

DETERMINACIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD Y SALUD DE SUELOS PARA PLANTACIONES BANANERAS EN VENEZUELA

Eduardo Delgado, Javier Trejos, Mario Villalobos, Gustavo Martínez, Deyanira Lobo, Juan Carlos Rey, Gustavo Rodríguez, Franklin E. Rosales y Luis E. Pocasangre

RESUMEN

Se presenta el procedimiento para la determinación de un índice de calidad y salud de suelos bananeros para Venezuela. Sesenta indicadores químicos, físicos y microbiológicos fueron medidos en seis fincas bananeras en los estados Trujillo y Aragua, Venezuela. El estudio se llevó a cabo para verificar la conveniencia y funcionalidad de los diferentes indicadores utilizados. Las fincas fueron seleccionadas con diferentes grados de producción y manejo (fincas de producción para exportación y

mercado local) A su vez, las fincas fueron divididas en diferentes áreas de producción (pobre y buena). Las mejores variables relacionadas a producción fueron seleccionadas basadas en técnicas de análisis multivariados de datos. Una vez determinado el mínimo número de datos (11) y definidas las curvas de respuestas para cada variable, se determinó el índice de calidad y salud de suelos bananeros para Venezuela.

Introducción

A pesar de la aplicación de técnicas e insumos de alto costo, incluyendo el uso intensivo de agroquímicos en las plantaciones comerciales de banano, en los últimos diez años se ha registrado una reducción considerable en la productividad, debido al cambio y deterioro acelerado de los factores físicos, químicos y biológicos del suelo. La interacción de estos últimos tres factores ha sido poco estudiada, pero en la actualidad se le considera fundamental para resolver la problemática del agotamiento y baja productividad de las

plantaciones. Hay evidencia de la relación directa entre la reducción de la productividad y la pérdida de la calidad y salud del suelo, por el impacto adverso del sistema convencional de producción (Gauggel *et al.*, 2005; Pattison *et al.*, 2005).

Por el valor bruto de su producción, los bananos son el cuarto cultivo alimentario más importante en el mundo, después del arroz, el trigo y el maíz. Los bananos son a la vez un producto básico y de exportación. Solo el mercado de exportación tiene un valor de casi USD 5×10^9 anuales, y constituye una importante fuente de empleo e in-

gresos en numerosos países en desarrollo (INIBAP, 2004). Concretamente en Venezuela, se aprecia una disminución en el área sembrada, la producción, y el rendimiento, donde se calcula que entre 1997 y 2005 hubo una reducción del 46,31% (FAO, 2006). Las zonas de mayor producción de banano están en los estados Aragua, Carabobo, Trujillo, Barinas y Yaracuy.

El término 'salud del suelo' es usado, según Doran y Zeiss (2000), para indicar la capacidad del suelo de funcionar como un sistema vital para mantener la productividad biológica, promoviendo la

calidad ambiental y manteniendo la salud humana. Aunque existen diferencias en los términos 'calidad del suelo' y 'salud del suelo' se usan muchas veces como sinónimos. Ambos conceptos han ido evolucionando, especialmente el de 'calidad', al cual se le han agregado atributos tales como sostenibilidad y calidad ambiental (Romig *et al.*, 1995; Karlen *et al.*, 1997).

Los indicadores de calidad del suelo son propiedades físicas, químicas y biológicas que pueden ser medidas cualitativa o cuantitativamente, y que proveen pistas acerca de qué tan adecuadamente un suelo funciona, de

PALABRAS CLAVE / Análisis Multivariado / Bananos / Calidad de Suelo /

Recibido: 09/02/2010. Aceptado: 11/11/2010.

Eduardo Delgado. Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora, Venezuela. M.Sc. en Extensión Agrícola, University of Missouri, EEUU. Máster en Administración de Proyectos, Universidad para La Cooperación Internacional (UCI), Costa Rica. Ph. D. en Educación Agrícola, The Ohio State University, EEUU. Investigador, INIA, Venezuela. Dirección: INIA-Barinas, km 10 vía Torunos, Apartado 131. Barinas 5201, Venezuela. e-mail: edelgado@inia.gob.ve

Javier Trejos. Licenciado en Matemática, Universidad de Costa Rica (UCR). M.Sc. en Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Doctorado en Matemáticas Aplicadas, Université Paul Sabatier, France. Profesor, UCR, Costa Rica.

Mario Villalobos. Licenciado y M.Sc. en Matemáticas, UCR, Costa Rica. Doctorado en Matemáticas, CINVESTAV-IPN, México. Profesor, UCR, Costa Rica.

Gustavo Martínez. Ingeniero Agrónomo y M.Sc. en Agronomía especialidad Protección Vegetal, Universidad Central de Venezuela (UCV). Investigador, INIA-CENIAP, Venezuela.

Deyanira Lobo. Ingeniera Agrónoma, M.Sc. y Doctorado en Ciencias del Suelo, UCV, Venezuela. Profesora, UCV, Venezuela.

Juan Carlos Rey. Ingeniero Agrónomo y M.Sc. en Ciencias del Suelo, UCV, Venezuela. Investigador, INIA-CENIAP y Profesor, UCV, Venezuela.

Gustavo Rodríguez. Ingeniero Agrónomo y M.Sc. en Ciencias del Suelo, UCV, Venezuela. Profesor, UCV, Venezuela.

