios más significativos en el concepto, al incorporar la visión del suelo como un ecosistema que sostiene diversas funciones y servicios (Karlen *et al.* 2019). Este período propició las condiciones para la creación de metodologías de evaluación de la calidad del suelo en países como Canadá y Nueva Zelanda en el año 1996, Australia en el año 1999, y Alemania en el año 2000 (Karlen *et al.* 2019). Desde el año 2010, ocurrió un aumento exponencial en las investigaciones sobre la calidad del suelo en el mundo (Janzen *et al.* 2021).



Figura 1. Cambios en el concepto de calidad de suelo y aspectos clave, desde una visión preconceptual hasta la contemporaneidad.

Figure 1. Changes in the concept of soil quality and key aspects, from a pre-conceptual vision to contemporaneity.

Actualmente, el concepto continúa como un tema de debate dentro de la comunidad científica (Janzen *et al.* 2021). Algunos investigadores sostienen que su conceptualización es innecesaria, ya que resulta redundante con la capacidad de identificar un suelo adecuado para una función específica (Karlen *et al.* 1997). Esta perspectiva coincide con el conocimiento tradicional de comunidades indígenas en Costa Rica, como la comunidad Cabécar, capaz de identificar las condiciones de suelo favorables para el cultivo de banano sin recurrir a metodologías formales de evaluación (Sandoval 2023). Otros investigadores plantean que la evaluación de la calidad del suelo es impracticable, debido a la gran variabilidad natural entre diferentes órdenes de suelo (Karlen *et al.* 1997).

A pesar de que algunos autores han desestimado la relación entre calidad y productividad agrícola (Larson y Pierce 1991), esta última está implícita en el concepto mismo (Doran y Parkin 1994) y resalta su relevancia en la búsqueda de sistemas más sostenibles (Marion *et al.* 2022). Algunos estudios han relacionado la mejora en la calidad del suelo con incrementos en los rendimientos de los cultivos (Biswas *et al.* 2023, Juhos *et al.* 2016). Este aumento se logra mediante la identificación y optimización de los factores más limitantes en el suelo (Chaparro *et al.* 2012, Miner *et al.* 2020).

La productividad corresponde a la dimensión biofísica a través de la que se cuantifica la sostenibilidad (Lal 1998). En las plantaciones bananeras, el rendimiento varía de acuerdo con el manejo. Plantaciones con un manejo intensivo pueden superar las 3000 cajas $ha^{-1} año^{-1}$ (cajas de 18,14 kg de fruta), mientras que otros sistemas menos intensivos alcanzan rendimientos cercanos a las 300 cajas $ha^{-1} año^{-1}$ (Stoorvogel y Segura 2018). En ambos extremos, aún existen grandes interrogantes, pero la literatura ha relacionado altos índices de calidad de suelo con mejor desarrollo del banano y altos rendimientos (Culma *et al.* 2017, Delgado *et al.* 2010, González *et al.* 2021, Olivares *et al.* 2022, Villarreal *et al.* 2013, Vargas-Fernández 2024).

Deterioro de la calidad del suelo en plantaciones de banano

La producción bananera en Costa Rica adoptó un modelo intensivo, caracterizado por el uso de insumos y técnicas orientadas a maximizar la productividad (Bellamy 2013). Con el fin de mantener la rentabilidad del cultivo, el manejo de los sistemas bananeros se basa en una aplicación intensiva de fertilizantes y productos fitosanitarios para suplir los nutrientes esenciales del cultivo y controlar plagas y enfermedades que amenazan los rendimientos (Geissen *et al.* 2010, Melgar *et al.* 2008). Este enfoque intensivo, sin embargo, ha generado un impacto considerable en la calidad del suelo y la sostenibilidad del sistema de producción de banano.

El área cultivada en el país se incrementó aceleradamente entre 1980 y 1995 (Jadin *et al.* 2016), debido al programa de fomento bananero, para satisfacer la demanda creciente en los principales mercados (Gauggel *et al.* 2005). El área sembrada alcanzó un pico de más de 50 mil hectáreas en el año 1994, para luego disminuir gradualmente hasta el año 2002 (Serrano 2005). En un inicio, de 1960 a 1980 las plantaciones se sembraron en suelos de las márgenes de los ríos, mientras que una segunda expansión en las décadas de 1980 y 1990 fue llevada a cabo en suelos clasificados, mayoritariamente, como *Inceptisol* (Soil Survey Staff 2014), con una alta fertilidad química (Veldkamp *et al.* 1992), principalmente bajo producción de cacao, plátano, arroz y suelos en ganadería, entre otros cultivos (Gibbs *et al.* 2010). La degradación y deterioro del suelo en estos sistemas productivos se ha relacionado con la conversión de suelos forestales y de otros sistemas menos alterados a plantaciones intensivas de banano (Ledo *et al.* 2020).

A partir de 1989, los rendimientos se redujeron hasta alcanzar el menor valor en 1994, para continuar con un comportamiento inestable hasta el año 2015 (Serrano 2005). Un estudio realizado en Costa Rica destaca que el incremento exponencial del área de producción fue acompañado de una reducción en la productividad, con un promedio nacional de 1960 cajas ha^{-1} año en el año 1994 (Serrano *et al.* 2006). Fue hasta el año 2016 que la productividad promedio alcanzó cerca de 2700 cajas ha^{-1} año (**Figura 2**). Otro estudio resalta que después de seis años de producción intensiva, diez fincas de productores independientes experimentaron una reducción promedio de 600 cajas ha^{-1} año, atribuido al deterioro de la calidad del suelo (Zúñiga *et al.* 2009). Otros registros indican que, a pesar de contar con claros estándares para la selección de suelos para el cultivo, detallados por Jaramillo y Vásquez (1990), la reducción de la productividad experimentada en el corto plazo respondía a que una gran mayoría de plantaciones se establecieron con estudios de suelo inadecuados, lo cual influyó en un posterior abandono de muchas áreas productoras entre 1980 y 1990 (Gauggel *et al.* 2005).

El análisis del rendimiento histórico del cultivo de banano en Costa Rica durante la última década muestra que la producción nacional promedio ha alcanzado niveles altos y rentables sin una expansión del área cultivada (CORBANA, 2024), lo que sugiere un aumento en la eficiencia de los sistemas de producción. Sin embargo, aún no está claro si este incremento logrado es compatible con el mantenimiento de la calidad del suelo o si, por el contrario, podría conducir a procesos de degradación que comprometan la sostenibilidad del sistema productivo a largo plazo.

