

Indicador de calidad de un Vertisol dedicado al arroz en la provincia Holguín, Cuba

Quality indicator of a Vertisol dedicated to rice in the Holguín province, Cuba

 Roberto Alejandro García-Reyes^I,  María Elena Ruíz-Pérez^{II*} and  Sergio Rodríguez-Rodríguez^{III}

^IMinisterio de la Agricultura, Departamento Provincial de Suelos y Fertilizantes, Holguín, Cuba.

^{II}Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{III}Universidad de Granma, Centro de Estudios de Biotecnología Vegetal, Bayamo, Granma, Cuba.

*Autor para correspondencia: María Elena Ruíz-Pérez, e-mail: mrui@unah.edu.cu

RESUMEN: El arroz constituye un producto de alta demanda nacional y que se requiere incrementar su producción. En la provincia Holguín, Cuba se construye en estos momentos un trasvase que hará posible disponer del agua necesaria para el cultivo del arroz en una zona de alrededor de 2000 ha. Cuando se dispone de grandes áreas de suelo cuya aptitud debe ser evaluada para un cultivo, se requieren de indicadores que sean factibles de determinar sin grandes costos y campañas experimentales, y que además puedan ser estimados de forma indirecta. En esta investigación se introduce un indicador de calidad del suelo (SQI) por sus siglas en inglés. Se explica el procedimiento seguido para el cual se llevó a cabo una campaña experimental en una zona de la región mencionada en la que se determinaron un total de 14 propiedades del suelo comúnmente empleadas para caracterizar la calidad suelo. Se realizó un análisis factorial con vistas a determinar cuáles de las propiedades eran las que más contribuían a la variabilidad común y a partir de sus pesos y de los valores de las funciones de puntuación que evalúan la buena o mala influencia de sus valores finalmente se calcularon los valores del SQI que permitieron encontrar que sólo un 31% del área estudiada tiene aptitud entre moderada y muy buena, situada en la parte norte del área estudiada. Las propiedades que resultaron de mayor importancia en el estudio fueron el nitrógeno total, el fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, materia orgánica y la conductividad eléctrica.

Palabras clave: índice de calidad, análisis factorial, arroz.

ABSTRACT: Rice is a product of high national demand and its production needs to be increased. In the province of Holguín, Cuba, a transfer is currently being built that will make it possible to have the water necessary for the cultivation of rice in an area of around 2000 hectares. When there are large areas of soil whose suitability must be evaluated for a crop, indicators are required that are feasible to determine without large costs and experimental campaigns, and that can be estimated indirectly. In this research, a soil quality indicator (SQI) is introduced. The procedure followed is explained for which an experimental campaign was carried out in an area of the aforementioned region in which a total of 14 soil properties commonly used to characterize soil quality were determined. A factor analysis was done in order to determine which of the properties contributed the most to the common variability and, based on their weights and the values of the scoring functions that evaluate the good or bad influence of their values, the values were finally calculated. SQI values that allowed us to find that only 31% of the studied area has moderate to very good suitability, located in the northern part of the studied area. The properties that were most important in the study were total nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sodium, organic matter and electrical conductivity.

Keywords: Soil Quality Index, Factor Analysis, Rice.

INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo, según Nasir *et al.* (2024), se define como su capacidad o aptitud para soportar el crecimiento de los cultivos sin que esto resulte en la degradación del suelo o en un daño ambiental, y se establece como resultado de asociar la condición del suelo a características necesarias para un uso particular (aptitud). Un indicador es un parámetro o un valor derivado de parámetros que provee información, describe las propiedades, los procesos y las características, con la finalidad de dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un período dado, con un significado extendido más allá

que el directamente asociado con el valor del parámetro (Vasu *et al.*, 2016).

Prieto *et al.* (2013) señalan que estos indicadores deben ser limitados en número, manejables por diversos tipos de usuarios, sencillos, fáciles de medir y tener un alto grado de agregación. Deben contemplar la mayor diversidad de situaciones y tener una variación en el tiempo tal que sea posible realizar un seguimiento de las mismas. Asimismo, no deberán poseer una sensibilidad alta a los cambios climáticos y/o ambientales pero la suficiente como para detectar los cambios producidos por el uso y manejo de los recursos.

Recibido: 02/07/2024

Aceptado: 16/11/2024

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

AUTHOR CONTRIBUTIONS: **Conceptualization:** Roberto García. **Data curation:** Roberto García, María Elena Ruíz. **Formal Analysis:** Roberto García, María Elena Ruíz. **Investigation:** Roberto García, María Elena Ruíz, Sergio Rodríguez. **Methodology:** Roberto García. **Supervision:** Roberto García, María Elena Ruíz, Sergio Rodríguez. **Validation:** F. García, Sergio Rodríguez. **Visualization:** Roberto García, María Elena Ruíz. **Writing-original draft:** Roberto García, María Elena Ruíz. **Writing-revision and editing:** Roberto García, María Elena Ruíz, Sergio Rodríguez. La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Según las instrucciones técnicas para la nutrición y fertilización del cultivo del arroz en Cuba propuesto por Mairura *et al.* (2007) dentro de los elementos químicos a tener en cuenta para obtener óptimos rendimientos se encuentran el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y silicio. Otros oligoelementos como el hierro, manganeso y zinc se consideran que pueden estar presentes a nivel micro en el suelo, mientras que el sodio es considerado como un ión nocivo por su acción dispersante sobre los coloides del suelo y tóxico para el arroz.

