

ESTIMACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO: CRITERIOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS

Lisbet Font Vila⁽¹⁾; Bernardo Calero Martín⁽³⁾; Olegario Muñiz Ugarte⁽³⁾, Pavel Chaveli Chávez⁽²⁾; Antonio Del Castillo Ramírez⁽²⁾, Luisa Mendoza Rodríguez⁽²⁾, Roberto Curbelo Rodríguez⁽²⁾; Odalis Calero Macías⁽²⁾, Antonio Castillo Acanda⁽²⁾, Ricardo Montero Casas⁽²⁾, Marialina Valenciano Abreu⁽²⁾.

RESUMEN

Se desarrolló una metodología que permite la implementación de un sistema de evaluación de la calidad de los suelos, a partir de la necesidad de establecer un método de vigilancia para monitorear las afectaciones o beneficios del manejo agrícola sobre este recurso y su influencia en el ambiente global. Se elaboró una estructura modelo que integró las propiedades físicas, químicas y biológicas, funciones y procesos del suelo y se validó mediante la determinación del Índice de Calidad del Suelo (ICS) en varios manejos del suelo. Los métodos empleados mostraron la efectividad de un conjunto mínimo de indicadores de suelo, los valores umbrales para su normalización estandarizados en la región y la importancia relativa de funciones, procesos e indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo que integrados sirvieron de procedimientos para la obtención del Sistema de Evaluación y Monitoreo de la Calidad del Suelo (SEMCAS), la metodología para su implementación y una multimedia como herramienta de aprendizaje; método útil para perfeccionar el modo de evaluación de los suelos para su uso y manejo sostenible. El ICS varió por la relación entre el tipo de suelo, su capacidad de funcionar y el manejo agrícola como expresión del resultado de la dinámica entre la calidad edáfica y ambiental. La calidad del suelo fue perturbada por el manejo inadecuado del mismo con su consecuente degradación. El ICS se incrementó en aquellos sitios con un sistema de manejo agrícola adecuado que propició rendimientos aceptables.

Palabras clave: calidad del suelo, indicadores, protección ambiental.

Assessment of soil quality: physical, chemical and biological approaches.

ABSTRACT

A methodology that allows the implementation of a system of evaluation of the quality of the soils was developed, starting from the necessity of establishing a system of surveillance to check the affectations or benefits because of agricultural handling on this resource and its influence in the global atmosphere. A structure model that integrated the physical, chemical and biological properties function, work and processes of the soil was elaborated. It system was validated by means of

(1) DraC. Lisbet Font Vila, Profesora Instructora e Investigador Auxiliar de la Univ. de Camagüey.

(2) Instituto de Suelos. Dirección Provincial, Camagüey. suelos@eimanet.co.cu

(3) Instituto de Suelos, Ciudad Habana. suelos@minag.cu

determination of the Soil Quality Index (ICS) in severe types and systems of soil management. The used methods showed the effectiveness of a minimum group of indicators of soil; thresholds values for their normalization were standardized in the region join to relative importance of functions, processes and physical, chemical and biological indicators of the soil integrated, served as procedures to obtaining a Soil Quality Evaluation and Checking System (SEMCAS), a methodology for their implementation and a multimedia like learning tool; use and useful method to perfect the way of soils evaluation in order to sustainable handling. The ICS varied because of the type of soil, its capacity to work and the agricultural handling relationship as expression of the result of the dynamics among the edaphic and environmental quality. The soil quality was perturbed by the inadequate soils management with its consequent degradation. The ICS was increased in those places with an appropriate agricultural management system.

Key words: soil quality, indicators, environmental protection.

INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos se encuentra entre los problemas más apremiantes de la crisis alimentaria mundial. La explotación irracional del mismo y el brusco incremento de la población se unen a tal efecto, provocando una mayor demanda de producciones agrícolas y efectos adversos sobre la calidad del suelo y su productividad (Delgado *et al.*, 2010).

A partir de la necesidad de mantener y mejorar las condiciones productivas de los suelos y disminuir la degradación de los mismos, muchos países se han preocupado por su calidad. Uno de los retos más importantes que enfrenta la Ciencia del Suelo es desarrollar criterios de calidad que se utilicen también en una evaluación objetiva de riesgos ambientales (Orjuela *et al.*, 2009). Su evaluación está vinculada con el empleo de indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo, fáciles de medir y sensibles a los

cambios generados por las prácticas de manejo, en el tiempo y espacio (Villarreal, 2010).