Franklin Rosales. B.Sc. en Agronomía y M.Sc. en Fitomejoramiento, New Mexico State University, EEUU. Ph.D. en Fitomejoramiento, Oklahoma State University, EEUU.

Luis Pocasangre. B.Sc. en Agronomía, Universidad Nacional Autónoma de Honduras. M.Sc. en Mejoramiento de Plantas, CATIE, Costa Rica. Ph.D. en Nematología, Bonn University, Alemania. Profesor, CATIE, Costa Rica.

DETERMINATION OF A SOIL QUALITY AND HEALTH INDEX FOR BANANA PLANTATIONS IN VENEZUELA

Eduardo Delgado, Javier Trejos, Mario Villalobos, Gustavo Martínez, Deyanira Lobo, Juan Carlos Rey, Gustavo Rodríguez, Franklin E. Rosales and Luis E. Pocasangre

SUMMARY

A procedure for the determination of a soil quality and health index for banana plantations in Venezuela is presented. Sixty chemical, physical and microbiological indicators were measured in six banana farms selected in Trujillo and Aragua states, Venezuela. The test was carried out in order to verify the convenience and functionality of the various indicators used. The farms were selected from a wide range of contrasts on management practices and productivity levels (export farms

and local production farms), and were divided in different areas based on productivity (bad/good). The best explanatory variables related to production were selected on the basis of multivariate data analysis techniques. Once the minimum number of data sets was selected (11) and the corresponding response curves defined, quality and health indices for the soil of banana plantations in Venezuela was determined.

DETERMINAÇÃO DE UM ÍNDICE DE QUALIDADE E SAÚDE DE SOLOS PARA PLANTAÇÕES BANANEIRAS NA VENEZUELA

Eduardo Delgado, Javier Trejos, Mario Villalobos, Gustavo Martínez, Deyanira Lobo, Juan Carlos Rey, Gustavo Rodríguez, Franklin E. Rosales e Luis E. Pocasangre

RESUMO

Apresenta-se o procedimento para a determinação de um índice de qualidade e saúde de solos bananeiros para Venezuela. Sessenta indicadores químicos, físicos e microbiológicos foram medidos em seis fazendas bananeiras nos estados Trujillo e Aragua, Venezuela. O estudo foi realizado para verificar a conveniência e funcionalidade dos diferentes indicadores utilizados. As fazendas foram selecionadas com diferentes graus de produção e manejo (fazendas de produção para exportação e

mercado local) Por sua vez, as fazendas foram divididas em diferentes áreas de produção (pobre e boa). As melhores variáveis relacionadas a produção foram selecionadas baseadas em técnicas de análises multivariadas de dados. Uma vez determinado o mínimo número de dados (11) e definidas as curvas de respostas para cada variável, se determinou o índice de qualidade e saúde de solos bananeiros para Venezuela.

modo que los mejores indicadores serán aquellas propiedades que influyan significativamente sobre la capacidad del suelo para proveer cada función (Gregorich *et al.*, 1994; SQI, 1996; Carter *et al.*, 1997). Además, es necesario caracterizar los sistemas para analizar las influencias que el manejo y sus componentes pueden tener en el suelo; las prácticas culturales pueden afectar significativamente la calidad de suelos al cambiar los parámetros físicos, químicos y biológicos (Fauci y Dick, 1994).

El objetivo principal de este trabajo fue la determinación de un índice matemático que describa la calidad y salud de suelos bananeros, indicando los factores más críticos en la producción de las fincas estudiadas, mediante la selección de indicadores que toman en cuenta las propiedades físicas, químicas y, principalmente, biológicas del suelo.

Materiales y Métodos

Para este estudio se seleccionaron dos de las principales áreas productoras de banana en Venezuela (estados Aragua y Trujillo). El trabajo se inició con la selección de las fincas, que para ser incluidas en el estudio debían contar con datos históricos de manejo y producción con un mínimo de tres años, ya que esta información es importante al momento de analizar los resultados del diagnóstico y para el diseño de las alternativas de recuperación para mejorar la calidad y salud del suelo.

El proceso se subdividió en dos grandes secciones: La primera, o prediagnóstico, tuvo por finalidad obtener el historial de la finca, basado en entrevistas con los productores, colección de información secundaria y verificación *in situ* de la situación productiva de la finca a través de la aplicación de indicadores de

producción. La producción se estimó en base a tres variables agronómicas: número de manos, circunferencia del seudotallo de la madre y altura del hijo de sucesión, a partir de la metodología diseñada por Rosales *et al.*, (2008). La segunda sección es la del diagnóstico, el cual usó a las calicatas como medio para la obtención de los datos de campo, aplicando y midiendo todos los indicadores o variables para el estudio de la parte física, química y biológica del suelo.

Áreas de estudio

Finca Punta Larga. La Finca Punta Larga se halla ubicada en el Estado Aragua, el cual se localiza en la parte Centro-Norte-Costera de Venezuela, entre 09°23'06" y 10°32'38"N y entre 66°32'50" y 67°52'54"O; limita al norte con el mar Caribe, al este con los estados Miranda, Guárico, y el Distrito Federal, al oeste

con los estados Carabobo y Guárico y al sur con el estado Guárico. Aragua posee una superficie de 7014 km² de la cual 92 km² bajo banano. La finca se ubica en el municipio Libertador, entre 67°30' y 67°34'O y entre 10°12' y 10°17'N, enclavada en la depresión del Lago de Valencia, con relieve plano, entre 410 y 440msnm y una superficie levantada de 150ha.

