

01

Recibido: septiembre, 2022 Aprobado: octubre, 2022 Publicado: diciembre, 2022

CONSTRUCCIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE SUELOS BANANEROS EN LA PROVINCIA EL ORO, ECUADOR

CONSTRUCTION OF A QUALITY INDEX FOR BANANA CULTIVATED SOILS IN EL ORO PROVINCE, ECUADOR

Roxana Ramírez Machare¹

E-mail: roxanamorayma1606@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1905-0916>

Salomón Barrezueta Unda¹

E-mail: sabarrezueta@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4147-9284>

¹Universidad Técnica de Machala. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Ramírez Machare, R., Barrezueta Unda, S. (2022). Construcción de un índice de calidad de suelos bananeros en la Provincia el Oro, Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas*, 10(3), 6-13. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>

RESUMEN

Lograr la sostenibilidad de los suelos es la finalidad de muchos agricultores, en especial en suelos donde el cultivo del banano se realiza por muchos años de manera intensiva. Con este enfoque se estableció el concepto de calidad del suelo. Los objetivos fueron: analizar las propiedades fisicoquímicas de dos suelos bananeros y calcular sus respectivos índice de calidad del suelo. Se tabularon los registros de análisis de suelo y de ingresos neto por hectárea del 2015 al 2019 de las fincas bananeras Santa Bárbara y Kimberley, ubicadas en Machala (Ecuador). Los suelos se diferencian por altos niveles de arcilla en Santa Bárbara y de arena en Kimberley. En ambos suelos se identificó bajos niveles de materia orgánica, pero con valores en P, K, Ca, S, Mg y B que sobrepasan el nivel óptimo para el banano. El análisis de componentes principales permitió seleccionar seis indicadores (pH, MOS, Mg, Cu, Mn y B) en Santa Bárbara y de ocho (pH, MOS, P, K, S, Mg, Cu y Fe) en Kimberley. Los suelos obtuvieron un puntaje de 0,33 (Santa Bárbara) y de 0,24 (Kimberley) que representan suelos bueno y regular, respectivamente.

Palabras clave:

Propiedades del suelo; musáceas; fertilización química; degradación del suelo, análisis de componentes principales.

ABSTRACT

The sustainability of soils is the goal of many farmers, especially in soils where banana cultivation has been carried out intensively for many years. With this approach, the concept of soil quality was established. The objectives were: to analyze the physicochemical properties of two banana soils and to calculate their respective soil quality index. Soil analysis records and net income per hectare from 2015 to 2019 of the Santa Barbara and Kimberley banana farms, located in Machala (Ecuador), were tabulated. The soils are differentiated by high levels of clay in Santa Bárbara and sand in Kimberley. In both soils, low levels of organic matter were identified, but with values of P, K, Ca, S, Mg and B that exceed the optimum level for bananas. The principal component analysis allowed the selection of six indicators (pH, MOS, Mg, Cu, Mn and B) in Santa Bárbara and eight (pH, MOS, P, K, S, Mg, Cu and Fe) in Kimberley. The soils scored 0.33 (Santa Barbara) and 0.24 (Kimberley) representing good and fair soils, respectively.

Keywords:

Soil properties; musaceae; chemical fertilization; soil degradation, principal component analysis.

INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos es uno de los principales problemas relacionados con la crisis mundial de alimentos y con el cambio climático. El origen de esta problemática ambiental se ha asociado principalmente a la actividad agraria, pues ésta involucra prácticas como el uso continuo de insumos químicos y los monocultivos que impactan de manera negativa al suelo (Reyes et al., 2018). En particular, los suelos de uso agrícola son muy susceptibles a su degradación y se expresa en los cambios de las propiedades físicas, químicas y biológicas (Barbieri et al., 2020). Cambios que ocasiona acidez, salinidad, compactación edáfica, pérdida de materia orgánica, entre otros (Reyes et al., 2018).

Por otra parte, el sector agrícola, tiene la necesidad de incrementar la producción para satisfacer el consumo de alimento de una población en continuo crecimiento (Barreuzeta-Unda et al., 2017). Por tanto, los suelos juegan un rol importante en la sostenibilidad agraria del planeta (Bünemann et al., 2018). En este marco, para evaluar la calidad de un suelo y, así, determinar si el uso que se le está dando es sostenible, se ha recurrido al uso de indicadores, los cuales están referidos a las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Reyes et al., 2018; Zhang et al., 2022). El origen del concepto de calidad del suelo tiene dos enfoques, el primero que pone énfasis en las propiedades inherentes del suelo y el segundo en los efectos de la gestión humana (Bünemann et al., 2018). Para (Vasu et al., 2016) la calidad del suelo está referida a la capacidad específica del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o alterado, para sostener la vida, la producción agraria y como soporte de vivienda. De esta forma el concepto de calidad del suelo no es propio de la agricultura, así que abarca todas las actividades que se desarrollan sobre este recurso natural.