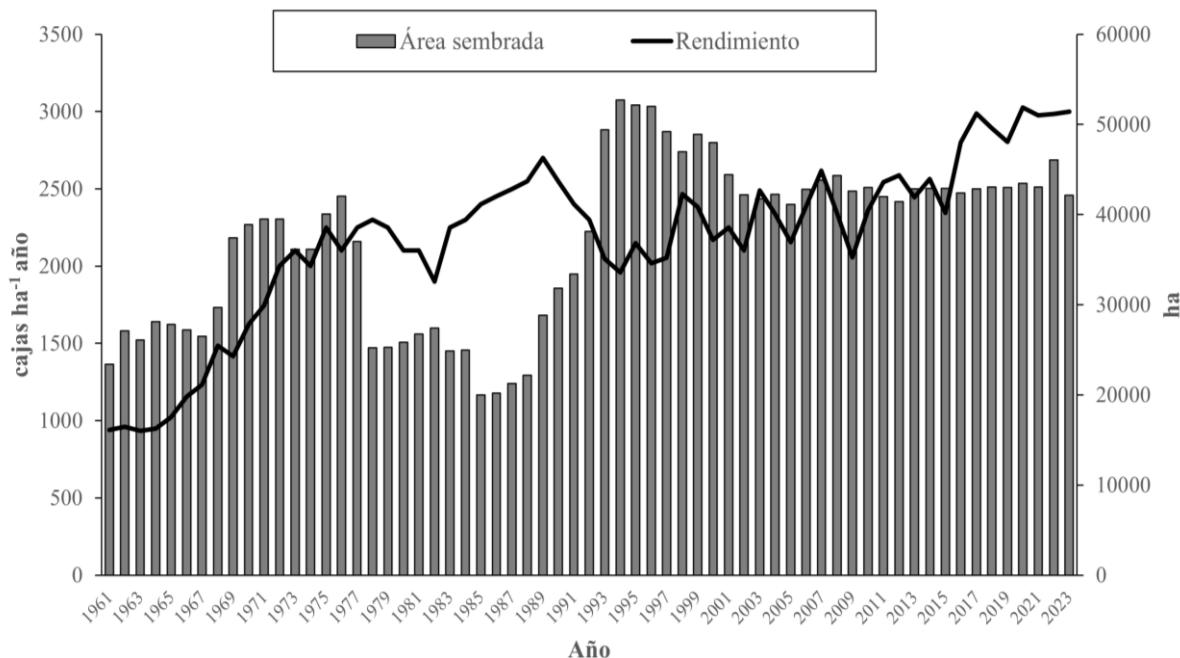


Figura 2. Histórico de rendimiento del cultivo de banano (cajas de 18,14 kg ha⁻¹ año) y área sembrada (ha) en Costa Rica de 1961 a 2023 (CORBANA 2024, FAO 2020, Serrano 2005).

Figure 2. Historical yield of banana cultivation (boxes of 18.14 kg ha⁻¹ year) and planted area (ha) in Costa Rica from 1961 to 2023 (CORBANA 2024, FAO 2020, Serrano 2005).

El patrón de disminución en la productividad y abandono de áreas de producción también fue reportado en otros países de América Latina, y fue vinculado al deterioro de las propiedades químicas, físicas y, especialmente, biológicas del suelo (Rosales *et al.* 2010). En Panamá, se reportó una reducción cercana a 1,000 cajas ha⁻¹ año⁻¹ entre 2003 y 2013 (Villarreal *et al.* 2013), mientras que en Venezuela los rendimientos nacionales disminuyeron un 46% entre 1997 y 2005 (Delgado *et al.* 2010). En contraste, los sistemas de producción orgánica, de algunas áreas de Venezuela y República Dominicana, mostraron mayor estabilidad en la productividad (Delgado *et al.* 2010).

La disminución en la calidad del suelo en sistemas de producción de banano ha sido atribuida a la reducción en la cantidad de raíces, debido a altas poblaciones de nematodos, acidez elevada y limitaciones físicas del suelo (Ortega-Bonilla *et al.* 2022); compactación y drenaje ineficiente, bajo contenido de materia orgánica y actividad microbiana (Villarreal *et al.* 2013); disminución en las poblaciones de lombrices (Cornwell 2014) y microorganismos esenciales, como bacterias, hongos, actinomicetos y bacterias aerobias (Segura *et al.* 2015). Sin embargo, persiste un vacío de información sobre la magnitud y las causas principales del deterioro en la calidad de los suelos, lo cual limita la posibilidad de evaluar si este puede ser mitigado o corregido mediante prácticas de agricultura regenerativa (Schreefel *et al.* 2020).

Evaluación de la calidad de suelo en el cultivo banano

Comúnmente, las fincas dedicadas a la producción de banano llevan a cabo un programa de monitoreo de la fertilidad química del suelo. En algunos casos, este monitoreo es facilitado por CORBANA o el Ministerio de Agricultura; mientras que, en las empresas transnacionales, lo gestionan los propios departamentos técnicos. Parámetros biológicos del suelo se miden en casos excepcionales y con fines de investigación, y los físicos solo en estudios de aptitud para el cultivo (Jaramillo y Vásquez 1990). Existen también algunos estudios de la mineralogía y clasificación del suelo, pero con fines de investigación (Arias *et al.* 2009). Aunque los datos generados de estos trabajos no están disponibles públicamente o se han generado con otro objetivo, tienen un gran potencial para el estudio de la calidad del suelo.

Las evidencias del deterioro de la calidad recopiladas en la literatura y el aumento exponencial en investigaciones en otras partes del mundo (Janzen *et al.* 2021), impulsaron la realización de investigaciones en plantaciones de banano y otros cultivos asociados. Las investigaciones disponibles fueron realizadas en Australia (Pattison *et al.* 2008, Rasiah *et al.* 2009), África (Ssali *et al.* 2003, Van Asten *et al.* 2004) y China (Zhong *et al.* 2014, 2021) (**Tabla 1**). En América, destacan estudios realizados en banano y plátano en Brasil (da Silva *et al.* 2022), Colombia (Culma *et al.* 2017, Afanador-Barajas *et al.* 2020) Panamá (Villarreal *et al.* 2013), y Venezuela (Delgado *et al.* 2010, González *et al.* 2021, Olivares *et al.* 2022, Rey *et al.* 2009) (**Tabla 2**). Estos trabajos exponen los indicadores de calidad del suelo utilizados en otros contextos y que son aplicables al cultivo de banano. Sin embargo, factores como el sistema de producción, cultivar, particularidades de los suelos estudiados y las condiciones climáticas limitan la extrapolación de sus resultados y a las condiciones de Costa Rica.

Tabla 1. Estudios sobre calidad de suelo en el cultivo de banano realizados en Australia, África y China.
Table 1. Studies on soil quality in banana cultivation carried out in Australia, Africa and China.

País o región	Cultivo, especie o cultivar	Indicadores utilizados*	Referencia
Australia	Banano (<i>Musa AAA</i>) Pastizal, Bosque Banano, orgánico	Textura, Da, COT, C lábil, N, AI, pH, CE, CIC, P y comunidad de nematodos	Pattison <i>et al.</i> (2008)
Australia	Banano (<i>Musa AAA</i> cv. Williams)	Da, porosidad, compactación e infiltración	Rasiah <i>et al.</i> (2009)
China	Banano (<i>Musa</i> cvs. Baxijiao AAA)	pH, COT, N, P, K, Fe, Mn, Cu, Zn, NO_3^- , NH_4^+ y PR	Zhong <i>et al.</i> (2014)
China	Banano (<i>Musa paradisiaca</i> L.) Banano – piña Banana –	%HG, Da, porosidad, Est. Agreg., pH, N, NO_3^- , NH_4^+ , COT, N, P, K, Ca, Mg, actividad enzimática de la Ureas, Fosfatasa, β -Glucosidasa, Deshidrogenasa, Invertasa, Catalasa, CBM y RM	Zhong <i>et al.</i> (2021)
Uganda	Banano (<i>Musa AAA</i> cv Nakyetengu)	FQS, ENP, CP, AP, PR, MPR, AD, Da, poblaciones de nemátodos y daño por picudo negro	Ssali <i>et al.</i> (2003)
África Oriental	<i>Musa AAA</i>	pH, COT, CIC, ENP	Van Asten <i>et al.</i> (2004)

*% HG: humedad gravimétrica. % HV: humedad volumétrica. AD: agua disponible. AI: acidez intercambiable. AP: altura de hijo de sucesión. C: carbono. CBM: carbono de biomasa microbiana. CE: conductividad eléctrica. CIC: capacidad de intercambio catiónica. COT: carbono orgánico total. CP: circunferencia de planta. Da: densidad aparente. ENP: estado nutricional de la planta. Est. Agreg.: estabilidad de agregados. FQS: fertilidad química de suelo. HP: hojas funcionales por planta. MO: materia orgánica. MPR: manos por racimo. PR: peso de racimo. *R. similis*: *Radopholus similis*. RM: respiración microbiana. RSP: resistencia del suelo a la penetración.