Cuba no está exenta de esta situación, donde el deterioro de los suelos y la pérdida de su calidad ha sido objeto de estudio a través del Programa Nacional de Conservación y Mejoramiento de los Suelos. En este sentido, se desarrolló una investigación con el objetivo de obtener un sistema integrado de evaluación y monitoreo de la calidad del suelo (SEMCAS), para la toma de decisiones y estrategias de manejo sostenible de este recurso natural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron 680 muestras de suelo de los primeros 20 cm de profundidad pertenecientes a dos subtipos de los tipos Ferríticos Rojo Oscuro, Ferralíticos Rojos y Pardos Sialíticos (Hernández y Ascanio, 2005) ubicados al centro y norte de las provincias de Camagüey

y Ciego de Ávila, Cuba, en cuatro sistemas de manejo: sin explotación agrícola, con cultivos temporales, perennes y diversificados. Se tomó una muestra compuesta por cada variante usando el entramado de muestreos al azar de puntos de forma longitudinal, se secaron al aire y se siguió el procedimiento recomendado según NC ISO 11464 (1999) para los análisis físicos y químicos. En el caso de las muestras utilizadas en las determinaciones microbiológicas, se pasaron por un tamiz con malla de 2 mm y se conservaron bajo techo a temperatura ambiente por un período de 60 días (Calero *et al.*, 1999), con el objetivo de estabilizar gran parte de la microflora autóctona y lograr un estado de latencia hasta tanto no se le proporcione condiciones óptimas de temperatura y humedad para evaluar su expresión metabólica.

Se utilizaron como indicadores de suelo, la densidad real y aparente (d_r y d_a) por los métodos pignométrico en xilol y de los anillos (determinada a niveles de humedad en el suelo muy próximos a la capacidad de campo o límite superior del agua disponible) respectivamente, humedad higroscópica (h_y') por el método gravimétrico, $pH(KCl)$ por el método potenciométrico, conductividad eléctrica (CE) por el método en relación suelo-agua 1:5, capacidad de intercambio catiónico (CIC), método Melich modificado (Schachtschabel), porcentaje de saturación por bases (V), relación calcio/magnesio (Ca^{2+}/Mg^{2+}), materia orgánica (MO) por el método Walkley- Black colorimétrico,

respiración basal (RB) por el sistema de frasco cerrado, humedecimiento de 25 g de suelo al 60% de la capacidad máxima de retención de humedad, y la determinación del CO_2 al cabo de 24 horas de incubación a $30^\circ C$ y la respiración inducida con carbono (RIC), se emplea la glucosa buscando, de acuerdo al agrupamiento de suelo, la concentración mínima para alcanzar la máxima respiración y la nitrificación (NR), (extracción del nitrato con K_2SO_4 al 0.01% utilizando ácido disulfofenólico para el desarrollo del color) (Font, 2008).

Para la obtención del SEMCAS, se empleó una estructura modelo que integró funciones, procesos e indicadores del suelo. Se definió la importancia relativa de los mismos, las ecuaciones lineales para normalizar cada indicador con los valores umbrales, tomando de otras metodologías, los elementos aplicables a la región (Doran *et al.* 1999). Posteriormente, se diseñó un *Software* mediante el gestor de base de datos MySQL y lenguaje de programación PHP para el cálculo del ICS.

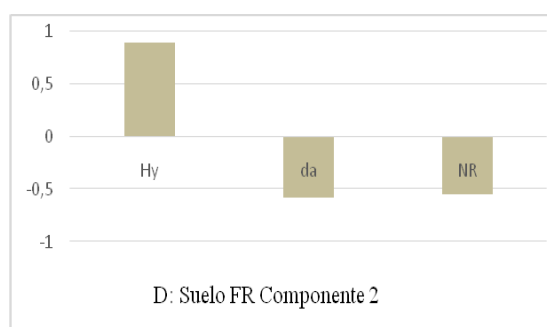
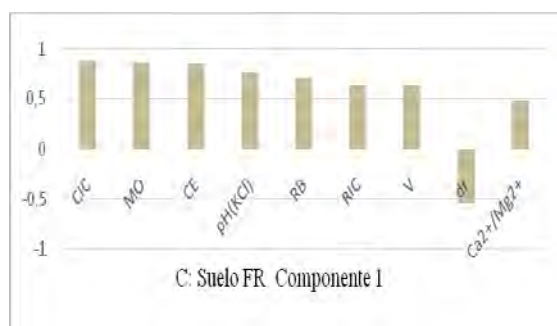
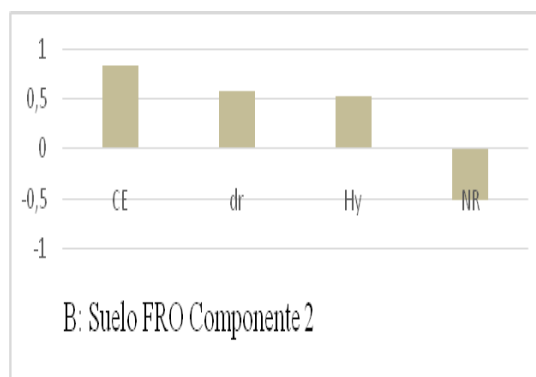
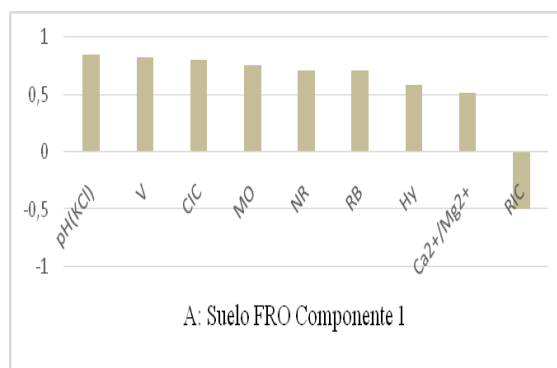
El sistema se validó en agroecosistemas en explotación de la provincia de Camagüey. El primero, en un Inceptisol, afectado por la erosión con pendientes de 1-2 % y de 2-5 %, se tomaron 10 muestras al azar en cada grado de pendiente, al inicio y a los dos años de aplicadas las medidas de conservación y mejoramiento y el segundo, en un Oxisol cultivado de Naranja cv Valencia Late con aplicación por 10 años, de diferentes dosis de nitrógeno (0, 50, ..., 250 $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$) y fondo

