



AGRONOMÍA COSTARRICENSE

REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost>




Artículo científico


Calidad de suelo en la región Huetar Atlántica de Costa Rica: una comparación entre dos condiciones de producción de banano y un bosque secundario*


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


*Este trabajo forma parte de la tesis de maestría del primer autor.

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

¹Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Laboratorio de Suelos y Foliare, Centro de Investigaciones Agronómicas. 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, Escuela de Agronomía, Sede Guanacaste, Liberia, Costa Rica. 

DOI: <https://doi.org/10.15517/9wx1ph53>

Recibido el 02 de setiembre del 2024; Aceptado el 26 de febrero del 2025.

Resumen

Introducción. La disminución de la calidad del suelo afecta la sostenibilidad de la producción de banano. Mejorar factores limitantes del suelo aumenta su calidad y asegura la sostenibilidad de la producción. **Objetivo.** Comparar la calidad del suelo en condiciones de alta (AP) y baja (BP) productividad, y un bosque secundario maduro (BM) en la región Huetar Atlántica de Costa Rica, mediante indicadores e índices de calidad. **Materiales y métodos.** Se analizaron indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo, y biométricos de la planta (ICS). La evaluación de la calidad incluyó: conformación de conjuntos de indicadores, interpretación y asignación de puntajes, e integración en índices de calidad (InCS), por medio de un enfoque aditivo simple. Los conjuntos de indicadores utilizados fueron un conjunto total (TDS) y dos reducidos, por análisis de componentes principales (MDS_{PCA}) y criterio experto (MDS_{EO}). Las metodologías SMAF y CND interpretaron los ICS, asignando puntajes entre 0 y 1 según condiciones locales del cultivo. **Resultados.** Los InCS mostraron mejor calidad de suelo en AP y BM que en BP. BP presentó compactación hasta 100 cm y mayores concentraciones de macro y micronutrientes, pero menor carbono orgánico total y pH. BM y AP mostraron mayor actividad biológica que BP. AP destacó en indicadores biométricos y del sistema radical, mientras BP destacó en concentración foliar de Ca y Mg.

Conclusiones. Los conjuntos MDS_{PCA} y MDS_{EO} fueron más sensibles que el TDS para diferenciar la calidad del suelo, por menor redundancia y subjetividad. Las metodologías SMAF y CND fueron consistentes, pero su aplicación depende de las condiciones específicas y la disponibilidad de datos regionales. El enfoque integral utilizado en el presente trabajo optimizó la evaluación de la calidad del suelo y apoya la sostenibilidad del cultivo de banano.

Palabras clave: indicadores; índices de calidad de suelo; banano; productividad.

Scientific article

Abstract

Soil quality in the Huetar Atlantic region of Costa Rica: A comparison between two banana production conditions and a secondary forest

Introduction. The decline in soil quality affects the sustainability of banana production. Improving limiting soil factors increases its quality and ensures the sustainability of production. **Objective.** To compare soil quality under high (AP) and low (BP) productivity conditions, and a mature secondary forest (BM) in the Huetar Atlántica region of Costa Rica, using soil quality indicators and indexes.

Materials and methods. Chemical, physical, and biological soil indicators, as well as plant biometrics (ICS), were analysed. The quality assessment included: the formation of indicator sets, interpretation and score assignment, and integration into soil quality indices (InCS) by a simple additive approach. The indicator sets assessed were a total set (TDS) and two reduced sets, based on principal component analysis (MDS_{PCA}) and expert criteria (MDS_{EO}). The SMAF and CND methodologies interpreted the ICS, assigning scores between 0 and 1 based on local cultivation conditions. **Results.** The InCS indicated better quality in AP and BM than in BP. BP showed compaction up to 100 cm depth and higher concentrations of macro and micronutrients, but lower total organic carbon and pH. BM and AP showed higher biological activity than BP. AP excelled in biometric and root system indicators, while BP stood out for foliar concentrations of Ca and Mg.

Conclusions. The MDS_{PCA} and MDS_{EO} sets were more sensitive than the TDS in differentiating soil quality, due to lower redundancy and subjectivity. The SMAF and CND methodologies were consistent, but their application depends on specific conditions and the availability of regional data. The integrated approach used in this study optimized soil quality assessment and supports the sustainability of banana cultivation.

Keywords: indicators; soil quality indexes; bananas; productivity.

Introducción

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). En total, se han registrado 12 millones de hectáreas de suelos tropicales y subtropicales del mundo dedicadas a diversas variedades de este cultivo (Stoorvogel y Segura 2018). El cultivo de banano se desarrolla en 42 512 hectáreas del territorio costarricense y produce 100 millones de cajas de 18,14 kg de banano anuales (CORBANA 2024), lo que posiciona a Costa Rica entre los principales exportadores del mundo. Históricamente, esta actividad ha tenido un impacto significativo en la economía de la Región Huetar Atlántica y a nivel nacional (CORBANA 2024).

La actividad bananera en el país comenzó hace ciento cincuenta años y se orientó hacia un modelo de monocultivo extensivo (Goluboay y Vega 1988). Durante la década de 1990, el programa de fomento bananero impulsó un incremento en el área cultivada, debido al establecimiento de plantaciones destinadas a satisfacer la creciente demanda de fruta en los principales mercados internacionales (Jadin *et al.* 2016, Gauggel *et al.* 2005). La expansión de esta actividad agrícola se realizó, principalmente, a expensas de tierras cubiertas por bosques (Gibbs *et al.* 2010). Las plantaciones adoptaron un modelo de producción intensiva, caracterizado por un alto uso de insumos y la implementación de técnicas orientadas a maximizar la productividad (Bellamy 2013). Además, se establecieron plantaciones en suelos de baja aptitud agrícola, a menudo basándose en estudios de suelo inadecuados (Gauggel *et al.* 2005). Estas prácticas contribuyeron significativamente a la degradación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Powers 2004, Guimarães *et al.* 2014).

Algunos estudios identificaron un patrón de disminución en la productividad, pocos años después del aumento del área sembrada en 1990, tanto en Costa Rica como en otros países de América Latina. Esta disminución se atribuyó, principalmente, a la degradación del suelo (Rosales *et al.* 2008). En Costa Rica, se reportó una reducción en la productividad de plantaciones de banano de, aproximadamente, 100-300 cajas ha⁻¹ año⁻¹, tras siete años de producción continua (Zúñiga *et al.* 2009). En Panamá, entre 2003 y 2013, se observó una disminución de 1000 cajas ha⁻¹ año⁻¹ (Villarreal Núñez *et al.* 2013), mientras que, en Venezuela, el rendimiento nacional mostró una reducción del 46% entre 1997 y 2005 (Delgado *et al.* 2010).

La calidad de un suelo se puede describir por medio de indicadores (ICS), que hacen referencia a procesos en los que participan parámetros físicos, químicos y biológicos, influenciados por los factores formadores y el manejo del suelo (Bünemann *et al.* 2018). Estos procesos le permiten al suelo funcionar dentro de sus límites ecosistémicos y mantener la productividad biológica y la calidad del ambiente (Doran y Parkin 1994). La contribución multiparamétrica de un conjunto de indicadores reducido (MDS por sus siglas en inglés) se resume en un índice de calidad de suelo (InCS), una variable numérica que permite monitorear el estado la calidad del suelo en el tiempo (Mukherjee y Lal 2014). En ese sentido, mantener o mejorar la calidad del suelo es fundamental para incrementar y asegurar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Marion *et al.* 2022, Biswas *et al.* 2023). El aumento en la calidad del suelo ha sido relacionado con la atención y mejora de factores limitantes que conducen a mejores rendimientos (Miner *et al.* 2020).

La investigación sobre la calidad del suelo en sistemas de producción de banano ha avanzado en regiones como China, Australia, África e Irán (Mulat *et al.* 2021, Pattison *et al.* 2008, Rasiah *et al.* 2009, Samaei *et al.* 2022, Walker *et al.* 2022, Zhong *et al.* 2014, Zhong *et al.* 2021), así como en América, con estudios destacados en Venezuela, Colombia, Panamá y Brasil (Afanador *et al.* 2020, Delgado *et al.* 2010, González *et al.* 2021, Herrera *et al.* 2017, Mello da Silva *et al.* 2021, Olivares *et al.* 2022, Rey *et al.* 2009, Villarreal Núñez *et al.* 2013). Sin embargo, sus resultados no son directamente aplicables a las condiciones de Costa Rica, debido a diferencias en la metodología utilizada, cultivares, climas y tipos de suelo. En el ámbito local, los trabajos de Cerda (2008) y Cornwell (2014) han comparado sistemas agrícolas, incluyendo el banano, mientras que Acuña *et al.* (2006) y Londoño (2006) analizaron indicadores químicos, físicos y biológicos en fincas comerciales. No obstante, estas investigaciones, realizadas hace más de una década, no ofrecen un análisis integral del impacto del manejo del cultivo en la calidad del suelo ni abordan la sostenibilidad del potencial productivo y su posible recuperación mediante prácticas agrícolas sostenibles.

Ante las evidencias de la relación del deterioro de la calidad del suelo en plantaciones de banano y su productividad, surge la necesidad de generar conocimiento actualizado que permita evaluar la sostenibilidad de esta actividad. Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo fue comparar la calidad del suelo en condiciones de alta (AP) y baja (BP) productividad, y un bosque secundario maduro (BM) en la región Huetar Atlántica de Costa Rica, mediante indicadores e índices de calidad.

Materiales y métodos

Sitios de estudio

Los sitios estudiados en el presente trabajo se ubicaron en Tortuguero, distrito Cariari y cantón Pococí, provincia de Limón, en una finca dedicada a la producción de banano para exportación, propiedad de Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte S.A (CDADM) (10.498764 N; 83.632668 O) (**Figura 1**). Los tres sitios se ubicaron en la zona de vida de bosque muy húmedo tropical (bmh-T) (Holdridge 1987). Las elevaciones en la zona oscilaron entre 0-30 msnm, el rango de precipitación anual fue de 5000-6000 mm, en promedio 263 días con lluvia al año, y la temperatura promedio anual fue de 26 °C (21-32 °C) (Rojas 2011).

Con respecto al promedio nacional (CORBANA 2024) y de acuerdo con un histórico de los últimos seis años, el área de finca Tortuguero definida como una condición de alta productividad (AP) produjo en promedio 2433 cajas ha⁻¹ año⁻¹ (2178 - 2916 cajas ha⁻¹ año⁻¹), mientras que, en la condición de baja productividad (BP), produjo en promedio 2144 cajas ha⁻¹ año⁻¹ (1966 - 2296 cajas ha⁻¹ año⁻¹). Ambas áreas fueron sembradas en 1992 con *Musa* (Grupo AAA) 'Valery' (subgrupo Cavendish), mientras que el área de bosque fue clasificada como un bosque secundario maduro (BM), sin intervención desde hace 30 años (SINIGIRH 2023). Los suelos en cada área fueron clasificados a nivel de suborden como Dystric Fluventic Eutrudepts en BP, y Andic Dystrudepts tanto en AP como en BM (Schoeneberger *et al.* 2012, Soil Survey Staff 2014).

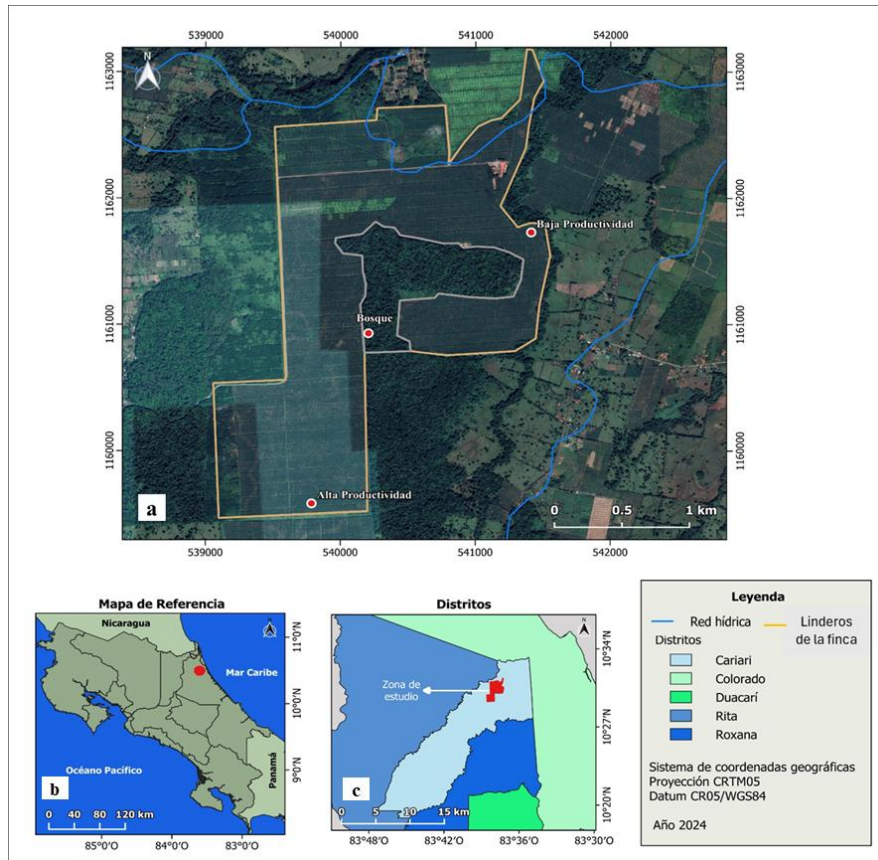


Figura 1. a) Ubicación de los sitios de estudio en finca Tortuguero. b) Localización de la finca en la provincia de Limón y c) en el distrito de Cariari.

Figure 1. a) Location of the study sites on the Tortuguero farm. b) Location of the farm in the province of Limón and c) in the district of Cariari.

