

ÍNDICE DE CALIDAD DEL SUELO EN ÁREAS CULTIVADAS CON BANANO EN PANAMÁ¹

José Villarreal-Núñez², Iidefonso Pla-Sentis³, Lwonel Agudo-Martínez², Jhon Villaláz-Perez², Franklin Rosales⁴,
Luís Pocasangre⁴

RESUMEN

Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. El objetivo de este trabajo fue obtener un índice para la gestión agrícola y ambiental en suelos cultivados con banano en Panamá. El estudio se realizó en cinco fincas independientes del distrito de Alanje y seis pertenecientes a la Cooperativa COOSEMUPAR en Barú, en el Pacífico de Panamá. Los suelos pertenecen a los órdenes inceptisol (Andic Dystrudepts, Udic Haplustepts y Dystric Haplustepts) y entisol (Andic Udifluvents). Para la descripción de los indicadores se abrieron cuatro calicatas, por cada área de alta y baja productividad, en la banda de fertilización de plantas de banano recién florecidas. Se registraron los datos biométricos de veinte plantas cercanas a cosecha. En cada sitio se midió la infiltración básica, el peso total de raíces y se tomaron muestras para determinar las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo. En todas las fincas se pudo observar elevados niveles de Ca, Mg y K, bajas concentraciones de materia orgánica, relacionado con la baja actividad biológica y escasa biomasa microbiana. En la mayoría de las fincas la infiltración era lenta y había presencia de estructuras degradadas en los horizontes inferiores. El conjunto mínimo de datos que mejor ayudaron a diferenciar entre áreas de alta y baja productividad fueron: porcentaje de arena, pH, Ca, K, materia orgánica, respiración microbiológica, índice de mineralización y peso total de raíces.

Palabras claves: *Musa* spp, actividad biológica en suelos bananeros, plantaciones bananeras.

ABSTRACT

Soil quality indexes in areas cultivated with banana in Panamá. The objective of this research was to obtain an index that could serve as a useful tool for environmental assessment and managing agricultural banana soils in Panama. The work was performed in five independent farms from Alanje District and six properties belonging to the Cooperative COOSEMUPAR in Barú (2005-2006). The soils belong to the orders Inceptisols (Andic Dystrudepts, Udic haplustepts and Dystric haplustepts) and Entisols (Andic Udifluvents). For the description of the indicators, four pits were opened for each area of high and low productivity in the band of fertilization of recently flowered banana plants. Biometric data were recorded of twenty banana plants near harvest. In addition, each site was measured for basic infiltration, total weight of roots and sampled to determine the physico-chemical and biological properties of the soil. In all farms high levels of Ca, Mg and K were detected, low concentrations of organic matter associated with low biological activity and low microbial biomass. In most farms infiltration was slow and degraded structures were present in the lower horizons. The Minimum Data Set (MDS) that best predicted areas of high and low productivity was composed of the following indicators: percentage of sand, pH, Ca, K, organic matter, microbial respiration, mineralization rate and total weight of roots.

Keywords: *Musa* spp, biological activity, banana plantations.

¹ Recibido: 10 de julio, 2012. Aceptado: 28 de octubre, 2013. Parte de la tesis presentada por el primer autor para optar al título de doctor, Universidad de Lleida, España.

² Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Panamá (IDIAP). Panamá. jevilla38@gmail.com, lwonelagudo@gmail.com, jvillalaz14@gmail.com

³ Universidad de Lleida, España. ipla@macs.udl.cat

⁴ Biodiversity International. Costa Rica. f.rosales@bioversity.catie.cr, l. pocasangre@bioversity.catie.cr



INTRODUCCIÓN

El cultivo del banano constituye una de las principales fuentes de ingreso en la economía de más de 120 países en el trópico y subtrópico. Además, el cultivo del banano y el plátano como un conjunto, representan el cuarto cultivo más importante del mundo, después del arroz, el trigo y el maíz, siendo considerado un producto de consumo básico y de exportación, constituye una importante fuente de empleo e ingresos para numerosos países en desarrollo (FAO 2004).

El banano es cultivado en una alta diversidad de suelos, en sistemas tradicionales y ambientalmente sustentables, lo que implica diferencias marcadas en las características del suelo y su calidad. Por lo tanto, es necesario buscar indicadores que sirvan de referencia para conocer la estabilidad y la calidad de estos suelos.

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información importante. Las principales funciones de los indicadores son: evaluar condiciones o tendencias, comparar transversalmente sitios o situaciones, evaluar metas y objetivos, proveer información preventiva temprana y anticipar condiciones y tendencias futuras (Dumanski 1994, Bautista *et al.* 2004).

La calidad de un suelo está definida como “la capacidad del suelo para funcionar dentro de un ecosistema, para una productividad biológicamente sostenible, manteniendo la calidad y promoviendo la salud de la planta y el animal (Doran y Parkin 1994).

Según Pla (1988), los procesos de degradación del suelo son aquellos que reducen tanto en forma cuantitativa como cualitativa, su capacidad actual de producir bienes o servicios. Por lo general, son debidos a la ruptura provocada por la intervención humana, del equilibrio natural entre la agresividad climática y la resistencia potencial de los suelos.

Actualmente los esfuerzos para tratar de comprender los procesos que ocurren en el suelo, han sido enfocados principalmente en las propiedades físicas y químicas y de sus relaciones con algunas características especiales como la topografía y las condiciones climáticas predominantes, no obstante, las propiedades biológicas y el desarrollo radical de la planta juegan un papel determinante en la expresión del potencial

productivo del cultivo y son elementos claves para explicar las complejas interacciones del suelo y su rizosfera (Pattison *et al.* 2004).

En Panamá unas 11 070 ha se dedican al cultivo de banano, los productores independientes cultivan un área total de 6556 ha de banano (4731 en el Pacífico y 1825 en el Atlántico). Las otras 5151 ha son cultivadas en el lado Atlántico por la Compañía Chiquita a través de la Bocas Fruit Company (Dirección Nacional del Banano 2003).

En el año 2007 Panamá exportó un total de 20,4 millones de cajas de banano (406 627 toneladas) que representaron ventas totales al exterior por un monto de 103,2 millones de dólares. Sin embargo, en los últimos años ha habido un descenso constante en los ingresos provenientes de las exportaciones de banano (Dirección Nacional del Banano 2008).

A pesar de la aplicación de técnicas e insumos de alto costo, el uso de variedades mejoradas y resistentes a enfermedades, en las plantaciones comerciales de banano se ha registrado una reducción considerable en la productividad, debido al cambio y deterioro acelerado de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. La relación directa entre la reducción de la productividad y la pérdida de la calidad del suelo, ocasionados por el manejo inadecuado de la plantación, erosión y pérdida de la capa arable del suelo, establecimiento de la red de canales en forma deficiente, uso excesivo de agroquímicos para el control de plagas y enfermedades y fertilización sin tomar en cuenta las necesidades reales del cultivo ni tampoco los niveles existentes en el suelo (Gauggel *et al.* 2005, Pattison *et al.* 2005).