de 110 y 90 kg ha⁻¹ año⁻¹ de fósforo y potasio respectivamente. Los datos se procesaron mediante el programa estadístico SPSS® para Windows versión 11.5.1 (2002). La comparación del efecto de distintos tratamientos se llevó a cabo mediante un análisis de varianza simple y se realizaron las comparaciones múltiples utilizando la prueba de Tukey con un nivel de significación del 5 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Validación del conjunto mínimo de indicadores físicos, químicos y biológicos seleccionados para su empleo en la evaluación de la calidad de los suelos.

La selección de las variables en cada tipo de suelo fue distinta, por las diferencias en la magnitud de sus valores propios y el peso de contribución sobre cada componente, lo que se puede atribuir a los contrastes entre las características edafológicas de los tipos de suelos, como expresaron Hernández y Ascanio (2005). (Figura 1). El análisis realizado demostró la estrecha correlación entre los indicadores físicos, químicos y biológicos estudiados, lo que justificó la necesidad de su estudio de forma integrada para una mejor interpretación del efecto de las prácticas agrícolas sobre la calidad del suelo, correspondiéndose con lo referido por Tamayo (2009).



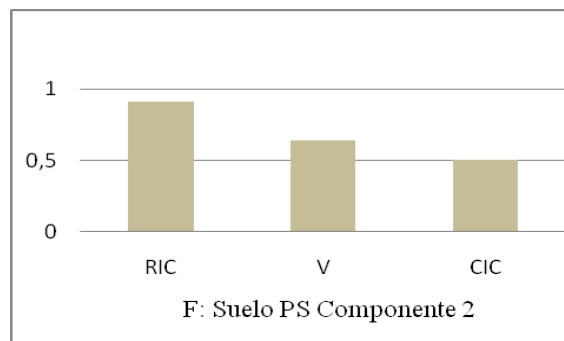
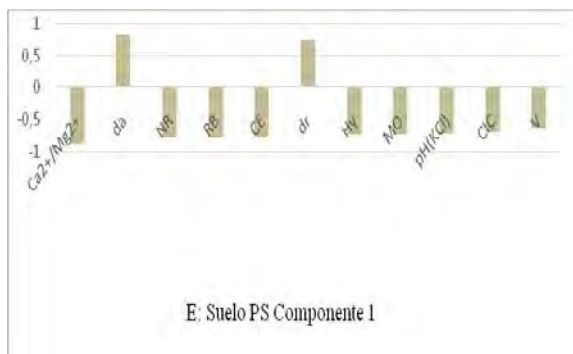


Figura 1.- Componentes principales y valores propios de los suelos estudiados. Suelo FRO (Ferrítico Rojo Oscuro Variabilidad Total: 54.83%), Suelo FRO (Ferralítico Rojo Variabilidad Total: 57.29%), Suelo PS (Pardo Sialítico Variabilidad Total: 73.52%).

Los resultados obtenidos para la materia orgánica reafirmaron su importancia en la estimación de la calidad del suelo. (Orjuela *et al.*, 2009). En general, se presentó una correlación positiva en los tres tipos de suelos, con indicadores como el pH(KCl), Ca²⁺/Mg²⁺, V, CIC. Sin embargo, sobre la misma tuvo un peso negativo la dr y da, ocasionado por la alta correlación negativa entre ambas. (Villarreal, 2010).

La alta correlación que mantuvo la MO con los indicadores microbiológicos de actividad potencial básica (RB y NR), explicó lo planteado por Dale *et al.*, (2008) al referir que la misma por sí sola no representa la calidad del suelo puesto que se necesita su integración con otros indicadores como los microbiológicos, que resultan importantes en funciones del suelo como el reciclaje de nutrientes y la producción biológica, entre otras, debido a que la gran mayoría de los efectos microbiológicos sobre el suelo ocurren vía materia orgánica.

En todos los casos para la selección de los indicadores, se tuvieron en cuenta dos criterios fundamentales: 1) que abarquen los tres componentes del suelo (Físico, químico y biológico) y 2) que se integren indicadores de lenta, media y rápida variación para que permitan evaluar la evolución de la calidad del suelo (Font *et al.*, 2012).