Recolección de muestras y trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó en octubre y noviembre del 2023. En cada condición de producción de banano (AP y BP), se muestreó un área de aproximadamente 1,5 ha, mediante un recorrido en zigzag. En ambas condiciones, el área de muestreo se conformó con 15 “boquetes”, de casi 1000 m² cada uno, mientras que en BM se seleccionó un polígono de 4,5 ha, de alrededor de 300 m de largo por 150 m de ancho. En las áreas, se recolectaron 25 muestras de suelo, cada una compuesta por tres submuestras. La separación entre muestras fue de aproximadamente 20-60 m en AP y BP, y de 10-12 m en BM, y la separación entre submuestras de 3 m. Las muestras se obtuvieron con un barreno de taladro, a una profundidad de 0-30 cm.

En las áreas de AP y BP, las muestras de suelo se recolectaron en la banda de fertilización, frente al hijo de sucesión de la planta (Ortega *et al.* 2019), mientras que en BM fueron tomadas en áreas libres de vegetación para evitar la interferencia de raíces. En los tres sitios, algunas variables químicas y físicas se midieron en muestras de suelo tomadas a mayor profundidad en una fosa de observación de 2 x 2 x 2 m.

Las variables biométricas se midieron en 100 plantas de AP y 100 plantas de BP, aledañas al punto de recolección de la muestra de suelo. Las hojas funcionales, circunferencia y altura del hijo de sucesión fueron medidas en plantas con inflorescencia visible (al momento de la floración) y en plantas con fruta de 11 o 12 semanas desde el momento de poner la bolsa plástica para proteger el racimo (edad de cosecha) (Ortega *et al.* 2019). El conteo de manos por racimo se hizo en campo, con el racimo colgado de la planta y de acuerdo con la metodología descrita por Vargas *et al.* (2010).

La determinación del estado nutricional de la planta se realizó en la hoja número tres, al seleccionar la sección central de cada semi limbo, sin incluir la vena central, en plantas en edad de floración (Martin-Prével 1974) e interpretados con base en los niveles óptimos para banano (Martin-Prével *et al.* 1988). En cada sitio, se tomaron 25 muestras de tejido foliar, de acuerdo con el recorrido descrito en el muestreo de suelo. La recolección de muestras de indicadores del sistema radical de la planta se realizó con la metodología descrita por Vargas y Araya (2018). En cada sitio se tomaron 25 muestras de raíz en la interfase madre-hijo de sucesión. Se utilizó un palín para realizar un hoyo de 15 cm de largo por 15 cm de ancho por 30 cm de profundidad (equivalente a un volumen de 6750 cm³ de suelo), y se colectaron todas las raíces presentes.

Análisis químicos, físicos y biológicos

Las concentraciones de nutrientes en suelo se determinaron en el laboratorio químico de CORBANA, con la solución extractora Mehlich III (Mehlich 1984) y la técnica ICP/OES. El pH y conductividad eléctrica se determinaron en agua (FAO 2021). La acidez y aluminio intercambiable se determinaron en KCl 1M y por medio de titulación (Grant 1982, Henríquez y Cabalceta 2012). Para determinar el carbono orgánico total, se utilizó la metodología de combustión seca (Elementar Analysensysteme GmbH 2011). Los indicadores físicos del suelo se determinaron en el Laboratorio de Recursos Naturales, del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. La resistencia del suelo a la penetración se midió en campo con un penetrómetro marca Eijkelkamp® modelo 06.01 SB, la densidad aparente con cilindros metálicos, y la retención de humedad en dos puntos, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (CC y PMP respectivamente) (Forsythe 1985). La textura del suelo se determinó por medio del método del hidrómetro y calibrado por temperatura (Burt 2014).

La estabilidad de agregados se determinó con el método de tamizado en húmedo (Kemper y Rosenau 1986), con un Wet sieving apparatus® (Royal Eijkelpkamp 2024). El análisis de los nutrientes en tejido foliar se realizó en el laboratorio químico de CORBANA, a través de digestión en microondas y determinación en ICP/OES (Sparks 1996), mientras que el nitrógeno se determinó por combustión seca (Elementar Analysensysteme GmbH 2011). El conteo de las poblaciones de nemátodos fitoparásitos y saprofitos en la raíz se realizó en el laboratorio de Nematología de CDADM (Araya 2002).

El carbono de la biomasa y respiración microbiana se determinaron por medio de la metodología descrita por Vance *et al.* (1987) y Anderson (1982), respectivamente. La actividad enzimática de la Deshidrogenasa y la β -glucosidasa, se determinó de acuerdo con la metodología descrita por (Henríquez *et al.* 2014). Estos indicadores se determinaron en el Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. La huella metabólica de la comunidad microbiana sobre sustratos de carbono se determinó con Biolog®EcoPlate™ (Biolog Inc. USA) (Luan *et al.* 2020), en el Centro de Investigación en Biología Celular y Molecular de la Universidad de Costa Rica. El metabolismo microbiano de cada sustrato se expresó como desarrollo promedio del color del pozo (AWCD por sus siglas en inglés) a las 72 h, leído como absorbancia a una longitud de onda de 590 nm con BIOLOG-Microstation™. A partir de AWCD, se calculó el índice de diversidad de Shannon (H'), el índice de riqueza de Simpson (S), y la similitud (E), relacionados con la cantidad de sustratos de carbono que la comunidad puede degradar. Para la determinación de S , se utilizó el total de pozos con una densidad óptica $\geq 0,25$ (Chou *et al.* 2017).

Evaluación de la calidad del suelo

La evaluación de la calidad del suelo se realizó en tres pasos: 1) conformación de los conjuntos de indicadores de la calidad del suelo (ICS), 2) interpretación de los ICS, y 3) integración en índices de la calidad del suelo (InCS) (**Figura 2**). Sin embargo, los ICS fueron preseleccionados por su relación con las funciones del suelo, sensibilidad al manejo y relevancia para el cultivo (Karlen *et al.* 1997, Seybold *et al.* 2018, Bünemann *et al.* 2018). En el primer paso, se conformaron tres conjuntos de indicadores: uno que utilizó el total (TDS); uno reducido por análisis de componentes principales (MDS_{PCA}); y el último, reducido por criterio de expertos y revisión de literatura (MDS_{EO}).

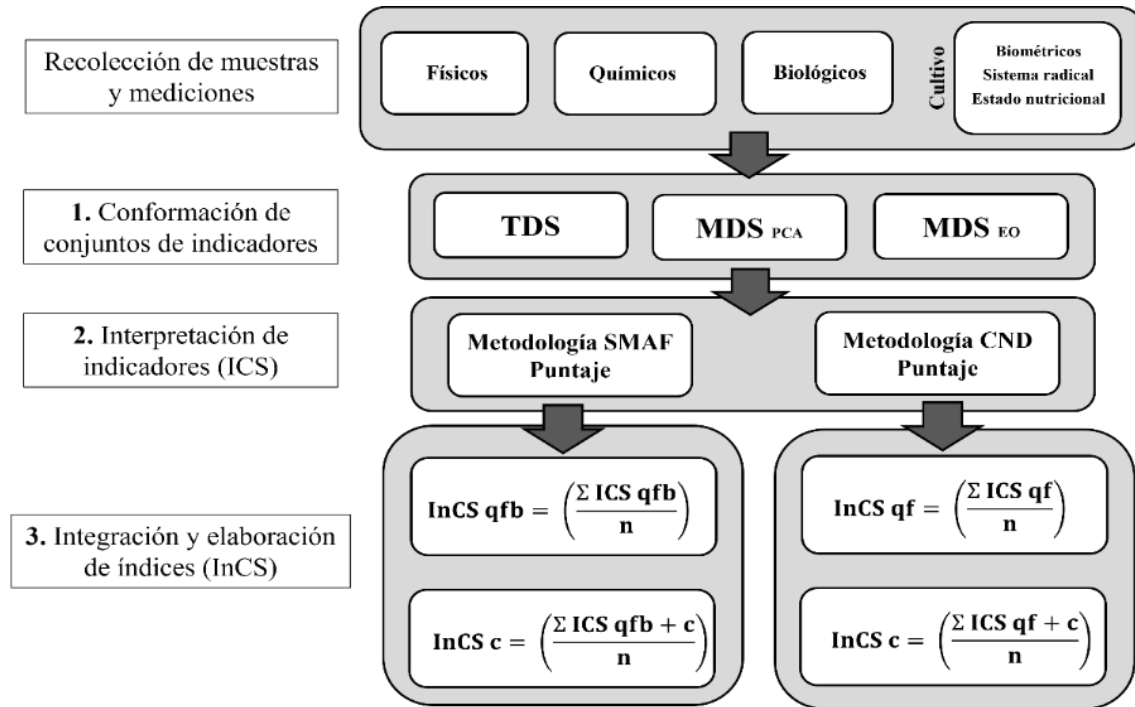


Figura 2. Pasos para la evaluación de la calidad de suelo utilizados en el presente trabajo. TDS: conjunto total de indicadores. MDS_{PCA}: conjunto de indicadores reducido por análisis de componentes principales. MDS_{EO}: conjunto de indicadores reducido por criterio de expertos y revisión de literatura. ICS: indicadores de la calidad del suelo. SMAF: Marco de evaluación del manejo de suelos. CND: Distribución Normal Acumulativa. InCS: índice de calidad del suelo. InCS_{qfb}: índice de calidad obtenido con indicadores químicos, físicos y biológicos. InCS_{qf}: índice de calidad obtenido con indicadores químicos y físicos. InCS_c: índice de calidad obtenido con indicadores químicos, físicos, biológicos, biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta. n: número de ICS.

Figure 2. Steps for the soil quality assessment used in the present work. TDS: total set of indicators. MDS_{PCA}: set of indicators reduced by principal component analysis. MDS_{EO}: set of indicators reduced by expert criteria and literature review. ICS: soil quality indicators. SMAF: Soil Management Assessment Framework. CND: Cumulative Normal Distribution. InCS: soil quality index. InCS_{qfb}: quality index obtained with chemical, physical and biological indicators. InCS_{qf}: quality index obtained with chemical and physical indicators. InCS_c: quality index obtained with chemical, physical, biological, biometric, root system and nutritional status indicators of the plant. n: number of ICS.

En el segundo paso, la interpretación de los ICS se realizó mediante dos metodologías: el Marco de evaluación del manejo de suelos (SMAF por sus siglas en inglés) (Andrews *et al.* 2004) y la Distribución Normal Acumulativa (CND por sus siglas en inglés) (Moebius-Clune *et al.* 2016). En ambas metodologías, la interpretación de los ICS y la asignación del puntaje a cada uno de ellos se hizo mediante ecuaciones no lineales: asíntota superior (AS) descrito en la ecuación 1, asíntota inferior (Ai) descrito en la ecuación 2, o curva Gaussiana (G), con la utilización de ambas ecuaciones (Marion *et al.* 2022).

$$\text{Puntaje (As)} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{B-UB}{x-UB}\right)^S\right]}$$

Ecuación 1

$$\text{Puntaje (Ai)} = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{B-LB}{x-LB}\right)^S\right]}$$

Ecuación 2

En las ecuaciones 2 y 3, **Puntaje** corresponde al valor adimensional entre 0 y 1, **a** es el puntaje máximo = 1, **B** es un valor base, donde el puntaje es 0,5, **LB** es el límite inferior, **UB** es el límite superior, **x** es el valor medido para el indicador de suelo, y **S** es la pendiente de la ecuación que es -2,5.

La metodología SMAF consideró los niveles óptimos y límites descritos para los ICS en el cultivo de banano (**Tabla 1**). Para utilizar la metodología CND, se verificó el comportamiento normal de los ICS disponibles en la base de datos del mapa de suelos de Costa Rica (MSCR) (Mata *et al.* 2022) y los registros históricos de CDADM, a través de una prueba de normalidad. En caso contrario, se realizó la transformación respectiva, mediante RStudio versión 2023.12.0.369 (R Studio Team 2015). Posteriormente, se seleccionaron los datos correspondientes al orden y suborden de los suelos clasificados para este estudio a una profundidad de 0-30 cm. Después de este paso, se procedió a obtener la media y la desviación estándar de cada ICS (**Tabla 2**). Tanto MSCR como CDADM contenían datos de ICS químicos, físicos, biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta, pero no biológicos.

Tabla 1. Tipo de ecuación utilizada para interpretar los indicadores de acuerdo con la metodología SMAF.**Table 1.** Type of equation used to interpret the indicators according to the SMAF methodology.