Para lograr la operatividad del concepto de calidad del suelo es necesario la construcción de un índice que permita evaluar en forma integral o parcial la capacidad del suelo para cumplir diferentes funciones en forma sostenible (Andrews et al., 2002; Cairo Cairo & Machado Armas, 2017). Varios investigadores utilizan métodos estadísticos para la selección de las propiedades del suelo que conforman el índice (Acevedo et al., 2020; Reyes et al., 2018; Zhang et al., 2022). En este mismo sentido, las propiedades del suelo proporcionan la información para el índice de calidad del suelo (ICS) (Acevedo et al., 2020; Cantún et al., 2009). Propiedades que pasan a denominarse indicadores de calidad del suelo. (Acevedo et al., 2020; Cantún et al., 2009) indica que los indicadores no deben ser universales y corresponden a las condiciones del ambiente y de las características del suelo.

En este marco, varios cultivos a nivel mundial por su alta demanda en los mercados internacionales afectan en gran medida la calidad del suelo. El banano (*Musa* AAA), es uno de ellos; ocupa el cuarto lugar entre los cultivos que más se consumen en el mundo, después del arroz, el trigo y el maíz (Delgado et al., 2010). Para obtener una óptima producción el banano requiere de un elevado

aporte de potasio (K), nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mn), hierro (Fe), boro (B), zinc (Zn) y cobre (Cu) (Rajput et al., 2022). Nutrientes esenciales que los toma del suelo y que los agricultores compensan su pérdida con aplicaciones de fertilizantes químicos y abonos orgánicos. Cambiar los suelos cultivados con banano no es una estrategia viable, pues representa grandes ingresos por su exportación en los países donde producen, a su vez genera fuentes de empleo directo e indirecto.

En Ecuador, la producción de banano es la actividad agrícola más importante. En el 2018, el país produjo 6,2 millones de t en aproximadamente 158.057 ha de cultivadas (Villaseñor et al., 2020). Pero la mayoría de las fincas bananeras tiene más de 40 años de continua explotación agrícola, con continuos controles fitosanitarios y de aplicación de fertilizantes. Aspectos que inciden en la calidad de suelo (Castillo-Valdez et al., 2021).

Una estrategia para mejorar la sustentabilidad de las fincas bananera, es desarrollar un índice de calidad del suelo que permitirá a los productores de banano y a los técnicos agrícolas mejorar las prácticas de gestión del suelo (Segura et al., 2022; Villaseñor et al., 2020). Con lo expuesto se plantearon los objetivos de analizar las propiedades físicas y químicas de dos suelos cultivados con banano bajo manejo convencional y calcular sus respectivos índice de calidad del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en dos fincas cultivadas con banano, ubicadas en la provincia de El Oro (Ecuador), entre las coordenadas geográficas 3°17'44"S y 79°54'13.7"O para la finca Santa Bárbara y 3°30'15"S 79°86'98,9"O para la finca Kimberley. El clima en la zona es tropical Megatérmico. La temperatura promedio es de 25.0 C, la precipitación anual es de 550 mm y la humedad relativa de 85%. La formación del suelo es aluvial y corresponde al orden Alfisoles.

Diseño de la investigación

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 cuatro años. Para la investigación las fincas seleccionadas mantienen registros de cinco años comprendidos entre el 2015 al 2019, y pertenecen a una sola empresa bananera.

La administración de cada finca divide la superficie cultivada en cuatro lotes de aproximadamente igual superficie. Los suelos mantienen un modelo de agricultura convencional con manejo intensivo y en monocultivo de más de 40 años de plantadas con banano, clon cavendish. En ambas bananeras el sistema de riego es presurizado. La programación de fertilización durante los cinco años que abarca el estudio se conformó de: 61 kg ha⁻¹ de Urea (46 % N- 0 - 0); 17 kg ha⁻¹ de DAP (18 % N- 46 % P- 0) y Muriato de potasio (0- 0- 60 % K). Todos los fertilizantes

se aplicaron de manera edáfica al suelo en media luna frente entre la planta madre y la planta de sucesión (hijo).

El proceso inició con la etapa de diagnóstico de las fincas bananeras. La finalidad fue tabular los análisis de suelos realizados entre 2015 al 2019. Análisis que son referidos a los primeros 30 cm del suelo.

Las propiedades reportadas fueron: granulometría (arena, limo y arcilla) por el método de Bouyoucos, materia orgánica del suelo (MOS) por digestión húmeda (Walkley y Black). El pH en una solución de KCL (1:2,5) y la conductividad eléctrica (CE) en agua (1:2,5) con lectura en un potenciómetro. El nitrógeno amoniacal (NH₄) en un Kjeldahl, fósforo (P) con el método de Olson modificado, potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B) por absorción atómica y el azufre (S) por turbidimetría. Con los datos obtenidos se realizó una caracterización de cada lote y finca, para describir el estado de los suelos en estudio durante el periodo de evaluación.

En la segunda etapa, se determinaron las propiedades físicas o químicas que conforman el conjunto mínimo de datos (CMD). En esta etapa las propiedades del suelo se denominan indicadores. Se tomó el proceso de conformación de un índice aditivo por pesos ponderados descrito por (Andrews et al., 2002) y modificado por (Barrezueta-Unda et al., 2017) que se detalla a continuación.