Por otra parte, investigaciones realizadas por Sys (1985); FAO (1991); Horuz y Dengiz (2018); Dengiz (2020); Trigos *et al.* (2023) plantean la necesidad de conocer también, el contenido de sales, la textura, el pH, la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de materia orgánica en el suelo. Para la interpretación de la condición del suelo en términos de calidad se utilizan indicadores o índices que simplifican y cuantifican las propiedades del mismo (Prasad *et al.*, 2017). No obstante, en Cuba no se han reportado estudios que permitan disponer de un indicador para evaluar la aptitud de los suelos para el cultivo del arroz.

En la provincia de Holguín como medida de enfrentamiento al cambio climático para el aumento de la producción de alimentos se desarrolla el trasvase Este-Oeste en el municipio de Mayarí, el cual beneficiará a más de 2000 hectáreas en su mayoría dedicadas al cultivo del arroz por lo que el acceso al agua estará garantizado. Dada la extensión del área disponible y que mayoritariamente presenta suelos vérticos, resulta necesario poder disponer de un indicador para conocer la aptitud de las tierras en la región para extender este cultivo. Por lo antes expuesto se plantea como objetivo de la investigación, introducir un indicador de calidad en un Vertisol dedicado al cultivo del arroz que, posteriormente pueda ser estimado a partir de métodos indirectos como sensores remotos o aprendizaje automático.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área experimental pertenece a la Empresa Agropecuaria Guatemala, CCS Tomás Machado del poblado de Cosme Herrera ubicada en los 20°44'54,601"N y 75°50'43,743"W del municipio Mayarí en la provincia Holguín (Figura 1). En ella se dedican al cultivo del arroz más de 100 ha con perspectiva a un incremento hasta 2000 ha por el potencial en esta zona del riego a partir del abasto de agua del Trasvase Este-Oeste para el cultivo del arroz como ya fue señalado.

En la zona de estudio según datos de la estación meteorológica de Guaro, ubicada a 20,96 msnm en los 20°40'21"N y 75°46'57" W en el municipio de Mayarí, la precipitación anual media es de 1067,6 mm y la temperatura anual media de 25,6 °C según lo reportado por Villazón *et al.* (2021; 2023).

El suelo característico del área es del tipo Vertisol crómico Hernández *et al.* (2015) con una pendiente < 2 % por lo que puede considerarse plana. En el área de 100 ha, se realizó un muestreo sistemático en 100 puntos georeferenciados con un GPS con apreciación de 3 m, a una distancia entre puntos de 100 m. Las muestras fueron tomadas en el rango de profundidad entre 0 a 0,20 m por ser en esta profundidad donde se encuentra el mayor contenido de radículas y raíces del cultivo del arroz capaces de absorber el agua y los elementos nutritivos necesarios para su crecimiento y desarrollo (Angladette *et al.*, 1969).

Propiedades del suelo determinadas experimentalmente

Las propiedades del suelo que fueron evaluadas se muestran en la Tabla 1. Estas propiedades señaladas como importantes para evaluar la calidad de los suelos en particular para el arroz fueron determinadas según las normas cubanas vigentes en la red Nacional de Laboratorios de Suelos (Paneque *et al.*, 2018)

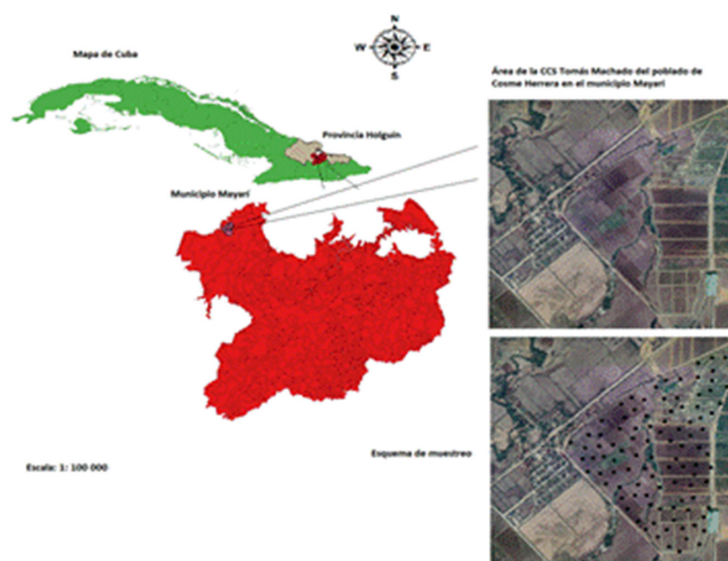


FIGURA 1. Ubicación del área donde se realizó la investigación, perteneciente a la CCS Tomás Machado del poblado de Cosme Herrera, Mayarí de la provincia Holguín, Cuba. Imagen tomada del SAS PlanetNightly 200718.10081 (<http://www.geojamal.com>).

TABLA 1. Propiedades del suelo determinadas

No	Nombre de la propiedad del suelo	Símbolo	Unidad de medida	Técnica analítica empleada
1	pH en agua	pH _{H₂O}	unidades	(NC 2001.2015)
2	Fósforo asimilable	P ₂ O ₅	mg kg ⁻¹	(NC 52.1999)
3	Potasio asimilable	K ₂ O	mg kg ⁻¹	
4	Nitrógeno total	Nt	%	(NC 11261: 2009)
5	Materia orgánica	MO	%	(NC 1043.2014)
6	Calcio	Ca	cmol kg ⁻¹	(NC 209:2002)
7	Magnesio asimilable	Mg	cmol kg ⁻¹	(NC 209:2002)
8	Sodio asimilable	Na	cmol kg ⁻¹	
9	Capacidad de Intercambio Catiónico	CIC	cmol kg ⁻¹	
10	Arena gruesa	AG	%	(NC 11508: 2000)
11	Arena fina	AF		
12	Limo	L		
13	Arcilla	Arc		
14	Conductividad eléctrica	CE	dS m ⁻¹	(NC 776: 2010)

*NC: norma cubana

Procedimiento para la determinación del Índice de Calidad del Suelo (SQI)

El SQI se determinó en tres pasos separados como se describe en la [Tabla 2](#).