Indicador	Unidad	Ecuación	LT	UT	LB	UB	PO	Referencia
pH	Sin unidades	G	4,9	6,55	4,5	7	5,5	
AI	cmol(+) L ⁻¹	Ai	0,01	2,17	0	1,5	-	
CE	Ms cm ⁻¹	Ai	0,03	0,55	0	4	-	
Na	mg*L-l	Ai	17,2	102	0	2000	-	
Ca	cmol(+) L ⁻¹	As	1,77	14,1	5	20	-	
Mg	cmol(+) L ⁻¹	As	0,64	6,66	2	10	-	
K	cmol(+) L ⁻¹	As	0,13	3,15	0,5	1,5	-	López y Espinoza (1995) y Martin-Prével <i>et al.</i> (1988)
P	mg L ⁻¹	As	1	72	19	40	-	
Cu	mg L ⁻¹	As	0,9	13,9	1	5	-	
Zn	mg L ⁻¹	As	0,1	19,9	1	6	-	
B	mg L ⁻¹	As	0,01	1,11	0,2	1	-	
Fe	mg L ⁻¹	G	67	373	50	150	100	
Mn	mg L ⁻¹	G	6	93	15	50	30	
COT	%	As	1,06	5,05	1	3	-	López y Espinoza (1995)
Arena	%	G	9	70	0	20	35	
Limo	%	G	27	71	40	73	40	Jaramillo y Vázquez (1990)
Arcilla	%	G	2	32	27	40	20	
Bd	g cm ⁻³	Ai	0,4	1,1	0,6	1,5	-	Vaquero (2003)
RSP	MPa	Ai	0,4	1,3	0	1,3	-	Vaquero (2003)
RSSP	MPa	Ai	0,7	2,3	0	1,3	-	
Est.Agreg	%	As	47	96	30	100	-	Andrews <i>et al.</i> (2004)
AD	% HV	G	2,8	64,1	-	-	20	van Wesemael <i>et al.</i> (2019)
RM	mg CO ₂ kg ⁻¹	As	15	291	20	200	-	
CBM	mg C kg ⁻¹	As	47	511	80	500	-	Durango <i>et al.</i> (2015)
AEDh	µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹	As	0.10	81.7	NR	NR	-	NR
AEBg	µg PNP g ⁻¹ h ⁻¹	As	0.08	0.10	NR	NR	-	NR
AWCD	OD 590nm	As	0,07	1,45	0,07	1,45	-	NR
DIV(H)	Sin unidades	As	2,1	3,33	2,1	3,33	-	NR
RIQ(S)	Sin unidades	As	3	29	3	29	-	NR
SIM(E)	Sin unidades	As	0,97	1,91	0,97	1,91	-	NR
RF	g planta ⁻¹	As	17	173	20	150	-	Turner y Rosales (2005)
Rsimilis	indiv/100 g	Ai	3000	16000	0	10000	-	Araya (2002) y Vargas y Araya (2018)
NemSap	indiv/100 g	As	0	2500	NR	NR	-	
N	% ebms	As	2,51	3,2	2,48	2,6	-	
P	% ebms	As	0,16	0,25	0,14	0,21	-	
Ca	% ebms	As	0,21	0,77	0,48	1	-	
Mg	% ebms	As	0,24	0,37	0,21	0,36	-	
K	% ebms	As	2,43	4,32	2,85	4	-	
S	% ebms	As	0,16	0,23	0,15	0,3	-	López y Espinoza (1995) y Martin-Prével <i>et al.</i> (1988)
Cu	mg kg ⁻¹	As	7,3	11,4	4,8	14	-	
Fe	mg kg ⁻¹	As	47	118	57	100	-	
Zn	mg kg ⁻¹	As	14	30	14	27	-	
B	mg kg ⁻¹	As	10	21	10	20	-	
Mn	mg kg ⁻¹	As	81	321	57	150	-	
APC	cm	As	160	310	150	350	-	
CPC	cm	As	68	95		90	-	
HPC	hojas planta ⁻¹	As	4	9		9	-	
APF	cm	As	120	285		250	-	González <i>et al.</i> (2021), Serrano <i>et al.</i> (2006), y Villarreal Núñez <i>et al.</i> (2013)
CPF	cm	As	66	96		90	-	
HPF	hojas planta ⁻¹	As	10	13		15	-	
MPR	manos racimo ⁻¹	As	6	9	5	9	-	

NR: no registra. AI: acidez intercambiable. CE: conductividad eléctrica. Na: sodio. Ca: calcio. Mg: magnesio. N: nitrógeno. K: potasio. P: fósforo. Cu: cobre. Zn: zinc. B: boro. Fe: hierro. Mn: manganeso. COT: carbono orgánico total. Bd: densidad aparente. RSP: Resistencia a la penetración superficial. RSSP: Resistencia a la penetración subsuperficial. Agreg. Est: Estabilidad de agregados. AD: agua disponible. % HV: porcentaje de humedad volumétrica. RM: Respiración microbiana. CBM: Carbono de la biomasa microbiana. AWCD: Desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). DIV(H): Índice Shannon-Wiener. DIV(S): Índice de Simpson. SIM: Similitud. RF: raíz funcional. Rsimilis: Radopholus similis. NemSap: nematodos saprófitos. %ebms: porcentaje en base materia seca. APC: Altura de hijo edad cosecha. CPC: Circunferencia de planta edad cosecha. HPC: Hojas por planta edad cosecha. APF: Altura de hijo edad floración. CPF: Circunferencia de planta edad floración. HPF: Hojas por planta edad floración. MPR: Manos por racimo.

Tabla 2. Tipo de ecuación utilizada para interpretar los indicadores de acuerdo con la metodología CND.

Table 2. Type of equation used to interpret the indicators according to the CND methodology.

Indicador	Unidad	Ecuación	AVE	ST DV	LT	UT	PO	Entradas*	Base de datos
pH	Sin unidades	G	5,3	0,5	3,9	7,6	5,5	2428	CDDADM y MSCR
Al	cmol(+) L ⁻¹	Ai	1	0,9	0,1	5	-	2096	CDDADM y MSCR
Ca	cmol(+) L ⁻¹	As	8,4	3,4	0,3	36	-	2248	CDDADM y MSCR
Mg	cmol(+) L ⁻¹	As	3	1,3	0	8,6	-	2248	CDDADM y MSCR
K	cmol(+) L ⁻¹	As	1,4	0,7	0,1	4,6	-	2248	CDDADM y MSCR
P	mg L ⁻¹	As	33,8	20,3	1	181	-	2248	CDDADM y MSCR
Cu	mg L ⁻¹	As	7,9	5,9	0,6	53,6	-	2238	CDDADM y MSCR
Zn	mg L ⁻¹	As	5,6	3,7	0	40,7	-	2248	CDDADM y MSCR
B	mg L ⁻¹	As	0,3	0,3	0,1	2,8	-	788	CDDADM y MSCR
Fe	mg L ⁻¹	G	266	190	28	2564	100	2248	CDDADM y MSCR
Mn	mg L ⁻¹	G	37	29	1	268	30	2235	CDDADM y MSCR
COT	%	As	3,7	1,3	0,9	10,1	-	180	CDDADM y MSCR
Arena	%	G	42,5	17,1	6	85	35	226	MSCR
Limo	%	G	22,2	10,9	7	60,4	40	226	MSCR
Arcilla	%	G	37	17,1	5	72	20	226	MSCR
Bd	g cm ⁻³	Ai	0,9	0,4	0	2,2	-	268	MSCR
RSP	MPa	Ai	0,5	0,3	0	1,5	-	407	MSCR
AD	% HV	G	10,7	3,2	1	28	20	179	MSCR
RF	g planta ⁻¹	As	36,2	19,9	2,3	196	-	5877	CDDADM
Rsimilis	indiv/100 g	Ai	9811	9032	167	60000	-	5789	CDDADM
N	% ebms	As	2,77	0,28	2,03	3,56	-	673	CDDADM
P	% ebms	As	0,19	0,02	0,14	0,28	-	673	CDDADM
Ca	% ebms	As	3,5	0,32	2,46	4,64	-	673	CDDADM
Mg	% ebms	As	0,51	0,1	0,11	0,83	-	673	CDDADM
K	% ebms	As	0,27	0,03	0,15	0,4	-	673	CDDADM
Zn	mg kg ⁻¹	As	21,58	5,26	12,2	67	-	673	CDDADM
B	mg kg ⁻¹	As	12,63	5,14	2	42,35	-	673	CDDADM
APC	cm	As	79,43	8,2	61	97	-	164	CDDADM
CPC	cm	As	249,2	55,71	100	410	-	164	CDDADM
HPC	hojas planta ⁻¹	As	8,96	2,1	4	13	-	164	CDDADM
APF	cm	As	78,8	7,59	59	97	-	164	CDDADM
CPF	cm	As	195,99	60,96	75	420	-	164	CDDADM
HPF	hojas planta ⁻¹	As	13,01	1,58	10	16	-	164	CDDADM
MPR	manos racimo ⁻¹	As	7,63	0,93	6	10	-	164	CDDADM

*Datos disponibles en la base de datos respectiva. Al: acidez intercambiable. Ca: calcio. Mg: magnesio. N: nitrógeno. K: potasio. P: fósforo. Cu: cobre. Zn: zinc. B: boro. Fe: hierro. Mn: manganeso. COT: carbono orgánico total. Bd: densidad aparente. RSP: Resistencia a la penetración superficial. AD: agua disponible. % HV: porcentaje de humedad volumétrica. RF: raíz funcional. Rsimilis: *Radopholus similis*. % ebms: porcentaje en base materia seca. APC: Altura de hijo edad cosecha. CPC: Circunferencia de planta edad cosecha. HPC: Hojas por planta edad cosecha. APF: Altura de hijo edad floración. CPF: Circunferencia de planta edad floración. HPF: Hojas por planta edad floración. MPR: Manos por racimo. CDDADM: Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte S.A. MSCR: Mapa de suelos de Costa Rica.

Finalmente, los ICS fueron integrados por medio de un enfoque aditivo simple, descrito en la ecuación 3 (Marion *et al.* 2022). Donde **InCS** es el índice de calidad de suelo, $\sum_{i=1}^n S_i$ es la sumatoria de los puntajes de los ICS y **n** es el número de ICS. Con la metodología SMAF, se obtuvo un InCS_{qfb} que considera los indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo, mientras que con la metodología CND se obtuvo un InCS_{qf} que integra los indicadores químicos y físicos disponibles en las bases de datos e históricos. Con cada una de las metodologías, se obtuvo un InCS_c para AP y BP, que incorpora los indicadores químicos, físicos, biológicos, biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta.

$$ICS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \right)$$

Ecuación 3

Análisis estadístico

Se determinaron los estadísticos descriptivos como la media, desviación estándar y varianza para los ICS. Posteriormente, se realizó una comprobación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Cuando estos supuestos se cumplieron, se procedió con un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, con RStudio versión 2023.12.0.369 (R Studio Team 2015) y con una significancia estadística determinada en $p \leq 0,05$. En caso contrario, se realizó la transformación respectiva. Cuando hubo significancia estadística, se realizó una prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Para la elaboración del conjunto de indicadores reducido (MDS_{PCA}), se realizó un análisis multivariado (PCA) con los componentes principales (CP) que explicaron el 80% de la variación observada y con autovalores (eigenvalues) > 1 . Posteriormente, a partir de una rotación tipo varimax realizada a los CP, se retuvo los ICS con cargas factoriales $\geq 0,45$. Además, se realizó una matriz de correlaciones de Pearson para discriminar indicadores correlacionados, en cuyo caso se seleccionó el de mayor carga factorial.

Resultados

Análisis e interpretación de indicadores físicos, químicos y biológicos

Los resultados de los análisis permitieron clasificar el suelo en la condición BP como Franco Arcillo Limoso, y en la condición AP como Franco Arenoso, mientras que el suelo de BM se clasificó como Franco Limoso. La estabilidad de agregados en los sitios BP y BM fue superior a la de AP. La resistencia del suelo a la penetración (RSSP) fue mayor en BP que en AP y superior en comparación con BM. En BP, hasta los 100 cm de profundidad, predominaron condiciones de compactación (Tabla 3). En BP, hasta los 100 cm de profundidad, predominaron condiciones de alta RSSP (Figura 3a) que coinciden con la presencia de raíces muertas y con secciones necrosadas a esa profundidad. Por otro lado, en términos absolutos, el agua disponible (AD) fue mayor en BM y AP, en comparación con BP (Tabla 3 y Figura 3b).

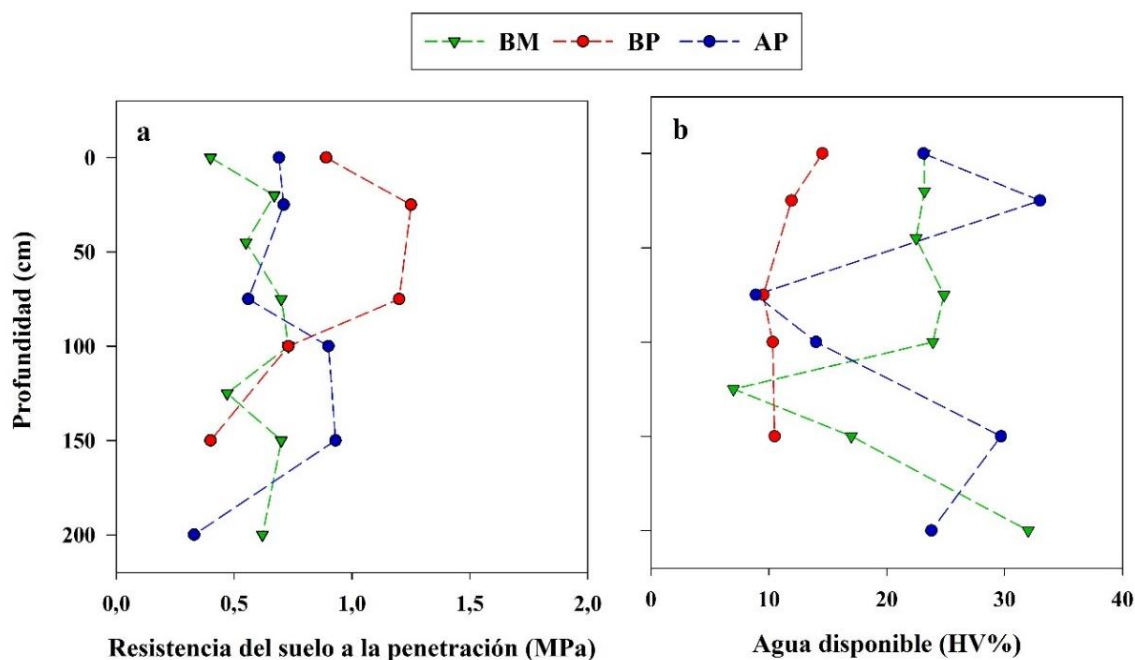


Figura 3. Variación de la resistencia del suelo a la penetración (RSSP) (a) y el agua disponible (AD) (b) a distintas profundidades en un bosque (BM) y en dos condiciones de producción de banano, alta (AP) y baja (BP) productividad.

Figure 3. Variation of soil resistance to penetration (RSSP) (a) and available water (AD) (b) at different depths in a forest (BM) and under two banana production conditions, high (AP) and low (BP) productivity.

Tabla 3. Indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo en un bosque maduro (BM) y dos condiciones de producción de banano, alta (AP) y baja productividad (BP).

Table 3. Physical, chemical and biological indicators of soil quality in a mature forest (BM) and two banana production conditions, high (AP) and low productivity (BP).