Por ejemplo, la productividad de las plantaciones en fincas bananeras con alta tecnología, gestionadas por multinacionales en Panamá, ha mostrado oscilaciones considerables durante la última década pasando de aproximadamente 50 t/ha a un rendimiento promedio de apenas 30-35 t/ha. Existe evidencia no bien documentada de que esta reducción de la producción está asociada a un agotamiento de los suelos, que ha ocasionado el abandono de muchas áreas de producción ya no rentables para las grandes empresas exportadoras. Prueba de ello es que la empresa Chiquita Fruit Company, en el año 1998, vendió sus fincas a productores independientes de la Cooperativa de Servicios Múltiples de Puerto Armuelles (COOSEMUPAR). Estos productores debido a malos manejos administrativos

en las fincas, falta de tecnificación en la producción y problemas sindicales con sus trabajadores han visto disminuir cada día más su productividad.

Por el contrario, la producción bananera en países como Venezuela y República Dominicana, caracterizada por una mayor utilización de sistemas de producción orgánica o de menor uso de insumos químicos, aunque con un rendimiento más bajo por planta, ha mantenido una notoria estabilidad durante los últimos diez años (Serrano 2003).

La compactación del suelo, el manejo deficiente del drenaje, el bajo contenido de materia orgánica y una escasa actividad microbiana, son los principales problemas que influyen sobre el crecimiento de las raíces y la productividad del banano en esta zona (Villareal *et al.* 2008). Capas de suelo compactadas limitan el crecimiento y afectan las propiedades relacionadas al movimiento del agua y aire.

En la medida en que se avance en metodologías y generación de información que permitan establecer indicadores confiables, se estará más cerca de diseñar sistemas productivos menos agresivos con el suelo,

el medio ambiente y que permitan incluso delimitar aquellas zonas que es necesario mantener sin intervenir. El objetivo de la presente investigación fue obtener un índice que sirviera como una herramienta muy útil para la gestión agrícola y ambiental de suelos de áreas cultivadas con banano en Panamá, facilitando la evaluación de los impactos que pudieran tener las técnicas que se apliquen sobre la conservación de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelo y clima

El estudio se realizó en el área bananera de la vertiente del Pacífico de Panamá durante los años 2005 y 2006, en cinco fincas pertenecientes a productores independientes del corregimiento de Divalá, distrito de Alanje y seis fincas pertenecientes a la Cooperativa de Servicios Múltiples de Puerto Armuelles (COOSEMUPAR R.L.) en Barú, provincia de Chiriquí, en el occidente de Panamá (Cuadro 1).

Cuadro 1. Ubicación de las fincas productoras de banano en la vertiente del Pacífico de Panamá, 2006.

Nombre de la finca	Productividad	Distrito	Productor	Coordenadas UTM
Los Angeles-(LA)	Alta	Alanje	Independiente	307761,43 X - 926065,22 Y
	Baja			306493,21 X - 926149,35 Y
San Antonio-(SA)	Alta	Alanje	Independiente	309733,37 X - 926714,12 Y
	Baja			308551,12 X - 924949,32 Y
Santa Cecilia-(SC)	Alta	Alanje	Independiente	308125,43 X - 929520,22 Y
	Baja			308384,24 X - 930153,33 Y
Margarita-(MR)	Alta	Alanje	Independiente	307780,12 X - 927345,24 Y
	Baja			309147,27 X - 927030,45 Y
Balsas-(BL)	Alta	Barú	Independiente	291533,22 X - 930871,11 Y
	Baja			291599,17 X - 931621,33 Y
Higuitos-(HG)	Alta	Barú	COOSEMUPAR	292900,14 X - 922224,13 Y
	Baja			292736,27 X - 922757,36 Y
Mango-(MG)	Alta	Barú	COOSEMUPAR	295527,11 X - 925729,23 Y
	Baja			294833,45 X - 925915,34 Y
Palo Blanco-(PB)	Alta	Barú	COOSEMUPAR	294899,41 X - 921729,32 Y
	Baja			294691,42 X - 923088,37 Y
Jagua-(JG)	Alta	Barú	COOSEMUPAR	297673,37 X - 925613,52 Y
	Baja			297049,65 X - 926181,41 Y
Javillo-(JV)	Alta	Barú	COOSEMUPAR	293327,22 X - 926291,55 Y
	Baja			293817,17 X - 925382,36 Y
Caoba-(CA)	Alta	Barú	COOSEMUPAR	294214,12 X - 928658,39 Y
	Baja			294847,14 X - 927987,27 Y

Las fincas independientes escogidas para el estudio en Alanje fueron: Los Ángeles (LA), San Antonio (SA), Santa Catalina (SC), Margarita (MR) y Balsas (BL). Mientras que las de COOSEMUPAR fueron las siguientes: Higuitos (HG), Mango (MG), Palo Blanco (PB), Jagua (JG), Javillo (JV) y Caoba (CA).

Los suelos de la región son de origen sedimentario, principalmente suelos aluviales pertenecientes a los órdenes inceptisol (Andic Dystrudepts, Udic Haplustepts y Dystric Haplustepts) y entisol (Andic Udifluvents), con una altura promedio de unos 40 msnm y relieve bastante plano (pendiente 5 – 10%). Son valles y planicies aluviales formadas en el terciario y cuaternario por aluviones, rocas sedimentarias poco consolidadas y areniscas, con gran presencia de cenizas, tobas, lutitas y lavas basalto-andesíticas provenientes de las zonas volcánicas muy próximas a las áreas cultivadas con banano.

De acuerdo a la clasificación de Köppen (IGNTG 1995) en la región predomina un clima tropical húmedo (Ami). Presenta un promedio anual de lluvias de 2200 mm (promedio de 25 años) (ETESA 2008), con meses secos (déficit hídrico) entre enero y marzo y húmedos (lluviosos) entre abril y diciembre, temperatura promedio de 27°C. Se presenta un régimen de humedad del suelo údico.

Selección de las áreas de estudio en cada finca

Inicialmente se realizó una entrevista con cada administrador de finca con el fin de conocer su versión sobre productividad y los problemas afines de su finca. En cada una se seleccionaron dos áreas de cuatro hectáreas con historial de productividad contrastante, una de alta y otra de baja productividad. Considerando como áreas de alta productividad aquellas con producciones mayores de 30 t/ha, que han presentado mayor estabilidad en el tiempo, y las menores de esta cantidad, y con una mayor fluctuación en los rendimientos, como de baja productividad. Tomando en cuenta la frondosidad de la plantación se verificó la selección hecha de acuerdo a los registros de cada administrador de finca.

Dentro de cada área seleccionada se delimitaron cuatro parcelas de 20 x 50 m cada una, correspondiente a 1000 m². Para elegir estos sitios se hizo un muestreo exploratorio de suelos tomando muestras con un barreno, para seleccionar los 1000 m² que presentaran la menor variación de suelos posible en cada área del estudio.