Se utilizó el índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) para adecuar los valores muestrados indicando si estos son aptos para realizar el análisis de factores. Valores superiores a 0,50 indican la aptitud de los datos para el análisis. En adición se utiliza además la prueba de esfericidad Bartlett a una significación de $p < 0,05$, la cual complementa asegurar la viabilidad del análisis ([Mustafa, 2023](#)).

Las cargas variables representan el peso de las variables sobre los factores. En general, las variables con pesos o cargas de 0,60 pueden considerarse para la interpretación de los resultados, ya que son significativas para la evaluación de los componentes. El valor absoluto de la carga describe la influencia de la variable y la componente principal, el signo positivo o negativo muestra la dirección de la influencia. Por lo tanto, un valor negativo alto representa que el factor está muy influenciado y negativamente por una variable ([Lawrence y Upchurch, 1982](#)).

En la [Tabla 3](#), se muestran los valores críticos superior a inferior del suelo para el cultivo del arroz, según ([Guo et al., 2018](#); [Saleh et al., 2021](#)).

Para clasificar el SQI obtenido se utilizó la propuesta por [Dengiz \(2020\)](#) formulada para determinar la aptitud de un suelo para el cultivo del arroz a partir del análisis de sus propiedades ([Tabla 4](#)).

Luego de determinado el SQI, las propiedades del suelo que componen este indicador fueron llevadas a una base de datos que contiene la información necesaria de cada punto de muestreo o sea el valor del indicador de calidad del suelo y se proyectaron en las coordenadas del sistema WGS 1984 UTM Zona 18 Norte en el software ArcGIS 10.5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La [Tabla 5](#) muestra los resultados de las pruebas de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y de Bartlett. El valor obtenido en la prueba de KMO es de 0.580, lo que indica que

la adecuación de la muestra para el análisis factorial se encuentra en los límites permisibles para realizar un análisis factorial. En el caso de la prueba de esfericidad de Bartlett, ilustra un valor de Chi-cuadrado aproximado de 1419,299 con 91 grados de libertad y una significancia de 0,000 lo cual indica que las correlaciones entre las variables no son todas cero, lo que justifica la aplicación del análisis factorial.

En el estudio realizado por [Mustafa \(2023\)](#) sobre la utilización de propiedades del suelo para la elaboración de un SIG de indicadores de calidad, reporta valores de KMO de 0,78 y la esfericidad de Bartlett con 141,2, indicando una buena adecuación de la muestra y justificando el uso del análisis factorial en la identificación de factores clave como la fertilidad del suelo y las propiedades texturales.

Las comunales indican la proporción de la varianza de cada variable que es explicada por los factores comunes extraídos ([Tabla 6](#)). En el caso del potasio tiene una comunalidad de 0.94 en el potasio demuestra que después de la extracción, el 94.0 % de la varianza de esta variable es explicada por los factores comunes. Esto sugiere que el potasio está bien representado en el modelo factorial. Una alta proporción de estimación de comunalidad sugiere que una gran parte de la varianza fue explicada por el factor; por lo tanto, obtendría mayor preferencia sobre una estimación de comunalidad baja ([Shukla et al., 2006](#)).

En contraste, variables como Arena gruesa, Arena fina, Limo y Arcilla tienen comunales extremadamente bajas tras la extracción (0,160; 0,026; 0,011; 0,013, respectivamente), lo que indica que estos componentes no están bien representados en el modelo factorial. La baja comunalidad de estas variables podría deberse a que los factores principales extraídos no están capturados en las dimensiones relacionadas con la textura del suelo, o que estas variables tienen una estructura diferente en el contexto específico de los datos.

Los autovalores iniciales y porcentaje de varianza explicada ([Tabla 7](#)) indican la cantidad de varianza que cada factor explica. El primer factor tiene un autovalor de 4,75, lo que representa el 33,93% de la varianza total.