Indicador	BM	BP	AP
Físicos			
% Arena	44,4 ± 11,4 a	15,8 ± 6,2 b	47,7 ± 9,9 a
% Limo	51,0 ± 10,6 b	62,52 ± 5,23 a	46,16 ± 6,18 b
% Arcilla	4,6 ± 1,8 b	21,7 ± 5,2 a	6,2 ± 5,0 b
% Est. Agreg.	90,3 ± 5,4 a	88,2 ± 7,1 a	70,1 ± 10,2 b
RSP (MPa) 0-30 cm (40% HG)	0,55 ± 0,12 c	1,01 ± 0,11 a	0,92 ± 0,16 b
RSSP (MPa) 30-50 cm (55% HG)	1,29 ± 0,49 a	1,23 ± 0,27 a	1,33 ± 0,17 a
Bd g cm ⁻³	0,58 ± 0,11 b	0,86 ± 0,09 a	0,90 ± 0,09 a
AD (%HV)	15,1 ± 5,9 ab	13,5 ± 10,1 b	17,4 ± 14,6 a
Químicos			
AI cmol(+) L ⁻¹	0,17 ± 0,09 a	0,43 ± 0,62 a	0,17 ± 0,20 a
pH	5,89 ± 0,25 a	5,64 ± 0,46 b	5,88 ± 0,40 a
COT %	2,71 ± 0,92 a	2,13 ± 0,46 b	2,40 ± 1,07 ab
Ca cmol(+) L ⁻¹	5,53 ± 2,23 b	10,84 ± 2,26 a	6,76 ± 2,35 b
Mg cmol(+) L ⁻¹	2,33 ± 1,12 b	5,26 ± 1,02 a	2,99 ± 1,34 b
K cmol(+) L ⁻¹	0,31 ± 0,10 b	1,18 ± 0,66 a	0,97 ± 0,43 a
CE mS cm ⁻¹	0,31 ± 0,02 a	0,15 ± 0,04 b	0,13 ± 0,05 b
P mg L ⁻¹	0,04 ± 0,01 b	0,19 ± 0,13 a	0,21 ± 0,10 a
Fe mg L ⁻¹	5,2 ± 2,60 c	36,4 ± 21,5 a	17,1 ± 15,9 b
Cu mg L ⁻¹	149,3 ± 61,6 b	268,9 ± 65,6 a	129,0 ± 66,9 b
Zn mg L ⁻¹	2,46 ± 1,14 b	9,18 ± 2,48 a	2,62 ± 0,92 b
Mn mg L ⁻¹	1,22 ± 0,80 c	8,64 ± 4,58 a	5,59 ± 4,01 b
B mg L ⁻¹	24,8 ± 20,7 b	38,9 ± 16,9 a	21,1 ± 16,1 b
Na mg L ⁻¹	0,08 ± 0,03 c	0,31 ± 0,24 b	0,50 ± 0,26 a
Biológicos			
AWCD	0,82 ± 0,33 a	0,44 ± 0,28 b	0,63 ± 0,32 ab
Diversidad funcional (H')	3,07 ± 0,16 a	2,73 ± 0,21 b	2,86 ± 0,24 b
Riqueza (S)	21,36 ± 5,02 a	13,80 ± 4,57 b	17,04 ± 5,52 b
Similitud (E)	1,02 ± 0,09 a	1,07 ± 0,09 a	1,06 ± 0,18 a
RM mg C-CO ₂ g ⁻¹ día	78,2 ± 33,9 a	70,0 ± 44,9 a	111,3 ± 70,4 a
CBM µg C kg ⁻¹ suelo ⁻¹	306,7 ± 86,9 a	141,8 ± 60,8 b	142,1 ± 37,1 b
AEBg (µg PNP g ⁻¹ h ⁻¹)*	0,092 ± 0,003 a	0,085 ± 0,001 b	0,094 ± 0,004 a
AEDh (µg INTF g ⁻¹ h ⁻¹)*	15,5 ± 7,4 b	3,6 ± 3,52 a	44,5 ± 23,55 c

Promedios ± desviación estándar de la media (n = 25). *n = 15. Promedios seguidos de una letra distinta en una misma línea son estadísticamente diferentes según una prueba de Tukey (p ≤ 0,05). Est. Agreg: estabilidad de agregados. RSP: resistencia a la penetración superficial. RSSP: resistencia a la penetración subsuperficial. Bd: densidad aparente. AD: agua disponible. %HV: porcentaje de humedad volumétrica. AI: acidez intercambiable. COT: carbono orgánico total. Ca: calcio. Mg: magnesio. K: potasio. CE: conductividad eléctrica. P: fósforo. Fe: hierro. Cu: cobre. Zn: zinc. Mn: manganeso. B: boro. Na: sodio. AWCD: desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). DIV (H'): índice Shannon-Wiener. RIQ(S): riqueza, índice de Simpson. SIM (E): similitud. RM: respiración microbiana. CBM: carbono de la biomasa microbiana. AEDh: Actividad enzimática de Deshidrogenasa. AEBg: Actividad enzimática de β-glucosidasa.

Con respecto a los indicadores químicos relacionados con la acidez, el pH en BP fue menor que el encontrado en BM y AP, mientras que la acidez intercambiable fue estadísticamente igual en los tres sitios, pero con un valor promedio de más del doble en BP. En cuanto a las concentraciones de macro y micronutrientes, los suelos en BP tuvieron concentraciones mucho mayores que AP; no obstante, la condición AP tuvo concentraciones mayores en comparación con BM (**Tabla 3**). La capacidad de intercambio catiónica (CIC), en promedio, fue mayor en BP que en AP y BP ($17,9 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ y $11,0 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ respectivamente), mientras que en BM fue de $8,7 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$. En los tres sitios la CIC disminuyó con la profundidad (**Figura 4a**), sin embargo, la disminución en BP fue inferior que en los otros dos sitios. Los suelos de BM y AP presentaron el mayor porcentaje de carbono orgánico total (COT) que BP en el horizonte superficial del suelo (**Tabla 3**). A mayores profundidades del suelo, el COT disminuyó muy poco y de manera similar en los tres sitios (**Figura 4b**).

La conductividad eléctrica (CE) fue muy superior en las condiciones de BP y AP, cercana a $0,20 \text{ mS cm}^{-1}$, mientras que en BM fue de $0,04 \text{ mS cm}^{-1}$. Por el contrario, en BM, el contenido de sodio fue casi el doble ($0,70 \text{ mgL}^{-1}$) al registrado en los suelos BP y AP. Las concentraciones de Fe y Mn fueron mayores en BP (**Tabla 3**) de 0 a 100 cm de profundidad (**Figura 4c y 4d**), lo que coincide con la abundancia de características redoximórficas en la fosa de observación realizada en ese sitio.

Al respecto de los indicadores biológicos, el desarrollo de color promedio en cada pozo (AWCD), en los Biolog®EcoPlate™, fue mayor en el suelo de BM seguida por AP y con el valor menor la condición BP. La diversidad funcional (H' ; índice Shannon-Wiener) y la riqueza (S ; índice Simpson) respecto a la cantidad de compuestos de carbono que la comunidad microbiana puede utilizar, igualmente muestran valores superiores en BM que en BP y AP. También, el carbono de la biomasa microbiana (CBM) fue considerablemente mayor en BM, en comparación con AP y BP; entre estas dos no hubo diferencias. Por el contrario, el valor de similitud (E) no mostró diferencias entre los sitios (**Tabla 3**).

La respiración microbiana (RM) fue superior en la condición de AP, en comparación con BM y la condición de BP, sin diferencias estadísticas significativas. De igual manera, la actividad enzimática de la enzima deshidrogenasa (AEDh) fue superior en la condición de AP. En este caso, la diferencia con la condición de BP y BM fue estadísticamente significativa. No hubo diferencias en la actividad de la enzima β -glucosidasa (AEBg) entre BM y AP, pero sí entre estas condiciones y BP, teniendo BP el valor más bajo (**Tabla 3**).

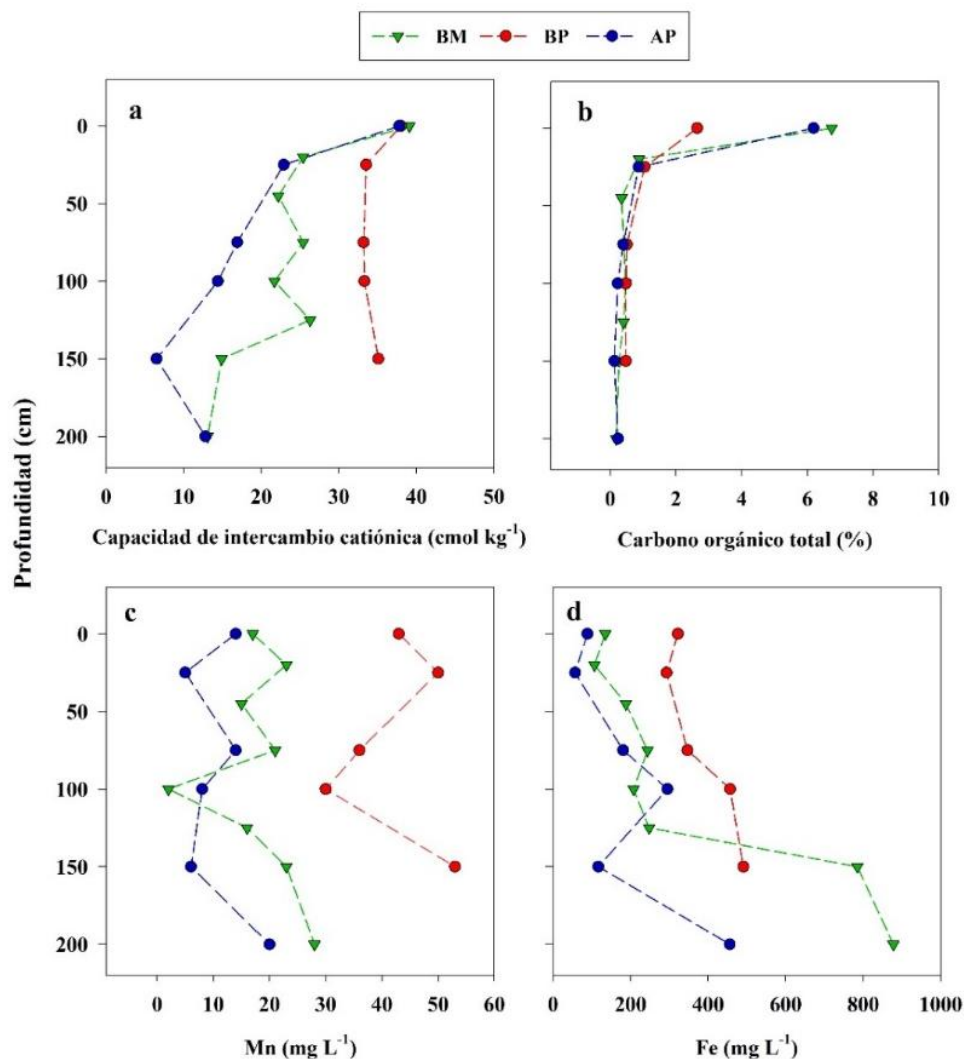


Figura 4. Variación de la capacidad de intercambio catiónica (a), carbono orgánico total (b), concentración de Fe (c) y Mn (d) a distintas profundidades en un bosque (BM) y en dos condiciones de producción de banana, alta (AP) y baja (BP) productividad.

Figure 4. Variation in cation exchange capacity (a), total organic carbon (b), concentration of Fe (c) and Mn (d) at different depths in a forest (BM) and two banana production conditions, high (AP) and low (BP) productivity.

En general, los indicadores físicos, textura y las tres fracciones que la componen, AD, RSSP y Bd, además del pH, AI y COT, obtuvieron mejores puntajes en la condición de AP y BM, con las dos metodologías utilizadas, SMAF y CND. Con respecto a la fertilidad química, las concentraciones de Ca, Mg, K, P, Zn y Cu mostraron los mayores puntajes en la condición BP, con ambas metodologías. Sin embargo, en la condición AP las concentraciones de Fe y Mn obtuvieron mayores puntajes, en comparación con la condición BP. Con respecto al AWCD, Riqueza, Diversidad funcional, CBM, RM, AEBg y AEDh se obtuvieron mayores puntajes en BM y la condición AP (**Figura 5**).