En cada uno de los cuatro sitios de 1000 m² seleccionados se verificó la densidad de plantas y luego se identificaron 20 plantas en plena producción que tenían un racimo entre 13 y 16 semanas, próximas a la cosecha, para un total de 80 plantas por cada área seleccionada y 160 por finca. A cada una se le tomaron datos biométricos de productividad: circunferencia de la madre (tomada a 1 m de altura del nivel del suelo), altura del hijo (cm), número de manos de banano. Igualmente, en cada una de estas áreas seleccionadas, se identificó una planta recién florecida (cuatro plantas en total por área de productividad contrastante) frente a la cual se abrió una calicata de 60 x 60 x 60 cm para determinar las características físicas, químicas y biológicas del suelo (30 cm de distancia del hijo, en la zona de fertilización), siguiendo la metodología de Jaramillo y Vásquez (1990) para estudios de suelos bananeros.

En cada calicata se anotó su localización exacta utilizando un GPS y se realizó la determinación de las propiedades que aparecen en el Cuadro 2. Se tomaron muestras de suelo que luego se llevaron al laboratorio de fertilidad de suelos del Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) para su respectivo análisis. Además, se identificaron y describieron los horizontes presentes al alcanzar los 60 cm de profundidad.

Las manchas o moteos presentes en el perfil se usaron para asignar una calificación para el drenaje. La profundidad efectiva del suelo, se midió introduciendo un barreno hasta 1,50 m de profundidad. La resistencia a la penetración se midió con un penetrómetro de punta, realizando cinco mediciones por horizonte. Además se determinó la capacidad de aireación de los suelos utilizando la metodología descrita por Pla (1983). Para la determinación de la humedad del suelo se utilizó el método gravimétrico en muestras disgregadas (EMBRAPA 1997).

El contenido de fósforo (P) y los micronutrientes: cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y cinc (Zn) fueron extraídos con la solución de Mehlich 3; potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) intercambiables con solución de acetato de amonio pH 7, aluminio (Al) intercambiable con KCl 1 N. El pH se midió en agua por medio de una relación suelo-agua de 1:2,5.

Se determinó el peso fresco total de las raíces para lo cual se excavó una planta, se colectaron y pesaron todas sus raíces. El carbono (C) de la biomasa microbiana se determinó por el método de fumigación-extracción con cloroformo y para determinar la

Cuadro 2. Indicadores determinados en cada calicata descrita. Plantaciones bananeras de Panamá. 2006.

Indicador	Método	Referencia
	Indicadores de propiedades físicas	
Descripción del perfil de la minicalicata	Estudio de los horizontes (zonas diferenciadas) en las minicalicatas	Jaramillo y Vásquez (1990)
Color	Libro de Munsell	Munsell Color Company (2000)
Textura del suelo	Método de Bouyoucos y textura al tacto en campo	Bouyoucos (1951)
Estructura	Soil USDA- determinada en campo	USDA (1995)
Infiltración básica	Método de los cilindros concéntricos	ILRI (1977)
Resistencia a la penetración	Método del penetrómetro (punta)	Forsythe (1980)
Densidad aparente	Método del cilindro de volumen conocido	Forsythe (1980)
Indicadores propiedades químicas		
Disponibilidad de P, Fe, Cu, Mn y Zn	Extraídos con Mehlich 3	Mehlich (1984)
K, Ca y Mg interc.	Acetato de amonio pH 7	USDA (1995)
pH	pH en agua (1 : 2,5)	USDA (1995)
Aluminio intercambiable	Extraído con KCl 1N	USDA (1995)
Carbono orgánico total	Digestión húmeda de Walkley-Black	USDA (1995)
Conductividad eléctrica	Conductímetro	USDA (1995)
Indicadores propiedades biológicas		
Biomasa microbiana de carbono	Método de fumigación-extracción con cloroformo	Tate <i>et al.</i> (1998)
Respiración microbiana	Liberación de CO ₂	Alef y Nannipieri (1995)
Índice de mineralización	Relación del C-CO ₂ producido durante diez días entre el C orgánico total del suelo (%)	Abril y Bucher (2001)
Peso total de raíces	Extracción total de raíces de la planta (0-40 cm)	Jaramillo y Vásquez (1990)
Indicadores de productividad (determinados a las plantas)		
Circunferencia de la madre (seudotallo)	Medición de la circunferencia del seudotallo a 1 m del suelo	Serrano (2003)
Altura del hijo	Medición del tamaño del hijo de sucesión	Serrano (2003)
Número de manos de banano	Conteo del número de manos producidas	Serrano (2003)

respiración microbiana cinco muestras de suelo, libre de raíces, colectadas de los primeros 20 cm de cada calicata, se incubaron en envases herméticamente cerrados en un lugar oscuro durante diez días, realizando dos lecturas, una cada cinco días. Se recogió el CO₂ generado en 10 ml de solución de NaOH 0,2 N y se valoró por medio de una solución de HCl 0,1 N.

Análisis de los datos y cálculo del índice de calidad

Se emplearon métodos estadísticos como el análisis en componentes principales, el análisis factorial discriminante, la clasificación automática o análisis de conglomerados (clustering), correlaciones y regresión lineal (Draper y Smith 1968, Castillo *et al.* 2006).

Además, se calculó la desviación estándar, se realizó análisis de varianza a los diferentes indicadores medidos y comparación de medias por medio de la prueba de rangos múltiples de Tukey con una confiabilidad del 95%.

La selección de los indicadores más significativos se hizo, en primer lugar, basado en regresiones lineales paso a paso ("stepwise"), tanto hacia adelante ("forward") como hacia atrás ("backward"). En el primer caso, se escogieron las variables para las cuales se obtuvo mayor regresión lineal múltiple, una a una, con respecto al conjunto de variables ya escogidas y la variable a explicar, basado en la *F* de Fisher. En el caso hacia atrás, se van eliminando variables no significativas.

El modelo matemático utilizado para la regresión lineal múltiple fue el siguiente:

$$y' = a + b_1X^1 + b_2X^2 + b_3X^3 + \dots + b_kX^k$$

donde y' era el valor predicho de la variable criterio, en este caso, los indicadores de productividad escogidos, y los valores de a y los coeficientes b fueron determinados a partir de los datos ofrecidos por la muestra. Esta ecuación no representa una línea como en el caso de la regresión simple sino que representa diversos planos de un espacio multi-dimensional.

El valor Beta que aparece en cada regresión múltiple indica la correlación existente entre cada indicador con la variable bajo estudio y la correlación que existe entre todos los indicadores entre sí.

Se aplicó el método de clasificación jerárquica ascendente según el criterio de la agregación del salto promedio (conocido en inglés como *average link*), aplicado sobre la matriz de correlaciones, para obtener las clases de indicadores. Se obtuvo finalmente un dendrograma o árbol de clasificación de los indicadores. Con estos resultados, se considera que un indicador puede representar a los demás elementos de su clase (Villalobos 2006).