Todos los indicadores del suelo fueron procesados en un análisis de componentes principales (ACP), procedimiento que indica que uno o varios componentes principales (CP) representan más del 80% de la variabilidad total de los datos. Con el objetivo de seleccionar indicadores representativos del conjunto total de datos, se realizó la selección de todos los CP > 1, y con los autovalores que indiquen un peso $\geq 0,70$.

Para eliminar indicadores redundantes, se aplicó la correlación de Pearson al 1 % de significancia, marcando los coeficientes de $r \geq 0,6$ que indiquen una alta correlación entre ellos (Barrezueta-Unda et al., 2017; Vasu et al., 2016). Con este procedimiento los indicadores seleccionados conformaron CMD.

Los indicadores seleccionados del CMD se integraron en la ecuación (1), para obtener el peso ponderado de cada indicador. El proceso consiste en multiplicar el valor del indicador seleccionado por el coeficiente de puntuación (Cop). El Cop, que se obtiene de dividir la varianza (%) de cada CP, para el total de la varianza (%) acumulada de los CP > 1.

$$ICS = \sum_{i=1}^n \text{Indicador} * (\% \text{ varianza por CP} / \% \text{ varianza acumulada}) \quad (1)$$

Cada indicador se suma y se promedian para obtener el ICS total por cada finca. A continuación, se clasifica en el entre: de 0-0,1 (suelo pobre); 0,1-0,25 (suelo regular); 0,25-0,65 (suelo bueno); 0,65-0,85 (suelo muy bueno) y de 0,85 en adelante suelo en excelentes condiciones (Delgado et al., 2010). Esta puntuación está en relación con el nivel de sostenibilidad del suelo.

Al final se compararon los ingresos (I) anuales de cada finca bananera, mediante la siguiente ecuación (2) propuesta por (Cairo Cairo & Machado Armas, 2017) y modifica para la investigación. con los valores obtenidos por año se realiza un análisis de regresión lineal solo con los indicadores que conforman el ICS.

$$I = (PP * PV) * CT \quad (2)$$

Donde: I= ingreso (USD); PP= promedio producción (Cajas de 19 kg); PV= Precio de Venta (USD caja⁻¹); CT= Costo Total (USD caja⁻¹).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) al 5% de significancia para cada propiedad física y química. Criterio con el cual se discrimina a las propiedades del suelo que entre los lotes de cada bananero existan diferencias significativas. Las propiedades que no tuvieron diferencia significativa ($p > 0,05$) se procesaron mediante un ACP y luego un análisis de correlación bilateral (Pearson al 1 y 5%). También se realizaron regresiones lineales con los valores de cada indicador seleccionado y el promedio de ingresos por año por hectárea de cada finca. Para realizar el ANOVA, el ACP y la correlación de Pearson se utilizó el programa estadístico SPSS, versión 23. Los valores calculados del ingreso fueron presentados en una gráfica serie temporal.

RESULTADOS

Análisis de las propiedades del suelo en estudio

En ambas fincas se obtuvo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) sólo en las propiedades granulométricas (Tabla 1). En la finca Santa Bárbara los valores de arcilla variaron de 32,8 g kg⁻¹ a 54 g kg⁻¹, mientras que el limo de 25,6 g kg⁻¹ a 43,2 g kg⁻¹ y la arena de 20,4 g kg⁻¹ a 28 g kg⁻¹. Valores que conforman una clase textural Franco arcillosa (lote 1 y 2) y arcillosa (lote 3 y 4). En Kimberley, los valores de arcilla disminuyeron entre 17 g kg⁻¹ a 24 g kg⁻¹, en menor medida también el limo que varió entre 23 g kg⁻¹ a 39,5 g kg⁻¹, mientras que los valores de arena se incrementaron entre 36,5 g kg⁻¹ a 60 g kg⁻¹. Valores que corresponden a una clase textural franco arenosa (lote 1, 2 y 3), franco (lote 4). La alta variabilidad en las fracciones arcilla y limo, se debe a los sedimentos aluviales que formaron estos suelos (Moreno et al., 2016; Villaseñor et al., 2015).

Para la selección de indicadores físicos, se debe tener en cuenta que las proporciones altas de arcilla o arena controla la heterogeneidad de varias propiedades químicas del suelo (Zhang et al., 2022). Por ejemplo, en suelos de clase textural franco arenosas la retención de humedad es baja y pueden favorecer la pérdida de nutrientes por lixiviación, lo cual ocasiona un bajo vigor en las plantas; más aún, si la textura indicada es homogénea en todo el terreno (González-García et al., 2021).

Varios métodos para construir un índice de calidad de suelos, excluyen a los indicadores físicos, si el fin es

medir la sostenibilidad de la gestión del suelo, incorporando sólo indicadores químicos y biológicos (Reyes et al., 2018). Pero si el objetivo es medir el grado de pérdida del suelo o efectos en el uso del suelo, las propiedades físicas se incluyen. En esta investigación, la diferenciación significativa de la granulometría puede incidir en la conformación de los CP, y generar altas correlaciones con la materia orgánica o las bases de cambio, efecto que al final genera una mayor redundancia de indicadores en la selección del CMD (Barrezueta-Unda et al., 2017).