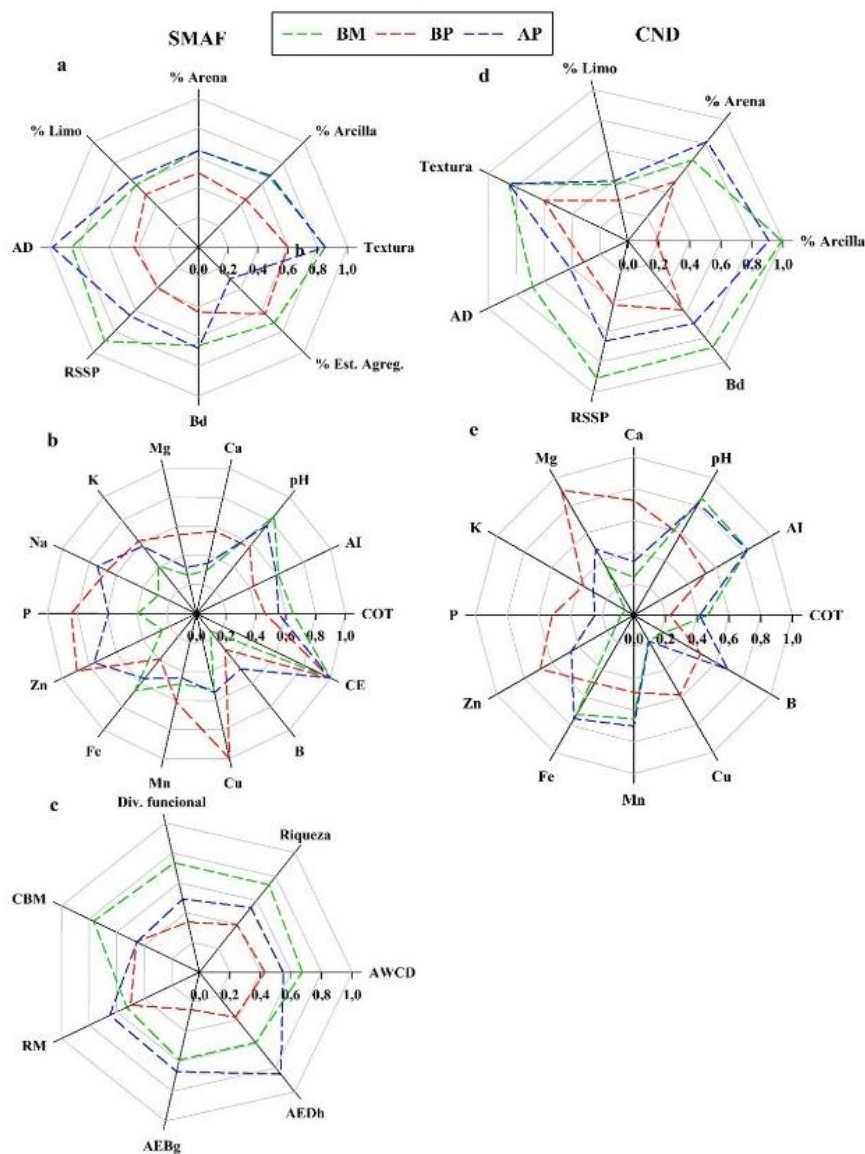


Figura 5. Puntaje, en escala de 0 a 1, asignado a los indicadores físicos, químicos y biológicos con las metodologías SMAF (a, b y c) y CND (d y e) en un bosque (BM) y dos condiciones de producción de banana, alta productividad (AP) y baja productividad (BP). Est. Agreg: estabilidad de agregados. RSSP: resistencia a la penetración subsuperficial. Bd: densidad aparente. AD: agua disponible. % HV: porcentaje de humedad volumétrica. AI: acidez intercambiable. COT: carbono orgánico total. AWCD: desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). RM: respiración microbiana. CBM: carbono de la biomasa microbiana. AEDh: Actividad enzimática de Deshidrogenasa. AEBg: Actividad enzimática de β -glucosidasa.

Figure 5. Score, on a scale of 0 to 1, assigned to the physical, chemical and biological indicators with the SMAF (a, b and c) and CND (d and e) methodologies in a forest (BM) and two banana production conditions, high productivity (PA) and low productivity (BP). Est. Agreg: aggregate stability. RSSP: resistance to subsurface penetration. Bd: bulk density. AD: water available. % HV: percentage of volumetric humidity. AI: exchangeable acidity. COT: Total Organic Carbon. AWCD: average color development in each well. RM: microbial respiration. CBM: carbon of microbial biomass. AEDh: Enzymatic activity of dehydrogenase. AEBg: Enzyme activity of β -glucosidase.

Análisis e interpretación de indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta

El puntaje asignado a los indicadores biométricos y del sistema radical, tanto con la metodología SMAF como CND fueron mayores en la condición de AP que en BP. No obstante, los indicadores del estado nutricional de la planta tuvieron mejores puntajes en la condición BP que en la condición AP (Figura 6).

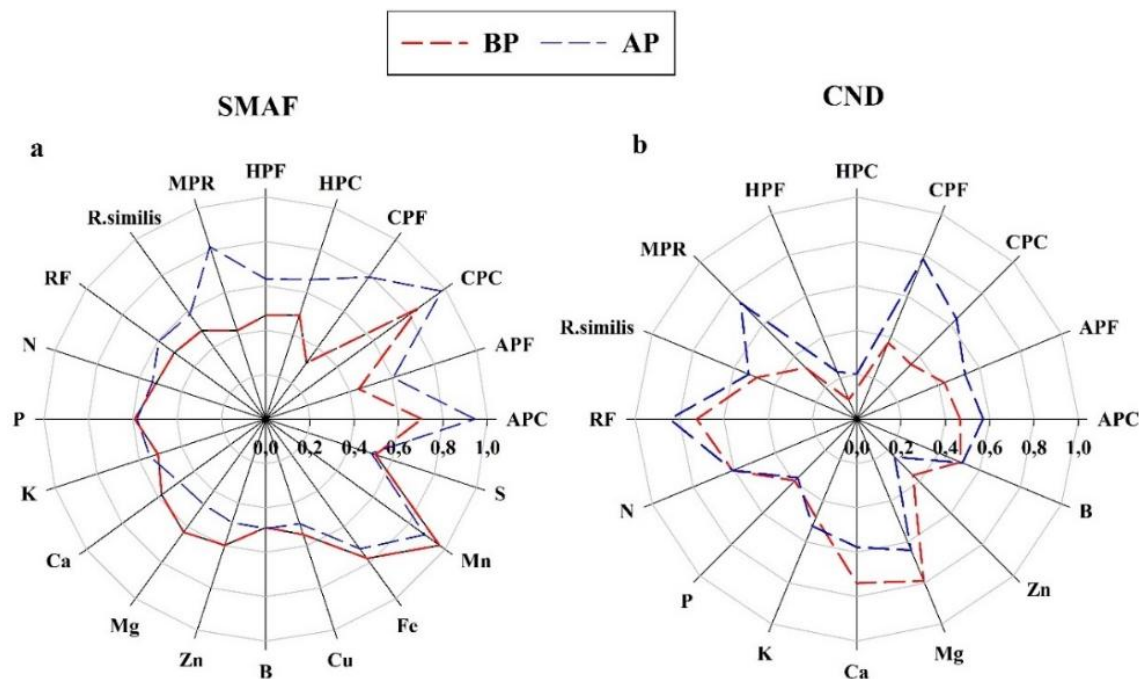


Figura 6. Puntaje, en escala de 0 a 1, asignado a los indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta con las metodologías SMAF (a) y CND (b) en condiciones de producción de banano, alta productividad (AP) y baja productividad (BP). APF: Altura de hijo edad floración. CPF: Circunferencia de planta edad floración. HPF: Hojas por planta edad floración. APC: Altura de hijo edad cosecha. CPC: Circunferencia de planta edad cosecha. HPC: Hojas por planta edad cosecha. MPR: Manos por racimo. RF: raíz funcional. R.similis: *Radopholus similis*. N: nitrógeno. P: fósforo. K: potasio. Ca: calcio. Mg: magnesio. S: azufre. Fe: hierro. Mn: manganeso. Zn: zinc. Cu: cobre. B: boro.

Figure 6. Score, on a scale of 0 to 1, assigned to the biometric indicators, the root system and nutritional status of the plant with the SMAF (a) and CND (b) methodologies under conditions of banana production, high productivity (PA) and low productivity (BP). APF: Height of sucker at flowering. CPF: Plant girth at flowering. HPF: Leaves per plant at flowering. APC: Height of sucker at harvest. CPC: Plant girth at harvest. HPC: Leaves per plant at harvest. MPR: Hands per bunch. RF: functional root. R.similis: *Radopholus similis*. N: nitrogen. P: Phosphorus. K: potassium. Ca: calcium. Mg: magnesium. S: sulfur. Fe: iron. Mn: manganese. Zn: zinc. Cu: copper. B: boron.

Los resultados de este estudio demostraron que la circunferencia de la planta en edad de floración (CPF) y de cosecha (CPC) medida a 1,0 m de altura de la base, hojas por planta en edad de floración (HPF), altura del hijo en edad de cosecha (APC) y la cantidad de manos por racimo (MPR) fueron mayores en la condición de AP en comparación con BP (**Tabla 4**), mientras que en las variables altura del hijo a floración (APF) y hojas a cosecha (HPC) no hubo diferencias entre condiciones evaluadas. La raíz funcional (RF), las poblaciones de *R. similis* y nemátodos saprofitos (Nem. Sap.) no mostraron diferencias entre las condiciones evaluadas. Con respecto a la nutrición del cultivo, las concentraciones de Ca, Mg, Mn, Zn y Cu a nivel foliar fueron significativamente más altas en BP que en AP (**Tabla 4**). Respecto al resto de nutrientes, no hubo diferencias estadísticas entre los sitios BP y AP.

Evaluación de la calidad de suelo

Las dos metodologías para la interpretación de indicadores (SMAF y CND) y tres clases de indicadores de la calidad del suelo, químicos, físicos y biológicos sirvieron de base para obtener los diferentes conjuntos de indicadores de la calidad de suelo. El primer conjunto estuvo conformado por el total de los 51 indicadores (TDS); el segundo, obtenido por medio del análisis de componentes principales (MDS_{PCA}), generó cuatro componentes principales que acumularon el 80% de la variación y los indicadores con cargas factoriales $\geq 0,45$, lo que redujo el conjunto inicial a siete y 19 indicadores y, por último, el criterio de expertos y revisión de literatura (MDS_{EO}) redujo a seis y 13 indicadores (**Tabla 5**). Con respecto a los indicadores que conformaron los conjuntos, se observó que el MDS_{EO} seleccionó la AI, textura, CIC e indicadores del cultivo en edad de floración, mientras que el MDS_{PCA} utilizó el % arena y % de arcilla, concentraciones de K y Na, y variables del cultivo en edad de cosecha y floración (**Tabla 5**).

Tabla 4. Indicadores biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta en dos plantaciones de banano, alta (AP) y baja (BP) productividad.

Table 4. Biometric indicators, root system and nutritional status of the plant in two banana plantations, high (PA) and low (BP) productivity.

Indicador	BP	AP
Biométricos		
CPF cm	75,9 ± 5,7 b	86,1 ± 6,1 a
APF cm	184,2 ± 35,9 a	200,4 ± 32,4 a
HPF	10,7 ± 0,7 b	11,8 ± 0,7 a
CPC cm	77,9 ± 5,3 b	86,1 ± 6,4 a
APC cm	242,2 ± 37,1 b	265,8 ± 22,8 a
HPC	6,2 ± 1,3 a	6,7 ± 1,2 a
MPR	7,5 ± 0,4 b	8,2 ± 0,9 a
Sistema radical		
RF g planta ⁻¹	67 ± 36 a	62 ± 29 a
<i>R. similis</i> indiv 100 g ⁻¹	10 060 ± 2513 a	9190 ± 3013 a
Nem. Sap indiv 100 g ⁻¹	60 ± 208 a	260 ± 557 a
Estado nutricional		
N % ebms	2,85 ± 0,14 a	2,86 ± 0,18 a
P % ebms	0,19 ± 0,015 a	0,18 ± 0,011 a
K % ebms	3,47 ± 0,32 a	3,53 ± 0,41 a
Ca % ebms	0,60 ± 0,12 a	0,53 ± 0,0,07 b
Mg % ebms	0,30 ± 0,03 a	0,28 ± 0,03 b
S % ebms	0,19 ± 0,01 a	0,19 ± 0,01 a
Fe mg kg ⁻¹	70,1 ± 14,0 a	64,3 ± 10,9 a
Mn mg kg ⁻¹	188,2 ± 59,6 a	126,5 ± 27,2 b
Zn mg kg ⁻¹	19,6 ± 3,8 a	17,7 ± 1,9 b
Cu mg kg ⁻¹	9,30 ± 0,92 a	8,89 ± 0,95 b
B mg kg ⁻¹	12,8 ± 2,2 a	12,8 ± 1,1 a

Promedios ± desviación estándar de la media (n = 25). Promedios seguidos de una letra distinta en una misma línea son estadísticamente diferentes según una prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). APF: Altura de hijo edad floración. CPF: Circunferencia de planta edad floración. HPF: Hojas por planta edad floración. APC: Altura de hijo edad cosecha. CPC: Circunferencia de planta edad cosecha. HPC: Hojas por planta edad cosecha. MPR: Manos por racimo. RF: raíz funcional. R.similis : Radopholus similis. NemSap: nematodos saprófitos. % ebms: porcentaje en base materia seca. N: nitrógeno. P: fósforo. K: potasio. Ca: calcio. Mg: magnesio. S: azufre. Fe: hierro. Mn: manganeso. Zn: zinc. Cu: cobre. B: boro.

Tabla 5. Indicadores de calidad de suelo utilizados para conformar los conjuntos MDS_{PCA} y MDS_{EO}.
Table 5. Soil quality indicators used to form the MDS_{PCA} and MDS_{EO} sets.

		MDS _{PCA}	MDS _{EO}
InCS _{qfb}	SMAF	COT, pH, K, P, Na, % arena, % arcilla, RSSP, AWCD, RM, CBM y AEBg.	CIC, Textura, COT, pH, AI, RSSP, AWCD y CBM.
InCS _{qf}	CND	COT, pH, K, P, % arena, % arcilla y RSSP.	CIC, Textura, COT, pH, AI y RSSP.
InCS _c	SMAF	COT, pH, K, P, Na, % arena, % arcilla, RSSP, AWCD, RM, CBM, AEBg, CPC, CPF, APF, HPC, MPR, RF y <i>R.similis</i> .	CIC, Textura, COT, pH, AI, RSSP, AWCD, CBM, RF, <i>R.similis</i> , CPF, APF y MPR.
	CND	COT, pH, K, P, % arena, % arcilla, RSSP, CPC, CPF, APF, HPC, MPR, RF y <i>R.similis</i> .	CIC, Textura, COT, pH, AI, RSSP, RF, <i>R.similis</i> , CPF, APF y MPR.

MDS PCA: conjunto reducido por análisis de componentes principales, y MDS EO: conjunto reducido por criterio de expertos y revisión de literatura. ICS qfb: obtenido para los tres sitios con indicadores químicos, físicos y biológicos. ICS qf: obtenido para los tres sitios con indicadores químicos y físicos. ICS c: obtenido para los sitios cultivados con indicadores químicos, físicos, biológicos, biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta. AI: acidez intercambiable. AEBg: Actividad enzimática de β-glucosidasa AWCD: Desarrollo de color promedio en cada pozo (por sus siglas en inglés). APC: Altura de hijo en edad cosecha. APF: Altura de hijo en edad floración. COT: porcentaje de carbono orgánico total. CBM: Carbono de la biomasa microbiana. CPC: Circunferencia de planta en edad cosecha. CPF: Circunferencia de planta en edad floración. HPC: Hojas por planta en edad cosecha. K: potasio. MPR: Manos por racimo. Na: sodio. P: fósforo. RSP: Resistencia a la penetración superficial. RM: Respiración microbiana. RF: raíz funcional. *R.similis*: Radopholus similis.