Tabla 2. Estudios sobre calidad de suelo en el cultivo de banano realizados en América Latina.
Table 2. Studies on soil quality in banana cultivation carried out in Latin America.

País	Cultivo, especie o cultivar	Indicadores utilizados*	Referencia
Brasil	Banano (<i>Musa</i> spp.) - yuca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz) Banano (<i>Musa</i> spp.) - açaí (<i>Euterpe oleracea</i> Mart)	Estructura del suelo, %HV, AD, Da y porosidad	da Silva <i>et al.</i> (2022)
Colombia	Plátano (<i>Musa</i> AAB cv. Dominic Harton)	Textura, Da, AD, K, N, COT, pH, RM, macrofauna, CP y MPR	Culma <i>et al.</i> (2017)
Colombia	Policultivo (<i>Musa balbisiana</i> , <i>Anthurium andraeanum</i> , <i>Manihot esculenta</i> o <i>Zea mays</i>)	Est. Agreg., pH, textura, COT, actividad enzimática de la Catalasa y Deshidrogenas, recuento de actinomicetos y bacterias solubilizadoras de fosfato, Da y porosidad	Afanador-Barajas <i>et al.</i> (2020)
México	<i>Musa</i> AAA	FQS, actividad enzimática, conteos de bacterias, hongos, actinomicetos, fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fosforo	Adriano <i>et al.</i> (2012)
México	<i>Musa</i> AAA	Mn y ethylenethiourea.	Geissen <i>et al.</i> (2010)
Panamá	<i>Musa</i> AAA	pH, AI, K, Ca, Mg, P, Cu, Fe, Mn, Zn, CE, COT, CP, AP, MPR, biomasa de raíces, Da, RSP, % HG, CBM, RM e índice de mineralización	Villarreal <i>et al.</i> (2013)
Perú	<i>Musa</i> AAA	Da, RSP, textura, pH, MO y FQS	Florida <i>et al.</i> (2023)
Venezuela	Banano (<i>Musa</i> AAA cv. Gran nain)	pH, Mn, Cu, textura, RSP, RM, CBM, biomasa de raíz, nematodos de vida libre y <i>Trichoderma</i> sp	Rey <i>et al.</i> (2009)
Venezuela	Plátano (<i>Musa</i> AAB cv. Hartón)	Textura, % HG, Da, conductividad hidráulica, RSP, infiltración, pH, CE, MO, N, P, CIC, recuentos de hongos, bacterias y actinomicetos, CBM, RM, MPR, CP y AP	González <i>et al.</i> (2021)
Venezuela	<i>Musa</i> AAA	Recuento de bacterias, hongos y actinomicetos, RM, CBM, <i>R. similis</i> , nematodos de vida libre y hongos endófitos en raíz	Olivares <i>et al.</i> (2022)
Venezuela, Costa Rica, Panamá y República Dominicana	<i>Musa</i> AAA	AI, Ca, Mg, K, P, Cu, P, infiltración, RSP, MO, RM, CBM, índice de mineralización, biomasa radical, <i>R. similis</i> , nematodos de vida libre, bacterias, hongos y microartrópodos	Delgado <i>et al.</i> (2010)

*% HG: humedad gravimétrica. % HV: humedad volumétrica. AD: agua disponible. AI: acidez intercambiable. AP: altura de hijo de sucesión. C: carbono. CBM: carbono de biomasa microbiana. CE: conductividad eléctrica. CIC: capacidad de intercambio catiónica. COT: carbono orgánico total. CP: circunferencia de planta. Da: densidad aparente. ENP: estado nutricional de la planta. Est. Agreg.: estabilidad de agregados. FQS: fertilidad química de suelo. HP: hojas funcionales por planta. MO: materia orgánica. MPR: manos por racimo. PR: peso de racimo. *R. similis*: *Radopholus similis*. RM: respiración microbiana. RSP: resistencia del suelo a la penetración.

En Costa Rica, los estudios sobre calidad del suelo en banano han abordado la influencia de indicadores físicos (Vaquero 2003), nematodos fitoparásitos como *R. similis* (Araya y De Waele 2004), la estructura de la comunidad de nematodos de vida libre (Londoño 2006), y la importancia de los indicadores biológicos, químicos y físicos del suelo (Serrano *et al.* 2006) (**Tabla 3**). Otros trabajos han abordado el efecto de las coberturas vivas en la calidad del suelo (Valverde-Araya *et al.* 2024), y han comparado la calidad del suelo entre el monocultivo de banano y otros cultivos, y sistemas de baja alteración como bosques (Cerda 2008, Cornwell 2014, Delgado *et al.* 2010, Vargas-Fernández 2024).

La mayoría de los estudios realizados en Costa Rica se realizaron hace más de una década. Estos trabajos, aunque valiosos en su contexto, presentan limitaciones ya que no otorgan la importancia necesaria a los indicadores biológicos (Kibblewhite *et al.* 2008). Además, dichos estudios no abordan de manera integral los principales impactos que el monocultivo de banano tiene sobre la calidad del suelo. Esto deja un vacío en la comprensión holística de cómo el sistema convencional de producción de banano afecta los procesos biológicos esenciales asociados a la productividad y sostenibilidad.

Metodología tradicional para obtener índices de la calidad del suelo

Las evidencias de la degradación del suelo en sistemas agrícolas impulsaron la creación de organizaciones y metodologías destinadas a velar por su calidad (Karlen *et al.* 2019). Alrededor del año 2000 surgió una cantidad significativa de métodos formales de evaluación que perduran hasta la actualidad (Karlen *et al.* 1997). Algunas fueron desarrolladas para suelos agrícolas, otras para suelos de sistemas naturales y suelos contaminados, con la capacidad para evaluar distintas escalas, desde los procesos básicos del suelo, a nivel de parcelas, hasta las escalas nacional, regional e internacional (Bastida *et al.* 2008).

A pesar de la amplia disponibilidad de metodologías, se ha dificultado la adopción de un enfoque único y generalizado. Esto se debe a que la calidad del suelo está determinada por las funciones ecosistémicas específicas de cada situación (Sarmiento Reyes *et al.* 2018). Dada la diversidad de usos y características del suelo, la evaluación de la calidad del suelo debe abordarse desde una perspectiva relativa y no de forma absoluta (Karlen *et al.* 1997). Las diferencias observadas en las características de los suelos utilizados para el cultivo de banano en Costa Rica respaldan esta visión, ya que, aunque comparten la función común de sostener la producción de banano, cada suelo presenta particularidades que afectan su calidad (Arias *et al.* 2009).

Tabla 3. Estudios sobre calidad de suelo en el cultivo de banano realizados en Costa Rica.
Table 3. Studies on soil quality in banana cultivation carried out in Costa Rica.