Por otra parte, las propiedades químicas fueron muy homogéneas en cada finca bananera (Tabla 1). En la finca Santa Bárbara, el pH varió de 6,48 a 6,85, valores próximos a nivel óptimo (pH 6-6,5, suelo neutro). Mientras en la finca Kimberley, el pH fluctuó entre 6,5 a 7,28, rango que indicó una tendencia ligeramente alcalina del suelo. A pesar que la aplicación de fertilizantes es continua en las dos fincas, esta práctica puede no aumentar significativamente en el pH del suelo en los primeros 30 cm, puesto que para mantener un pH de 6 a 7 es común las enmiendas con cal, yeso, abonos orgánicos o una mezcla de estas para mantener (Rajput et al., 2022; Villaseñor et al., 2020). De esta forma así algunos fertilizantes alcalinizan o acidifican los suelos, estas enmiendas regulan el pH a neutro.

La MOS, en ambas bananeras estuvieron bajo el nivel óptimo (> 3%), los valores más altos de materia orgánica fueron de 2,29 % (lote 4, Santa Bárbara) y de 2,39 % (lote 3, Kimberley). El bajo nivel de materia orgánica se debe a la alta temperatura y humedad que existe en la zona que propicia la formación de capa de carbono lábil que se

pierde rápidamente y no permite su fijación en los suelos (Barrezueta-Unda, 2019).

Por otra parte, los registros históricos de la CE también fueron bajo del nivel óptimo para estos suelos (0,20-0,40 dS/m⁻¹); a excepción del lote 2 de Kimberley que registró 0,5 dS/m⁻¹. Estos valores de CE concuerdan con los registros de (Villaseñor et al., 2015) y de (Barrezueta-Unda et al., 2017), realizados en suelos agrícolas de la provincia de El Oro, valores atribuidos al riego periódico y la textura del suelo (franca arenosa, franco y franco arenoso limoso) que facilita el lavado de sales.

En general los análisis de suelos reportaron valores que sobrepasaron el rango óptimo de nutrientes para suelos bananeros (Tabla 2); a excepción de algunos que se detalla a continuación. En Santa Bárbara, el NH₄ en los lotes 1 (27,7 ppm) y 2 (27,15 ppm) estuvieron bajo el rango óptimo (31-40 ppm), mientras el Fe que varió entre 14,81 ppm a 20,69 ppm, fue el único micronutriente que no alcanzó rango óptimo (20-40 ppm). En Kimberley, el NH₄ registró también valores menores al rango óptimo en los lotes 2 (27,98 ppm), 3 (28,38 ppm) y 4 (25,23 ppm) y al igual que el Ca (14,8 ppm a 15,38 meq/100 ml), sus valores fueron bajo el rango óptimo (16,96-19,08 meq/100 ml). Los promedios de los otros nutrientes sobrepasaron el rango óptimo en la mayoría de los lotes. Los valores de los nutrientes sobre el rango óptimo tienen relación directa con el manejo de los suelos (Barbieri et al., 2020). Para (Barrezueta-Unda, 2019) los valores altos de nutrientes en los suelos agrícolas es producto de un desbalance entre la relación planta-suelo en absorción de nutrientes producto del uso excesivo de fertilizantes químicos.

Tabla 1. ANOVA de las propiedades físicas y químicas de las fincas Santa Bárbara y Kimberley

Indicadores	Santa Barbara				Sig. 0,05	Nivel óptimo
	Lote1	Lote 2	Lote 3	Lote 4		
ARENA (g kg ⁻¹)	24	28	23,6	20,4	0,466	---
LIMO (g kg ⁻¹)	43,2	38	35,6	25,6	0,002	---
ARCILLA (g kg ⁻¹)	32,8	34	40	54	0,001	---
pH	6,85	6,50	6,62	6,48	0,601	6,0 - 6,5
MOS (%)	2,18	2,09	2,26	2,29	0,984	3,0-5,0
CE (dS/m ⁻¹)	0,19	0,17	0,18	0,15	0,843	0,20-0,40
NH ₄ (ppm)	27,7	27,15	36,9	32,73	0,854	31-40
P (ppm)	31,44	31,34	44,42	42,61	0,311	8-14
K (meq/100 ml)	1,57	1,38	2,61	1,94	0,462	0,7-1,48
Ca (meq/100 ml)	20,6	20,56	21,58	21,83	0,965	16,96-19,08
Mg (meq/100 ml)	5,29	5,53	5,78	6,47	0,696	1,9 - 3
S (ppm)	51,7	51,98	49,8	47,69	0,995	10-11,9
Zn (ppm)	4,68	4,34	4,17	7,98	0,143	3,1-7
Cu (ppm)	3,57	3,27	3,79	3,64	0,924	1,1-4
Fe (ppm)	14,81	20,69	18,31	14,96	0,882	20-40
Mn (ppm)	12,57	18,83	16,1	19,12	0,92	5,1-15
B (ppm)	1,29	1,23	1,63	1,24	0,914	0,2-0,49
Indicadores	Kimberley				Sig. 0,05	Nivel óptimo
	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4		
ARENA (g kg ⁻¹)	60	41	48	36,5	0,016	---
LIMO (g kg ⁻¹)	23	39,5	33	39,5	0,005	---
ARCILLA (g kg ⁻¹)	17	19,5	19	24	0,204	---
pH	6,5	6,7	6,83	7,28	0,053	6,0 - 6,5