TABLA 2. Procedimiento para la determinación del SQI

No.	Procedimientos	Método utilizado	Descripción	Ecuaciones
1	Selección del conjunto mínimo de datos (MDS)	Análisis factorial	Reducir el número de propiedades de suelo. También identifica la relación entre las variables y la influencia de estas en las muestras investigadas. Las cargas factoriales representan las correlaciones entre las variables originales y los factores extraídos. Para simplificar los resultados del análisis factorial e interpretarlos más claramente, se utiliza el Varimax con rotación de normalización de Kaiser (Aiuppa et al., 2003; Behera y Das, 2018).	
2	Calificación de los indicadores del MDS	Funciones de puntuación estándar (SSF)	Se utilizan según la importancia de la propiedad del suelo para el desarrollo y crecimiento del cultivo. Cada indicador se convirtió utilizando SSF, se normalizó a un valor entre 0,1 y 1 según las características de los indicadores del suelo. La ecuación 1 se utilizó cuando “menos es mejor” (<i>low is better</i> , LB) que expresa un menor valor de la variable se requiere por el cultivo en menor proporción el elemento o propiedad del suelo. La ecuación 2 cuando “más es mejor” (<i>more is better</i> , MB) donde un mayor valor de la variable es mejor y la ecuación 3 se utilizó cuando el rango del indicador es óptimo (<i>optimum</i> , RO) (Nabiollahi et al., 2017; Jiang et al., 2020).	$SSF_2 = 0,1 \quad \begin{matrix} 0,1, & x < L \\ L \leq x \leq U \\ 1,0, & x > U \end{matrix} \quad (1)$ $SSF_3 = 0,1 \quad \begin{matrix} 0,1, & x(L_1, x)U_2 \\ L_1 \leq x \leq U_1 \end{matrix}$ $SSF_3 = 0,1 \quad \begin{matrix} 0,1, & x(U_1, x)L_2 \\ L_2 \leq x \leq U_2 \end{matrix} \quad (2)$ $SSF_4 = 0,1 \quad \begin{matrix} 0,1, & x < L \\ L \leq x \leq U \\ 1,0, & x > U \end{matrix} \quad (3)$ <p>Donde x es el valor del indicador de suelo en un punto muestreado, U_2 y L_1 son los valores críticos superior e inferior del indicador del suelo, L_2 y U_1 son la izquierda y derecha los puntos finales del rango óptimo los cuales representan los niveles óptimos y de deficiencia del indicador en el suelo respectivamente (Yuan et al., 2020).</p>
3	Índice comparativo de calidad del suelo	Índice de Calidad del Suelo	Se integraron las puntuaciones de los indicadores en un índice comparativo de calidad del suelo utilizando un enfoque aditivo simple ponderado (Andrews et al., 2002).	$SQI = \sum_{i=1}^n Wi * Si$ <p>Dónde: W_i es el peso del indicador i; S_i es la puntuación del indicador i, que se calculó de acuerdo con SSF; n es el número de indicador del MDS.</p>

TABLA 3. Valores críticos superior e inferior del indicador del suelo según (Guo et al., 2018; Saleh et al., 2021).

Propiedades del suelo	Funciones de puntuación	Valor crítico inferior	Valor crítico superior
Nt	MB	0,007	0,578
CE	LB	0,09	0,76
Ca	LB	18,2	154,7
MO (%)	MB	0,9	4,12
P ₂ O ₅	MB	1,0	72,1
K ₂ O	MB	2,0	147,95
Mg	LB	50,0	250
Na	MB	0,1	3,0
pH	Rango óptimo	8,08	8,22
Arcilla	MB	12,8	64,9
Arena	LB	6,5	76,2

TABLA 4. Clases de aptitud de un suelo para el cultivo del arroz a partir del análisis de sus propiedades

Clases	Clasificación	SQI
I	Muy baja I	< 0,40
II	Baja	0,40-0,50
III	Moderada	0,50-0,65
IV	Alta	0,65-0,85
V	Muy alta	>0,85

TABLA 5. Pruebas de Kaiser-Meyer-Olkin y de esfericidad de Bartlett

Kaiser-Meyer-Olkin	KMO	0,58
Esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado	1419,29
	gl	91,0
	Significación	0,00

TABLA 6. Comunalidad de las propiedades analizadas

Propiedades analizadas	Inicial	Extracción
pH	0,50	0,43
P2O5	0,52	0,48
K2O	0,84	0,94
MO	0,63	0,60
Ca	0,87	0,96
Mg	0,85	0,74
Na	0,73	0,65
Arena Gruesa	0,92	0,16
Arena fina	0,99	0,02
Limo	0,99	0,01
Arcilla	0,99	0,01
CE	0,64	0,61
Nt	0,62	0,62
CIC	0,37	0,21

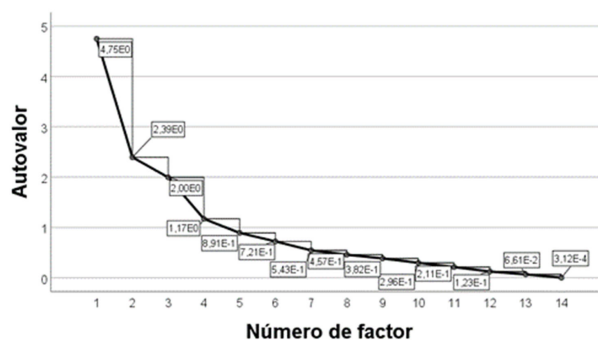
TABLA 7. Autovalores iniciales y porcentaje de la varianza

Factor	Total	% de varianza	% acumulado
1	4,750	33,92	33,92
2	2,39	17,10	51,03
3	1,99	14,25	65,28

El segundo y tercer factor explican 17,10% y 14,25% de la varianza, respectivamente. En total, los tres factores explican un 65,28% de la varianza acumulada, lo cual es un buen resultado.

Mairura *et al.* (2007) obtuvieron en cuatro factores el 68% de la variación de los datos de propiedades químicas y físicas en la determinación de indicadores de calidad de suelos bajo diferentes usos. La matriz de factor rotado (Varimax) muestra cómo se distribuyen las cargas factoriales después de la rotación, lo que facilita la interpretación.

En la Figura 2 se muestra el gráfico de sedimentación de los factores rotados que es utilizado en el análisis factorial para determinar el número adecuado de ejes o factores a retener por la interpolación de los autovalores. En el eje

**FIGURA 2.** Gráfico de sedimentación de los factores rotados por Varimax.

vertical y el número de factores en el eje horizontal, cuyos resultados muestran que los autovalores, que representan la cantidad de varianza explicada por cada factor, disminuyen a medida que se incrementan los factores, y que los primeros factores explican más varianza, con autovalores de 4,75 para el primer factor; 2,39 para el segundo factor y 2,0 para el tercer factor respectivamente, mientras que a medida que aumentan los factores se explica de forma progresiva menos variabilidad.