Cultivo, especie o cultivar	Indicadores utilizados*	Referencia
<i>Musa AAA</i>	<i>Radopholus similis</i> ., <i>Helicotylenus</i> spp., <i>Pratylenchus</i> spp	Araya y De Waele (2004)
<i>Musa AAA</i>	Macroinvertebrados, pH, CE y oxígeno disuelto	Castillo <i>et al.</i> (2006)
<i>Musa AAA</i>	CP, AP, MPR, AI, pH, Ca/Mg, Mg/K, retención de fosfatos, P e infiltración	Serrano <i>et al.</i> (2006)
Banano (<i>Musa AAA</i>)	RM, CBM, lombrices, micoparásitos, recuento de actinomicetes, nemátodos fitopatógenos, pH, COT, N total, K, Da y Est. Agreg	Cerda (2008)
Plátano (<i>Musa AAB</i>)		
Cacao (<i>Theobroma cacao</i>)		
<i>Musa AAA</i>	Actividad enzimática de la Fosfatasa, β -Glucosidasa, Deshidrogenasa y Ureasa.	Henríquez <i>et al.</i> (2014)
Banano (<i>Musa acuminata</i>)		
Cacao (<i>Theobroma cacao</i>) Piña (<i>Ananas comosus</i>) Pastos (<i>Cynodon nlemfuensis</i>)	Da, abundancia de lombrices, pH, AI, CIC, FQS, C y N	Cornwell (2014)
Café-banano (<i>Musa AAA</i>)	RM, CBM y actividad enzimática de la Fosfatasa	Durango <i>et al.</i> (2015)
<i>Musa AAA</i>	AP, CP, MPR, biomasa de raíz funcional, pH, MO, AI, Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Fe, Mn, recuento de bacterias, hongos y actinomicetos	Segura <i>et al.</i> (2015)
<i>Musa AAA</i>	pH, N, Ca, Mg y Mn	Segura <i>et al.</i> (2018)
<i>Musa AAA</i> (cv. Gal)	pH, CE, salinidad, C, N, textura, Da y artropofauna	Revelo-Tovar (2018)
<i>Musa AAA</i>	Microartropodos	Guillén-Sánchez y Sandoval (2018).
<i>Musa AAA</i>	Metales traza (As, Cd, Co, Cr, Ni, Pb)	Obando-Bustos (2021)
<i>Musa AAA</i>	Aporte nutricional de cobertura, RSP, RM, temperatura del suelo y PR	Valverde-Araya <i>et al.</i> (2024)
<i>Musa AAA</i>	COT, pH, K, P, Na, % arena, % arcilla, RSP, huella metabólica de la comunidad microbiana, RM, CBM, actividad enzimática de la β -glucosidasa, CP, AP, HP, MPR, RF y poblaciones de <i>R. similis</i> en la raíz de la planta	Vargas-Fernández (2024)

*% HG: humedad gravimétrica. % HV: humedad volumétrica. AD: agua disponible. AI: acidez intercambiable. AP: altura de hijo de sucesión. C: carbono. CBM: carbono de biomasa microbiana. CE: conductividad eléctrica. CIC: capacidad de intercambio catiónica. COT: carbono orgánico total. CP: circunferencia de planta. Da: densidad aparente. ENP: estado nutricional de la planta. Est. Agreg.: estabilidad de agregados. FQS: fertilidad química de suelo. HP: hojas funcionales por planta. MO: materia orgánica. MPR: manos por racimo. PR: peso de racimo. *R. similis*: *Radopholus similis*. RM: respiración microbiana. RSP: resistencia del suelo a la penetración.

La evaluación de la calidad del suelo sigue tradicionalmente tres pasos básicos: selección de un conjunto mínimo de indicadores, interpretación o transformación de los indicadores, e integración de los indicadores para obtener índices (Andrews *et al.* 2004). En el primer paso, se seleccionan parámetros asociados a procesos químicos, físicos y biológicos del suelo (Larson y Pierce 1991), pero se consideran características inherentes del suelo, dadas por los procesos pedogenéticos (Karlen *et al.* 1997), y se utiliza un procedimiento robusto que considere la variación temporal y espacial de esos parámetros y propiedades (Lal 1998).

Los indicadores deben ser cuantificables e interpretables (Rinot *et al.* 2019) y sensibles a cambios en el suelo (Pattison *et al.* 2008). La variación registrada por estos indicadores informa sobre la calidad del suelo en el presente y permiten dar un seguimiento a lo largo del tiempo, lo que contribuye a mejorar las prácticas de manejo del sistema productivo (Bünemann *et al.* 2018). La elección de indicadores debe realizarse, por lo tanto, con cuidado, con base en las condiciones particulares evaluadas y los servicios ecosistémicos brindados (Afanador-Barajas *et al.* 2020). Además, los indicadores seleccionados deben compararse con sitios similares, pero donde la alteración del suelo sea mínima o inexistente (Pattison *et al.* 2008).

A pesar de algunas limitaciones y desventajas resaltadas por algunos autores, tradicionalmente se utilizan dos estrategias para obtener un conjunto mínimo de indicadores (Thoumazeau *et al.* 2019). Una de ellas consiste en obtener indicadores que conservan la mayor parte de la variabilidad del conjunto inicial (Moebius *et al.* 2016), mediante un análisis de componentes principales bajo parámetros definidos (Afanador-Barajas *et al.* 2020, Delgado *et al.* 2010). Otra estrategia es la consulta de expertos y la revisión de estudios disponibles, no obstante, esta depende en gran medida de la subjetividad y experiencia del experto (Marion *et al.* 2022, Cherubin *et al.* 2016).

Una consulta realizada por la persona autora de este trabajo, a profesionales y técnicos que producen banano o desarrollan investigación en Costa Rica, señala con mayor frecuencia los siguientes indicadores para integrar un conjunto mínimo: la capacidad de intercambio catiónica, el pH, la textura, el carbono orgánico total, la diversidad de la microbiota del suelo, la resistencia a la penetración a una profundidad de 30 cm y la acidez intercambiable. Esta selección coincide con los indicadores que se utilizan frecuentemente en los estudios sobre la calidad de suelo en el cultivo de banano, tanto en Costa Rica como en otras partes del mundo (Culma *et al.* 2017, Henríquez *et al.* 2014, Pattison *et al.* 2008, Rasiah *et al.* 2009, da Silva *et al.* 2022, Ssali *et al.* 2003).

Indicadores menos frecuentes, pero de gran relevancia para evaluar la calidad del suelo en el cultivo de banano, han sido destacados en trabajos previos. Entre ellos, se encuentra la huella metabólica de la comunidad microbiana (Vargas-Fernández 2024), las poblaciones de nemátodos de vida libre (Delgado *et al.* 2010, Olivares *et al.* 2022, Pattison *et al.* 2008, Rey *et al.* 2009, Ssali *et al.* 2003), la macrofauna (Castillo *et al.* 2006, Culma *et al.* 2017, Guillén-Sánchez y Sandoval 2018, Revelo-Tovar 2018), la abundancia y diversidad de lombrices (Cerda 2008, Cornwell 2014), y los metales traza y macroinvertebrados como indicadores de la contaminación del suelo (Castillo *et al.* 2006, Melgar *et al.* 2008, Obando-Bustos 2021). Además, la literatura resalta la importancia de incorporar indicadores biométricos y del sistema radical de la planta, pues mantienen una relación importante con la productividad y la calidad del suelo en plantaciones de banano (Culma *et al.* 2017, González *et al.* 2021, Olivares *et al.* 2022, Segura *et al.* 2015, Villarreal *et al.* 2013).

Una vez seleccionados, en el segundo paso, los indicadores son interpretados a través de funciones no lineales, que modelan relaciones complejas y no proporcionales, como sucede naturalmente con ciertos parámetros del suelo (Marion *et al.* 2022, Cherubin *et al.* 2016). Ese paso requiere el uso de umbrales y valores óptimos predefinidos y disponibles en la literatura para condiciones específicas o generales (Bünemann *et al.* 2018), y, como resultado, se obtiene un puntaje, que va de 0 a 1 o de 0 a 100, para cada indicador (Andrews *et al.* 2004). Este paso elimina la dimensión de los datos y permite comparar indicadores de distinta naturaleza y combinarlos en índices integrales de la calidad del suelo (Marion *et al.* 2022, Cherubin *et al.* 2016). Entre las metodologías para interpretar indicadores se encuentra el Marco de evaluación del manejo de suelos (SMAF por sus siglas en inglés), comúnmente utilizado en investigaciones realizadas en banano (Andrews *et al.* 2004), y la Distribución Normal Acumulativa (CND por sus siglas en inglés), derivada de SMAF (Moebius *et al.* 2016).