Después de la interpretación y asignación de puntajes, y una vez concluida la conformación de los conjuntos, se obtuvo los InCS. Se obtuvo un InCS_{qfb} con la metodología SMAF, y un InCS_{qf} con la metodología CND. Luego, con cada una de las metodologías, se obtuvo un InCS_c únicamente para AP y BP. Los valores de estos índices de calidad de suelos, InCS_{qfb} y InCS_{qf}, para el BM y las condiciones BP y AP se presentan en la **Figura 7 a y b**, mientras que los índices InCS_c, generado con SMAF y CND se muestran en la **Figura 7 c y d**.

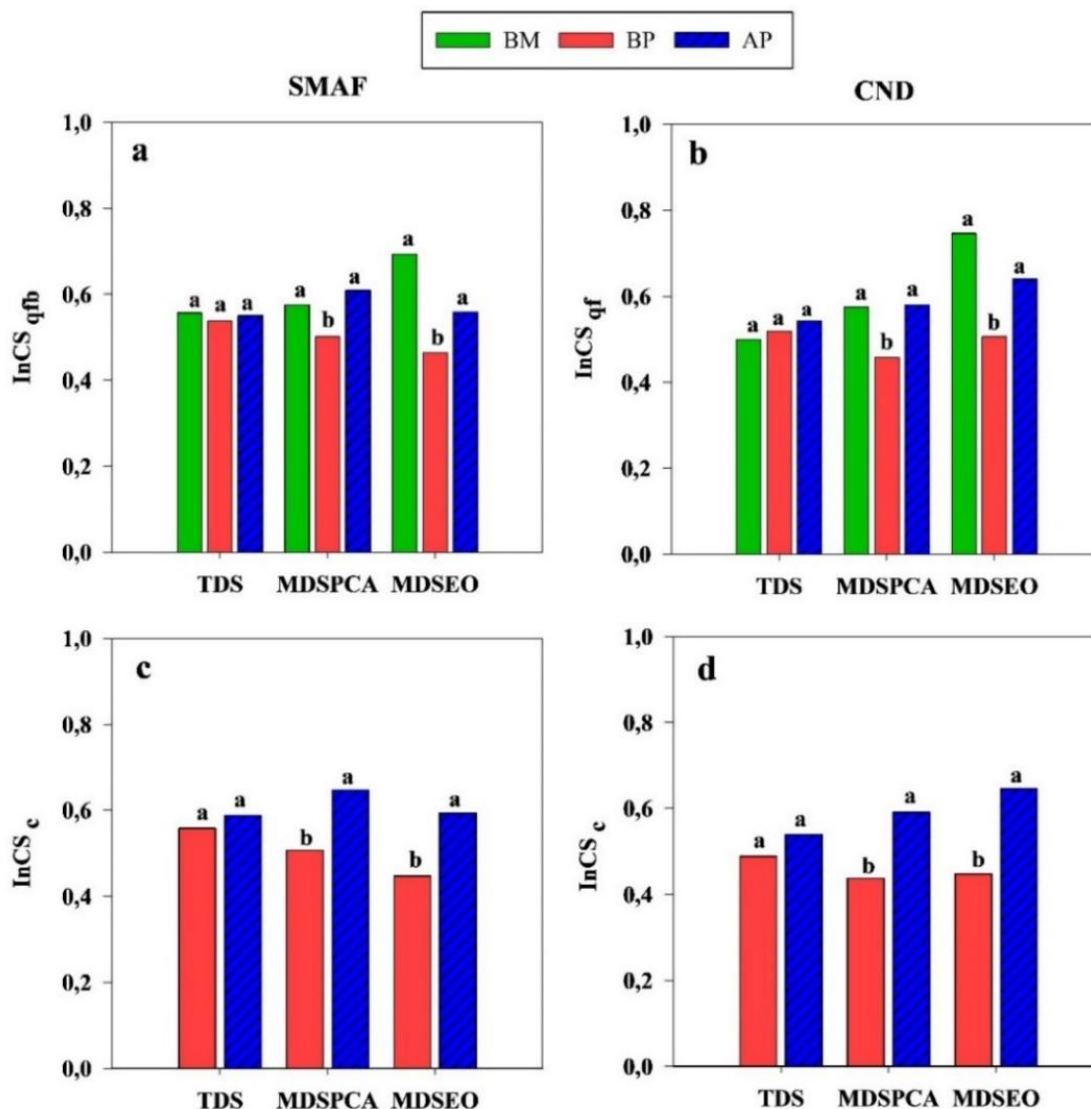


Figura 7. Índices de calidad de suelo en un bosque (BM) y en dos condiciones de producción de banano, alta (AP) y baja (BP) productividad, obtenidos con tres conjuntos de indicadores (TDS: conjunto total de indicadores, MDS_{PCA}: conjunto reducido por análisis de componentes principales, y MDS_{EO}: conjunto reducido por criterio de expertos y revisión de literatura). Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas, según una prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). (a) InCS_{qfb}: índice de calidad obtenido lo que integra indicadores químicos, físicos y biológicos, con metodología SMAF. (b) InCS_{qf}: índice de calidad obtenido lo que incorpora indicadores químicos y físicos con la metodología CND. (c y d) InCS_c: índice de calidad obtenido integrando indicadores químicos, físicos, biológicos, biométricos, del sistema radical y estado nutricional de la planta con las metodologías SMAF y CND.

Figure 7. Soil quality indices in a forest (BM) and in two banana production conditions, high (AP) and low (BP) productivity, obtained with three sets of indicators (TDS: total set of indicators, MDS_{PCA}: set reduced by principal component analysis, and MDS_{EO}: set reduced by expert criteria and literature review). Equal letters indicate that there are no statistical differences, according to a Tukey test ($p \leq 0,05$). (a) InCS_{qfb}: quality index obtained by integrating chemical, physical and biological indicators, with SMAF methodology. (b) InCS_{qf}: quality index obtained by integrating chemical and physical indicators with the CND methodology. (c and d) InCS_c: quality index obtained by integrating chemical, physical, biological, biometric, root system and nutritional status indicators of the plant with the SMAF and CND methodologies.

Discusión

Desde el punto de vista físico, las condiciones de AP y BM poseen una textura con un gran potencial para sostener rendimientos altos en el cultivo de banano, en contraste con la textura de la condición de BP, que posee un potencial medio a bajo (Jaramillo y Vázquez 1990). El impacto de la textura en la fertilidad de las plantaciones de banano está bien documentado en la literatura (Arias *et al.* 2009, Olivares *et al.* 2022). A diferencia de los otros suelos, el mayor porcentaje de arcilla y limo en la condición de BP proporcionó una mayor superficie específica, alta reactividad y CIC (Hepper *et al.* 2006, Yan *et al.* 2023), lo cual pudo influenciar las mayores concentraciones de nutrientes en este suelo. La estabilidad de agregados no ha sido ampliamente utilizada como indicador de la calidad de suelo en las plantaciones de banano. En el presente trabajo, mayor estabilidad de agregados en la condición de BP se atribuye a la influencia de las fracciones arcilla y limo (Chacón *et al.* 2015, Schweizer *et al.* 2019), mientras que en BM se atribuye al contenido de COT (Dong *et al.* 2023). Por otro lado, la predominancia de arena en la condición de AP ha sido identificado como un factor que reduce la estabilidad de los agregados (Bruand *et al.* 2005). Resultados similares fueron reportados por Pattison *et al.* (2005), quienes registraron mayor estabilidad de agregados en suelos de bosque que en suelos bananeros.

Los resultados de este estudio indican que el suelo de BM tenía menor compactación que las condiciones BP y AP. Esto coincide con lo observado por Rasiah *et al.* (2009), quienes registraron mayor compactación en suelos de plantaciones de banano, en comparación con el suelo de un bosque. Por otro lado, la resistencia a la penetración fue más favorable para el cultivo de banano en la condición de AP (Vaquero 2003), por el contrario, la compactación en la condición de BP, entre 0 y 100 cm de profundidad, es una condición crítica para el cultivo de banano, cuyo sistema radical se encuentra, principalmente, en los primeros centímetros del suelo (Stover y Simmonds 1987). En cuanto a la humedad del suelo, el exceso o déficit puede generar estrés y afectar el rendimiento del banano (Razi-Ismai *et al.* 2004). En los tres suelos evaluados, el porcentaje de agua disponible se mantuvo alrededor del 20% (humedad volumétrica), óptimo para el desarrollo del banano (van Wesemael *et al.* 2019). Este parámetro está influenciado por factores como las condiciones climáticas locales, el drenaje, la textura y la porosidad del suelo (van Wesemael *et al.* 2019). En el caso de la condición de BP, la retención de humedad y disponibilidad de agua estuvo influenciada por la predominancia de microporos (Yan *et al.* 2023), mientras que, en la condición de AP y BM, la influencia se atribuye a la predominancia de macroporos (Bruand *et al.* 2005).

En contraste con BM, el análisis de la fertilidad en las condiciones de AP y BP mostró mayor disponibilidad de nutrientes y acidez. Un bosque es un sistema natural en el que el ciclaje de nutrientes tiende al equilibrio y es más circular (Strawn *et al.* 2015), en cambio, las plantaciones reciben un aporte de nutrientes a través de la fertilización para suplir la demanda nutricional de un cultivo intensivo (Pérez y Torres-Bazurto 2020). Los niveles de acidez y pH registrados en el presente trabajo fueron adecuados para el cultivo de banano (López y Espinoza 1995), no obstante, el uso de fuentes nitrogenadas amoniacales genera acidificación, lo que reduce la calidad del suelo (Fratoni *et al.* 2017). Al comparar el suelo de las condiciones de AP y BP, se observó mayor disponibilidad de nutrientes en BP, a pesar de su bajo historial productivo. Este resultado puede atribuirse, en primer lugar, a una CIC más alta (Hepper *et al.* 2006), pero también al bajo vigor y baja productividad, que suponen una menor extracción de nutrientes.

El aporte continuo de materia orgánica, proveniente de la vegetación y la ausencia de intervención humana, pudo haber influido en mayor COT en el suelo de BM (Dong *et al.* 2023). Este resultado concuerda con lo observado por Guimarães *et al.* (2014), quienes registraron mayor carbono orgánico en bosques que en sistemas agrícolas. Por otro lado, a medida que se desarrolla una plantación se registran pérdidas en el carbono orgánico del suelo (Ledo *et al.* 2020). Asimismo, el encalado y la aplicación de fertilizantes afectan la relación carbono nitrógeno (C/N), y la dinámica de mineralización de la materia orgánica (Guimarães *et al.* 2014). El COT en la condición de AP fue significativamente similar a la de BM, este resultado se atribuye a que el 66% de la biomasa de una plantación de alto vigor regresa al suelo (Vargas y Flores 1995).

Las concentraciones de Na en el suelo de BM fueron el doble de las de los sitios cultivados. A pesar de lo anterior, las concentraciones de Na registradas no representan una limitante para el cultivo (López y Espinoza 1995), pero permiten inferir la sensibilidad de este parámetro al manejo. Altas concentraciones de Na en la zona, antes del establecimiento de sistemas de producción intensivos, pueden deberse a la influencia del material parental (Arias *et al.* 2009), intrusión salina (Arellano y Vargas 2011) y transgresión Flandense (Bergoeing 2008). Por el contrario, en los sitios cultivados, los bajos niveles de Na podrían estar asociados al uso de enmiendas a base de Ca y Mg, que compiten por sitios activos con este catión y a las obras de drenaje, que favorecen las pérdidas por infiltración a estratos inferiores del suelo (Ahmad *et al.* 2013, Trejo-González *et al.* 2019).

La disponibilidad de Fe y Mn está influenciada por factores como pH, el material parental (Méndez y Bertsch 2012), la textura, régimen de precipitación y drenaje (Naranjo-Morán *et al.* 2021). La textura de la condición de BP ha sido asociada a un mal drenaje y aumento de la disponibilidad de Fe y Mn (Fassbender y Bornemiza 1987), por el contrario, en la condición de AP y BM se reduce la disponibilidad de estos metales (Lahav y Turner 1992). La disponibilidad de Fe y Mn puede alcanzar concentraciones tóxicas para la raíz de la planta de banano (Soto 2014). En el presente estudio, mayores concentraciones de Fe y Mn en el suelo, presencia de características redoximórficas y pérdida de raíces funcionales entre los 90 y 150 cm en la condición de BP son evidencias de la influencia de las limitaciones de drenaje y limitaciones físicas como la resistencia del suelo a la penetración, además de la solubilidad de Fe y Mn (Li *et al.* 2019, Naranjo-Morán *et al.* 2021).

Seis indicadores biológicos proveyeron información sobre la actividad y diversidad biológica en el suelo, indicador de procesos como la descomposición de residuos orgánicos y ciclaje de nutrientes (Larkin 2015). En el presente trabajo, el uso de Biolog®EcoPlate™, constituyó una herramienta práctica y sensible para determinar la huella metabólica de la microbiota del suelo en plantaciones de banano, lo que concuerda con los trabajos de Chou *et al.* (2017), Fu *et al.* (2016) y Sánchez-Zúñiga *et al.* (2021). Por otra parte, los resultados obtenidos con el CBM concuerdan con otros reportes en los que la aplicación de agroquímicos y fertilizantes nitrogenados en plantaciones de banano reducen la actividad microbiana, determinada indirectamente con este parámetro (Cerdeña 2008), en contraste, sistemas más equilibrados, en cuanto a cantidad y reciclaje de fuentes orgánicas (Durango *et al.* 2015). A pesar de que RM ha sido muy utilizado en evaluaciones de calidad de suelo, en este trabajo, este parámetro no mostró sensibilidad a las diferencias entre sitios, lo que concuerda con los resultados de Durango *et al.* (2015). Las enzimas deshidrogenasa y β -glucosidasa han sido reportadas como indicadores de la calidad del suelo (Azañero *et al.* 2024). La deshidrogenasa está ligada exclusivamente a sistemas vivos y la β -glucosidasa participa en el ciclo del carbono (Henríquez *et al.* 2014), por lo que la actividad de ambas enzimas indica mayor actividad biológica e influye en la dinámica del carbono orgánico en BM y la condición de AP. Por otro lado, en BP y AP el pH es más favorable para la actividad de ambas enzimas, que se incrementa en un rango de 5,5-7,5 (Wang y Kuzyakov 2024). Este resultado resalta la importancia de incluir la actividad enzimática en estudios de calidad de suelo.