El clima de la región esta determinado por la influencia combinada de los vientos y las calmas ecuatoriales. Los vientos alisios provenientes del NE traen consigo humedad, que se eleva y condensa al contacto con la serranía del litoral, creando zonas con precipitación de 2000mm anuales en la cima de las montañas. Por otro lado actúan las calmas ecuatoriales en los vientos desprovistos de humedad que transitan la depresión central y la serranía del interior, generándose alternancia entre períodos seco y húme-

do. En Aragua se registran valores pluviométricos que van desde 700 a 1900mm promedio anual, siendo la precipitación media anual en la finca de 1000-1200mm.

La temperatura del aire varía con la altura, siendo las máximas registradas de 22-26°C y mínimas de 10-14°C. Las áreas más cálidas están en la costa y el extremo sur, donde se registra 33°C y mínimas de 22-24°C, la depresión, zona donde se encuentra la finca Punta Larga, presenta una situación fuera de género, con máximas que llegan a 33°C y mínimas relativamente bajas de 18-20°C.

En cuanto a los suelos, la Finca Punta Larga se ubica en una terraza lacustrina de 4° nivel de edad Cuaternaria. Esta región presenta una pendiente plana de 0-3%, con drenaje enmarcado como moderadamente bien drenado a bien drenado. Son tierras altamente aptas para su uso agrícola, generalmente no inundables, con suelos entre no salinos (0-2dS·m⁻¹) y ligeramente salinos (2-4dS·m⁻¹), con pH neutro (6,6-7,3) o ligeramente alcalino (7,4-7,8). En líneas generales, son suelos con buena fertilidad y materia orgánica media a abundante. Las texturas predominantes son franco, franco limosas y franco arcillo limosas; localmente se aprecian texturas arcillosas y arcillolimosas, encontrándose en el área molisoles y entisoles, con colores que pasan por gris parduzco claro, gris claro, blanco, amarillo pálido y marrón oliva. El uso más común en la zona es banano, pasto y caña de azúcar.

Finca Banaoro y Finca Kamluca. Estas se encuentran en el municipio La Ceiba del estado Trujillo, el cual está localizado entre 08°57'40" y 10°02'40"N y entre 70°00'10" y 71°05'20"O; limita por el norte con los estados Lara y Zulia, por el sur con los estados Barinas y Mérida, por el este con el estado Portuguesa, y por el oeste con el estado Zulia. Las dos fincas se hallan continuas una de otra, abar-

TABLA I
INDICADORES PRINCIPALES Y VARIABLES SELECCIONADAS AL INICIO Y ESTUDIADAS DURANTE EL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD Y SALUD DE SUELOS BANANEROS

Grupo Indicadores principales	Variables Estudiadas
Fitonematodos (5)	Peso de raíz total (g), peso de raíz funcional (g), <i>Radopholus similis</i> , <i>Helicotylenchus mlticintus</i> , total de fitonematodos
Nematodos de vida libre (5)	Nematodos de vida libre, fitonematodos, total de nematodos, % de nematodos de vida libre, % de fitonematodos
Hongos endofíticos (5)	Número de aislados <i>Trichoderma</i> , <i>Fusarium</i> , otros hongos, total de hongos aislados, total hongos purificados
Caracterización del sistema radical (6)	Peso radical, longitud radical, área (cm ²), diámetro (mm), volumen (cm ³), índice de necrosis (%)
Conteo poblaciones totales (3)	Bacterias, actinomicetos y hongos
Respiración microbiana (1)	mg 100 g ⁻¹ 10 días ⁻¹
Biomasa microbiana (4)	Valores en mg C en 100g suelo seco a 105°C; flujo de C en flujo-C / factor 0,45; fumigados y no fumigados
Conteos de microartrópodos (2)	Número de individuos y de familias
Indicadores de componentes químicos del suelo (21)	pH, Al, acidez intercambiable, Ca, Mg, K, suma de cationes, Ca/Mg, Ca/K, Mg/K, %sat K, %sat Ca, P, Fe, Cu, Zn, Mn, % MO, % AlFe, % fosfatos, % sat bases
Indicadores de componentes físicos del suelo (11)	Profundidad efectiva, textura, %arena, %limo, %arcilla, resistencia tangencial, resistencia a la penetración, densidad aparente, densidad partículas, infiltración, porosidad
Indicadores de producción (3)	Circunferencia planta madre, número de manos/racimo y altura del hijo

cando cada una ~300ha, con producción dedicada totalmente al mercado de exportación de banano. Las fincas se ubican entre los 09°24'13" y 09°30'13"N y entre los 70°00'10" y 70°57'32"O. Aunque la altitud en el estado Trujillo es muy variable (0-1000msnm), el área de estudio se encuentra entre 13 y 23msnm.

La temperatura máxima registrada es de 35°C y al mínima de 26°C, con promedio de 27°C. La precipitación promedio anual de la zona oscila entre 853 y 1040mm, según datos climatológicos de las estaciones de El Cenizo (principal y secundaria) y de

Valera. Las lluvias se inician entre abril y mayo. Existen dos períodos marcados de humedad y la precipitación alcanza el máximo en noviembre y diciembre. El área esta considerada dentro de la zona de vida bosque seco tropical (Ewel *et al.*, 1976).