Se obtuvo entonces el índice de calidad para los suelos bananeros de Panamá, que tenía la forma:

$$\text{Índice} = \sum_{i=1}^n \text{peso}_i f_i(x_i)$$

donde:

peso_i es el peso del indicador i

f_i es la curva de respuesta que corresponde al indicador i

x_i es el valor del indicador i del lugar que se quiere evaluar.

Es decir, para cada valor de los indicadores $x_1, x_2, \dots, x_n$ del conjunto mínimo de datos (MDS) se tenía un valor entre 0 y 1 del índice, el cual cuanto más cercano a 1 significaba que mejor era la calidad de ese suelo bananero, y cuanto más cercano a 0 peor era ese suelo para la producción (Castillo *et al.* 2006). Se elaboraron cuadros y gráficas tipo radar para presentar los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores obtenidos al medir las características biométricas del cultivo se presentan en el Cuadro 3. El desvío estándar calculado para las 80 réplicas medidas en cada área de alta y baja productividad de las fincas se indica entre paréntesis.

Los resultados obtenidos indican que las fincas San Antonio y Caoba fueron las que presentaron mayor contraste entre áreas de alta y baja productividad. Con relación a la circunferencia de la madre en el área de alta productividad se destacaron las fincas San Antonio, Higuitos, Mango, Palo Blanco, Jagua y Caoba, que aunque no presentaron diferencia estadísticamente significativa del resto, sí mostraron, en términos absolutos, mayor vigor. En el área de baja productividad se destaca, claramente, la finca Jagua con una mayor circunferencia de la madre comparado con el resto de las fincas. En las áreas de alta productividad se encontró que la circunferencia de la madre tenía en media 6,64 cm más que en las áreas de baja productividad, indicando con este resultado la existencia de plantas con mayor fortaleza y resistencia a vientos, enfermedades, mayor peso de frutas, etc.

Con relación a la altura del hijo y el número de manos los resultados obtenidos no fueron estadísticamente significativos, obteniéndose valores muy similares en casi todas las áreas, ya fueran de alta o baja productividad. Sin embargo, en términos absolutos, en las áreas de alta productividad, la media general de todas las fincas con relación a la altura del hijo, denotaba que había una diferencia de 0,23 m más respecto a la

Cuadro 3. Datos biométricos del cultivo de banano, medidos en cada área de alta y baja productividad, de las fincas bananeras en el Pacífico de Panamá. 2006.

Finca*	Circunferencia de la madre (cm)		Altura del hijo (m)		Número de 'manos de banano	
	Alta prod.	Baja prod.	Alta prod. _{NS} **	Baja prod. _{NS}	Alta prod. _{NS}	Baja prod. _{NS}
LA	69,05 (11,4) b***	61,88 (7,2) bc	2,19 (3,7)	1,92 (2,3)	6,66 (3,2)	5,83 (5,1)
SA	76,26 (11,3) ab	62,63 (6,7) bc	2,18 (3,2)	1,69 (4,4)	7,65 (3,5)	5,90 (4,7)
SC	70,10 (12,3) b	61,14 (8,9) bc	1,78 (3,5)	1,72 (4,2)	6,40 (3,7)	5,38 (5,2)
MR	65,75 (10,3) bc	57,86 (7,9) c	1,81 (1,8)	1,45 (1,3)	5,04 (5,2)	4,46 (6,3)
BL	68,63 (10,7) b	62,70 (5,7) bc	1,60 (1,8)	1,57 (2,2)	6,86 (3,4)	5,96 (3,9)
HG	74,94 (11,6) ab	68,01 (6,3) ab	2,13 (2,7)	1,85 (3,1)	7,86 (4,1)	6,63 (3,1)
MG	75,40 (10,4) ab	71,45 (7,4) ab	1,93 (1,7)	1,70 (4,3)	7,29 (4,2)	7,00 (3,2)
PB	75,99 (10,2) ab	66,51 (4,5) ab	2,15 (1,7)	1,73 (2,6)	7,65 (3,6)	6,06 (4,4)
JG	73,73 (9,3) ab	75,19 (7,7) a	1,80 (1,4)	1,81 (4,3)	6,78 (3,2)	6,76 (4,3)
JV	70,58 (7,5) b	68,06 (8,2) ab	1,77 (2,1)	1,72 (4,2)	7,10 (4,5)	6,20 (4,1)
CA	72,59 (10,1) ab	64,58 (4,3) bc	2,00 (2,3)	1,70 (3,5)	6,91 (3,5)	6,31 (3,9)
Media	72,09	65,45	1,94	1,71	6,93	6,04

* LA: Los Ángeles; SA: San Antonio; SC: Santa Catalina; MR: Margarita; BL: Balsas; HG: Higuitos; MG: Mango; PB: Palo Blanco; JG: Jagua; JV: Javillo; CA: Caoba. Prod.: productividad.

** NS= no significativo es válido para todas las medias de la columna.

*** Medias seguidas de la misma letra no muestran diferencia estadísticamente significativa. Nivel de significación por Tukey, $\alpha=0,05$.

media del área de baja productividad. Igualmente, para la variable número de manos, se determinó que había 0,89 manos más en las áreas de alta que en las de baja productividad, consecuentemente, se obtendrá en esta área mayor rendimiento.

El desvío estándar para cada valor indica que dentro de una misma área de la finca los valores encontrados mostraron mucha fluctuación, probablemente influenciado por la gran variabilidad del suelo, el manejo inadecuado de las parcelas, la fertilización deficiente que se ejecuta en forma rudimentaria y poco sistemática en la mayoría de las fincas. Las aplicaciones de fertilizantes se realizan sin uniformidad de medidas y en muchos casos sin contar con análisis de suelos ni de tejido foliar para verificar las necesidades del suelo y del cultivo.

Obtención del conjunto mínimo de datos (MDS)

El total de indicadores químicos, físicos y microbiológicos determinados, se usaron como variables

explicativas para hacer regresiones lineales con respecto a dos variables de productividad, escogiéndose el número de manos y circunferencia de la madre como factores que se corresponden con mayor productividad.

Mediante un análisis en componentes principales se pudo determinar que variables como el pH, potasio (K), fósforo (P), cinc (Zn), densidad aparente, respiración microbiana total y biomasa microbiana tenían influencia positiva o negativa sobre la productividad.

Un resumen de los resultados encontrados que ayudaron en la selección final de los indicadores, se observan en el Cuadro 4. De acuerdo con estos resultados, el MDS quedó conformado por aquellas variables que mejor explicaron la variabilidad total con respecto a las dos variables de productividad escogidas, siendo seleccionadas aquellas que aparecieron el mayor número de veces entre las mejores (cuatro o cinco veces), tanto en las regresiones paso a paso como también en el análisis en componentes principales (ACP).

