



Terra Latinoamericana

ISSN: 2395-8030

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

Ruiz-Dager, Magaly; Paolini, Jorge
Indicadores biológicos de suelos lacustres y aluviales de Venezuela
bajo diferentes usos. Parte 2. Evaluación de la calidad de suelos
Terra Latinoamericana, vol. 40, e967, 2022
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.967>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57371833040>

- ▶ [Cómo citar el artículo](#)
- ▶ [Número completo](#)
- ▶ [Más información del artículo](#)
- ▶ [Página de la revista en redalyc.org](#)



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Indicadores biológicos de suelos lacustres y aluviales de Venezuela bajo diferentes usos. Parte 2. Evaluación de la calidad de suelos

Biological indicators of lacustrine and alluvial soils in Venezuela under different land use. Part 2. Assessment of soil quality

Magaly Ruiz-Dager¹  y Jorge Paolini² 

¹Centro de Investigación y Extensión en Suelos y Aguas (CIESA). Universidad Nacional Experimental de los Llanos Centrales Rómulo Gallegos. (UNERG). Vía El Castrero, San Juan de los Morros. 2301. Estado Guárico, Venezuela.

[‡] Autora para correspondencia (magaruizdager@gmail.com)

²Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Apartado 21827. 1020-A Caracas, Venezuela.

Editor de Sección: Dr. Edgar Iván Sánchez Bernal

RESUMEN

Los mejores suelos agrícolas de Venezuela se ubican en la cuenca del lago de Valencia, pero desafortunadamente por diversas causas, como el uso de aguas grises recicladas con o sin tratamiento de origen urbano e industrial, han estado sometidos a procesos de degradación acelerada. Detectar las causas del deterioro del suelo en etapas tempranas con indicadores bioquímicos permitirá aplicar medidas correctivas oportunas. En este trabajo se adoptaron tres herramientas idóneas de medición con los índices matemáticos siguientes: índice de alteración 3, media geométrica enzimática y área de diagramas radar. Se evaluó la calidad de los suelos aluviales y lacustres de la cuenca del lago de Valencia cultivados con caña de azúcar y bananos. El cálculo de los índices se basó en las determinaciones de las actividades de la deshidrogenasa, amonificación de la arginina, fosfomonoesterasa ácida, fosfomonoesterasa alcalina, β -glucosidasa, ureasa y proteasa. Los índices de calidad estimados demostraron que el uso agrícola causa una perturbación del balance natural, siendo el orden: vegetación natural > caña de azúcar > banano. El índice de alteración (IA3) y la media geométrica enzimática (MGe) correlacionaron significativamente con el cociente de eficiencia metabólica. Los gráficos de radar para cada tipo de suelo (lacustre y aluvial) bajo los dos tipos de uso de la tierra (caña de azúcar y banano) confirmaron lo encontrado por los otros

índices. Los suelos sembrados con ambos cultivos mostraron una menor calidad en comparación con los suelos de referencia bajo vegetación nativa.

Palabras claves: *banano, caña de azúcar, enzimas, índices, propiedades bioquímicas, uso de la tierra.*

SUMMARY

The best agricultural soils in Venezuela are located in the Valencia lake basin, but unfortunately for various reasons, such as the use of recycled gray water with or without treatment from urban and industrial origin, they have been subjected to accelerated degradation processes. Detecting the causes of soil deterioration in early stages with biochemical indicators will allow timely corrective measures to be applied. In this work, three suitable measurement tools were adopted with the following mathematical indexes: alteration index (AI3), enzymatic geometric mean and radar diagram area. The quality of the alluvial and lacustrine soils of the lake Valencia basin cultivated with sugar cane and banana was evaluated. The calculation of the indexes was based on the determinations of dehydrogenase, arginine ammonification, acid phosphomonoesterase, alkaline phosphomonoesterase, β -glucosidase, urease and protease activities. The estimated quality indexes showed that agricultural use causes a disturbance of the natural balance, the order being: natural vegetation > sugar cane > banana. The alteration index (AI3) and the enzyme geometric mean (MGe) correlated significantly