Los suelos corresponden a una planicie aluvial de origen reciente, ocupando la posición de napa de limo de desborde, con pendiente entre 0,5 y 1%, donde predominan las formas cóncavas y convexas. Los suelos predominantes de la zona presentan un desarrollo incipiente siendo en su mayoría entisoles. Las texturas que se presentan comúnmente son

FL, y FAL a AL. Las principales limitaciones de estos suelos son el mal drenaje y la presencia de agua a poca profundidad. El uso más relevante de la zona es ganadería extensiva, con áreas localizadas de cultivo de banano.

Indicadores seleccionados

Se estudiaron tres tipos de indicadores: químicos, físicos y microbiológicos, para un total de 60 indicadores medidos o calculados en seis fincas (Tabla I). De estos 60 indicadores, se seleccionaron 57 como variables activas, de los cuales tres son indicadores de productividad: círculo de la madre, altura del hijo y número de manos.

Obtención de datos en campo

En la Tabla II se indican las fincas seleccionadas por tipo de sistema de producción. Cada finca fue dividida en dos sectores basados en la categorización de los sitios

TABLA II
FINCAS ESTUDIADAS POR SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y UBICACIÓN

Finca	Codigo	Sistema de produccion	Ubicacion
Banaoro 1	VEB1	Exportación	Trujillo
Banaoro 2	VEB2	Exportación	Trujillo
Kambuca 1	VEK1	Exportación	Trujillo
Kambuca 2	VEK2	Exportación	Trujillo
Punta Larga 1	VEP1	Mercado local	Aragua
Punta Larga 2	VEP2	Mercado local	Aragua

dada por el productor, sitio de buena o pobre producción. Esta clasificación inicial fue corroborada mediante un análisis en componentes principales, con calidades muy buenas (inercia >90% en la primera componente principal). Así mismo, se realizaron discriminaciones en dos clases usando el método de Fisher (Saporta, 1980), y en todos los casos se obtuvieron separaciones casi perfectas de las clases. De esta manera se validó la categorización dada por el productor, la cual sirvió de base para la determinación del índice.

Una vez terminado el diagnóstico y ubicados los sitios de muestreo, se procedió a ejecutar el diagnóstico. Cada sitio tuvo un tamaño de ~4ha y en cada área se delimitaron cuatro parcelas de 20x50m cada una, en forma de cuadrado, correspondiendo a 1000m², donde se calculó la densidad poblacional y luego se identificaron 20 plantas de las últimas tres cintas cercanas a la cosecha para la determinación de los parámetros de producción; para un total de 80 plantas en las 4ha. A las plantas seleccionadas se les determinó la altura del hijo de sucesión, la circunferencia del seudotallo de la planta madre y el número de manos, que son los indicadores de producción. En cada una de las áreas identificadas, se abrieron cuatro calicatas (una por ha) con dimensión de 60x60x60cm.

Finalizada la actividad de diagnóstico, los datos recolectados fueron organizados y analizados. La selección de los indicadores más significativos se hizo, en primer lugar, con base en regresiones lineales paso a paso, utilizando la producción como indicador a explicar. Seguidamente, se procedió a realizar un análisis en componentes principales (ACP) con el objetivo de describir las principales relaciones entre variables (a través de círculos de correlaciones) y sitios de muestreo.

A partir de los anteriores análisis, se seleccionaron los

indicadores más explicativos, que forman el conjunto mínimo de datos (CMD), selección que fue revisada mediante el análisis de conglomerados, o clasificación automática, mostrándose la pertinencia de las variables escogidas, así como su independencia. También se utilizó el juicio de expertos, con la apreciación de los especialistas y productores reconocidos en los diferentes campos afines al proyecto.

Cada indicador del CMD, entró al índice matemático con un peso y una curva de respuesta. El peso fue estimado a partir de la importancia del indicador correspondiente en los primeros componentes principales del análisis con las variables del CMD. Por su parte, la curva de respuesta se construyó a partir de la opinión de los especialistas en la materia, contrastados con los rangos observados en los datos. Los índices obtenidos fueron discutidos con los especialistas para validar la pertinencia de cada uno de los indicadores. Así, se obtuvo un índice que describe la calidad del suelo para plantaciones bananeras en Venezuela a partir de unos pocos indicadores.

Resultados y Discusión

La determinación del índice tiene dos pasos, 1) la selección de los indicadores más explicativos respecto a la producción, y 2) para cada indicador seleccionado, la determinación de las curvas de respuesta que entran en la fórmula del índice.