El MDS quedó integrado por un indicador físico (% de arena), cuatro indicadores químicos [pH, Calcio

Cuadro 4. Indicadores físicos, químicos y microbiológicos que obtuvieron los mejores resultados, de acuerdo con el método estadístico de análisis utilizado para la determinación del índice de calidad, en suelo de fincas bananeras en Panamá. 2006.

Indicador*	Circunferencia de la madre		Número de manos de banano		Total de indicadores	
	R. Adelante**	R. Atrás**	R. Adelante	R. Atrás	ACP***	Total
pH	pH	pH	pH	pH	pH	5
Al						0
Ca	Ca	Ca	Ca	Ca		4
Mg	Mg	Mg				2
K	K	K	K	K	K	5
P					P	1
Fe						0
Cu				Cu		1
Zn				Zn	Zn	2
Mn	Mn	Mn				2
Ca/Mg	Ca/Mg	Ca/Mg		Ca/Mg		3
Ca/K			Ca/K			1
Mg/K				Mg/K		1
% Sat K			% Sat K			1
%Sat Ca						0
M.O.	M.O.	M.O.	M.O.	M.O.		4
% arena	% arena	% arena	% arena	% arena		4
% arcilla			% arcilla	% arcilla		2
D ap.	D ap.				D ap.	2
Inf. Bás.	Inf. Bás.	Inf. Bás.	Inf. Bás.			3
RM Total	RM Total	RM Total	RM Total	RM Total	RM Total	5
N Total	N Total	N Total	N Total			3
C Total						0
Ind Min	Ind. Min.	Ind. Min.	Ind. Min.	Ind. Min.		4
Biom. M.					Biom M.	1
R. Total	R. Total	R. Total	R. Total	R. Total		4

*% Sat K (saturación de potasio); % Sat Ca (saturación de calcio); M.O. (materia orgánica); D. ap. (densidad aparente); Inf. Básica (infiltración básica); RM Total (respiración microbiológica total); N total (nitrógeno total); C total (carbono total); Ind Min (índice de mineralización); Biom. M. (biomasa microbiana); R. Total (peso total de raíces).

**R. adelante (regresión hacia adelante); R. atrás (regresión hacia atrás).

***ACP (análisis de componentes principales).

(Ca), potasio (K) y materia orgánica (MO)] y tres indicadores biológicos [(respiración microbiológica (RM), índice de mineralización (Ind Min), peso total de raíces (RT)].

Con el fin de demostrar la coherencia y la independencia entre los indicadores del MDS se efectuó un análisis de correlación solamente sobre las variables seleccionadas. El Cuadro 5 muestra las

Cuadro 5. Correlaciones entre las variables del Conjunto Mínimo de Datos. Fincas bananeras de Panamá. 2006.

Indicador	pH	Ca	K	MO	% Arena	RM	Ind. Min	RT
pH	1,00							
Ca	0,13	1,00						
K	0,24	0,44	1,00					
MO	-0,04	-0,04	0,03	1,00				
% Arena	-0,03	-0,21	-0,05	0,04	1,00			
RM	0,06	-0,25	-0,19	0,02	0,09	1,00		
Ind Min	0,12	-0,28	-0,25	-0,55	-0,03	0,49	1,00	
RT	-0,11	0,37	0,25	0,17	-0,43	-0,18	-0,33	1,00

correlaciones obtenidas en el análisis efectuado al MDS. Como se observa en dicho cuadro, a pesar de que en general, se obtuvieron correlaciones bastante bajas entre las variables del MDS, demostrando que había bastante independencia entre ellas, se destaca la buena correlación positiva entre RM e Ind Min, dos indicadores que mantienen una estrecha relación de dependencia entre sí, si la respiración microbiana es muy baja esto debe repercutir en un bajo índice de mineralización de la materia orgánica. Otra correlación importante que se observó fue la que se obtuvo entre RT y % de arena, siendo esta negativa, pues cuando el suelo presenta alto porcentaje de este componente granulométrico, generalmente se observa una tendencia a sufrir compactación dificultando el desarrollo radical de la planta.

Obtención de los pesos de los indicadores del MDS

Con el fin de definir la importancia relativa que tiene cada indicador, se efectuó un análisis de

componentes principales solamente sobre los ocho indicadores del MDS. De esta manera, el análisis arrojó cinco componentes principales con varianza mayor que uno que acumularon el 85% de inercia total (Cuadro 6). Existen diversos criterios para determinar el número de factores a conservar. Uno de los más utilizados es la regla de Kaiser que indica conservar aquellos factores cuyos valores propios (eigenvalues) son mayores a la unidad. Estos primeros cinco componentes principales fueron utilizados para calcular la comunalidad de cada indicador.

En un análisis de componentes principales, la comunalidad de un indicador representa la suma de los cosenos al cuadrado con los componentes principales y en este caso muestra la importancia relativa de cada indicador con respecto al conjunto de los cinco primeros componentes principales o cuánto de la variabilidad total es explicado por ese indicador determinado. Estas comunalidades sirvieron entonces para definir los pesos de cada indicador del MDS en la construcción del índice de calidad de suelos bananeros.

Cuadro 6. Valores propios del análisis de componentes principales del Conjunto Mínimo de Datos. Plantaciones bananeras de Panamá. 2006.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valor propio	2,377	1,477	1,217	1,013	1,002	0,520	0,431	0,222
Variabilidad (%)	29,708	18,459	15,212	12,666	9,288	6,506	5,383	2,778
Inercia acumulada (%)	29,708	48,168	63,379	76,045	85,334	91,839	97,222	100,00

F1 a F8 varianzas obtenidas mediante análisis de componentes principales.

La comunalidad de cada indicador hasta el quinto componente principal y su importancia relativa o porcentaje de variabilidad total que explica esa variable se presenta en el Cuadro 7. Los indicadores que mostraron el mayor peso fueron: índice de mineralización, porcentaje de materia orgánica y el de arena. Los indicadores físicos tuvieron un peso total de 13,6%; los químicos 48,6% y los biológicos 37,4%. Sin embargo, todos los factores están íntimamente relacionados, por tanto pudiera haber una gran influencia de los factores físicos del suelo sobre las otras propiedades.

En áreas productoras de banano del Atlántico de Costa Rica, se encontraron trece indicadores que tenían influencia sobre la productividad de la fruta (Trejos y Villalobos 2008). Al calcular la contribución de cada indicador del MDS al índice de calidad encontraron que los factores físicos eran responsables por el 10,3%; los químicos 39,9% y los biológicos 49,7%. Estos resultados coinciden con los encontrados en el experimento realizado en suelos bananeros de Panamá donde los factores físicos tuvieron la menor contribución para el cálculo del índice.

Rey *et al.* (2006), trabajando con suelos bananeros de Venezuela encontraron que la mayoría de los problemas relacionados con la calidad del suelo y la baja productividad de las plantaciones estaban relacionados con el deterioro de las propiedades físicas del suelo. En este sentido, Villarreal *et al.*

(2008), en experimentos realizados con anterioridad a este proyecto indican que algunos suelos bananeros de Panamá presentan compactación y una estructura poco favorable para el desarrollo de las raíces en los horizontes más profundos.