Estudios recientes han demostrado la relevancia y relación de los indicadores biométricos con la productividad y la calidad del suelo en el cultivo de banano (Olivares *et al.* 2022). Los resultados obtenidos en el presente trabajo concuerdan con los hallazgos de otras investigaciones en plantaciones de banano de alta productividad con mejores parámetros biométricos, mayor rendimiento y altos índices de calidad (Villarreal-Núñez *et al.* 2013, González García *et al.* 2021). Por la estrecha relación con la productividad, la evaluación de indicadores relacionados con el sistema radical del banano adquiere gran relevancia (Serrano 2003, Pattison *et al.* 2005). A diferencia de otros trabajos, que han señalado la raíz funcional y las poblaciones de nematodos fitoparásitos como indicadores sensibles (Pattison *et al.* 2008, Yogaswara *et al.* 2021), el presente estudio no encontró diferencias en estos indicadores. Con respecto a los niveles nutricionales en el tejido foliar de la planta, ambas condiciones de producción de banano se encuentran en los rangos óptimos (López y Espinoza 1995), no obstante, en BP las mayores concentraciones de Ca, Mg, Mn, Zn y Cu a nivel foliar pueden explicarse con la relación 1:1 que guardan con las concentraciones del suelo (Strawn *et al.* 2015).

En general, los índices de calidad obtenidos en AP y BM se encuentran en la categoría bueno y muy bueno, mientras, que en BP, los índices obtenidos se encuentran muy cerca de la categoría regular (Delgado *et al.* 2010). Entre las dos condiciones de producción de banano, la mayor calidad de suelo fue evidenciada en la condición de AP a través de mayores InCS. Este resultado coincide con un registro de mayor calidad de suelo en plantaciones de banano de alta productividad, reportado por Delgado *et al.* (2010) y Villarreal-Núñez *et al.* (2013). A pesar de lo anterior, BM presentó mayor InCS que las condiciones de AP y BP, lo que resalta el deterioro de la calidad física y biológica del suelo en sistemas agrícolas intensivos (Herrera *et al.* 2017, Marion *et al.* 2022).

A pesar de que un amplio rango de indicadores ha sido utilizado para evaluar la calidad del suelo (Lima *et al.* 2013), los resultados de este trabajo mostraron que un conjunto integrado por la totalidad de los indicadores (TDS) no fue sensible a las diferencias en la calidad del suelo en los sitios evaluados. Lo anterior se debe a la redundancia entre indicadores o autocorrelación entre algunos (Cherubin *et al.* 2016), sin mencionar que esta estrategia requiere una alta inversión de recursos y tiempo, y demanda una interpretación más compleja (Marion *et al.* 2022).

En contraste, el presente trabajo evidenció mayor sensibilidad por parte de los conjuntos reducidos. El MDS_{EO}, reducido al mínimo por una revisión de literatura y el criterio experto, aumentan la eficiencia de los indicadores seleccionados, no obstante, esta estrategia ha sido caracterizada por la subjetividad para la selección de los indicadores. Por otro lado, el conjunto MDS_{PCA}, a través de un análisis multivariado, elimina la subjetividad en la selección de indicadores y la redundancia entre ellos (Cherubin *et al.* 2016, Marion *et al.* 2022).

Otros trabajos han señalado una fuerte relación entre la calidad del suelo obtenida con conjuntos reducidos por análisis multivariados y el rendimiento de los cultivos (Mukherjee y Lal 2014). Los indicadores que conformaron los conjuntos reducidos (MDS_{PCA} y MDS_{EO}) en el presente trabajo, coinciden con los indicadores recomendados en los manuales y guías más utilizados para la evaluación de la calidad del suelo (USDA 1999, Moebius-Clune *et al.* 2016), así como en trabajos realizados en el cultivo de banano (Pattison *et al.* 2008, Delgado *et al.* 2010, Villarreal-Núñez *et al.* 2013, Cornwell 2014, Vallejo Quintero *et al.* 2020, Olivares *et al.* 2022).

En cuanto a las metodologías utilizadas en este estudio, SMAF y CND fueron consistentes para obtener InCS, tanto con los indicadores de suelo como con los del cultivo. SMAF es una herramienta ampliamente utilizada para la evaluación de la calidad del suelo (Andrews *et al.* 2004, Cherubin *et al.* 2016, Marion *et al.* 2022), no obstante, las condiciones específicas del estudio y el cultivo determinan los rangos altos y bajos para la interpretación de los indicadores, por lo que debe considerarse al extrapolar los resultados a otros sitios y condiciones (Bünemann *et al.* 2018). Por otro lado, por medio de la metodología CND, los parámetros de interpretación utilizados, desviación estándar y promedio, son obtenidos de bases de datos regionales o nacionales disponibles, que agrupan una gran cantidad de información (Moebius-Clune *et al.* 2016). Aun cuando en el presente estudio no se contó con indicadores biológicos para obtener índices con esta metodología, la disponibilidad de grandes bases de datos de parámetros físicos y químicos de los suelos de Costa Rica permitió utilizarla por primera vez en el cultivo de banano. No obstante, en otras condiciones la ausencia de información o acceso se convertiría en una de las principales limitaciones para usar esta metodología.

Conclusiones

Al comparar las condiciones de producción, los indicadores físicos, biológicos y biométricos fueron más apropiados en la condición de AP, lo que repercutió en un mayor índice de calidad en este suelo. En contraste con BM, AP y BP presentaron mayor compactación, aumento en la fertilidad química y acidez, reducción del carbono orgánico total y la actividad biológica. Las metodologías utilizadas permitieron obtener índices de calidad de suelo, con los que se determinó que la calidad del suelo fue de la siguiente forma: BM > AP > BP. En las condiciones de este estudio, las metodologías para interpretar los indicadores (SMAF o CND) fueron consistentes, por lo que podrían emplearse en futuras evaluaciones de la calidad de suelo en el cultivo de banano. No obstante, la metodología CND tiene como limitante la ausencia de información de indicadores biológicos. Los conjuntos de indicadores reducidos (MDS_{PCA} o MDS_{EO}) fueron más sensibles que el total de indicadores (TDS) para detectar diferencias en la calidad del suelo en los sitios evaluados. El conjunto MDS_{PCA} (carbono orgánico total, pH, K, P, Na, % arena, % arcilla, resistencia del suelo a la penetración subsuperficial, desarrollo de color promedio en cada pozo, respiración microbiana, carbono de la biomasa microbiana, actividad de la β -glucosidasa, circunferencia de planta en edad cosecha y en edad de floración, altura de hijo en edad floración, hojas por planta en edad cosecha, manos por racimo, raíz funcional y poblaciones de *R.similis* en la raíz) reduce la subjetividad en la selección, así como la redundancia y correlación que ocurre al utilizar los otros conjuntos de indicadores. Por lo que se sugiere su uso para evaluar la calidad de suelo en condiciones similares a las de este estudio.

Agradecimientos

Se agradece a Fresh Del Monte Produce, a Corporación de desarrollo Agrícola Del Monte S.A (CDADM) y al Sistema de Estudios de Posgrado, por la financiación de este trabajo. Se agradece a Yonner Céspedes por colaborar en la elaboración del mapa del sitio de estudio.

Literatura citada

Acuña, O; Peña, W; Serrano, E; Pocasangre, L; Rosales, F; Delgado, E; Pérez Moreno, J; Segura, A. 2006. La importancia de los microorganismos en la calidad y salud de suelos. In XVII Reunião Internacional da Associação para a Cooperação nas Pesquisas sobre Banana no Caribe e na América Tropical (2006, Santa Catarina, Brazil). Soprano, E; Tcacenco, FA; Lichtemberg, LA; Silva, MC (eds.). Proceedings. ACORBAT. p. 222.

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):35-50. DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201x.14856>

Ahmad, S; Ghafoor, A; Akhtar, ME; Khan, MZ. 2013. Ionic displacement and reclamation of saline-sodic soils using chemical amendments and crop rotation. Land Degradation and Development 24(2):170-178. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.1117>

Anderson, TH. 1982. Measurement of CO₂ evolution rates. *In* Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Alef, K; Nannipier, P (eds.). Academic Press. p. 831.

Andrews, SS; Karlen, DL; Cambardella, C. 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. 2002. Metodología utilizada en el laboratorio de Nematología de CORBANA SA para la extracción de nematodos de las raíces de banano (*Musa* AAA) y plátano (*Musa* AAB). Corbana 28(55):97-110.

Arellano, F; Vargas, A. 2011. Casos de contaminación por intrusión salina en acuíferos costeros de la Península de Nicoya (Costa Rica). Revista Geológica de América Central 25:77-84. DOI: <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i25.8540>

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>

Azañero, AJ; Riega, MA; Chávez, SV; Caja, DK; Gutiérrez, FD. 2024. Métodos para determinar la actividad enzimática en suelos contaminados. South Sustainability 5(1):e092-e092. DOI: <https://doi.org/10.21142/SS-0501-2024-e092>.

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>

Bergoeing, J. 2008. La transgresión flandense (en línea). *Revista geográfica - Instituto Panamericano de Geografía e Historia* 144:229-239. Consultado 14 dic. 2024. Disponible en <https://www.jstor.org/stable/40996779>

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 sub-tropical India. *Frontiers in Soil Science* 3:1155712. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1155712>

Bruand, A; Hartmann, C; Lesturgez, G. 2005. Physical properties of tropical sandy soils: a large range of behaviours. *In* Management of tropical sandy soils for sustainable agriculture. A holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics (1, 2005, Khon Kaen, Thailand) (en línea). Hartmann, C (ed.). L'Institut de Recherche pour le Développement. Consultado 15 dic. 2024. Disponible en <https://insu.hal.science/hal-00079666v1>

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>

Burt, R. 2014. Soil survey field and laboratory methods manual. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, Kellog Soil Survey Laboratory. s. p.

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. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 66 p. Consultado 15 dic. 2024. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4067>

Chacón, P; Lorenz, K; Lal, R; Calhoun, FG; Fausey, NR. 2015. Association of soil organic carbon with physically separated soil fractions in different land uses of Costa Rica. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* 65(5):448-459. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1020859>

Cherubin, MR; Karlen, DL; Cerri, CEP; Franco, ALC; 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>

Chou, YM; Shen, FT; Chiang, SC; Chang, CM. 2017. Functional diversity and dominant populations of bacteria in banana plantation soils as influenced by long-term organic and conventional farming. *Applied Soil Ecology* 110:21-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.11.002>

CORBANA (Corporación Bananera Nacional). 2024. Estadísticas de exportación bananera 2023. San José, Costa Rica, Mundo creativo S.A. 72 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>

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 (en línea). *Interciencia* 35(12):927-933. Consultado 15 dic. 2024. Disponible en www.musalit.org/seeMore.php?id=20313

Dong, X; Zhao, K; Wang, J; Gui, H; Xiao, Y; Chen, Z; Miao, Y; Han, S. 2023. Effects of forest types on soil carbon content in aggregate fraction under climate transition zone. *Frontiers in Environmental Science* 10:1052175. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1052175>

Doran, JW; Parkin, TB. 1994. Defining and assessing soil quality. *In* Defining soil quality for a sustainable environment (1992, Mineapolis, USA) (en línea). Doran, JW; Coleman, DC; Bezdicek, DF; Stewart, BA (eds.). *Proceedings*. Madison, Wisconsin, USA. p. 3. Consultado 15 dic. 2024. Disponible en <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2136/sssaspecpub35>

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>

Elementar Analysensysteme GmbH. 2011. Vario Macro Cube Elemental Analyzer Condensed Manual. Elementar Analy-sensysteme GmbH, Alemania. s. p.

FAO (Food and Agriculture Organization). 2021. Standard operating procedure for soil pH determination. Food and Agriculture Organization of the United Nations 1(2).

Fassbender, H; Bornemiza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, IICA. 420 p.

Forsythe, W. 1985. Física de Suelos: manual de laboratorio. 1 ed. 2ª reimpresión. San José, Costa Rica, IICA. 212 p.

Fratoni, MM; Moreira, A; Moraes, LA; Almeida, LH; Pereira, JC. 2017. Effect of nitrogen and potassium fertilization on banana plants cultivated in the humid tropical Amazon. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 48(13):1511-1519. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1373791>

Fu, L; Ruan, Y; Tao, C; Li, R; Shen, Q. 2016. Continuous application of bioorganic fertilizer induced resilient culturable bacteria community associated with banana *Fusarium* wilt suppression. *Scientific Reports* 6: 27731. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep27731>

Gauggel, C; Sierra, F; Arevalo, G. 2005. The problem of banana root deterioration and its impact on production: Latin America's experience. *In* International symposium: Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. (San José, Costa Rica). Turner, W; Rosales, F (eds.). Proceedings. International Network for the Improvement of Banana and Plantain. Montpellier, France. p. 13.

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. National Academy of Sciences of the United States of America 107(38):16732-16737. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0910275107>

Golubouay, J; Vega, H. 1988. Cambio y continuidad en la economía bananera: la actividad bananera en Costa Rica. San José, FLACSO. CEDAL. 258 p.