Como tendencia se selecciona el punto donde tiene lugar una inflexión para decidir la cantidad de ejes a considerar con vistas a realizar el análisis de grandes factores que afectan el proceso (Méndez y Sepúlveda, 2012). En esta investigación parece estar en el paso del segundo al tercer factor, por lo que los dos primeros factores serían los seleccionados con vistas a poder apreciar de forma clara la influencia de las propiedades seleccionadas en los grandes factores que afectan el proceso.

En la Tabla 8 se muestra la matriz del factor rotado. El Factor 1 explica las variables como el potasio (-0,96), la materia orgánica (0,74), el nitrógeno total (0,78) tiene altas cargas, sugiriendo que en este factor se encuentran mayor correlacionadas entre sí estas propiedades químicas. El Factor 2 está constituido por el calcio (0,98) y el magnesio (-0,85) con las cargas más altas.

TABLA 8. Matriz de factor rotado

Propiedades analizadas	Factor 1	Factor 2
pH	-0,65	0,05
P ₂ O ₅	0,68	0,12
K ₂ O	-0,96	-0,04
MO	0,74	-0,21
Ca	0,03	0,98
Mg	-0,11	-0,85
Na	0,79	0,11
Arena Gruesa	-0,05	-0,39
Arena fina	-0,14	0,08
Limo	0,10	-0,00
Arcilla	0,09	-0,06
CE	0,74	0,25
Nt	0,78	0,07
CIC	-0,29	0,35

(Mairura *et al.*, 2007) plantean que el pH es uno de las propiedades del suelo que más incide en el desarrollo de los cultivos y que a su vez es utilizada como indicador de calidad del suelo. Por otra parte consideran el papel que juega la materia orgánica en la disponibilidad de agua para las plantas y para disminuir los efectos de la degradación del suelo.

Ayoubi *et al.* (2011) en su investigación sobre los cambios de los indicadores de calidad en diferentes usos de la tierra por efecto de la degradación del suelo, a partir de un análisis factorial y los valores de comunalidad de las propiedades que explicaron la mayor proporción de la varianza, incluyeron el contenido de arena, la materia orgánica del suelo, el nitrógeno total y el agua de mar.

Las propiedades de mayor peso son los indicadores de mayor representatividad en el análisis factorial y se utilizan para la determinación del SQI teniendo en cuenta la premisa planteada de tomar valores superiores a 0,60 lo cual coincide con lo planteado por Mustafa (2023). En este caso las propiedades fueron: potasio (0,96), calcio (0,98), magnesio (0,855), sodio (0,799), nitrógeno total (0,78), materia orgánica (0,74), conductividad eléctrica (0,743), fósforo (0,68) y el pH (0,65).

El gráfico de factores rotados (Figura 3) demuestra que para el factor 1, que es el más importante por extraer la mayor variabilidad una vez realizada la rotación Varimax presentaron valores de correlaciones o cargas positivas por encima de 0,6, como es el caso del fósforo, la materia orgánica, el sodio, la conductividad eléctrica y el nitrógeno total que aparecen formando un grupo en la parte derecha y positiva del eje o factor 1, lo que sugiere que incrementos en algunos de ellos inducen en la misma proporción incrementos en el resto y viceversa.

Aparecen ubicados en la parte izquierda o negativa del eje o factor 1, las variables negativamente relacionadas con valores de cargas altos, es el caso del pH y el potasio e indica que incrementos en el suelo de las variables positivamente relacionadas producen descensos en las variables negativamente relacionadas. Para el primer factor, no parecen tener cargas importantes el calcio y el magnesio,

la arena gruesa y fina, limo, arcilla y la capacidad de intercambio catiónico.

Estos resultados es señal de que el factor o eje 1 parece estar más asociado con la fertilidad del suelo y la concentración de nutrientes. Las variables con alta carga en términos absolutos en este factor, como el fósforo, la materia orgánica, el sodio, la conductividad eléctrica, nitrógeno total, el pH y el potasio, constituyen indicadores de la capacidad del suelo para sustentar el crecimiento vegetal. Las disminuciones en los valores del pH de este suelo favorecen incrementos de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno.

Para el factor dos, con menor importancia que el factor 1, por extraer menor variabilidad fueron importantes por presentar cargas altas el calcio con carga positiva y el magnesio con carga negativa. Con valores intermedios para el factor dos fueron la capacidad de intercambio catiónico de forma positiva y la arena gruesa de forma negativa el resto. El resto de las variables por el valor de su carga no son representativos del eje o factor dos, el cual parece estar más relacionado con la composición de cationes como el calcio y el magnesio, y sugiere que una mayor cantidad de arena gruesa reduce la capacidad de intercambio catiónico.

En el caso del arroz, la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo se alinea con el rendimiento del grano, a la vez que influye en la arquitectura de la planta, que abarca el número de panículas por unidad de área y el número de espigas por panícula (Perdomo *et al.*, 1983). También la CE y la MO, contribuyen significativamente al desarrollo y crecimiento del cultivo (Coitiño *et al.*, 2015).

En el caso del calcio y magnesio, ambos posicionados en el mismo factor, en contraposición pueden atribuirse a las distintas funciones que desempeñan estos elementos en el suelo. Por un lado, el calcio participa activamente en la formación de los agregados del suelo, contribuyendo a la estructura general del suelo. Por el contrario, se ha descubierto que el magnesio reduce el porcentaje de agregados estables y también disminuye la cantidad de arcilla que actúa como agente cementante en el suelo. Además, la presencia de magnesio afecta negativamente a la porosidad de los agregados (Villazón *et al.*, 2017).