Cantú *et al.* (2007), realizaron un estudio de calidad de suelos en zonas productoras de Argentina encontrando que la materia orgánica tenía gran influencia sobre los demás indicadores. Según estos investigadores, la disminución del contenido de carbono orgánico sería la causa principal del deterioro de la calidad de algunos indicadores como: estabilidad de agregados, infiltración del agua y densidad aparente. Coincidentemente, en los suelos bananeros de Panamá, también se encontró que la materia orgánica fue uno de los indicadores más sensibles al manejo que ha recibido el suelo a través del sistema tradicional de producción, influenciando directamente otras propiedades.

Curvas de respuesta de cada indicador

Cada indicador tiene un comportamiento diferente sobre los puntos de medición y dependiendo de ello se define una curva que muestra su influencia en la descripción de una finca o de un sector de esta.

El cálculo de las curvas de respuesta se realizó basado en los intervalos de nutrientes recomendados por el Laboratorio de Suelos del IDIAP para los suelos

Cuadro 7. Comunalidad y contribución de cada indicador para la construcción del índice de calidad de suelos de fincas bananeras de Panamá, según el Análisis de Componentes Principales. Panamá. 2006.

Indicador	F1	F2	F3	F4	F5	Comunalidad	Peso total
% arena	0,172	0,291	0,427	0,221	0,244	1,355	13,6%
pH	0,446	0,187	0,215	0,168	0,272	1,288	12,9%
Ca	0,331	0,276	0,198	0,202	0,100	1,107	11,1%
K	0,126	0,447	0,053	0,333	0,105	1,064	10,6%
MO	0,234	0,269	0,340	0,290	0,260	1,393	14,0%
RM-Total	0,327	0,213	0,106	0,404	0,184	1,234	12,3%
Ind Min	0,530	0,291	0,225	0,201	0,188	1,435	14,4%
RT	0,474	0,181	0,223	0,132	0,064	1,074	10,7%
						9,950	100,0 %

F1 a F5 varianzas obtenidas mediante análisis de componentes principales.

MO (materia orgánica), RM Total (respiración microbiológica total), Ind. Min. (índice de mineralización), R. Total (peso total de raíces).

de Panamá (Name y Cordero 1987). Por ejemplo, según estos niveles, los valores recomendados de potasio intercambiable en el suelo estarían entre 0,8 y 1,4 cmol_c/kg de suelo. Se tomó como media la cantidad de 1,1 cmol_c/kg para los suelos bananeros. Estos niveles ayudaron a definir los sectores en que las curvas mostraban un buen, regular o mal comportamiento.

Todas las curvas se normalizaron para obtener valores entre 0 y 1. Así, se obtuvieron dos tipos de curvas que podían ser: curvas logística crecientes, entre 0 y 1; y curvas tipo campana, con máximo valor 1.

Para el cálculo de las curvas se utilizaron parámetros como los valores X determinados para cada indicador, la media denotada ($\bar{X}$) de cada variable, que sirve para posicionar la curva respecto al eje X de las abscisas y los parámetros m y b que son constantes que controlan el crecimiento y concavidad de la curva de acuerdo al intervalo establecido para cada variable.

Los valores de estos parámetros para cada una de las curvas de respuesta se presentan en el Cuadro 8, en este se observa el tipo de curva y los valores encontrados para la media ($\bar{X}$), la concavidad (b) y la extensión o crecimiento de la curva (m).

Obtención del índice de calidad del suelo

Para aplicar la ecuación propuesta para el cálculo de los índices, se utilizaron los valores de los ocho indicadores del MDS, con los pesos respectivos o

contribución relativa de cada uno y con las curvas de respuesta. Se calculó esta para cada indicador, se multiplicó por el peso y se hizo la suma del total. Se obtuvo un valor entre 0 y 1, que indica un mejor comportamiento cuanto más cercano a 1 sea este índice.

Los promedios encontrados para cada uno de los indicadores determinados en el área de alta y baja productividad de cada finca involucrada en el estudio, mostraron una gran variabilidad en los resultados y no se notó una tendencia clara de cuál área presentó mejores medias que la otra, sin embargo, luego de aplicada la ecuación del índice de calidad para suelos bananeros de Panamá a estas medias y al ser ponderadas de acuerdo al peso que representaba cada indicador en el desarrollo del índice, se realizó la sumatoria final de las respuestas de los ocho indicadores calculados en cada área de estas fincas, obteniéndose el índice global de cada una de estas (Cuadro 9).

En general, se obtuvieron mejores índices de calidad en las áreas de alta que en las de baja productividad (Cuadro 9), en la mayoría de las fincas, sin embargo, hubo excepciones, en algunas fincas como Jagua y Javillo, donde las áreas de baja productividad resultaron con índices generales de calidad del suelo más altos que en las de alta productividad. Las áreas de baja productividad de estas fincas presentaron mejor índice del contenido de potasio, esto es, muy cercano a 1 y lo contrario, las áreas de alta productividad tenían un índice más bajo, ya que presentaban un nivel menor de

Cuadro 8. Curvas de respuesta obtenidas para cada indicador del conjunto mínimo de datos (MDS) para obtener la productividad en plantaciones bananeras de Panamá. 2006.

Indicador*	Media	m**	b***	Tipo de curva
Arena (%)	45,0	0,00	1,46	Campana
pH (1:2,5)	6,0	0,09	1,46	Campana
Ca (cmol _c /kg)	15,0	0,80	-6,55	Logística creciente
K (cmol _c /kg)	0,8	122,37	-3,46	Logística creciente
MO (%)	2,0	3,03	-6,07	Logística creciente
RM Total (mg CO ₂ /100 g · 10 días)	350,0	0,01	-3,54	Logística creciente
Ind. Min.	0,6	298,75	1,46	Campana
R. Total (g)	105,0	0,10	-10,62	Logística creciente

*MO (materia orgánica), RM Total (respiración microbiológica total), Ind. Min. (índice de mineralización), R. Total (peso total de raíces).

**m: extensión o crecimiento de la curva.

***b: concavidad de la curva.

Cuadro 9. Índices de calidad de suelos determinados para cada área de alta y baja productividad en las fincas bananeras del Pacífico de Panamá. 2006.

Finca	Índice	
	Área alta prod.	Área baja prod.
Los Ángeles	0,541 c	0,445 d
San Antonio	0,581 c	0,472 cd
Santa Catalina	0,757 a	0,603 b
Margarita	0,528 c	0,465 cd
Balsas	0,702 ab	0,652 ab
Higuitos	0,638 b	0,609 b
Mango	0,784 a	0,637 b
Palo Blanco	0,734 a	0,645 ab
Jagua	0,680 ab	0,723 a
Javillo	0,525 c	0,635 b
Caoba	0,691 ab	0,667 ab

Nivel de significación por Tukey, $\alpha = 0,05$. Medias seguidas de la misma letra no muestran diferencia estadísticamente significativa.

potasio en el suelo. Igualmente, las áreas de baja productividad de estas fincas mostraron mejores respuestas de pH, Ca, y MO que las de alta productividad. Esto contribuyó de manera efectiva a que las áreas de baja productividad presentaran mayor índice general de calidad que las áreas de alta productividad en estas fincas.