González García, 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>

Grant, W. 1982. Exchangeable Cations. In Page, AL (ed.). Methods of soil analysis. 2nd edition. Madison, USA. p 161-164. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c9>

Guimarães, DV; Gonzaga, MI; Melo Neto, J de O. 2014. Management of soil organic matter and carbon storage in tropical fruit crops. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 18(3):301-306. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000300009>

Henríquez, C; Cabalceta, G. 2012. Guía Práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. 2 ed. San José, Costa Rica. UCR/CIA-ACCS. 112 p.

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>

Hepper, EN; Buschiazzi, DE; Hevia, GG; Urioste, A; Antón, L. 2006. Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents. Geoderma 135:216-223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.12.005>

Herrera, R; Calderón, I; Gutiérrez, A. 2017. Soil quality index in conventional and semi-ecological farms producing plantain (*Musa* AAB Simmonds cv. Dominic Harton) in Anolaima-Cundinamarca, Colombia. Acta Agronómica 66(4):457-465. DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v66n4.61271>

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

Holdridge, L. 1987. Ecología basada en zonas de vida (en línea). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 216 p. Consultado 15 jun. 2024. Disponible en <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DO2003100523>.

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):049502. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035005>

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. Departamento de Investigaciones, Asociación Bananera Nacional. San José, Costa Rica. 29 p.

Karlen, DL; Mausbach, MJ; Schuman, GE. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. Soil Science Society of America Journal 61:4-10. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>

Kemper, W; Rosenau, R. 1986. Technical bulletin. Aggregate stability of soils from the western portions of the United States and Canada. USDA, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC. N°. 1355.

Lahav, E; Turner, D. 1992. Boletín. Fertilización del banano para rendimientos altos. 2 ed. Quito, Ecuador, International Potash Institute. N°. 7.

Larkin, RP. 2015. Soil Health Paradigms and Implications for Disease Management. Annual Review of Phytopathology 53(1):199-221. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080614-120357>

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>

Li, J; Jia, Y; Dong, R; Huang, R; Liu, P; Li, X; Wang, Z; Liu, G; Chen, Z. 2019. Advances in the mechanisms of plant tolerance to manganese toxicity. International Journal of Molecular Sciences 20(20):5096. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20205096>

Lima, ACR; Brussaard, L; Totola, MR; Hoogmoed, WB; de Goede, RGM. 2013. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. Applied Soil Ecology 64:194-200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.12.009>

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. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 82 p. Consultado 15 dic. Disponible en <http://agriperfiles.agri-d.net/individual/n200378>

López, A; Espinoza, J. 1995. Manual de nutrición y fertilización del banano. Quito, Ecuador, INPOFOS. 82 p.

Luan, L; Liang, C; Chen, L; Wang, H; Xu, Q; Jiang, Y; Sun, B. 2020. Coupling bacterial community assembly to microbial metabolism across soil profiles. mSystems 5(3):10-1128. DOI: <https://doi.org/10.1128/msystems.00298-20>

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: <http://dx.doi.org/10.15517/am.v32i3.43610>.

Martin-Prével, P. 1974. Les méthodes d'échantillonnage pour l'analyse foliaire du bananier (en línea). *Fruits* 29(9):583-588. Consultado 15 dic. 2024. Disponible en <https://revues.cirad.fr/index.php/fruits/article/view/34098>

Martin Prével, P; Gardner, FP; Gautier, P. 1988. Plant analysis as a guide to the nutrient requirement of temperate and tropical crops. *Field Crops Research* 19(1):76-77. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(88\)90036-6](https://doi.org/10.1016/0378-4290(88)90036-6)

Mata, R; Rosales, A; Sandoval, D; Vindas, E; Alemán, B. 2022. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica (en línea). San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas. Esc. 1:200.000. Consultado 15 dic. 2024. Disponible en <http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>

Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15(12):1409-1416. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>

Mello da Silva, I; Rodríguez, S; Lima, H; Melo Queiroz, H; Pereira, G; Pires da Silva, A. 2021. 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>

Méndez, JC; Bertsch, F. 2012. Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, Costa Rica, ACCS. 108 p.

Miner, GL; Delgado, JA; Ippolito, JA; Stewart, CE. 2020. Soil health management practices and crop productivity 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, 3.1. ed. (en línea). Geneva, New York, Cornell University. Consultado 16 dic. 2024. 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>

Mulat, Y; Kibret, K; Bedadi, B; Mohammed, M. 2021. Soil quality evaluation under different land use types in Kersa sub-watershed, Eastern Ethiopia. Environmental Systems Research 10:19. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40068-021-00224-6>

Naranjo Morán, J; Vera Morales, M; Mora González, A. 2021. Acumulaciones de hierro en agroecosistemas bananeros (Milagro, Ecuador): una revisión bibliográfica de algunos factores que intervienen en la salud y nutrición del cultivo. Siembra 8(2):e2680. DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v8i2.2680>

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, R; Zuñiga, J; Segura, R; Torres, P; Blanco, F; Sandoval, J. 2019. Biofertilización como suplemento en la nutrición del cultivo de banano (*Musa AAA*) (en línea). Corbana 45(65):51-66. Consultado 16 dic. 2024. Disponible en www.musalit.org/seeMore.php?id=19585

Pattison, A; Moody, P; Badcock, K. 2005. Banana root and soil health project-Australia. In International symposium: Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. (San José, Costa Rica). Turner, W; Rosales, F (eds.). Proceedings. International Network for the Improvement of Banana and Plantain. Montpellier, France. p. 149.

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>

Pérez, WA; Torres Bazurto, J. 2020. Carbon-nitrogen ratio in soils with fertilizer applications and nutrient absorption in banana (*Musa* spp. cv. Williams). *Agronomía Colombiana* 38(2):253-26. DOI: <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v38n2.78075>

Powers, JS. 2004. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land use transitions in northeastern Costa Rica. *Ecosystems* 7(2):134-146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0123-2>

R Studio Team. 2015. R Studio: Integrated Development for R. Boston: R Studio, Inc. (en línea). Consultado 23 mar. 2024. Disponible en <http://www.rstudio.com>

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>

Razi Ismai, M; Yahya, MK; Majid, MM. 2004. Growth, water relations, stomatal conductance and proline concentration in water stressed banana (*Musa* spp.) plants. *Asian Journal of Plant Sciences* 3(6):709-713. DOI: <https://doi.org/10.3923/ajps.2004.709.713>

Rey, JC; Martínez, G; Lobo, D; 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. Consultado 16 dic. 2024. Disponible en <http://hdl.handle.net/10872/4166>

Rojas, N. 2011. Estudio de las cuencas hidrográficas de Costa Rica: Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico 2011 (en línea). Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones e Instituto Meteorológico nacional. San José, Costa Rica. 724 p. Consultado 16 dic. 2024. Disponible en <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/3508/>

Rosales, FE; Pocasangre, LE; Trejos, J; Serrano, E; Peña, W. 2008. Guía de diagnóstico de la calidad y salud de suelos (en línea). Bioversity International. Montpellier. Francia. Consultado 16 dic. 2024. Disponible en www.musalit.org/seeMore.php?id=12073

Royal Eijkelkamp. 2024. Wet sieving apparatus. 08.13 (en línea). Países Bajos. Consultado 10 jun. 2024. Disponible en <https://www.royaleijkelkamp.com/products/lab-testing-equipment/soil-physical-research/aggregate-stability/wet-sieving-apparatus/>

Samaei, F; Emami, H; Lakzian, A. 2022. Assessing soil quality of pasture and agriculture land uses in Shandiz county, northwestern Iran. Ecological Indicators 139:108974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108974>

Sánchez Zúñiga, K; Tapia Fernández, A; Rivera Méndez, WE. 2021. Effect of three different agronomic conditions on biochemical profile and diversity in the rhizosphere of banana plantations infected with *Fusarium oxysporum* Race 1. Revista Chapingo, Serie Horticultura 27(2):55-70. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.018>

Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils. Vers. 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. 300 p.

Schweizer, SA; Bucka, FB; Graf Rosenfellner, M; Kögel Knabner, I. 2019. Soil microaggregate size composition and organic matter distribution as affected by clay content. Geoderma 355:113901. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113901>

Serrano, E. 2003. Relationship between functional root content and banana yield in Costa Rica. In International symposium: Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. (San José, Costa Rica). Turner, W; Rosales, F (eds.). Proceedings. International Network for the Improvement of Banana and Plantain. Montpellier, France. p. 25.

Serrano, E; Sandoval, J; Pocasangre, L; Rosales, F; Delgado, E. 2006. Importancia de los indicadores físico químicos en la calidad del suelo para la producción sustentable del banano en Costa Rica. *In* XVII Reunião Internacional da Associação para a Cooperação nas Pesquisas sobre Banana no Caribe e na América Tropical (2006, Santa Catarina, Brazil). Soprano, E; Tcacenco, FA; Lichtemberg, LA; Silva, MC (eds.). Proceedings. ACORBAT. p. 207.

Seybold, CA; Mausbach, MJ; Karlen, DL; Rogers, HH. 2018. Quantification of soil quality. *In* Lal, R; Kimble, JM; Follett, RF; Stewart, B.A (eds.). Soil Processes and the Carbon Cycle. Boca Raton, CRC Press. 624 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203739273>

SINIGIRH (Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico). 2023. Mapa de Planificación Territorial SINAC – Bosque maduro (en línea). MINAE. Consultado 30 oct. 2023. Disponible en <https://mapas.da.go.cr/>

Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy (en línea). 12 ed. Washington, USA, USDA-Natural Resources Conservation Service. 381 p. Consultado 15 dic. 2024. Disponible en <https://nrcspad.sc.egov.usda.gov/DistributionCenter/pdf.aspx?productID=1059>

Soto, M. 2014. Bananos, conceptos básicos. Cartago, Costa Rica, Tecnológico de Costa Rica. 338 p.

Sparks, DL. 1996. Methods of soil analysis part 3 chemical methods. Wisconsin, USA, Soil Science Society of America. 1390 p.

Stoorvogel, JJ; Segura, RA. 2018. Nutrition and soil management in banana cultivation. *In* Kema, G; Drenth, A (eds.). Achieving sustainable cultivation of bananas. Vol. 1. Cambridge, United Kingdom, Burleigh Dodds Science. 420 p. DOI: <https://doi.org/10.19103/as.2017.0020.16>

Stover, R; Simmonds, N. 1987. Bananas. 3 rd. ed. Longman, London. 468 p.

Strawn, DG; Bohn, HL; O'Connor, GA. 2015. Soil Chemistry. 4 ed. USA, Wiley Blackwell. 375 p.

Trejo González, N; Prieto Méndez, J; Marmolejo Santillán, Y; Acevedo Sandoval, OA; Madariaga Navarrete, A; Aquino Torres, E; Canales Flores, RA; Prieto García, F. 2019. Displacement of sodium, potassium, calcium, magnesium and improvements in a saline soil treated with organic and chemical amendments. *Asian Journal of Chemistry* 31(12):2834-2840. DOI: <https://doi.org/10.14233/ajchem.2019.22228>

Turner, DW; Rosales, F. 2005. Proceedings of an international symposium: Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. (1, 2005, San José, Costa Rica). Montpellier, France, International Network for the Improvement of Banana and Plantain. 251 p.

USDA (United States of Department Agriculture). 1999. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Washington, USA, Departamento de Agricultura USDA. 88 p.

Vallejo Quintero, VE; Afanador Barajas, LN; Coca Peña, DA; Vargas Giraldo, AF; Bautista Murcia, MF; Mendoza Hernández, A. 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):35-50. DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201x.14856>

van Wesemael, J; Kissel, E; Eyland, D; Lawson, T; Swennen, R; Carpentier, S. 2019. Using growth and transpiration phenotyping under controlled conditions to select water efficient banana genotypes. *Frontiers in Plant Science* 10:352. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00352>

Vance, E; Brookes, P; Jenkinson, D. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 19:703-707. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)

Vaquero, R. 2003. Soil physical properties and banana root growth. *In* International symposium: Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. (San José, Costa Rica). Turner, W; Rosales, F (eds.). Proceedings. International Network for the Improvement of Banana and Plantain. Montpellier, France. p. 125.

Vargas, A; Madrigal, M; Calvo, P; Sáenz, MV. 2010. Efecto de la desflora y del desmane en la producción de banano (*Musa* AAA). *Corbana* 45(65):93-106.

Vargas, R; Araya, M. 2018. Contenido de raíces en plantaciones comerciales de banano muestreadas en el intermedio madre hijo y frente del hijo de sucesión. Corbana 44:97-124.

Vargas, R; Flores, C. 1995. Retribución nutricional de los residuos de hojas, venas de hojas, pseudotallo y pinzote de banano (*Musa* AAA) en fincas de diferentes edades de cultivo. Corbana 20(44): 33-47.

Villarreal Núñez, 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>

Walker, R; Olale, K; M. Sila, A; Ambaw, G; Radeny, M; Solomon, D. 2022. Measuring soil quality indicators under different climate-smart land uses across East African climate-smart villages. Agronomy 12(2):530. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020530>

Wang, C; Kuzyakov, Y. 2024. Soil organic matter priming: The pH effects. Global Change Biology 30(6):e17349. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17349>

Yan, F; Tuller, M; de Jonge, LW; Moldrup, P; Arthur, E. 2023. Specific surface area of soils with different clay mineralogy can be estimated from a single hygroscopic water content. Geoderma 438:116614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116614>

Yogaswara, DA; Kasmara, H; Hermawan, W. 2021. Using nematode community to evaluate banana soil food web in Mekargalih, Cianjur, West Java. Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science 44(2):465-483. DOI: <https://doi.org/10.47836/PJTAS.44.2.12>

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. DOI: <http://jast.modares.ac.ir/article-23-3022-en.html>

Zhong, S; Sheng, Z; Zheng, L; Zheng, X; Yang, Y; Xiao, D; 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. In: Informe anual de investigaciones. CORBANA, San José, Costa Rica. 321 p.



Agronomía Costarricense, Universidad de Costa Rica.

Se encuentra licenciada con [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Para mayor información escribir a rac.cia@ucr.ac.cr