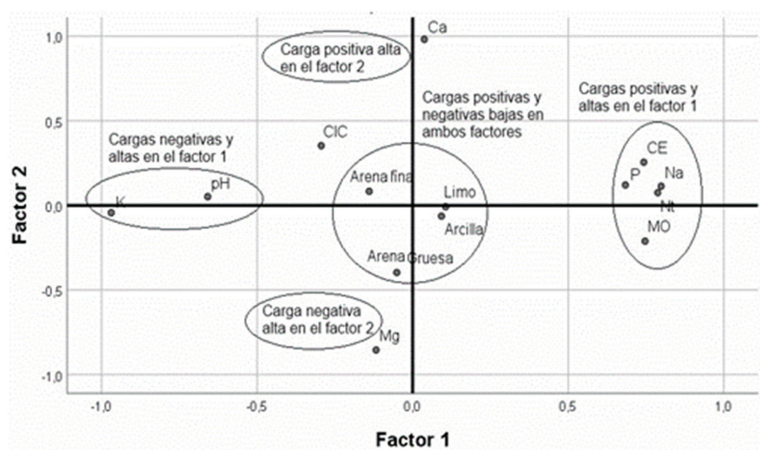


FIGURA 3. Gráfico de factor en espacio de factores rotados.

Choudhury y Mandal (2021) han utilizado iguales indicadores de calidad del suelo como parte de su análisis del conjunto mínimo de datos. Estos investigadores han reconocido la naturaleza fundamental de este enfoque analítico en el ámbito de la agricultura de precisión, ya que facilita prácticas de gestión del suelo más eficientes y específicas.

Seguidamente se muestra la estadística descriptiva de los valores arrojados en la determinación del SQI para el área de estudio dedicada al cultivo del arroz. El valor calculado para el SQI-MDS se situó en un promedio de 0,43, con valores mínimo de (0,27) y máximo (0,81) registrados. En cuanto al coeficiente de variación, las observaciones arrojaron valores bajos por encontrarse inferiores al 40 % (Tabla 9).

TABLA 9. Estadística descriptiva de los valores arrojados en la determinación del SQI para el área de estudio dedicada al cultivo del arroz

Indicador de la calidad del suelo (SQI)	
Media	0,43
Mínimo	0,27
Máximo	0,81
Coeficiente de variación (%)	35,99
Error Estándar	0,02
Desviación Estándar	0,16

Este resultado está en consonancia con los resultados descritos por Guo *et al.* (2018), quienes observaron un rango de variación similar en su investigación, lo que estableció un punto de referencia para la clasificación de los valores que se encuentran dentro del rango del 7,0 % $> \text{SQI} \geq 55,0$ %. Estos resultados sirven para subrayar la variabilidad inherente en la calidad del suelo que existe en el área de estudio, enfatizando la necesidad de una evaluación exhaustiva.

Los indicadores seleccionados para el SQI-MDS mediante esta herramienta permite una evaluación eficaz de la calidad del suelo en el área de estudio. Estos indicadores también se han empleado en otros estudios, lo que subraya su importancia en la agricultura de precisión (Buji *et al.*, 2022). El valor calculado del SQI-MDS, junto con el coeficiente de variación observado, sirve para resaltar la variabilidad inherente en la calidad del suelo dentro del área de estudio.

Por otro lado, se ilustra la distribución espacial del índice de calidad del suelo, que se ha determinado con el fin de evaluar el cultivo de arroz, dentro de la región de estudio especificada mediante un enfoque minimalista del análisis de datos. Además, este método empleó un conjunto reducido de puntos de datos para obtener información completa y fiable sobre el índice de calidad del suelo en una zona determinada.

La Figura 4 revela que una parte importante de la región muestra una característica homogénea en términos de aptitud del suelo, específicamente en la sección sur con

valores predominantes entre 0,27 y 0,39 de SQI los cuales se clasifican como Muy baja la aptitud para un 69 % del total del área. En la zona central del área se refleja la mayor variabilidad de los valores de SQI con clases entre Baja hasta Moderada (el 13 % del área) con un índice que oscila entre 0,45 a 0,61. Solamente al Norte se observa que existe una zona de clase Alta la cual representa el 18 % del área bajo estudio. Esta diferencia de aptitud podría atribuirse la acción antrópica en el área de estudio.

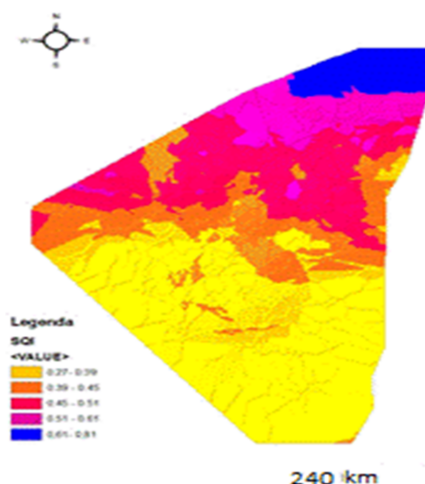


FIGURA 4. Distribución espacial del SQI obtenido para el cultivo del arroz.

CONCLUSIONES

Se describe un método para la obtención de un índice de calidad del suelo (SQI) empleando la obtención del mínimo de propiedades necesarias y sus pesos relativos.