En el área de alta productividad, entre las fincas independientes fue Santa Cecilia la que obtuvo el mejor índice y Mango y Palo Blanco entre las pertenecientes a COOSEMUPAR. Las fincas con el peor índice en esta área fueron Los Ángeles, San Antonio, Margarita y Javillo. En cuanto al área de baja productividad, Jagua destacó con el mejor índice. También obtuvieron elevada respuesta Balsas entre las fincas independientes y Palo Blanco y Caoba entre las de COOSEMUPAR, mientras que Los Ángeles, San Antonio y Margarita fueron las que obtuvieron los índices más bajos (Cuadro 9).

El contenido de potasio, calcio, materia orgánica, la respiración microbiana y el índice de mineralización, fueron los indicadores que más problemas presentaron en estas fincas. Estos índices fueron representados mediante gráficas tipo radar como se observa en la Figura 1, para el área de alta y baja productividad de la finca Santa Cecilia.

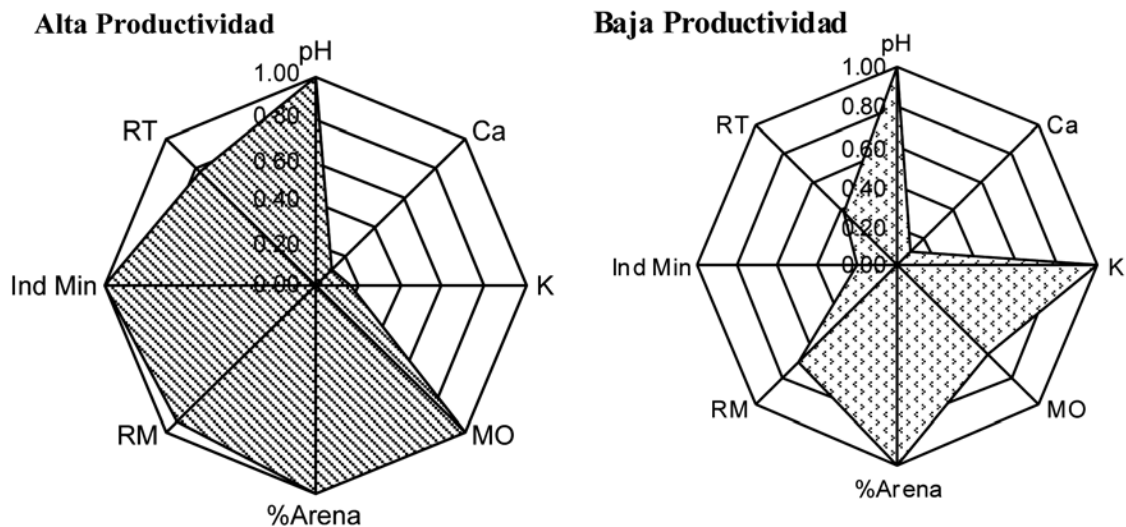


Figura 1. Representación gráfica de los índices obtenidos de productividad de banano, en la finca Santa Cecilia. Divalá, provincia de Chiriquí, Panamá. 2006.

Font-Vila *et al.* (2009), en Cuba, Serrano *et al.* (2006), en Costa Rica y Pattison *et al.* (2004) en Australia han utilizado metodologías similares a la de esta investigación para el cálculo de un índice de calidad de suelos bananeros en estos países. Mediante la utilización de este índice determinaron que la calidad del suelo fue perturbada por el manejo inadecuado del mismo con su consecuente degradación. El valor del índice se incrementó en aquellos sitios con un sistema de manejo agrícola adecuado que propició rendimientos aceptables.

Igualmente, el índice desarrollado para los suelos bananeros de Panamá, ayudó a diferenciar entre áreas con manejos adecuados e inadecuados. Este índice sin duda fue altamente influenciado por el tipo de suelo y su relación con el manejo dado al mismo.

La presente investigación sirvió para detectar deficiencias importantes en las fincas como lo son: niveles muy bajos de materia orgánica y acelerado índice de mineralización que rápidamente hace desaparecer los pocos residuos orgánicos que se aplican; esto se comprueba con el alto nivel de correlación negativa encontrado, como se puede observar en el Cuadro 5.

También estos suelos presentan muy bajos niveles de actividad microbiana; la fertilización no se realiza tomando en cuenta resultados de análisis de suelo, tejido vegetal, ni los rendimientos esperados en cada área, lo que ha traído como consecuencia la acumulación en algunas áreas de elevados niveles de K muy superiores a las exigencias del cultivo; bajo número, peso y extensión de raíces, producto de que en muchas áreas de las fincas hay presencia de estructuras degradadas, capas compactadas, baja aireación y un drenaje muy lento, que impide su desarrollo. Estas propiedades están afectando la producción y los ingresos económicos de cada finca.

Los índices obtenidos muestran que en algunas fincas las diferencias entre las áreas de alta y baja productividad son muy estrechas, posiblemente ha tenido gran influencia que los productores hacen un manejo indiferenciado del cultivo sin considerar los rendimientos y las propiedades físicas, químicas y biológicas que presenta el suelo. La fertilización no se basa en criterios científicos ni se utilizan técnicas de conservación del suelo, tampoco se le da mantenimiento a los drenajes en ninguna de las áreas.

El índice calculado representa una valiosa herramienta que permitirá la toma de decisiones para corregir, en el tiempo, errores en el manejo tradicional dado

a los suelos bananeros y además servirá de base para realizar monitoreos periódicos comparando el avance o retroceso del mismo.

El índice de calidad de suelos bananeros, aunque presentó algunas limitaciones, permitió el desarrollo de una metodología para la región y se obtuvo una herramienta para la gestión ambiental que con ciertas modificaciones y consideraciones locales de cada ecosistema, permitirá monitorear y evaluar la calidad del suelo e implementar acciones que impidan el avance de la degradación y a su vez, medir los impactos de la aplicación de técnicas de conservación y mejoramiento del manejo del suelo con un enfoque integral y sostenible.