En general, se demostró que la selección de las variables para establecer el conjunto mínimo de datos comunes a los tres tipos de suelos resultó difícil, debido a que el suelo, a diferencia del agua y el aire no tiene por su variabilidad, estándares de calidad definidos, lo que hace difícil establecer una simple medida física, química o biológica que la refleje adecuadamente y considere los múltiples componentes de la función del suelo, en particular, el productivo y el ambiental (Orjuela *et al.*, 2009).

No obstante, desde el punto de vista de los resultados, el mismo fue útil a partir de que se mostró que la selección de los indicadores de

acuerdo al peso de contribución sobre las componentes fue diferente, debido a que respondieron especialmente a la importancia que puedan tener cada uno de los indicadores en uno u otro tipo de suelo, cuyas características son específicas en dependencia de su génesis y composición morfológica, conforme a lo expresado por Hernández y Ascanio (2005). Los indicadores como la dr, hy', CIC y V, fueron considerados de lenta variación (Font, 2008).

El resto de los vectores propios que también contribuyeron significativamente a la conformación de las componentes, manifestaron los cambios en el suelo por la adopción de diferentes sistemas de manejo agrícola (Pouyat *et al.*, 2007).

Lo anterior permitió demostrar la necesidad de que todos los indicadores fueran seleccionados en la obtención del SEMCAS para que el mismo sea efectivo y común a los tipos de suelos estudiados. También, los conceptos actuales indicaron que su evaluación debe considerar la interrelación funcional entre funciones, procesos e indicadores del suelo. Por tanto, se derivó que era necesario acudir a otros métodos estadísticos que expresaran la naturaleza de esa visión integral y permitieran observar la evolución de un sistema a través del tiempo con el propósito de facilitar y hacer válidas las comparaciones (USDA, 2003).

Los resultados obtenidos tuvieron gran valor porque mostraron la validez del conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos seleccionados como indicadores de calidad

del suelo. También confirmaron los resultados obtenidos por varios autores (Dale *et al.*, 2008), sobre la eficacia de los indicadores biológicos como elementos para establecer cambios en la calidad y fertilidad de un suelo.

2. Desarrollo de ecuaciones que muestren las gradaciones para cada indicador del suelo a partir de rangos de los valores de referencias estandarizados para las condiciones específicas de cada región y ajuste del modelo.

Se establecieron ecuaciones estándares que permitieran convertir los datos numéricos en valores dentro de una unidad más pequeña, en una escala de rango entre 0-1, o sea normalizar los mismos de manera que la suma de todos los valores de indicadores en base a la condición ideal, permitieran el cálculo del índice de calidad del suelo igual a 1 y esta constituya la línea base que logre evaluar el estado corriente de la calidad del suelo. En la Tabla 1 se muestran las ecuaciones obtenidas para cada indicador de suelo, a partir de los valores estadísticamente aceptables de por subtipo de suelo.

En los indicadores físicos, la dr y da siguen la misma tendencia con pendiente negativa y responde a que la calidad del suelo se vio perturbada por el aumento de los valores en estos indicadores, lo cual fue confirmado por varios autores (D'Haene *et al.*, 2008; Glab y Kuling, 2008).

En el caso de la hy', los valores máximos se correspondieron con los suelos que presentaron mayores contenidos

montmorillonítico. De acuerdo con MINAG (1984), los valores apropiados para la generalidad de las especies se encontraron entre 6-8% por lo que se establece un rango óptimo, siempre que no existan otras limitaciones que lo impidan (Mesa *et al.*, 1992). Ambos indicadores físicos (dr y hy')

son de variación muy poco notable en el tiempo, no así el caso de la da (Font, 2008).

Para los indicadores químicos, se establecieron valores óptimos de pH (KCl), CE, CIC, V, Ca^{2+}/Mg^{2+} ; por encima o por debajo de los rangos establecidos, se afectan estas propiedades, la relación suelo- planta y los estándares de fertilidad.

Tabla 1. Ecuaciones para la normalización de cada indicador de suelo (confiabilidad 95%).

Indicadores	Ecuaciones estándares
Físicos	
(hy')	$y=0.189x$ (hy' < 6%) $Y=1$ (6% ≤ hy' ≤ 8%), $y=-0.1351x+2.0811$ (hy' > 8%)
(dr)	$y=-0.9901x+3.2277$
(da)	$y = -0.4484x + 1.139$
Químicos	
pH(KCl)	$y = 0.4386x - 1.8509$ (pH (KCl) <6.5), $y = -0.5988x + 4.892$ (pH (KCl) >6.5)
(CE)	$y=1$ (0-0.8 dS m ⁻¹), $y=-0.3125x + 1.25$ (CE > 0.8 dS m ⁻¹)
(CIC)	$y = 0.0323x - 0.1294$ (CIC ≤ 35 cmol ⁺ kg ⁻¹), $y = 1$ (35 cmol ⁺ kg ⁻¹ ≤ CIC ≤ 40 cmol ⁺ kg ⁻¹), $y = -0.022x + 1.8791$ (CIC ≥ 40 cmol ⁺ kg ⁻¹)
(V)	$y = 0.0248x - 0.7374$ (V ≤ 70%), $Y = 1$ (70% ≤ V ≤ 90%), $y = -0.012x + 2.08$ (V ≥ 90%)
(Ca^{2+}/Mg^{2+})	$y = 0.1689x - 0.0135$ (Ca^{2+}/Mg^{2+} <6) $y = -0.0518x + 1.3107$ (Ca^{2+}/Mg^{2+} >6)
Biológicos	
(MO)	$y = 0.1715x - 0.1046$
(RB)	$y = 0.0545x$
(RIC)	$y = 0.0545x$ (RIC < 18,37 mmol CO ₂ Kg ⁻¹), $y = -0.0192x + 1.353$ (RIC > 18,37 mmol CO ₂ Kg ⁻¹)
(NR)	$y = 0.2128x$