Selección de los indicadores más explicativos

En un primer momento se llevó a cabo una clasificación automática del tipo análisis de conglomerados (Diday *et al.*, 1982). Para ello se utilizó el método de clasificación jerárquica de Ward, cortándose el árbol de clasificación en 5-8 clases. Estas clases servirán de referencia posteriormente, una vez terminado el proceso

ACP Circ de Correlación Venezuela

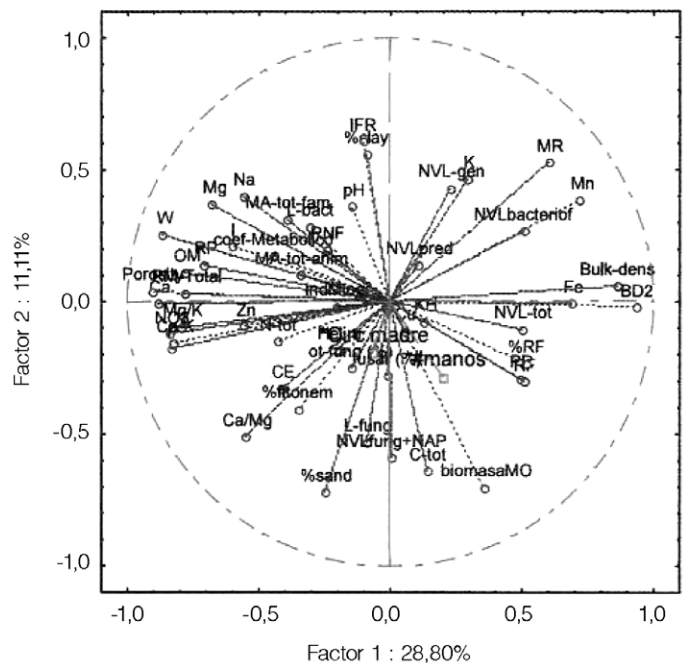


Figura 1. Círculo de correlaciones de los indicadores estudiados.

de selección de indicadores explicativos, para su validación.

Para buscar los indicadores que mejor explicaran las variables de producción, se procedió de dos formas. En primer lugar, se utilizaron regresiones lineales con todos los indicadores medidos como variables explicativas (54) para explicar las dos variables de producción: número de manos y circunferencia del seudotallo de la planta madre.

Se siguió un proceso paso a paso (Draper y Smith, 1968) ya que estos métodos siguen un enfoque del tipo algoritmo voraz y producen óptimos locales del criterio de mínimos cuadrados. Así, en el caso de regresión paso a paso hacia delante, se introducen indicadores al modelo lineal suponiendo que las variables ya escogidas constituyen el mejor modelo, pero sin revisar si el nuevo modelo es el mejor en el número de indicadores presentes en el modelo. En el caso de regresión paso a paso hacia atrás, se eliminan indicadores redundantes del modelo, pero de nuevo sin hacer una revisión de las escogencias. Si bien es cierto que se

pudo usar un enfoque de optimización mejorado, por ejemplo utilizando metaheurísticas de optimización combinatoria, como algoritmos genéticos, no se usaron por no estar bien probadas aún (Trejos y Espinoza, 2009).

De esta forma, las regresiones paso a paso hacia delante y hacia atrás produjeron soluciones diferentes en cada caso, y los algoritmos se detuvieron según el criterio del R² ajustado máximo. Por otro lado, se aplicó análisis de componentes principales, utilizando las variables de producción como variables suplementarias, y de esta forma se encontraron también indicadores con alto poder explicativo por su posición en el círculo de correlaciones y por su calidad de representación. Con todos estos resultados, se buscó un consenso de los indicadores más explicativos, a la luz de los resultados de los métodos estadísticos. Una reunión de expertos internacionales y del país, ayudó para hacer la selección final.

Con estos indicadores, se hicieron tres pruebas: i) de pertinencia, que consistió en

reevaluar el poder explicativo de los indicadores seleccionados; ii) de completitud, para evaluar que todas las clases, obtenidas en el proceso de clasificación automática indicado más arriba, estuvieran bien representadas; y iii)

además, se debía verificar la independencia de los indicadores escogidos, de modo de evitar redundancias; para ello se examinó la matriz de correlaciones de los indicadores seleccionados. Al examinar el círculo de correlaciones (Figura 1), se aprecia que hay un grupo de indicadores que influyen más, tanto positiva como negativamente, en la circunferencia de la madre y el número de manos. Para establecer esto numéricamente, se calcularon los cosenos de los ángulos entre los vectores que definen a cada indicador y las dos primeras componentes principales. Al seleccionar a los indicadores con ángulo >0,8 o <-0,8 se tiene lo que hemos llamado conjunto mínimo de datos (CMD), el cual fue revisado por expertos. Estos conjuntos se muestran en la Tabla III.

Determinación del índice

Se propone un índice de calidad y salud de suelos bananeros de tipo aditivo (Andrews *et al.*, 2004), dado por

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

donde K: número de indicadores en el MDS, peso_i: peso del indicador i, f_i: curva de respuesta que corresponde al indicador i, y x_i: valor del indicador i del lugar que se quiere evaluar. Es decir, para cada valor de los indicadores x₁, x₂,...,x_K del MDS el índice tiene un valor entre 0 y 1, interpretándose el 1 como la mejor calidad y salud de dicho suelo (Tabla IV)

De acuerdo con la opinión de los expertos, se utilizaron

TABLA III
LOS 11 INDICADORES SELECCIONADOS
PARA VENEZUELA, LLAMADO CONJUNTO
MÍNIMO DE DATOS (CMD)

pH	%arena	biomasaMO	NVLbacteriof
Mg	Pen-res	PR	Trichod (%)
Cu	RM-tot	NVLtot	

PR: peso radical, RM-Total: respiración microbiana total, NVLtot: total nemátodos vida libre, trichod: población de *Trichoderma*, Pen-res: resistencia a la penetración, NVLbacteriof: total nemátodos de vida libre bacteriófagos, biomasaMO: biomasa de materia orgánica, Trichod: % de *Trichodermas*.