Para llevar a cabo la interpretación, la metodología SMAF emplea los umbrales y los niveles óptimos de cada indicador desarrollados en el cultivo, mientras que la metodología CND utiliza la media y la desviación estándar de un conjunto de datos mayor, y la función de la distribución normal acumulativa (Moebius *et al.* 2016). La sensibilidad y utilidad de ambas metodologías fue validada en otras condiciones (van Es y Karlen 2019), no obstante, CND fue utilizada por primera vez en el país por Vargas-Fernández (2024) para interpretar los indicadores en el cultivo de banano, a partir de la base de datos del mapa de suelos de Costa Rica (Mata *et al.* 2022).

El tercer paso en la evaluación de la calidad del suelo es la construcción de índices multiparamétricos (Bastida *et al.* 2008), por medio de métodos como el aditivo simple, en el que cada indicador tiene el mismo aporte (Cherubin *et al.* 2016, Mukherjee y Lal 2014), o el aditivo ponderado, que mediante el cálculo de la communalidad (Delgado *et al.* 2010) o criterio experto (Cherubin *et al.* 2016, Marion *et al.* 2022), cada indicador adquiere un peso en la construcción del índice. Finalmente, los índices de calidad del suelo se clasifican con base en escalas de cinco categorías, en las que un índice de 1 se interpreta como un suelo de alta calidad y uno de 0 ó cercano como un suelo de muy baja calidad (Cantú *et al.* 2009, Delgado *et al.* 2010).

La evaluación de la calidad del suelo ha experimentado una evolución significativa desde mediados del siglo XX, gracias a la incorporación de metodologías con indicadores químicos, físicos y biológicos, adaptados a contextos específicos (Bastida *et al.* 2008, Karlen *et al.* 1997). Aunque la falta de estandarización aún presenta un desafío, estos avances son fundamentales para el monitoreo de la calidad del suelo en sistemas productivos de banano, y establecen algunas perspectivas y oportunidades para continuar en esta línea de investigación.

Perspectivas y oportunidades para futuros estudios de la calidad del suelo

A raíz de esta investigación bibliográfica, se identificaron algunas oportunidades y perspectivas importantes para futuras investigaciones sobre la calidad del suelo en el cultivo de banano. En primer lugar, trabajos realizados en otras condiciones han hecho aportes considerables al concepto de calidad de suelo, considerándola una metáfora útil para concientizar a productores y al sector político sobre la importancia de un suelo capaz de cumplir sus funciones, pero con el riesgo de mal interpretar la alta complejidad del suelo (Janzen *et al.* 2021). Este cambio ha motivado un nuevo enfoque para evaluar la calidad del suelo como un sistema completo y complejo, con especial énfasis en la evaluación de signos de resiliencia (Harris *et al.* 2022). Este enfoque señala la necesidad de un monitoreo que capture la mayor cantidad de componentes del suelo y las conexiones directas e indirectas que existen entre ellos (Harris *et al.* 2022, Rinot *et al.* 2019). Al respecto, esta revisión sugiere la integración de indicadores ecológicos, biológicos y moleculares, utilizados con poca frecuencia, para entender su participación y sensibilidad a procesos clave como la disponibilidad de nutrientes, la resistencia ante situaciones de estrés, y su interacción con otros indicadores fisicoquímicos (Karlen *et al.* 2019, Thoumazeau *et al.* 2019).

Otro aspecto clave para investigaciones futuras es el desarrollo de un índice que abarque la gran diversidad de suelos y condiciones climáticas en los que se cultiva el banano en Costa Rica (Arias *et al.* 2009).

En este sentido, se deben hacer esfuerzos en la estandarización de las metodologías de muestreo y análisis de laboratorio de los indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo, y se deben considerar herramientas estadísticas alternativas para seleccionar e interpretar los indicadores, y obtener índices (Vargas-Fernández 2024). Otras oportunidades yacen en el estudio del microbioma del suelo (Banerjee y van der Heijden 2023) y el uso de sensores *in situ*, espectroscopía, índices de vegetación (Rinot *et al.* 2019, Thoumazeau *et al.* 2019), modelado y mapeo de la calidad del suelo (Batjes *et al.* 2024).

Finalmente, en el país, una alta proporción de los suelos dedicados al cultivo fue seleccionado mediante el sistema de clasificación de la aptitud de tierras para el cultivo de banano, desarrollado por Jaramillo y Vásquez (1990). Este sistema, con un enfoque utilitario, clasifica a los suelos en cinco clases de aptitud (desde la clase I a la V), diferenciadas por su textura, acidez, profundidad efectiva, estructura, tabla de agua y topografía. La clase I corresponde a la de mayor aptitud y potencial productivo, mientras que las clases IV y V de menor aptitud se excluyen para la siembra de banano (Jaramillo y Vásquez 1990). No obstante, existen pocos estudios publicados respecto a la sostenibilidad productiva de cada una de estas clases de suelo y, aún menos, sobre cómo las características físicas, químicas y biológicas del suelo varían con el manejo del cultivo. Por lo tanto, estudiar y evaluar la calidad del suelo por medio de índices proporcionaría un complemento y una vía de actualización del sistema de clasificación tradicional. Esto permite refinar los criterios de aptitud existentes con un conjunto mínimo de indicadores que incorpore indicadores biológicos y ecológicos.

Conclusiones

La calidad del suelo es esencial para la sostenibilidad y productividad del cultivo de banano, ya que influye en propiedades físicas, químicas y biológicas que determinan el rendimiento agrícola. Sin embargo, en esta revisión, se presentaron algunas evidencias de como el modelo intensivo de monocultivo ha generado un deterioro del suelo, lo cual ha comprometido la sostenibilidad de este sistema productivo.

Las investigaciones disponibles han evidenciado vacíos importantes, especialmente, en la evaluación integral de los efectos del monocultivo sobre los procesos biológicos del suelo. Las metodologías para la evaluación de la calidad del suelo han permitido integrar indicadores químicos, físicos y biológicos adaptados a contextos específicos. Herramientas como SMAF y CND han facilitado la interpretación de estos indicadores, contribuyendo al desarrollo de índices multiparamétricos comparables. No obstante, esta revisión subraya la necesidad de avanzar hacia la estandarización de metodologías para medir indicadores y evaluar la calidad del suelo, con un enfoque holístico.

Las perspectivas sobre la realización de estudios de la calidad del suelo en el cultivo de banano en Costa Rica son prometedoras, con un amplio potencial para la estandarización de metodologías y el uso de tecnologías avanzadas, así como para contribuir con el desarrollo de un índice general de calidad de suelo, que incluya la diversidad de suelos existentes, y una mayor cantidad de indicadores biológicos, lo cual es esencial para comprender y mejorar la sostenibilidad de los suelos bananeros. Estos avances proporcionarán herramientas clave para la gestión y optimización del cultivo de banano, y servirán para complementar y mejorar el sistema de clasificación de la aptitud de tierras existente.