MOS (%)	1,44	1,59	2,32	1,99	0,411	3,0-5,0
CE (dS/m ⁻¹)	0,22	0,57	0,17	0,15	0,38	0,20-0,40
NH ₄ (ppm)	33,1	27,98	28,38	25,23	0,861	31-40
P (ppm)	33,82	31,96	26,4	29,86	0,629	8-14
K (meq/100 ml)	1,58	1,83	1,87	1,57	0,77	0,7-1,48
Ca (meq/100 ml)	15,24	15,19	15,39	14,8	0,999	16,96-19,08
Mg (meq/100 ml)	4,08	4,82	3,81	4,76	0,398	1,9 - 3
S (ppm)	43,35	35,36	49,14	43,93	0,853	10-11,9
Zn (ppm)	7,21	10,59	5,02	4,73	0,194	3,1-7
Cu (ppm)	3,74	3,39	3,41	2,77	0,703	1,1-4
Fe (ppm)	47,75	28,12	31,05	32,67	0,629	20-40
Mn (ppm)	17,53	9,73	11,38	9,06	0,683	5,1-15
B (ppm)	1,13	1,13	1,57	1,28	0,789	0,2-0,49

Selección de indicadores para conformar el CMD

El ACP para la finca Santa Bárbara se obtuvo tres CP con una varianza acumulada de 85,74%, repartida de la siguiente manera: CP1, 36,96 %; CP2, 30,55 % y CP3 18,33% (Tabla 2). Los indicadores seleccionados en relación al mayor peso por CP fueron: por el CP1, pH (0,87), MOS (0,87), Cu (0,81) y Mn (-0,89); por el CP2, Ca (0,82), Mg (-0,88) y Zn (-0,69); y por el CP3, CE (0,84), NH₄ (0,86) y B (0,82). Los valores negativos del Mn y el Mg representan una relación inversamente proporcional en cada CP; mientras los valores del resto de indicadores suben, los de Mn y Mg bajan y viceversa. Por lo general los indicadores con mayor peso (>0,80) en un ACP sin propiedades físicas, son la MOS y el pH del suelo (Reyes et al., 2018).

Tabla 2. Resultados del análisis de componentes principales de la finca Santa Barbara

Varianza (%)	36,96	30,55	18,23
Varianza acumulada (%)	36,96	67,51	85,74
Coefficiente puntuación	0,43	0,36	0,21
Indicadores	CP1	CP2	CP3
pH	0,87	0,00	0,14
MOS	0,87	0,07	0,30
CE	0,20	0,47	0,84
NH ₄	-0,37	-0,19	0,86
P	0,12	0,20	0,45
K	0,35	0,26	0,29
Ca	0,40	0,82	0,01
Mg	0,16	-0,88	-0,13
S	0,42	0,72	-0,19
Zn	0,40	-0,69	-0,22
Cu	0,81	0,13	-0,41
Fe	-0,67	0,59	0,02
Mn	-0,89	-0,01	0,41
B	-0,03	0,02	0,82

El ACP que corresponde a la finca Kimberley presenta cuatro CP con una varianza acumulada de 86,54 %, repartida de la siguiente manera: CP1, 28,84 %; CP2, 26,20 %; CP3 17,63 % y 13,87 % (Tabla 3). Los indicadores seleccionados en relación al mayor valor por CP fueron: por el CP1, MOS (0,95), Mn (0,96) y Fe (0,93); por el CP2, el Cu (0,93), S (-0,78), Mg (-0,77) y pH (0,73); por el CP3, B (0,88), P (-0,83) y CE (0,83), y por el CP4 K (0,859), NH₄ (0,68) y Ca (0,71). En este análisis se obtuvo una mayor

cantidad de indicadores con un peso mayor a 0,60; características que inciden en la conformación de cuatro CP. Así también, el mayor peso obtenido para los macronutrientes (N, K y P) se expresó en el tercer y cuarto CP. (González-García et al. 2021) indica que las variables con los valores más altos en los componentes seleccionados serán las de mayor importancia. Por tanto, el hecho de que N, K y P sean los más importantes para el desarrollo de los bananos no significa que sean los de mayor peso en la extracción para conformar el CMD.

Tabla 3. Resultados del análisis de componentes principales de la finca Kimberley

varianza (%)	28,84	26,20	17,62	13,87
Varianza acumulada (%)	28,84	55,05	72,67	86,54
Coefficiente puntuación	0,33	0,30	0,20	0,16
Indicadores	CP1	CP2	CP3	CP4
pH	-0,39	0,73	0,15	-0,01
MOS	0,95	0,07	-0,03	-0,07
CE	0,28	0,41	0,83	0,10
NH ₄	0,35	0,57	-0,16	0,68
P	0,24	0,06	-0,83	-0,05
K	-0,25	-0,01	0,02	0,85
Ca	0,26	-0,54	0,33	0,71
Mg	-0,31	-0,77	-0,15	-0,04
S	0,50	-0,78	0,16	0,22
Zn	0,01	0,43	-0,43	0,61
Cu	0,11	0,93	0,18	0,23
Fe	0,93	-0,01	0,07	0,01
Mn	0,97	-0,09	0,18	0,04
B	0,34	0,10	0,88	-0,19