tres tipos de curvas de respuesta (Wolfram, 1996):

i) una curva logística (creciente o decreciente), con la ecuación

$$y = \frac{e^{mx+b}}{1+e^{mx+b}}$$

donde m y b son parámetros que controlan el crecimiento y la concavidad de la curva;

ii) una curva tipo campana, con la ecuación

$$y = \frac{b}{m(x-\bar{x})^4 + b}$$

donde m y b son parámetros que controlan la concavidad y crecimiento de la curva, y la media es el punto donde se alcanza el máximo; y

iii) una curva creciente con asíntota horizontal, con la ecuación

$$y = \frac{x}{mx+b}$$

donde m y b son parámetros que controlan las asíntotas y concavidad de la curva.

En la Tabla V se presenta el tipo de curva y el valor de los coeficientes para cada uno de los indicadores presentes en el CMD. Estos indicadores tienen una diferente contribución al poder explicativo de las variables de producción. Para determinar esta contri-

TABLA IV
VALORACIÓN DEL ÍNDICE
DE CALIDAD Y SALUD DE SUELO
BANANERO

Valor del indicador	Interpretación
0 y 0,1	Pobre
0,1 y 0,35	Regular
0,35 y 0,65	Bien
0,65 y 0,85	Muy Bien
0,85 y 1,0	Excelente

TABLA V
TIPO DE CURVA DE RESPUESTA POR INDICADOR SELECCIONADO

Coeficientes	Media	m	b	Tipo de curva
pH	6	0,094	1,456	Campana
Mg	4,15	0,04080	1,456	Campana
Cu	3,5	0,09440	1,456	Campana
%arena	45	0,0000478	1,456	Campana
Pen-res	0,2	-20,22900	1,456	Logística decreciente
RM-Total	350	0,01	-3,540	Logística creciente
biomasaMO	5,5	1	-3,338	Logística creciente
PR	35	0,3034	10,620	Logística creciente
NVL-tot	145	0,101	-1,467	Logística creciente
NVLbacteriof	15	0,3034	-4,551	Logística creciente
Trichod	5	2	-7,586	Logística creciente

bución se hace un análisis en componentes principales de cada CMD y se calcula la comunalidad de cada indicador Joliffe (2004); esto es, la

suma de las correlaciones al cuadrado con las componentes principales con varianza >1. Una alta comunalidad muestra que el indicador es importante

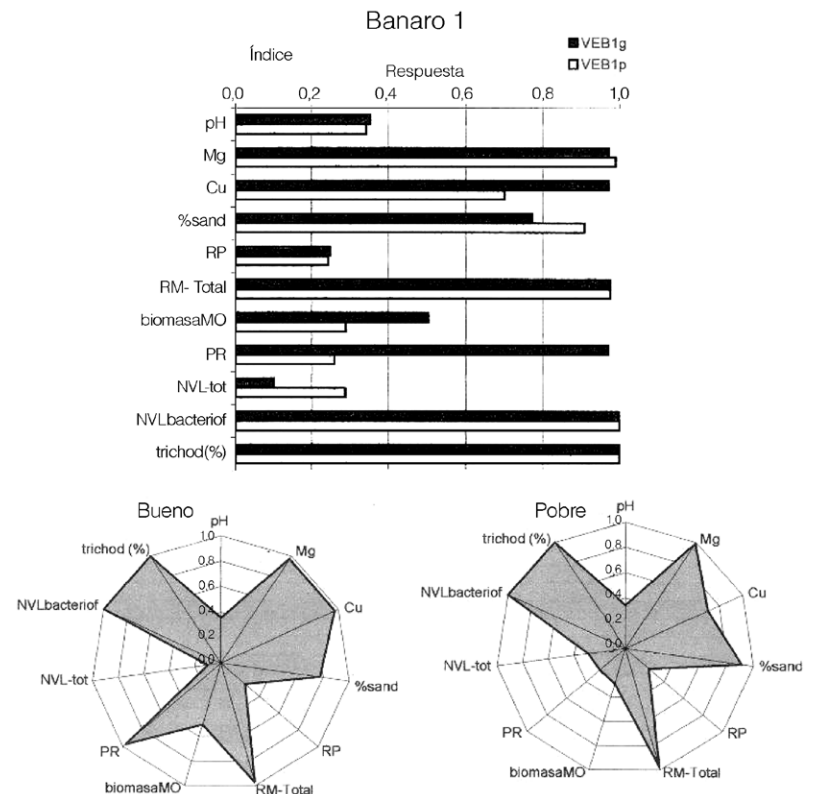


Figura 2. Representación del índice del índice de calidad y salud de suelos bananeros para la finca Banaoro 1.