En el pH se encontraron los valores óptimos cercanos al neutro 7, que es donde coincide un mejor estado del suelo, buena disponibilidad de los nutrientes y un excelente comportamiento de los cultivos. En el caso de la CE el rango considerado aceptable por la USDA (2003) para el crecimiento de la mayoría de los cultivos es desde 0 hasta $0,8\text{dS m}^{-1}$, a partir de este valor la ecuación sigue una pendiente negativa, porque comienzan a restringirse los rendimientos de algunos cultivos y se alteran además, procesos microbianos como la nitrificación y Los indicadores pH (KCl) y CE son importantes para estimar la condición del suelo, ya que los mismos influyen en el crecimiento de las plantas, el reciclado de nutrientes y pueden afectar la actividad biológica del suelo.

La CIC es considerada por muchos autores como un índice de calidad del suelo y de productividad debido a su influencia en los rendimientos, (Villarreal, 2010). Su estado óptimo se encontró entre $35 - 40 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$, donde el suelo presentó buena fertilidad (MINAG, 1984); este valor es característico de cada tipo de suelo y es calificado como un indicador estable.

El valor de V se encuentra estrechamente relacionado con el pH (KCl) y la CIC, debido a que son directamente proporcionales. Para los suelos cubanos se alcanzó un rango óptimo entre 70-90% (MINAG, 1984 y Mesa *et al.*, 1992), ya que por encima de 90% pueden resultar inadecuados para plantas sensibles a altos niveles carbonáticos. Las relaciones

respiración. Con valores de 4 dS m^{-1} existen problemas de salinidad limitante que reducen la calidad del suelo (peor condición), ya que el suelo requiere de mejoramiento para su explotación productiva.

Densidad real y aparente (d_r y d_a), humedad higroscópica (h_y'), pH (KCl), conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de saturación por bases (V), relación calcio/magnesio ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$), materia orgánica (MO), respiración basal e inducida (RB y RIC), nitrificación (NR).

intercatiónicas son importantes para la asimilación de nutrientes. La relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ideal para la generalidad de las especies fue alrededor de 6:1, por debajo de 2 pueden producirse problemas por exceso de magnesio y superiores a 10:1 existen deficiencias bien marcadas de este elemento. Dentro de los indicadores biológicos, la MO del suelo, respiración basal y nitrificación real, siguen una función lineal ascendente, que indica un incremento de la calidad del suelo en la medida que su valor aumenta (Font, 2008). Este indicador influye de forma positiva en casi todas las propiedades del suelo como la CIC, sobre la estructura del suelo, agua y disponibilidad de nutrientes. Esta influye, además, en la d_a y d_r existiendo una alta correlación negativa de la MO entre ellas (Villarreal, 2010).

Es importante resaltar la variación que presentó la RB entre los distintos subtipos de suelo, lo cual mostró la dinámica y sensibilidad de la misma a los cambios que se

producen en los suelos, de ahí que la actividad microbiológica sea el componente más activo y sensible al impacto externo dentro del suelo.

De esta forma, la actividad microbiana constituye una medida fundamental de importancia ecológica, puesto que por una parte representa el nivel de actividad biológica, involucrando el componente lábil de la MO y por otro, integra los factores del medio ambiente y su influencia en la MO (Dale *et al.*, 2008). Así también, es considerada de gran importancia en la calidad del suelo debido a que refleja con más sensibilidad los cambios ocurridos en la fertilidad que las determinaciones químicas de carbono y nitrógeno. Al respecto, Calero *et al.* (1999) mostraron resultados similares en el suelo Ferralítico Rojo cultivado de papa y en suelos Ferríticos Rojos Oscuros cultivados de cítrico y el cultivo protegido de hortalizas.

Para la RIC, en la medida que este indicador sea más cercano a la máxima RB reportada, el suelo tendrá mayores reservas energéticas en su MO, teniendo en cuenta que la misma expresa la respuesta de la microflora a la adición de fuentes externas de carbono fácilmente degradable como es la glucosa y habrá a su vez mayor disponibilidad de nitrógeno utilizable (Calero *et al.*, 1999) y por tanto, mejor será la calidad del suelo, a partir de que se pueda predecir la mineralización del nitrógeno.