Literatura citada

Adriano, ML; Gutiérrez, F; Dendooven, L; Salvador-Figueroa, M. 2012. Influence of compost and liquid bioferment on the chemical and biological characteristics of soil cultivated with banana (*Musa* spp. L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 12(1). DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012000100004>

Afanador-Barajas, LN; Coca-Peña, DA; Vargas-Giraldo, AF; Bautista-Murcia, MF; Mendoza-Hernández, A; Vallejo-Quintero, VE. 2020. Evaluación de la calidad de suelos en agroecosistemas de Colombia a través de la selección de un conjunto mínimo de datos. *Colombia Forestal* 23(1). DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201x.14856>

Andrews, SS; Karlen, DL; Cambardella, CA. 2004. The Soil Management Assessment Framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal* 68(6):1945-1962. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>

Araya, M; De Waele, D. 2004. Spatial distribution of nematodes in three banana (*Musa* AAA) root parts considering two root thickness in three farm management systems. *Acta Oecologica* 26(2). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2004.03.010>

Arias, F; Mata, R; Alvarado, A; Serrano, E; Laguna, J. 2009. Relación entre la mineralogía de la fracción arcilla y la fertilidad en algunos suelos cultivados con banano en las llanuras aluviales del Caribe de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 34(2):99-111. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v34i2.3633>

Banerjee, S; van der Heijden, MG. 2023. Soil microbiomes and one health. *Nature Reviews Microbiology* 21(1):6-20. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00779-w>

Bastida, F; Zsolnay, A; Hernández, T; García, C. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147:159-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>

Batjes, NH; Calisto, L; de Sousa, LM. 2024. Providing quality assessed and standardised soil data to support global mapping and modelling (WoSIS snap-shot 2023). *Earth System Science Data* 16(10):4735-4765. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-16-4735-2024>

Bebber, DP. 2023. The long road to a sustainable banana trade. *Plants People Planet* 5(5):662-671. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp3.10331>

Bellamy, AS. 2013. Banana production systems: Identification of alternative systems for more sustainable production. *Ambio* 42(3):334-343. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0341-y>

Bezard, M; Barlagne, C; Diman, JL; Angeon, V; Morin, R; Ozier-Lafontaine, H; Andrieu, N. 2023. Codesigning innovative plantain cropping systems to support the diversity of agroecological pathways in Guadeloupe. *Agronomy for Sustainable Development* 43:28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00879-8>

Biswas, S; Singh, P; Rahaman, R; Patil, KV; De, N. 2023. Soil quality and crop productivity under 34 years old long-term rainfed rice based cropping system in an Inceptisol of subtropical India. *Frontiers in Soil Science* 3:1155712. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1155712>

Blomme, G; Dita, M; Jacobsen, KS; Vicente, LP; Molina, A; Ocimati, W; Poussier, S; Prior, P. 2017. Bacterial diseases of bananas and enset: Current state of knowledge and integrated approaches toward sustainable management. *Frontiers in Plant Science* 8:1290. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01290>

Bünemann, EK; Bongiorno, G; Bai, Z; Creamer, RE; De Deyn, G; de Goede, R; Fleskens, L; Geissen, V; Kuyper, TW; Mäder, P; Pulleman, M; Sukkel, W; van Groenigen, JW; Brussaard, L. 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120:105-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

Cantú, MP; Becker, AR; Bedano, JC; Schiavo, HF; Parra, BJ. 2009. Evaluación del impacto del cambio de uso y manejo de la tierra mediante indicadores de calidad de suelo, Córdoba, Argentina (en línea). Cuadernos Do Laboratorio Xeoloxico de Laxe 34(34):203-214. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3007652>

Castillo, LE; Martínez, E; Ruepert, C; Savage, C; Gilek, M; Pinnock, M; Solis, E. 2006. Water quality and macroinvertebrate community response following pesticide applications in a banana plantation, Limón, Costa Rica. Science of the Total Environment 367(1):418-432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.052>

Cerda, R. 2008. Calidad de suelos en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*), banano (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*) en el valle de Talamanca, Costa Rica (en línea). Tesis M. Sc. Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5551>

Chaparro, JM; Sheflin, AM; Manter, DK; Vivanco, JM. 2012. Manipulating the soil micro-biome to increase soil health and plant fertility. Biology and Fertility of Soils 48(5):489-499. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0691-4>

Cherubin, MR; Karlen, DL; Cerri, CE; Franco, AL; Tormena, CA; Davies, CA; Cerri, CC. 2016. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. PLoS ONE 11(3):e0150860. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>

CORBANA (Corporación Bananera Nacional). 2024. Estadísticas de exportación bananera. Editorial Mundo Creativo S.A. s. p.

Cornwell, E. 2014. Effects of different agricultural systems on soil quality in Northern Limón province, Costa Rica. Revista de Biología Tropical 62(3):887-897. DOI: <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i3.14062>

Culma, RA; Rodríguez, LI; Malaxechebarria, ÁM. 2017. Soil quality index in conventional and semiecological farms producing plantain (*Musa AAB Simmonds* cv. Dominic Harton) in Anolaima-Cundinamarca, Colombia. Acta Agronomica 66(4):457-465. DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v66n4.61271>

da Silva, IM; Rodrigues, S; Lima, H; Queiroz, HM; Pereira Valani, G; da Silva, AP. 2022. Visual evaluation of soil structure in organic smallholder farms in the eastern Amazon: a useful tool to assess soil quality. *Archives of Agronomy and Soil Science* 68(9):1251-1260. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1884225>

Das, P; Savani, AK; Sharma, R; Bhattacharyya, A; Malarvizhi, M; Ayesha-Ravishankar, KV; Sen, P. 2023. *Fusarium* wilt in banana: unraveling molecular aspects of host-pathogen interaction and resistance mechanism. *Vegetos* 37(4):1232-1243. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42535-023-00682-6>

Delgado, E; Rosales, F; Trejos, J; Villalobos, M; Pocasangre, L. 2010. Índice de calidad y salud de suelos para plantaciones bananeras en cuatro países de América Latina y el Caribe. *Bioagro* 22(1):53-60. Disponible en www.musalit.org/seeMore.php?id=20313

Delgado, E; Trejos, J; Villalobos, M; Martínez, G; Lobo, D; Rey, JC; Rodríguez, G; Rosales, FE; Pocasangre, LE. 2010. Determinación de un índice de calidad y salud de suelos para plantaciones bananeras en Venezuela. *Interciencia* 35(12):927-933. Disponible en www.musalit.org/seeMore.php?id=13210

Doran, JW; Parkin, TB. 1994. Defining and assessing soil quality. In *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment: Proceedings of a Symposium*, Minneapolis, MN, 1992. Soil Science Society of America. p. 3-21. DOI: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>

Durango, W; Uribe, L; Henríquez, C; Mata, R. 2015. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 39(1):59-68. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v39i1.19543>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2020. FAOSTAT: Productos agrícolas y pecuarios (QCL) (en línea). Roma, IT: FAO. Consultado el 10 de enero de 2025. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2023. Análisis del mercado 2022 (en línea). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en <https://www.fao.org/economic/est/publicaciones/es/>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2024. Towards a banana sector free of plastic contamination (en línea). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd2622en>

Florida, N; Gozme-Sulca, CA; Rengifo-Rojas, A. 2023. Modelling of alluvial soil quality and production in permanent banana Harton plantations. *Soil and Water Research* 18(3):192-203. DOI: <https://doi.org/10.17221/22/2023-SWR>

Gauggel, C; Sierra, F; Arévalo, G. 2005. The problem of banana root deterioration and its impact on production: Latin America's experience. In *Banana Root System: Towards a Better Understanding for its Productive Management: Proceedings of an International Symposium International Network for the Improvement of Banana and Plantain*. p. 251-260.