TABLA VI
CÁLCULOS DEL ÍNDICE PARA FINCAS BANANERAS

Venezuela												
Valores	VEB1g	VEB1p	VEB2g	VEB2p	VEK1g	VEK1p	VEK2g	VEK2p	VEP1g	VEP1p	VEP2g	VEP2p
pH	8,31	8,34	8,20	8,07	7,39	7,66	7,85	8,11	8,02	7,89	8,27	8,28
Mg	5,15	4,92	5,85	4,50	1,49	0,66	1,70	1,83	7,23	5,45	6,83	7,23
Cu	4,33	5,10	4,98	3,98	5,30	3,45	5,85	6,05	9,43	4,18	0,38	1,68
%sand	20,56	25,10	26,59	31,92	20,59	35,81	13,05	10,28	49,59	45,78	30,77	27,21
RP	0,23	0,23	0,24	0,16	0,09	0,13	0,12	0,23	0,35	0,33	0,29	0,41
RM-Total	1,34	1,44	3,11	2,26	1,85	2,38	4,13	3,56	5,01	7,61	6,28	5,34
biomasaMO	5,52	4,02	3,67	5,07	2,66	1,01	1,66	0,82	0,40	1,98	1,38	2,78
PR	46,51	31,54	25,07	38,54	61,91	53,61	47,46	31,22	21,38	20,92	45,78	31,50
NVL-tot	39,00	60,00	113,00	44,00	41,00	70,00	38,00	33,00	6,50	18,00	28,25	36,00
NVLbacteriof	36,00	56,00	102,00	32,00	17,00	54,00	26,00	18,00	3,00	6,50	2,50	8,00
Trichod (%)	0,00	0,00	0,00	12,50	0,00	7,50	0,00	2,50	2,50	5,00	2,50	5,00
Respuesta	VEB1g	VEB1p	VEB2g	VEB2p	VEK1g	VEK1p	VEK2g	VEK2p	VEP1g	VEP1p	VEP2g	VEP2p
pH	0,35	0,34	0,40	0,46	0,81	0,67	0,57	0,44	0,48	0,55	0,37	0,36
Mg	0,97	0,99	0,81	1,00	0,42	0,19	0,50	0,55	0,28	0,93	0,41	0,28
Cu	0,97	0,70	0,77	1,00	0,59	1,00	0,34	0,27	0,01	0,99	0,14	0,58
%sand	0,77	0,91	0,94	0,99	0,77	1,00	0,48	0,38	0,98	1,00	0,99	0,95
RP	0,25	0,24	0,23	0,60	0,84	0,72	0,75	0,26	0,03	0,05	0,09	0,01
RM-Total	0,98	0,98	0,93	0,96	0,97	0,96	0,89	0,92	0,82	0,48	0,68	0,79
biomasaMO	0,50	0,29	0,25	0,43	0,15	0,06	0,09	0,06	0,04	0,11	0,08	0,16
PR	0,97	0,26	0,05	0,74	1,00	1,00	0,98	0,24	0,02	0,01	0,96	0,26
NVL-tot	0,10	0,29	0,91	0,13	0,11	0,42	0,10	0,07	0,02	0,03	0,06	0,09
NVLbacteriof	1,00	1,00	1,00	0,99	0,65	1,00	0,97	0,71	0,03	0,07	0,02	0,11
Trichod (%)	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,02	1,00	0,98	0,98	0,50	0,98	0,50
Indice	VEB1g	VEB1p	VEB2g	VEB2p	VEK1g	VEK1p	VEK2g	VEK2p	VEP1g	VEP1p	VEP2g	VEP2p
	0,71	0,63	0,67	0,71	0,64	0,68	0,58	0,41	0,29	0,43	0,40	0,36

para el análisis del país respectivo. Esta comunalidad, normalizada entre la suma de las comunales, fue usada como ponderación del indicador respectivo en la fórmula del índice de calidad y salud de suelos.

Aplicación del índice a las fincas estudiadas

Con el índice definido, se puede aplicar a los datos observados con el fin de determinar si efectivamente el índice sirve para contrastar los sitios buenos de los sitios pobres. En la Tabla VI se muestra en la parte superior los valores promedio para los distintos sitios y para cada uno de los indicadores del CMD, y en la parte inferior se presenta el valor respectivo de la curva de respuesta. En la última línea se tiene el valor calculado del índice en cada sitio. Se puede apreciar en la Tabla VI que los índices sirven para contrastar los sitios buenos de los sitios pobres. Sin embargo, hay algunas fin-

cas donde eso no sucede, posiblemente porque para esas fincas los indicadores seleccionados no son tan contrastantes, o bien porque los índices obtenidos son generales y puede haber casos en que no hagan una diferenciación tan precisa como en otras fincas.

En la Figura 2 se pueden apreciar las representaciones realizadas con la aplicación del índice de calidad y salud de suelos en una de las fincas estudiadas. Se presentan dos gráficos, uno tipo radial o ameba (o telaraña), y uno de barras horizontales. para la Finca Banaoro 1 (VEB1) con los valores promedios y las respuestas de los indicadores seleccionados (Tabla VI). Al aplicar el índice se obtiene el valor de 0,71 para el sitio bueno y 0,63 para el sitio pobre. La lectura de la figura muestra que para el sitio bueno se tiene como resultado muy bien en Mg, Cu, RM-total, PR, NVL-bacteriof y trichod; bastante bien en % arena; regular en pH y biomasaMO; y mal en RP y NVL-tot.

Conclusiones

Se determinó un índice matemático de calidad y salud de suelos bananeros para su aplicación en fincas bananeras de Venezuela.

Se obtuvo un conjunto mínimo de datos (CMD) para la aplicación del índice matemático basado en los 11 indicadores químicos, físicos y biológicos más representativos de las condiciones propias de cada uno de los sistemas de producción estudiados y con la participación de expertos locales y productores involucrados.