Cita recomendada:

Ruiz-Dager, M. y Paolini, J. (2022). Indicadores biológicos de suelos lacustres y aluviales de Venezuela bajo diferentes usos. Parte 2. Evaluación de la calidad de suelos. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-11. e967. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.967>

Recibido: 13 de abril de 2021. Aceptado: 12 de agosto de 2021.
Artículo. Volumen 40, septiembre de 2022.

with the metabolic efficiency quotient. The radar plots for each soil type (lacustrine and alluvial) under both types of land use (sugar cane and banana) confirmed the results of the other indexes. Soils planted with both crops showed a lower quality compared to the reference soils under native vegetation.

Index words: *banana, sugar cane, enzymes, indexes, biochemical properties, land use.*

INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo de acuerdo a Doran y Parkin (1994) se define como la capacidad del suelo de funcionar, dentro de los límites del ecosistema, para sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud de las plantas y animales; y la misma puede evaluarse tanto para agroecosistemas en los que el servicio ecosistémico principal, aunque no exclusivo, es la productividad vegetal, como en los ecosistemas naturales en los que los principales objetivos son el mantenimiento del medio ambiente y la conservación de la biodiversidad (Bünemann *et al.*, 2018).

Factores extrínsecos al suelo como material parental, clima, topografía e hidrología pueden influir en los valores potenciales de las propiedades del suelo de tal punto que es imposible establecer valores umbrales o de referencia de aplicación universal. Por lo tanto, en la evaluación de la calidad del suelo se debe incluir valores de línea base o de referencia para poder identificar los efectos del manejo y la gestión del mismo. A menudo los suelos reaccionan de forma lenta a los cambios en el uso y manejo de la tierra y por eso en muchos casos se hace difícil detectar cambios en la calidad del suelo antes de que estos causen daños irreversibles (Nortcliff, 2002). Así, un paso necesario para estimar la calidad del suelo, es la identificación de un conjunto de atributos sensibles del mismo que reflejen su capacidad de funcionar y puedan ser usados como indicadores de la calidad del medio edáfico. La evaluación de la calidad del suelo proporciona entonces una herramienta científica cuantitativa para la estimación de la gestión del recurso suelo, teniendo en cuenta también las demandas sociales de los diversos beneficios que los suelos, si se gestionan bien, pueden proporcionar a la humanidad. La valoración de la calidad del suelo, por tanto, se conecta a la valoración de los servicios ecosistémicos proporcionados por los suelos.

La calidad del suelo es dinámica y puede cambiar en corto plazo de acuerdo al uso y prácticas de manejo y su evaluación permite entender y revertir el deterioro de la funcionalidad del ecosistema; para ello se usan atributos relacionados con las funciones del suelo conocidos como indicadores, así tenemos propiedades físicas (textura, profundidad, infiltración y densidad aparente, capacidad de agua disponible); químicas (pH, contenidos de C, N, nutrientes extraíbles, capacidad de intercambio catiónico) y biológicas (C y N de la biomasa microbiana; respiración basal; enzimas, riqueza y abundancia de la fauna) (Cardoso *et al.*, 2013). En general los parámetros físicos y químicos del suelo solo se alteran cuando éste sufre cambios drásticos, siendo esto una limitación cuando se evalúa la calidad del suelo (Filip, 2002; Mijangos, Pérez, Albizu y Garbisu, 2006).