La determinación del indicador de calidad del suelo para el cultivo de arroz arrojó que las propiedades de mayor importancia en el estudio son el nitrógeno total, el fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, materia orgánica y la conductividad eléctrica. Cada uno de los pesos de las propiedades seleccionadas son superiores a 0,60 por lo cual su uso fue superior al resto de las propiedades determinadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIUPPA, A.; BELLOMO, S.; BRUSCA, L.; D'ALESSANDRO, W.; FEDERICO, C.: "Natural and anthropogenic factors affecting groundwater quality of an active volcano (Mt. Etna, Italy)", *Applied Geochemistry*, 18(6): 863-882, 2003, ISSN: 0883-2927, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00182-8](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00182-8).
- ANDREWS, S.S.; KARLEN, D.; MITCHELL, J.: "A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California", *Agriculture, ecosystems & environment*, 90(1): 25-45, 2002, ISSN: 0167-8809.
- ANGLADETTE, A.; RIPOLL, V.; PALOMEQUE, F.: "El arroz", En: Ed. Barcelona: Blume, 1969, ISBN: ISBN 847313835X.

- AYOUBI, S.; SHAHRI, A.; KARCHEGANI, P.M.; SAHRAWAT, K.L.: "Application of artificial neural network (ANN) to predict soil organic matter using remote sensing data in two ecosystems", *Biomass and remote sensing of biomass*, 10: 181-196, 2011.
- BEHERA, B.; DAS, M.: "Application of multivariate statistical techniques for the characterization of groundwater quality of Bachel and Kirandul area, Dantewada district, Chattisgarh", *Journal of the Geological Society of India*, 91(1): 76-80, 2018, ISSN: 0016-7622, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12594-018-0822-0>.
- BUJI, I.B.; NOMA, S.; ENIOLORUNDA, N.; HAYATU, N.G.; MANASSEH, E.A.; UMAR, G.; SHARU, M.B.; TALHA, I.Z.; MAGAJI, M.; ADAMU, I.: "Using Different Methods of Land Suitability Evaluation for Rice Production (*Oryza Sativa*) in Rabah District of Sokoto State Nigeria", *Journal of Science and Engineering Research*, 2(2): 29-46, 2022, ISSN: 2786-9873.
- CHOUDHURY, B.U.; MANDAL, S.: "Indexing soil properties through constructing minimum datasets for soil quality assessment of surface and profile soils of intermontane valley (Barak, North East India)", *Ecological Indicators*, 123: 107369, 2021, ISSN: 1470-160X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107369>.
- COITINO, L.J.; BARBAZÁN, M.; ERNST, O.: "Conductividad eléctrica aparente para delimitar zonas de manejo en un suelo agrícola con reducida variabilidad en propiedades físico-químicas", *Agrociencia (Uruguay)*, 19(1): 102-111, 2015, ISSN: 2301-1548.
- DENGİZ, O.: "Soil quality index for paddy fields based on standard scoring functions and weight allocation method", *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(3): 301-315, 2020, ISSN: 0365-0340, DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1610880>.
- FAO: *Soil Resources, and Conservation Service. Guidelines: land evaluation for extensive grazing*, no. No. 58. Food&Agriculture Org, Inst. Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. Italy, 1991.
- GUO, S.; HAN, X.; LI, H.; WANG, T.; TONG, X.; REN, G.; FENG, Y.; YANG, G.: "Evaluation of soil quality along two revegetation chronosequences on the Loess Hilly Region of China", *Science of the Total Environment*, 633: 808-815, 2018, ISSN: 0048-9697, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.210>.
- HERNÁNDEZ, J.A.; PÉREZ, J.J.M.; MESA, N.A.; BOSCH, I.D.; RIVERO, L.; CAMACHO, E.: *Nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba*, Ed. AGRINFOR, La Habana, Cuba, ISBN: 959-246-022-1, Barcaz L L ed., vol. I, La Habana, Cuba, 93 p., 2015, ISBN: 959-246-022-1.
- HORUZ, A.; DENGİZ, O.: "The relationships between some physico-chemical properties and nutrient element content of paddy raised on alluvial land in Terme region.", *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 33(1): 58-67, 2018.
- JIANG, M.; XU, L.; CHEN, X.; ZHU, H.; FAN, H.: "Soil quality assessment based on a minimum data set: a case study of a county in the typical river delta wetlands", *Sustainability*, 12(21): 9033, 2020, ISSN: 2071-1050, DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219033>.
- LAWRENCE, F.W.; UPCHURCH, S.B.: "Identification of recharge areas using geochemical factor analysis", *Groundwater*, 20(6): 680-687, 1982, ISSN: 0017-467X, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1982.tb01387.x>.
- MAIRURA, F.; MUGENDI, D.; MWANJE, J.; RAMISCH, J.; MBUGUA, P.; CHIANU, J.: "Integrating scientific and farmers' evaluation of soil quality indicators in Central Kenya", *Geoderma*, 139(1-2): 134-143, 2007, ISSN: 0016-7061.
- MÉNDEZ, C.M.J.; SEPÚLVEDA, M.A.: "Introducción al análisis factorial exploratorio", *Revista colombiana de psiquiatría*, 41(1): 197-207, 2012, ISSN: 0034-7450, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-7450\(14\)60077-9](https://doi.org/10.1016/S0034-7450(14)60077-9).
- MUSTAFA, A.: "Utilizing of principal component analysis and geographic information system approach for assessing soil quality index under different land uses: case study", *SVU-International Journal of Agricultural Sciences*, 5(2): 41-53, 2023, ISSN: 2636-3801, DOI: <https://doi.org/10.21608/svuijas.2023.210997.1285>.
- NABIOLLAHI, K.; TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; KERRY, R.; MORADIAN, S.: "Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran", *Ecological indicators*, 83: 482-494, 2017, ISSN: 1470-160X.
- NASIR, M.J.; HAIDER, M.F.; ALI, Z.; AKHTAR, W.; ALAM, S.: "Evaluation of soil quality through simple additive soil quality index (SQI) of Tehsil Charsadda, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan", *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 23(1): 42-54, 2024, ISSN: 1658-077X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.09.001>.
- NORMA CUBANA (NC): "Calidad del suelo-determinación de los componentes orgánicos", NC: 1043.2014, Oficina Nacional de Normalización, Cuba. 2014.
- NORMA CUBANA (NC): "Determinación de las formas móviles de Fósforo y Potasio", NC: 52.1999, Oficina Nacional de Normalización, Cuba. 1999.
- NORMA CUBANA (NC): "Calidad del Suelo. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y de los cationes intercambiables del suelo", NC: 209.2002, Oficina Nacional de Normalización, Cuba. 2002.
- NORMA CUBANA (NC): "Calidad del Suelo. Determinación del Nitrógeno total Método Kjeldahl", NC: 11261.2009, Oficina Nacional de Normalización, Cuba. 2009.