Se determinó que los indicadores seleccionados son confiables para diferenciar sectores buenos y pobres de las fincas.

Recomendaciones

No existen indicadores globales que puedan aplicarse a todos los sistemas de producción de manera específica. Estos varían de acuerdo a las condiciones de cada localidad;

sin embargo, los indicadores identificados pueden servir de referencia para indagar estas propiedades en los sistemas identificados (exportación y mercado local).

El hecho que los indicadores biológicos fueron los de mayor aporte a la determinación del índice indica la importancia de incorporar a éstos en los estudios para determinar calidad y salud del suelo, en contraposición de lo que formalmente se utiliza (indicadores físicos, químicos y productivos). Así mismo, se recomienda el uso de todo insumo de origen biológico o prácticas agrícolas que mejoren calidad del suelo de acuerdo a lo encontrado en este estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a FONTAGRO por su apoyo financiero (código LOAINI-BAP2005/13) y a todo el personal técnico-científico que participó en el proyecto "Innovaciones tecnológicas para el

manejo y mejoramiento de la calidad y salud de suelos bananeros de América Latina y el Caribe”, a Bioversity International (antes INIBAP), Universidad de Costa Rica, por la colaboración de su personal de la Facultad de Matemáticas, al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) y a la Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, por su apoyo y, finalmente, a los protagonistas de este trabajo, los productores de la zona Sur del Lago (Trujillo) y de Aragua (Santa Cruz) por su apoyo y confianza.

REFERENCIAS

- Andrews SS, Karlen DL, Cambardella CA (2004) The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1945-1962.
- Carter MR, Gregorich EG, Anderson DW, Doran JW, Janzen HH, Pierce FJ (1997) Concepts of soil quality and their significance. En Gregorich EG, Carter MR (Eds.) *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. Elsevier. Amsterdam, Holanda. pp. 1-20.
- Diday E, Lemaire J, Pouget J, Testu F (1982) *Éléments d'Analyse des Données*. Dunod. París. Francia. pp. 117-122.
- Doran JW, Zeiss MR (2000) Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15: 3-11.
- Draper NR, Smith H (1968) *Applied Regression Analysis*. Wiley. Nueva York, EEUU. 420 pp.407
- Ewel J, Madriz A, Tosi J (1976) *Zonas de Vida de Venezuela*. 2ª ed. FONAIAP. Ministerio de Agricultura y Cria. Caracas, Venezuela. 270 pp.
- Fauci MF, Dick RP (1994) Microbial biomass as an indicator of soil quality: Effects of long-term management and recent soil amendments. En *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Spec. Pub. N° 5. SSSA, Madison, WI, EEUU. pp. 229-234.
- FAO (2006) *Base de Datos Agrícolas: FAOSTAT*. Food and Agriculture Organization <http://faostat.fao.org/site/340/DesktopDefault.aspx?PageID=340> (Cons. 30/08/2006).
- Gauggel CA, Sierra F, Arévalo A (2005) The problems of banana root deterioration and its impact on production: Latin America's experience. En Turner DW, Rosales FE (Eds.) *Banana Root System: Towards a Better Understanding for its Productive Management*. INIBAP. Montpellier, Francia. pp. 13-22.
- Gregorich EG, Carter MR, Angers DA, Monreal CM, Ellert BH (1994) Toward a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural Soils. *Can. J. Soil Sci.* 74: 367-386.
- INIBAP (2004) *Innovaciones Tecnológicas para el Manejo y Mejoramiento de la Calidad y Salud de Suelos Bananeros de América Latina y el Caribe*. Red Internacional para el Mejoramiento del Banano y el Plátano. San José, Costa Rica. 36 pp.
- Jolliffe IT (2004) *Principal Component Analysis*. 2a ed. Springer. Nueva York, EEUU. 487 pp.
- Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Haeris RF, Schumann GF (1997) Soil quality and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Pattison T, Smith L, Moody P, Armour A, Badcock K, Cobon J, Rasiyah V, Lindsay S, Gullino L (2005) Banana root and soil health project - Australia. En Turner DW, Rosales FE (Eds.) *Banana Root System: Towards a Better Understanding for its Productive Management*. INIBAP. Montpellier, Francia. pp. 149-165.
- Romig DE, Garlynd MJ, Harris RF, McSweeney K (1995) How farmers assess soil health and quality. *J. Soil Water Cons.* 50: 229-236.
- Rosales FE, Pocasangre LE, Trejos J, Serrano E, Peña W (2008) *Guía de Diagnóstico de la Calidad y Salud de Suelos*. Bioversity International. Montpellier, Francia. 79 pp.
- Saporta G (1980) *Théorie et Méthodes de la Statistique*. Technip. París, Francia. 308 pp.
- SQI (1996) *Indicators for Soil Quality Evaluation*. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by National Soil Survey Center, Soil Quality Institute, NRCS, USDA, National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. LUGAR???, EEUU.
- Trejos J, Espinoza JL (2009) Uso de algoritmos genéticos en la selección de parámetros en regresión lineal múltiple. Preprint. CIMPA, Universidad de Costa Rica. 16 pp.
- Wolfram S (1996) *The Mathematical Book*. Cambridge University Press. Cambridge, EEUU. 1403 pp.