La Matriz de correlación de Pearson para la finca Santa Bárbara (Tabla 5), presenta altas correlaciones ($p \leq 0,01$) positiva entre el NH₄ con el Mn (0,801**) y con el B (0,622**) y entre el Ca y el Mg (0,793**) y el B (0,622**). También con el Ca se registró una alta correlación, pero negativa con la CE (-0,711**). Los demás indicadores que tiene una alta correlación como el pH con la MOS (0,87**), el Mg con la CE (-0,787**) y el NH₄ con el B (0,784**), pero fueron incluidos en el CMD para estructurar el ICS. Se descarta al Mn y el Ca, por mantener altas correlaciones con varios indicadores, criterio de selección que se explicó en materiales y métodos.

Tabla 5. Matriz de Pearson para la finca Santa Barbara

pH	1									
MOS	0,807**	1								
CE	0,255	0,106	1							
NH4	-0,408	-0,492	0,643*	1						
Ca	-0,174	-0,173	-0,711**	-0,491	1					
Mg	-0,174	-0,283	-0,787**	-0,035	0,793**	1				
Zn	-0,273	-0,097	0,078	0,358	-0,023	0,126				
Cu	-0,196	-0,127	-0,587*	-0,174	0,584*	0,458	1			
Mn	-0,334	-0,37	0,136	0,801**	0,331	0,261	-0,205	1		
B	-0,226	-0,274	-0,015	0,784**	0,724**	0,617*	0,108	0,622**	1	

** altamente significativo (0,001); * significativo (0,05).

En la Matriz de correlación de Pearson que corresponde a la finca Kimberley (Tabla 6), se obtuvo alta correlación ($p < 0,01$) de tipo negativa entre el Ca con el Mn (-0,690**), con Fe (-0,863**) y con el B (-0,769**), y entre la CE y el Mn (-0,714**). También se observa alta correlación de tipo positiva entre la CE y el Ca (0,837**) y entre Mn con

el (0,797**) y con el B (0,731**). Los indicadores que se descartan por su alta correlación fueron: Ca, Mn y el B. Indicadores como MOS por lo general se correlacionan con la mayoría de los indicadores del suelo (Zhang et al., 2022); pero su nivel bajo pudo influenciar en un no determinar una asociación positiva en el presente trabajo.

Tabla 6. Matriz de Pearson para la Finca Kimberley

	pH	MOS	CE	P	K	Ca	Mg	Cu	S	Fe	Mn	B
pH	1											
MOS	-0,08	1										
CE	0,209	0,15	1									
NH4	-0,353	0,242	-0,123									
P	-0,225	0,187	-0,084	1								
K	0,266	-0,203	0,262	0,146	1							
Ca	0,339	0,174	0,837**	-0,08	0,098	1						
Mg	-0,107	-0,238	-0,714**	-0,207	-0,141	-0,670**	1					
S	-0,131	0,267	0,363	-0,014	0,134	0,278	-0,275	0,221	1			
Fe	-0,274	0,186	-0,301	0,12	-0,178	-0,863**	0,582*	0,371	-0,152	1		
Mn	-0,533*	0,393	-0,481	0,039	-0,255	-0,690**	0,434	0,531*	0,236	0,797**	1	
B	-0,296	0,061	-0,520*	-0,179	-0,088	-0,769**	0,411	0,138	-0,102	0,523*	0,731**	1

Los indicadores que conforman el ICS con sus respectivos pesos ponderados seleccionados del ACP se muestran en la Tabla 6. La finca Santa Barbara obtuvo una puntuación de 0,33, que clasifica al suelo como un nivel de sostenibilidad bueno. Mientras la finca Kimberley obtuvo un puntaje de 0,24 que se clasifica como suelo como una sostenibilidad regular. Otros cálculos de ICS realizados en suelos de la provincia de El Oro, también determinaron un nivel de bueno a regular del suelo, siendo el principal factor el continuo manejo y el bajo nivel de aporte de materia orgánica (Barrera León, J., Barrezueta Unda, S., & Miguel García Batista, R. M., 2020; Barrezueta-Unda et al., 2017).

En ambas fincas la MOS fue el indicador con el mayor peso, seguido del pH y de los metales Mn, Cu y Mg en Santa Bárbara y Mg y Cu en Kimberley. Mientras que el P y K, nutrientes fundamentales para el desarrollo de las plantas mostraron los pesos más bajos en la finca Kimberley, por tanto, su porcentaje de variabilidad con respecto al todo el CMD fue bajo. (Acevedo et al. 2020; Castillo-Valdez et al. 2021), en sus investigaciones

encontraron que los valores bajos ICS corresponde a suelos con muchos años de manejo a diferencia de suelos sin laboreo donde el índice fue alto. Aunque estos autores incluyeron indicadores físicos y biológicos, la MOS fue el indicador que más influye en la conformación de los índices de calidad del suelo.