- NORMA CUBANA (NC): “Calidad del Suelo. Evaluación de la afectación por salinidad”, NC: 776.2010, Oficina Nacional de Normalización, Cuba. 2010.
- NORMA CUBANA (NC): “Calidad del suelo-determinación de pH”. NC: 10390.2014, Oficina Nacional de Normalización, Cuba. 2014.
- PERDOMO, M.; GONZÁLEZ, F.J.; DE GALVIS, Y.; GARCÍA DURÁN, D.E.; ARREGOCÉS, O.; LEÓN, S.L.A.: “Los macronutrientes en la nutrición de la planta de arroz [conjunto audiotutorial]”, 1983, Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/items/366ab9dd-cdc7-459a-b54a-10c3da83932d>.
- PRASAD, R.; NEWAJ, R.; SINGH, R.; SAROJ, N.; TRIPATHI, V.; SHUKLA, A.; SINGH, P.; CHATURVEDI, O.: “Soil quality index (SQI) for assessing soil health of agroforestry system: effect of Hardwickia binata Roxb. tree density on SQI in Bundelkhand, central India”, *Indian Journal of Agroforestry*, 19(2): 38-45, 2017, ISSN: 0972-0715.
- PRIETO, M.J.; PRIETO, G.F.; ACEVEDO, S.O.; MÉNDEZ, M.M.A.: “Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, México”, *Agronomía mesoamericana*, 24(1): 83-91, 2013, ISSN: 1659-1321.
- SALEH, A.M.; ELSHARKAWY, M.; ABDELRAHMAN, M.; ARAFAT, S.M.: “Evaluation of soil quality in arid western fringes of the Nile Delta for sustainable agriculture”, *Applied and Environmental Soil Science*, 2021(1): 1-17, 2021, ISSN: 1687-7675, DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/1434692>.
- SHUKLA, M.; LAL, R.; EBINGER, M.: “Determining soil quality indicators by factor analysis”, *Soil and tillage research*, 87(2): 194-204, 2006, ISSN: 0167-1987, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>.
- SYS, C.: *Land evaluation.*, [en línea], Land evaluation”, Parts I, II, III. ITC Lecture Notes ed., University of Ghent, Belgium, 343 p., 1985, Disponible en: www.cabdigitalibrary.org/doi/full/10.5555/19881924050.
- TRIGOSO, B.D.; FLORIDA, R.N.; RENGIFO, R.A.: “Indicadores Físicoquímicos del suelo con Manejo Convencional Del Arroz (Oriza sativa L.) Bajo Riego”, *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 37(1): 117-129, 2023, ISSN: 1390-8596, DOI: <https://doi.org/10.17163/lgr.n37.2023.09>.
- VASU, D.; SINGH, S.K.; RAY, S.; DURAISAMI, V.P.; TIWARY, P.; CHANDRAN, P.; NIMKAR, A.M.; ANANTWAR, S.G.: “Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India”, *Geoderma*, 282: 70-79, 2016, ISSN: 0016-7061, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>.
- VILLAZÓN, G.J.A.; MARTÍN, G.G.; COBO, V.Y.: “Análisis multivariado de las propiedades químicas de los suelos pardos erosionados”, *Centro Agrícola*, 44(1): 56-62, 2017, ISSN: 0253-5785.
- VILLAZÓN, G.J.A.; NORIS, N.P.; GARCÍA, R.R.A.; CRUZ, P.M.: “Análisis temporal de la agresividad y concentración de las precipitaciones en áreas agropecuarias de la provincia de Holguín, Cuba”, *Idesia (Arica)*, 41(3): 77-86, 2023, ISSN: 0718-3429, DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292023000300077>.
- VILLAZÓN, G.J.A.; NORIS, N.P.; MARTÍN, G.G.: “Determinación de la precipitación efectiva en áreas agropecuarias de la provincia de Holguín”, *Idesia (Arica)*, 39(2): 85-90, 2021, ISSN: 0718-3429, DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292021000200085>.
- YUAN, P.; WANG, J.; LI, C.; XIAO, Q.; LIU, Q.; SUN, Z.; WANG, J.; CAO, C.: “Soil quality indicators of integrated rice-crayfish farming in the Jiangnan Plain, China using a minimum data set”, *Soil and Tillage Research*, 204: 104732, 2020, ISSN: 0167-1987, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104732>.

Roberto Alejandro García-Reyes, Ing., Inv., Ministerio de la Agricultura, Departamento Provincial de Suelos y Fertilizantes, provincia Holguín, Cuba. e-mail: ralejandro9409@gmail.com

María Elena Ruiz-Pérez, Dr.C., Profesora Titular, Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”. Carretera Tapaste y Autopista Nacional km 231/2, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP 32700.

Sergio Rodríguez-Rodríguez, Dr.C., Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Agrícolas, Centro de Estudios de Biotecnología Vegetal, Bayamo, Granma, Cuba. e-mail: ralejandro9409@gmail.com