Se asumió como óptimo para la RIC el máximo valor registrado en la RB, (18,37 mmol CO₂ Kg⁻¹). Los valores mayores se

encontraron en los suelos Pardos Sialíticos mullidos (70,33 mmol CO₂ Kg⁻¹), y resultó este último, la peor condición (0), al considerar que el suelo se encontró limitado de carbono lo cual se corresponde con el promedio de MO que resultó menor en este subtipo de suelo (3,15%).

Aunque los valores de cada indicador físico, químico y biológico normalizado en su mejor estado (1) es el reconocido como adecuado por el Manual de Interpretación de los Suelos (MINAG, 1984) y Font *et al.* (2012), los valores umbrales seleccionados en base a la peor condición (0), deben ajustarse para otras condiciones geográficas y tipos de suelos.

3. Adecuación de un modelo matemático para la obtención del índice de calidad del suelo y un software a tal fin.

El modelo matemático para la estimación de la calidad del suelo se logró mediante una estructura modelo usada con efectividad por algunos autores (Doran *et al.*, 1999), basada en un orden de colección y selección de los indicadores de calidad del suelo que constituyan el conjunto mínimo de datos y sean comunes para los tipos de suelos analizados con el propósito de facilitar y hacer válidas las comparaciones a nivel nacional. Los resultados logrados en el trabajo demostraron la validez y efectividad de los seleccionados para estos suelos.

La combinación de los indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo dentro de cada proceso y función se realizó mediante los criterios planteados por Font *et al.* (2009),

logrando un balance entre los de mayor y menor variación. El sistema utilizado permitió la combinación de más de una variable medida para formar un índice útil.

Posteriormente, se definió la importancia relativa de cada función e indicador propuesto para que estos últimos estén relacionados cuantitativamente a la función que soporta, la que se detalló a partir del resultado obtenido en la valoración del criterio de expertos (Encuesta Delphi), calculando el valor medio de las evaluaciones que dieron los expertos a cada uno de los indicadores propuestos. Fueron seleccionados 30 expertos de acuerdo al coeficiente de competencia (Font, 2008).

Aunque la forma de asignar un valor ponderado a funciones, procesos e indicadores generó contradicciones y controversias, el resultado demostró la validez de la propuesta y los elementos que la integraron, ya que los elementos sometidos a criterio de expertos fueron evaluados por la mayoría de los mismos entre bueno y muy bueno (valor promedio 5,90), lo que confirmó que el método seleccionado resultó efectivo en la determinación de la importancia relativa de las funciones e indicadores de la calidad del suelo que son posibles utilizar, ya empleados con eficacia por otros autores (Doran *et al.*, 1999).

Los señalamientos efectuados por los expertos constituyeron recomendaciones de inestimable valor para perfeccionar la propuesta realizada.

En cuanto a los procesos que soportan cada función, se otorgó el mismo peso relativo,

considerándolos de igual importancia por lo que se le asigna el valor de 0,5 a cada uno. Como resultado de todo el procedimiento, en la Tabla 2 se muestra la importancia de cada indicador básico de la calidad del suelo propuesto, así como el de las funciones y procesos.

Una vez asignada la importancia relativa a cada función, proceso e indicador, se confeccionó un diagrama organizativo para evaluar los mismos y estimar mediante un índice integrador la calidad del suelo. Las ecuaciones estándares obtenidas permitieron normalizar los valores de cada uno de los indicadores seleccionados en una escala de cero a uno (0-1), siendo uno (1) el mejor estado del indicador para la calidad del suelo. El índice de calidad ideal del suelo (ICIS) se obtuvo al multiplicar cada valor relativo de funciones, procesos e indicadores. Todos los índices obtenidos en cada valor se sumaron y son iguales a uno (1). A continuación se describen las ecuaciones que permiten su cálculo.

$$ICIS = \sum_{b=1}^n (P_1 \times P_2 \times P_3)$$

ICIS= Índice de calidad ideal del suelo = 1

b= índices relativos.

P₁= valor relativo en la función del suelo.

P₂= valor relativo en cada proceso dentro de cada función.

P₃= valor relativo de cada indicador del suelo dentro de cada proceso.

Tabla 2. Valor relativo de importancia de funciones, procesos e indicadores de la calidad del suelo.