Tabla 7. ICS normalizados para las fincas Santa Barbara y Kimberley

Finca Santa Barbara		Finca Kimberley	
Indicadores	Peso ponderado	Indicadores	Peso ponderado
pH	0,38	pH	0,22
MOS	0,38	MOS	0,32
Mg	0,31	P	0,17
Cu	0,35	K	0,14
Mn	0,38	S	0,23
B	0,17	Mg	0,23
		Cu	0,28
		Fe	0,31
ICS	0,33		0,24

La comparación entre los ingresos de dinero ha⁻¹, entre finca mediante la prueba de Duncan se muestra en la Figura 1. Se establecieron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre las dos fincas, superando la finca Santa Barbara en ingresos a Kimberley en todos los años que comprende el estudio. El valor más alto de ingresos en Santa Bárbara fue de \$3859 en el 2019, seguido de \$3769 (2018); mientras que el rango de ingresos obtenido en Kimberley fue de \$2578 (2015) a \$2973 (2019). Aunque se observa una tendencia al incremento sostenido de Santa Bárbara, los ingresos económicos de una finca bananera no solo se atribuyen a la fertilidad de sus suelos, sino a otros factores como los costos de insumos, manejo, y precio de la fruta en los mercados internacionales.

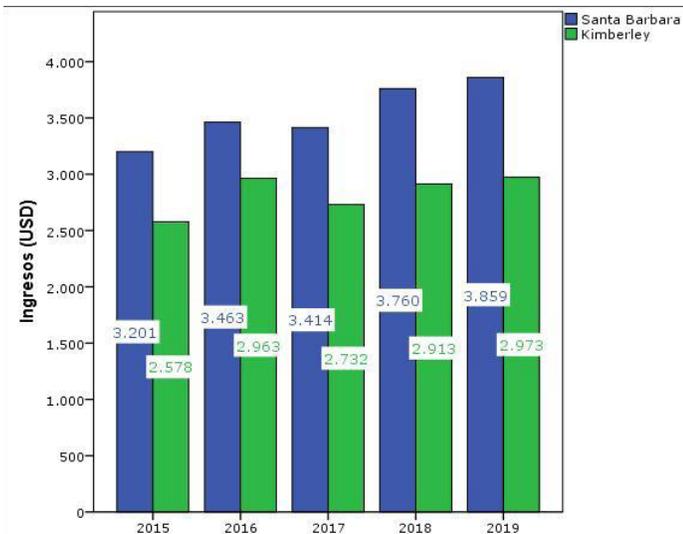


Figura 1. Ingresos efectivos por hectárea de las fincas Santa Barbara y Kimberley

Las regresiones lineales que se presentan en la tabla 8, indican que el modelo de Santa Bárbara se ajusta mejor con los resultados de ingresos, el R^2 fue de 0,907 obtenido para todos los indicadores seleccionados. En el caso del modelo de Kimberley, el R^2 fue bajo para la mayoría de los indicadores a excepción de la MOS que obtuvo 0,803, pero con una pendiente negativa. Esta diferencia entre las regiones lineales de las fincas, se da por que la finca Kimberley no indicó un patrón de incremento en los ingresos netos. (González-García et al. 2021) indica que las correlaciones entre las propiedades del suelo con métricas productivas son más efectivas cuando se incluyen indicadores físicos y biológicos. Así también, los suelos franco arenosos y arenosos no ajustan a modelos matemáticos altamente correlacionados con variables productivas (González-García et al. 2021) (Barrezueta-Unda et al. 2017).

Tabla 8. Regresión lineal entre el ingreso anual y los indicadores que conforman el ICS, con su respectivo modelo matemático

Modelo Santa Barbara			Modelo Kimberley		
	R ²	Ecuación		R ²	Ecuación
pH	0,907	$y=224,12x + 4245,5$	pH	0,589	$y=-0,146x + 7,264$
MOS	0,907	$y=224,12x + 4245,5$	MOS	0,803	$Y=-0,422x + 3,296$
Cu	0,907	$y=224,12x + 4245,5$	P	0,312	$y=0,647x + 28,569$
Mn	0,907	$y=224,12x + 4245,5$	K	0,034	$y=0,001x+1,69$
B	0,907	$y=224,12x + 4245,5$	S	0,034	$y=2,716x + 34,798$
			Mg	0,299	$y=0,32x + 3,565$
			Cu	0,26	$y=0,389x + 2,161$
			Fe	0,263	$y=7,47x + 12,488$

CONCLUSIONES

En los suelos de ambas fincas, existen diferencias significativas entre los valores de la arena, limo y arcilla. El pH fue neutro para la finca Santa Bárbara y de neutro a ligeramente alcalino para la Finca Kimberley, pero la CE fue baja en los suelos. También se identificó bajos niveles de MOS en las fincas. En algunos casos los niveles del P, K, Ca, S, Mg y B sobrepasan el nivel óptimo para el banano.

El ACP redujo el número de indicadores de 14 a 6 y 8 indicadores para las fincas Santa Barbara y Kimberley, respectivamente. De esta forma se integró el ICS con los indicadores de mayor peso, los cuales representan el grado de sostenibilidad de los suelos para el periodo 2015-2019. De esta forma, el ICS permitió observar en forma conjunta la correlación de varios indicadores para interpretar aspectos funcionales del suelo; más allá de la interpretación individual de cada indicador.