LITERATURA

- Abril, A; Bucher, EH. 2001. Overgrazing and soil carbon dynamics in the Western Chaco of Argentina. *Appl. Soil Ecol.* 16:243-249.
- Alef, K; Nannipieri, P. 1995. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. London, Academic Press. 435 p.
- ANAM (Autoridad Nacional del Ambiente). 2009. GEO 2009. Informe del estado del ambiente. Panamá, Editora Novo Art, S.A. 155 p.
- Bautista, CA; Etchevers, B; Del Castillo, RF; Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas 2004/2* (en línea). Consultado 24 marzo 2008. Disponible en www.aect.org/ecosistemas/042/revision2.htm
- Bouyoucos, GL. 1951. Recalibration of hydrometer method for making mechanical analysis of soil. *Agronomy Journal* 43(9):434-438.
- Cantú, MP; Becker, A; Bedano, JC; Schiavo, HF. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* (Argentina) 25(2):173-178.
- Castillo, W; González, J; Trejos, J. 2006. Análisis multivariado de datos. Versión preliminar. San José, Costa Rica, Editorial Universidad de Costa Rica. 312 p.
- Dirección Nacional del Banano. 2003. Ministerio de Comercio e Industrias (MICI). Memoria 2003. Panamá. 14 p.
- Dirección Nacional del Banano. 2008. Ministerio de Comercio e Industrias (MICI). Memoria 2008. Panamá. 12 p.
- Doran, JW; Parkin, TB. 1994. Defining and assessing soil quality. In Doran, JW; Coleman, DC; Bezdicek,

- DF; Steward, BA. eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Spec. Publ. No. 35. SSSA y ASA, Inc. Madison, WI. p. 3-21.
- Draper, NR; Smith, H. 1968. Applied regression analysis. New York, USA, Wiley. 345 p.
- Dumanski, J. 1994. Indicators and their utilization in a framework for evaluation of sustainable land management. Proceedings of the International Workshop on Sustainable Land Management for the 21st Century. Vol. 1: Workshop Summary. The Organizing Committee. International Workshop on Sustainable Land Management. Agricultural Institute of Canada. Ottawa, Canadá. 832 p.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. Manual de métodos de análise de solo. 2 ed. Rev. atualizada. Rio de Janeiro, Brasil. 212 p.
- ETESA (Empresa de Transmisión Eléctrica). 2008. Datos climáticos de la red nacional de estaciones meteorológicas (en línea). Consultado 3 abr. 2008. Disponible en www.etsa.gob.pa
- FAO. 2004. FAOSTAT. Estadísticas sobre la productividad, área sembrada y rendimientos de bananas en Latinoamérica (en línea). Consultado 17 mayo 2008. Disponible en www.fao.org
- Font-Vila, L; Calero, B; Muniz, O; Chaveli, P; Del Castillo, R; Mendoza, L; Curbelo, R; Corona, W; Montero, R; Valenciano, M. 2009. Estimación de la calidad del suelo: criterios físicos, químicos y biológicos. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. CD-Rom.
- Forsythe, W. 1980. Física de suelos: manual de laboratorio. 2ª reimp. San José, Costa Rica, IICA. 212 p.
- Gauggel, CA; Sierra, F; Arévalo, A. 2005. The problems of banana root deterioration and its impact on production: Latin America's experience. In Turner, DW; Rosales, FE. eds. Banana root system: towards a better understanding for its productive management; Proceeding of an International Symposium. Montpellier, France, INIBAP. p. 13-22.
- IGNTG (Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia). 1995. Atlas Nacional de la República de Panamá. 3 ed. Panamá. 222 p.
- ILRI (International Institute for Land Reclamation and Improvement). 1977. Principios y aplicaciones del drenaje: Estudios e investigaciones. 16 ed. Wageningen, Holanda. Volumen III. 245 p.
- Jaramillo, R; Vásquez, A. 1990. Manual de procedimientos para presentación y realización de estudios detallados de suelos y clasificación de tierras para cultivo de banano. Ed. rev. Departamento de investigaciones. Asociación Bananera Nacional. San José, Costa Rica. 29 p.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Commun. Soil Science Plant Analysis 15(12):1409-1416.
- Munsell Color Company. 2000. Munsell soil color charts. 617 Little Britain Road. New Windsor, NY, USA. 27 p.
- Name, B; Cordero, A. 1987. Alternativas para uso y manejo de suelos ácidos en Panamá. Compendio de los resultados de investigación presentados en la Jornada Científica. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. Región Central. 23 p.
- Pattison, T; Smith, L; Moody, P; Armour, A; Badcock, K; Cobon, J; Rasiah, V; Lindsay, S; Gullino, L. 2005. Banana root and soil health project – Australia. In Turner, DW; Rosales, FE. eds. Banana root system: toward a better understanding for its productive management. Proceedings of an International Symposium. Montpellier, France, INIBAP. p. 149-165.
- Pattison, T; Badcock, K; Lindsay, S; Armour, A; Velupillai, R; Moody, P; Smith, L; Gullino, L. 2004. Banana root and soil health project – field workbook. Department of Primary Industries and Fisheries, Queensland, Australia. 15 p.
- Pla, I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. Facultad de Agronomía, UCV, Maracay, Venezuela. Revista Alcance 32:91.
- Pla, I. 1988. Desarrollo de índices y modelos para el diagnóstico y prevención de la degradación de suelos agrícolas en Venezuela. Caracas, Venezuela. Banco Consolidado, 1989. 58 p.
- Rey, JC; Chacín, M; Sapuky, M; Núñez, M; Martínez, G; Rodríguez, G; Espinoza, J; Arturo, M; Pocasangre, L; Delgado, E; Rosales, F. 2006. Aptitud de las tierras para banano en suelos de Venezuela y su relación con la productividad. In Memorias XVII Reunión Internacional ACORBAT: Banano un negocio sustentable. Joinville, Santa Catarina, Brasil. p. 362.
- Serrano, E. 2003. Relación entre los contenidos de raíz funcional y la productividad de banano en Costa Rica. In INIBAP-CORBANA ed. Banana root system: toward a better understanding for its productive management. Abstracts, International Symposium. San José, Costa Rica. 28 p.

- 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 Reuniao Internacional da Associação para a Cooperaçao nas Pesquisas sobre Banana no Caribe e na América Tropical. Joinville-Santa Catarina, Brasil. p. 167-182.
- Tate, KR; Ross, DJ; Feltham, CW. 1998. A direct extraction method to estimate microbial C: effects of experimental variables and some different calibration procedures. *Soil Biol. Biochem.* Oxford 20:329-335.
- Trejos, J; Villalobos, M. 2008. Procedimiento de construcción del índice de calidad y salud de suelos bananeros de Costa Rica. CIMPA, Escuela de matemática. Reporte Técnico. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 21 p.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1995. Soil Survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigation Report no. 42. Washington, D.C, USA, USDA-NRCS. U.S. Gov. Printing Office. 400 p.
- Villalobos, MA. 2006. Rango y curvas de respuesta de los indicadores de calidad de suelos bananeros en fincas de Costa Rica. *In* Simposio sobre innovaciones tecnológicas para el manejo y mejoramiento de la calidad y salud de suelos bananeros de América Latina y el Caribe. Panamá. 15 p.
- Villarreal, JE; Agudo, L; Villaláz, J; Arosemena, J; Rosales, F; Pocasangre, L; Delgado, E. 2008. Calidad de suelos bananeros de Panamá. I Congreso Internacional de Plátano y banano. David, Panamá, IDIAP-CIAOC. p. 41-45.