Función del suelo	P_1	Proceso	P_2	Indicadores del suelo	P_3
Biodiversidad y Producción Biológica	0.27	Crecimiento de la planta	0.40	da	0.14
				dr	0.15
				MO	0.26
				RB	0.25
				CE	0.20
		Producción de fibras y alimentos	0.60	pH(KCl)	0.25
				Ca ²⁺ /Mg ²⁺	0.25
				V	0.23
		NR	0.27		
Regulación y distribución de agua y solutos	0.25	Regulación y distribución de agua y solutos	1.00	Hy''	0.28
				da	0.24
				dr	0.24
				CIC	0.24
Capacidad buffer, infiltración y degradación	0.22	Procesos microbianos	0.40	RB	0.32
				RIC	0.28
				MO	0.40
		Relaciones tóxicas	0.60	CE	0.31
				pH(KCl)	0.33
				CIC	0.36
Almacenamiento y reciclaje de nutrientes	0.26	Procesos microbianos	1.00	MO	0.19
				RB	0.17
				RIC	0.15
				pH(KCl)	0.18
				NR	0.15
				CIC	0.16

P_1, P_2, P_3 : Valor Relativo

Considerando el ICIS, se calculó el índice de calidad real para cada suelo (ICS), el cual se obtuvo multiplicando cada índice relativo (b) por el valor normalizado en la ecuación obtenida $f(y)$, el que resultó de buscar en las ecuaciones estándares el valor y que se correspondió con el obtenido del análisis de

cada uno de los indicadores y se obtuvo un valor dentro de la escala 0-1 en cada función.

$$ICS = \sum_{i=1}^n (b \times f(y))$$

ICS= Índice de calidad del suelo.

b= índices relativos.

$f(y)$ = valor normalizado del indicador del suelo de acuerdo a las ecuaciones estándares obtenidas.

La estimación de la calidad del suelo es un tema amplio y complejo en el que debe tenerse en cuenta su multifuncionalidad. Su evaluación involucra funciones, procesos e indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo que interrelacionados funcionalmente, permiten la obtención de un índice para evaluar la calidad del suelo.

Diseño del Software.

El programa de computación, procesó los valores originales del conjunto mínimo de indicadores físicos, químicos y biológicos seleccionados para cada función específica del suelo, con la importancia relativa de cada función, proceso e indicador y las ecuaciones que permiten normalizar los valores de cada indicador que constituyen la línea base para la evaluación de la calidad del suelo.

Se obtuvieron como reportes, el valor del índice de calidad del suelo calculado con los datos originales de los indicadores mencionados que le dieron su valor, así como aquellos indicadores físicos, químicos y/o biológicos de la muestra que más afectaron el índice de la calidad del suelo, basado en su proximidad a la peor condición del suelo ($=0$).

En la validación del SEMCAS se obtuvo que el ICS resultó mayor en la zona de acumulación respecto a la de erosión (Figura 2).

Las medidas de conservación aplicadas mejoraron la calidad del mismo al

incrementarse el ICS al cabo de los dos años, fundamentalmente, en la zona erosionada y se mantuvo su valor en la de menor pendiente, lo cual permitió un equilibrio entre ambas zonas. En el cítrico, con la dosis de $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de nitrógeno, $110 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de P_2O_5 y $90 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de K_2O aplicada de fondo se obtuvo el mayor ICS (0,51) y rendimientos de la naranja. Los resultados demostraron la efectividad del ICS para la estimación del impacto de la erosión a largo plazo y la correspondencia entre los rendimientos de la naranja y el ICS estimado. Además, reveló que las prácticas de mejoramiento y conservación de los suelos, por su efecto lento y paulatino, conducen a lograr resultados al cabo de los dos o tres años. De ahí, que la estimación cuantitativa de la calidad del suelo proporciona un medio para evaluar la sostenibilidad de la agricultura, los sistemas de manejo agrícolas y los riesgos ambientales (Aparicio y Costa, 2007; Martínez *et al*, 2008; Delgado *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

El SEMCAS, constituye una herramienta para la gestión ambiental que permite evaluar temporal y espacialmente la calidad del suelo, desarrollar criterios de calidad ambiental con fines regulatorios, implementar acciones anticipadas que impidan el avance de la degradación y evaluar los impactos de la aplicación de medidas de conservación y mejoramiento de suelo con un enfoque integrado y sostenible.