Geissen, V; Ramos, FQ; Bastidas-Bastidas, PD; Díaz-González, G; Bello-Mendoza, R; Huerta-Lwanga, E; Ruiz-Suárez, LE. 2010. Soil and water pollution in a banana production region in tropical Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 85(4):407-413. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0077-y>

Gibbs, HK; Ruesch, AS; Achard, F; Clayton, MK; Holmgren, P; Ramankutty, N; Foley, JA. 2010. Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(38):16732-16737. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0910275107>

González, H; González-Pedraza, AF; Rodríguez-Yzquierdo, G; León-Pacheco, R; Betancourt-Vásquez, M. 2021. Vigor en plantas de plátano (*Musa* AAB cv. Hartón) y su relación con características físicas, químicas y biológicas del suelo. *Agronomía Costarricense* 45(2):115-134. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v45i2.47772>

Guillén-Sánchez, C; Sandoval, J. 2018. Diversidad de poblaciones de microartropodos en suelos dedicados al cultivo de banano (*Musa* AAA). *Corbana* 44(64):175-184.

Harris, JA; Evans, DL; Mooney, SJ. 2022. A new theory for soil health. *European Journal of Soil Science* 73(4):e13292. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13292>

Henríquez, C; Uribe, L; Valenciano, A; Nogales, R. 2014. Actividad enzimática del suelo - Deshidrogenasa, β -Glucosidasa, Fosfatasa y Ureasa bajo diferentes cultivos. *Agronomía Costarricense* 38(1):43-54. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v38i1.15118>

Jadin, I; Meyfroidt, P; Lambin, EF. 2016. International trade, and land use intensification and spatial reorganization explain Costa Rica's forest transition. *Environmental Research Letters* 11(3):035005. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035005>

Janzen, HH; Janzen, DW; Gregorich, EG. 2021. The 'soil health' metaphor: Illuminating or illusory? *Soil Biology and Biochemistry* 159:108167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108167>

Jaramillo, R; Vázquez, A. 1990. Manual de procedimientos para la presentación y realización de estudios detallados de suelos y clasificación de tierras para el cultivo del banano. Asociación Bananera Nacional. s. p.

Juhos, K; Szabó, S; Ladányi, M. 2016. Explore the influence of soil quality on crop yield using statistically derived pedological indicators. *Ecological Indicators* 63:366-373. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.029>

Karlen, DL; Mausbach, MJ; Doran, JW; Cline, RG; Harris, RF; Schuman, GE. 1997. Soil Quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61(1):4-10. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>

Karlen, DL; Veum, KS; Sudduth, KA; Obrycki, JF; Nunes, MR. 2019. Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. *Soil and Tillage Research* 195:104365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>

Kibblewhite, MG; Ritz, K; Swift, MJ. 2008. Soil health in agricultural systems. *In Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363:104365. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>

Lal, R. 1998. Soil quality and agricultural sustainability. Sleeping Bear Press, Inc. s. p.

Larson, W; Pierce, F. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. *International Board Soil Research Management*. s. p.

ledo, A; Smith, P; Zerihun, A; Whitaker, J; Vicente-Vicente, JL; Qin, Z; McNamara, NP; Zinn, YL; Llorente, M; Liebig, M; Kuhnert, M; Dondini, M; Don, A; Diaz-Pines, E; Datta, A; Bakka, H; Aguilera, E; Hillier, J. 2020. Changes in soil organic carbon under perennial crops. *Global Change Biology* 26(7):4158-4168. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15120>

Londoño, S. 2006. Caracterización de nemátodos de vida libre como bioindicadores de calidad y salud de suelos bananeros en Costa Rica (en línea). Tesis M. Sc. Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Disponible en <http://agriperfiles.agrider.net/individual/n200378>

Marion, LF; Schneider, R; Cherubin, MR; Colares, GS; Wiesel, PG; da Costa, AB; Lobo, EA. 2022. Development of a soil quality index to evaluate agricultural cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research* 218:105293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105293>

Martínez-Solórzano, GE; Rey-Brina, JC. 2021. Bananos (*Musa AAA*): Importancia, producción y comercio en tiempos de Covid-19. *Agronomía Mesoamericana* 32(3):1034-1046. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v32i3.43610>

Mata, R; Rosales, A; Sandoval, D; Vindas, E; Alemán, B. 2022. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica, 2022. Esc. 1:200.000 [Mapa]. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas. <http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>

Melgar, C; Geissen, V; Cram, S; Sokolov, M; Bastidas, P; Ruiz Suárez, LE; Ramos, FJ; Sanchez, AJ. 2008. Pollutants in drainage channels following long-term application of Mancozeb to banana plantations in southeastern Mexico. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171(4):597-604. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200700171>

Miner, GL; Delgado, JA; Ippolito, JA; Stewart, CE. 2020. Soil health management practices and crop productivity. *Agricultural and Environmental Letters* 5(1):e20023. DOI: <https://doi.org/10.1002/ael2.20023>

Moebius-Clune, BN; Moebius-Clune, DJ; Gugino, BK; Idowu, OJ; Schindelbeck, RR; Ristow, AJ; van Es, HM; Thies, JE; Shayler, HA; McBride, MB; Wolfe, DW; Abawi, GS. 2016. Comprehensive assessment of soil health – the Cornell framework manual (online). Cornell University. Disponible en <https://soilhealth.cals.cornell.edu/manual/>

Mukherjee, A; Lal, R. 2014. Comparison of soil quality index using three methods. PLoS ONE 9(8):e105981. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981>

Noar, RD; Thomas, E; Daub, ME. 2022. Genetic characteristics and metabolic interactions between *Pseudocercospora fijiensis* and banana: Progress toward controlling Black Sigatoka. Plants 11(7):948. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11070948>

Obando-Bustos, V. 2021. Metales traza (As, Cd, Co, Cr, Ni, Pb) en plantaciones bananeras de Costa Rica y efecto del cromo en el crecimiento y la absorción de nutrientes en plantas de banana (*Musa AAA*) (en línea). Tesis M. Sc. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. Disponible en <https://hdl.handle.net/10669/84420>

Olivares, BO; Calero, J; Rey, JC; Lobo, D; Landa, BB; Gómez, JA. 2022. Correlation of banana productivity levels and soil morphological properties using regularized optimal scaling regression. Catena 208:105718. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105718>

Ortega-Bonilla, RM; Torres-Asuaje, P; Segura-Mena, R; Echeverría-Beirute, F; Uribe-Lorío, L. 2022. *Bacillus cereus* isolates on the growth and nitrogen content in banana (*Musa AAA*). Agronomía Mesoamericana 33(3):49614. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.49614>

Pattison, AB; Moody, PW; Badcock, KA; Smith, LJ; Armour, JA; Rasiah, V; Cobon, JA; Gulino, LM; Mayer, R. 2008. Development of key soil health indicators for the Australian banana industry. Applied Soil Ecology 40(1):155-164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.04.002>

Rasiah, V; Armour, JD; Moody, PW; Pattison, AB; Lindsay, S; Florentine, S. 2009. Characterising and improving the deteriorating trends in soil physical quality under banana. Australian Journal of Soil Research 47(6):574-584. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR08256>

Revelo-Tovar, H. 2018. Evaluación de un índice bio-indicador de calidad de suelos adaptado al trópico húmedo. Tesis Lic. Costa Rica, Universidad EARTH. s. p.

Rey, J; Martínez, G; Rodríguez, G; Lobo, D; Delgado, E; Trejos, J; Pocasangre, L; Rosales, F. 2009. Aspectos sobre calidad y salud de suelos bananeros en Venezuela (en línea). Producción Agropecuaria 2(1):52-55. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/261287616_Aspectos_sobre_calidad_y_salud_de_suelos_bananeros_en_Venezuela

Rinot, O; Levy, GJ; Steinberger, Y; Svoray, T; Eshel, G. 2019. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Science of the Total Environment* 648:1484-1491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259>

Rosales, FE; Pocasangre, LE; Trejos, J; Serrano, E; Peña, W. 2010. Guía de diagnóstico de la calidad y salud de suelos (en línea). Montpellier, Francia, Bioversity International. Disponible en www.musalit.org/seeMore.php?id=12073

Sandoval, J. 2023. Cosmovisión Cabécar del banano. Litograffía e Imprenta Segura Hermanos. s. p.