No obstante, la regresión entre el ingreso neto por hectárea con los indicadores del ICS solo indicó un alto R^2 para el modelo matemático de la Finca Santa Barbara. Tal vez las condiciones intrínsecas del suelo en Kimberley como la granulometría no permitieron establecer una mejor regresión, a diferencias de otras investigaciones que incluyen indicadores físicos y biológicos.

La construcción del ICS representa una herramienta que permitirá la toma de decisiones para corregir errores en el manejo tradicional dado a los suelos bananeros, además, servirá de base para realizar monitoreos periódicos comparando el avance o retroceso del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, I., Sánchez, A., & Mendoza, B. (2021). Evaluación del nivel de degradación del suelo en dos sistemas productivos en la depresión de Quíbor. *Bioagro*, 33(1), 59–66.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90(1), 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)

- Barbieri, R., Barrezueta-Unda, S., Chabla, J., Paz-González, A., & Montanari, R. (2020). Distribuição espacial de atributos do solo na região de El Oro, Ecuador. *Colloquium Agrariae*, 6(4), 46–60. <https://doi.org/10.5747/ca.2020.v16.n4.a382>
- Barrera León, J., Barrezueta Unda, S., & Miguel García Batista, R. M. (2020). Evaluación de los índices de calidad del suelo de diversos cultivos en diferentes condiciones topográficas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(1), 182–190.
- Barrezueta-Unda, S. (2019). Properties of several soils cultivated with cocoa in the province of El Oro, Ecuador. *CienciaUAT*, 14(1), 155–166. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1210>.
- Barrezueta-Unda, S., Paz-González, A., & Chabla-Carrillo, J. (2017). Determination of indicators for quality of soils cultivated with cocoa in the province El Oro-Ecuador. *Revista Cumbres*, 3(1), 17–24.
- Barrezueta-Unda, S., Velepucha-Cuenca, K., Hurtado-Flores, L., & Jaramillo-Aguilar, E. (2019). Soil properties and storage of organic carbon in the land use pasture and forest. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 36(2), 31–45. <https://doi.org/10.22267/rcia.193602.116>
- Bünemann, Bongiorno, Bai, & Creamer. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology & Biochemistry*. 120. p 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Cairo Cairo, & Machado Armas. (2017). Efecto de abonos órgano-minerales sobre la calidad del suelo, impacto en el rendimiento de la caña de azúcar. *Centro Azúcar*. 44(4), 12-20.
- Cantún, M. P., Becker, A. R., Bedano, J. C., Schiavo, H. F., & Parra, B. J. (2009). Evaluación del impacto del cambio de uso y manejo de la tierra mediante indicadores de calidad de suelo, Córdoba, Argentina. *Cadernos Do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 34, 203–214.
- Castillo-Valdez, X., Etchevers, J., Hidalgo-Moreno, C., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698>
- Delgado, E., Rosales, F., Trejos, J., Villalobos, M., & Poca-sangre, L. (2010). Índice de calidad y salud de suelos para plantaciones bananeras en cuatro países de América latina y el Caribe. *Bioagro*, 22(1), 53–60.
- González-García, H., González-Pedraza, A., 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), 115–142.
- Moreno, J., Sevillano, G., Valverde, O., Loayza, V., Haro, R., & Zambrano, J. (2016). Soil from the Coastal Plane. In J. Espinosa, J. Moreno, & G. Bernal (Eds.), *The Soils of Ecuador* (pp. 1–195). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25319-0_2
- Rajput, A., Memon, M., Memon, K. S., Sial, T. A., & Laghari, H. B. (2022). Integrated nutrient management in banana: comparative role of FYM and composted pressmud for the improvement of soil properties. *Pakistan Journal of Botany*, 54(1). [https://doi.org/10.30848/pjb2022-1\(34\)](https://doi.org/10.30848/pjb2022-1(34))
- Reyes, E., Fandiño, S., & Gómez, L. (2018). Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática. *Ecós*, 27(3), 130–139. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1598>
- Segura, R. A., Stoorvogel, J. J., & Sandoval, J. A. (2022). The effect of soil properties on the relation between soil management and Fusarium wilt expression in Gros Michel bananas. *Plant and Soil*, 471(1), 89–100.
- Vasu, D., Singh, S. K., Ray, S. K., Duraisami, V. P., Tiwary, P., Chandran, P., Nimkar, A. M., & Anantwar, S. G. (2016). Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma*, 282, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>
- Villaseñor, D., Chabla, J., & Luna, E. (2015). Caracterización física y clasificación taxonómica de algunos suelos dedicados a la actividad agrícola de la provincia del El Oro. *Cumbres*, 1(2), 28–34.
- Villaseñor, D., Prado, R., Pereira da Silva, G., Carrillo, M., & Durango, W. (2020). DRIS norms and limiting nutrients in banana cultivation in the South of Ecuador. *Journal of Plant Nutrition*, 43(18), 2785–2796. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1793183>
- Zhang, Y., Wang, L., Jiang, J., Zhang, J., Zhang, Z., & Zhang, M. (2022). Application of soil quality index to determine the effects of different vegetation types on soil quality in the Yellow River Delta wetland. *Ecological Indicators*, 141, 109116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2022.109116>