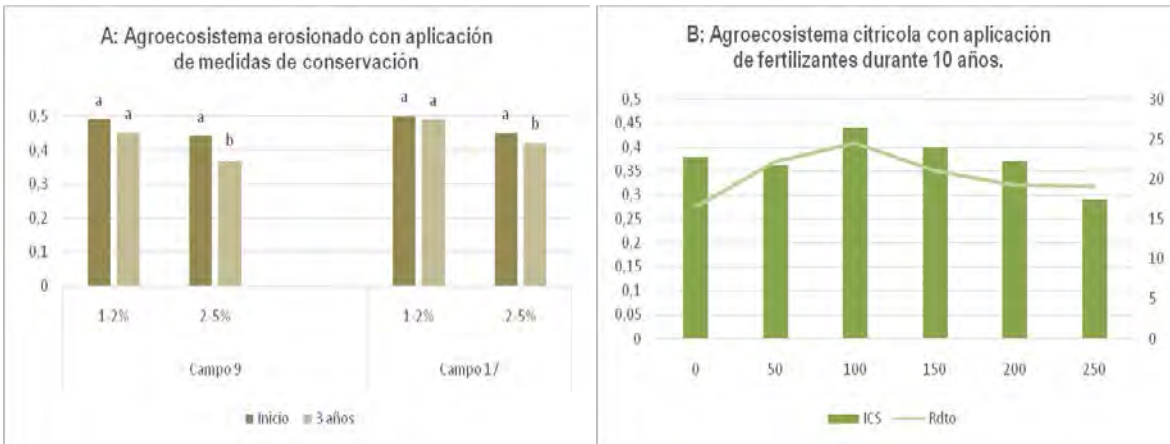


Figura 2. Comportamiento del ICS en dos agroecosistemas (A y B).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio, V. y Costa, J. L. (2007): Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil & Tillage Research*, 96: 155 – 165.
- Calero, B.J.; Guerrero, A.; Alfonso, C.A.; Somoza, V. y Camacho, E. (1999): Efecto residual de la fertilización mineral sobre el estado microbiológico del suelo. *La Ciencia y el Hombre*. XI: 89 -94.
- Dale, V. H.; Peacock, A. D.; Charles T. G.; Sobek, E. y Wolfe, A. K. (2008): Selecting indicators of soil, microbial, and plant conditions to understand ecological changes in Georgia pine forests. *Ecological Indicators*, 8: 818 – 827.
- D’Haene, K.; Vermang, J.; Cornelis, W. M.; Leroy, B. L. M.; Schiettecatte, W.; De Neve, S.; Gabriels, D.; Hofman, G. (2008): Reduced tillage effects on physical properties of silt loam soils growing root crops. *Soil & Tillage Research*, 99: 279 – 290.
- Delgado, E.; Rosales, F.; Trejos, J.; Villalobos, M.; Poscasangre, 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.
- Doran, J.W.; Jones, A. J.; Arshad, M. A. y Gilley, J. E. (1999): Determinants of soil quality and health. En: *Soil Quality and Soil Erosion*. Ed: R. Lal. CRC Press: 17 - 36.
- Font, L. (2008): Estimación de la calidad del suelo: Criterios físicos, químicos y biológicos. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. INCA. C. Habana: 105p.
- Font, L.; Calero, B.; Muñiz, O. (2009): SEMCAS. Sistema integrado de evaluación y monitoreo de Calidad del suelo. *Agricultura Orgánica*, 15(2): 27-28.
- Font, L.; Calero, B.; Muñiz, O.; Chaveli, P.; Lamadrid, R.; Del Castillo, A.; Mendoza, L.;

- Montero, R. (2012): Guía para la evaluación y monitoreo de la calidad de los suelos. *Agricultura Orgánica*, 18 (1): 16 - 18.
- Glab, T. y Kulig, B. (2008): Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). *Soil & Tillage Research*, 99: 169–178
- Hernández, A.; Ascanio, O.; Morales M.; Cabrera A. (2005): Correlación de la Nueva Versión de la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba con las Clasificaciones Internacionales y Nacionales: Una herramienta útil para la investigación, la docencia y la producción agropecuaria, INCA, La Habana, Cuba: 59p.
- Martínez, E.; Fuentes, J. P.; Silva, P.; Valle, S. y Acevedo, E. (2008): Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a mediterranean environment of Chile. *Soil & Tillage Research*, 99: 232 – 244
- Mesa, A.; Colón, C.; Trémols, A.J.; Pena, J. y Suárez, O. (1992): Características edafológicas de Cuba según escala 1:50 000. Dirección Nacional de Suelos y fertilizantes. Ed. Científico-Técnica. 154p.
- MINAG. (1984): Manual de Interpretación de los Índices Físico- Químicos y Morfológicos de los Suelos Cubanos. Ed. Científico Técnico, C. Habana. 132p.
- NC 11464. (1999): Calidad del Suelo. Pretratamiento de las muestras para los análisis físico-químicos. 9p.
- Orjuela, R.; Rubiano, P. y Piraneque, N. (2009): Generación de la línea base de indicadores para el monitoreo de la calidad de suelos en área de influencia del Distrito de riego del Alto Chicamocha. Tesis de grado como requisito para optar al título de Maestro en Ciencias Agrarias en Suelos y Aguas. Univ. Nacional de Colombia. 153p
- Pouyat, R. V.; Yesilonis, I. D.; Russell-Anelli, J.; Neerchal, N. K. (2007): Soil Chemical and Physical Properties That Differentiate Urban Land-Use and Cover Types. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71: 1010 – 1019.
- Tamayo, C. (2009): Metodología para calcular el índice de calidad del suelo. Caso de estudio. Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería Marina y Ciencias del mar. Tema Contaminación de los Suelos. 11p.
- USDA (United States Department of Agriculture) (2003): Rangeland Soil Quality, Natural Resources Conservation Service, Wahington, D. C: 98p.
- Villarreal, J. E. (2010): Determinación de índice de calidad del suelo en áreas productoras de banano (*Musa x paradisíaca* L.) de la vertiente del Pacífico de Panamá. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrarias. Universidad de Lleida Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Panamá: 195p.

Fecha recibido: 4 de junio de 2014.

Fecha aceptado: 22 de mayo de 2015.