Sarmiento Reyes, EB; Fandiño Zabala, SA; Gómez Echeverri, LF. 2018. Índices de calidad del suelo (en línea). Una revisión sistemática. *Ecosistemas* 27(3):130-139. Disponible en <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/1598>

Schreefel, L; Creamer, RE; van Zanten, HH; de Olde, EM; Koppelmäki, K; Debernardini, M; Schulte, RP. 2024. How to monitor the ‘success’ of agricultural sustainability: A perspective. *Global Food Security* 43:100810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2024.100810>

Schreefel, L; Schulte, RP; de Boer, IJ; Schrijver, AP; van Zanten, HH. 2020. Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security* 26:100404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>

Segura, RA; Serrano, E; Pocasangre, L; Acuña, O; Bertsch, F; Stoorvogel, JJ; Sandoval, JA. 2015. Chemical and microbiological interactions between soils and roots in commercial banana plantations (*Musa* AAA, cv. Cavendish). *Scientia Horticulturae* 197:66-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.10.028>

Segura, RA; Stoorvogel, JJ; Samuels, JZ; Sandoval, JA. 2018. Managing the interactions between soil abiotic factors to alleviate the effect of *Fusarium* wilt in bananas. *Acta Horticulturae* 1196. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1196.19>

Serrano, E. 2005. Relationship between functional root content and banana yield in Costa Rica. *In* Turner, DW; Rosales, FE (eds.). Banana root system: Towards a better understanding for its productive management (p. 25-34). International Network for the Improvement of Banana and Plantain. <https://hdl.handle.net/10568/104730>

Serrano, E; Sandoval, J; Pocasangre, L; Rosales, F; Delgado, E. 2006. Importancia de los indicadores fisicoquímicos en la calidad del suelo para la producción sustentable del banano en Costa Rica. *Proceedings XVII Reunião Internacional da Associação para a Cooperação nas Pesquisas sobre Banana no Caribe e na América Tropical (ACORBAT)* p. 207-221.

Soil Survey Staff. 2014. Claves para la taxonomía de suelos. 2 ed. Washington, D.C., EE. UU., Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture (USDA). 372 p.

Ssali, H; McIntyre, BD; Gold, CS; Kashaija, IN; Kizito, F. 2003. Effects of mulch and mineral fertilizer on crop, weevil and soil quality parameters in highland banana. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65:141-150. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022184927506>

Staver, C. 2018. Good agricultural practices: an end point or a starting point for more sustainable banana production? *In* Kema, G; Drenth, A (eds.). Achieving sustainable cultivation of bananas: Cultivation techniques. Burleigh Dodds Science Publishing. DOI: <https://doi.org/10.19103/as.2017.0020.14>

Stoorvogel, JJ; Segura, RA. 2018. Nutrition and soil management in banana cultivation. *In* Kema, G; Drenth, A (eds.). Achieving sustainable cultivation of bananas: Cultivation techniques. Burleigh Dodds Science Publishing Limited. DOI: <https://doi.org/10.19103/as.2017.0020.16>

Thoumazeau, A; Bessou, C; Renevier, MS; Panklang, P; Puttaso, P; Peerawat, M; Heepngoen, P; Polwong, P; Koonklang, N; Sdoodee, S; Chantuma, P; Lawongsa, P; Nimkingrat, P; Tha-ler, P; Gay, F; Brauman, A. 2019. Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part B: investigating the impact of land management of rub-ber plantations on soil quality with the Biofunctool® index. *Ecological Indicators* 97:429-437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.028>

Torres-Asuaje, PE; Cotes Prado, AM; Echeverría Beirute, F; Blanco Rojas, FA; Sandoval Fernández, JA; Segura Mena, RA; Palomares Rius, JE. 2023. Ensilaged biostimulants promoting root health and control of *Radopholus similis* in banana (*Musa AAA*) cv. Grande Naine. European Journal of Plant Pathology 165(3): 465-474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-022-02617-4>

Valverde-Araya, E; Ortega-Bonilla, R; González-Zúñiga, M; Sandoval-Solís, JL; Segura-Mena R. 2024. Coberturas vivas para recuperar y mantener la calidad y la salud del suelo en la producción de banano (*Musa AAA*). Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia 1(1):14. DOI: <https://doi.org/10.62498/ARTC.2414>

Van Asten, P; Gold, C; Okech, S; Gaidashova, S; Tushemereirwe, W; de Waele, D. 2004. Soil quality problems in East African banana systems and their relation with other yield loss factors. InfoMusa 13(2):20-25. <https://hdl.handle.net/10568/96412>

van Es, HM; Karlen, DL. 2019. Reanalysis validates soil health indicator sensitivity and correlation with long-term crop yields. Soil Science Society of America Journal 83(3):721-732. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.09.0338>

Vaquero, R. 2003. Soil physical properties and banana root growth. In Turner, DW; Rosales, FE (eds.). Banana root system: Towards a better understanding for its productive management (online). International Network for the Improvement of Banana and Plantain. p. 125-131. Disponible en <https://hdl.handle.net/10568/104730>

Vargas-Fernández, JP. 2024. Evaluación de la calidad de suelos de alta y baja productividad en una finca bananera bajo manejo convencional en el Caribe de Costa Rica (en línea). Tesis M.Sc. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. Disponible en <https://hdl.handle.net/10669/100103>

Varma, V; Bebber, DP. 2019. Climate change impacts on banana yields around the world. Nature Climate Change 9(10):752-757. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0559-9>

Veldkamp, E; Weitz, AM; Staritsky, IG; Huisng, EJ. 1992. Deforestation trends in the Atlantic Zone of Costa Rica: A case study. Land Degradation Development 3(2):71-84. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3400030202>

Vellema, S; Jansen, K. 2018. Sustainable banana cultivation: from standards to multiple solutions. In Kema, G; Drenth, A (eds.). Achieving sustainable cultivation of bananas: Cultivation techniques. Burleigh Dodds Science Publishing. DOI: <https://doi.org/10.19103/as.2017.0020.24>

Villarreal, J; Pla-Sentis, I; Agudo-Martínez, L; Villaláz-Pérez, J; Rosales, F; Pocasangre, L. 2013. Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 24(2):301-315. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v24i2.12530>

Wallace, HA. 1910. Relation between livestock farming and the fertility of the land. Iowa State College. Retrospective Theses and Dissertations. 98. DOI: <https://doi.org/10.31274/rtd-180813-7404>

Wilson, HA; Browning, GM. 1945. Soil aggregation, yields, runoff and erosion as affected by cropping systems. *Soil Science Society of America* 10:51-57. <https://doi.org/10.2136/sssaj1946.03615995001000C00010x>

Zhong, S; Mo, Y; Guo, G; Zeng, H; Jin, Z. 2014. Effect of continuous cropping on soil chemical properties and crop yield in banana plantation. *Journal of Agricultural Science and Technology* 16(1):239-250. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-3022-en.html>

Zhong, S; Sheng, Z; Zheng, L; Zheng, X; Yang, Y; Xiao, D; Ai, B; Zeng, H. 2021. Impacts of 25-year rotation and tillage management on soil quality in a semi-arid tropical climate. *Chilean journal of agricultural research* 81(1):3-13. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-58392021000100003>

Zúñiga, J; Serrano, E; González, M; Sandoval, J. 2009. El deterioro de la calidad y salud de los suelos cultivados con banano causa disminución de la productividad. En *Informe anual de investigaciones*. San José, Costa Rica, CORBANA S.A. e254210.