Las propiedades biológicas (microbiológicas y bioquímicas) del suelo están relacionadas estrechamente con la descomposición de la materia orgánica proveniente de los residuos vegetales y animales así como el reciclaje de los mismos (Cardoso *et al.*, 2013) y son muy dinámicas por lo que tienen la ventaja de servir de señales tempranas de degradación o mejoría del suelo (Doran y Parkin, 1994), mucho antes que las propiedades físicas y químicas, además de ser de fácil medición y sensibles a los cambios medioambientales. Dado que la calidad del suelo no se puede medir directamente, se prefiere integrar algunas propiedades físicas, químicas, microbiológicas y bioquímicas en el conjunto mínimo de datos (CMD abreviatura del inglés MDS = Minimum Data Set), combinarlas en un índice numérico que describirá los procesos y el funcionamiento de los suelos de acuerdo p. ej. al tipo de manejo agrícola o forestal, tipo de suelo, cultivo, así como actividades antrópicas nocivas y generalmente se prefiere una escala comprendida entre 0 y 1, en la cual los valores más altos corresponden a una mejor calidad del suelo. La literatura a este respecto es numerosa en relación a la selección de los atributos de los suelos del CMD, su estandarización e interpretación hasta el producto final del índice numérico (Cherubin *et al.*, 2016; Andrews, Karlen y Cambardela, 2004).

Dilly y Blume (1998) indican que el uso de índices que combinan datos de un pequeño número de propiedades bioquímicas podría enmascarar importantes características microbianas en el ecosistema del suelo; por lo cual sugieren una selección de diez propiedades bioquímicas básicas y relacionadas con: (a) el contenido

en biomasa microbiana (determinada por fumigación-extracción y por respiración inducida por sustrato, SIR); (b) la actividad microbiana general (respiración basal, actividad de la deshidrogenasa, amonificación de arginina, reducción de dimetilsulfóxido); y (c) la actividad microbiana específica (β -glucosidasa, proteasa, fosfatasa alcalina y fosfatasa no tamponada). Estos autores proponen el uso de gráficos de estrellas, telaraña, o radar en los que la variabilidad en la forma de la estrella refleja la diversidad o abundancia de los microorganismos involucrados, y el área de la estrella se asocia con la vitalidad (Bachmann y Kinzel, 1992). La combinación de diversidad y vitalidad se puede utilizar para la evaluación del uso sostenible de la tierra cuando se considera la microbiología del suelo.

En la literatura hay numerosos trabajos que determinan índices de calidad de suelos basados exclusivamente en el uso de las propiedades microbiológicas y enzimáticas (Aponte *et al.*, 2020; Gianfreda y Rao, 2019; Bastida, Zsolnay, Hernández y García, 2008; Paz-Ferreiro y Fu, 2013). Entre los índices basados exclusivamente en las actividades enzimáticas podemos indicar los siguientes: Índice de Alteración 3 (IA3) propuesto por Puglisi, Del Re, Rao y Gianfreda (2006) el cual está derivado de los coeficientes canónicos de un análisis discriminante, cuando se usan datos de suelos italianos no perturbados o control y otros sometidos a diversas perturbaciones como contaminación con metales pesados, agricultura intensiva, actividades mineras o erosión y estos autores indican que valores pequeños de este índice se asocian a una mayor calidad del suelo. Dicho índice mide el balance de tres actividades enzimáticas (β -glucosidasa, fosfomonoesterasa y ureasa). Otro índice muy utilizado es el propuesto por Hinojosa, García, Viñegla y Carreira (2004), García-Ruiz, Ochoa, Hinojosa y Carreira (2008) y García-Ruiz *et al.* (2009) conocido como la media geométrica. Dicho índice condensa la información de todas las actividades enzimáticas medidas en un único valor independiente de las unidades de medida y el intervalo. Recientemente Kuzyakov *et al.* (2020) también proponen el empleo de los gráficos radar o de araña (secuencia de radios equiangulares en el cual cada radio representa una variable) como una manera de visualizar los indicadores de calidad de suelos y de esa manera mostrar la sensibilidad de dichos indicadores; de este modo cuando la representación se hace utilizando el cociente del valor del indicador en el uso de la tierra en consideración y el valor del mismo

indicador en un ambiente no perturbado o de la práctica de manejo más sostenible; dicho cociente equivale a las funciones de puntuación “más es mejor” que se utilizan en los cálculos de los índices de calidad de suelos (Andrews *et al.*, 2004). Así todos los parámetros estarán estandarizados o normalizados entre 0 y 1, dichos valores representan respectivamente la peor y la mejor condición de la calidad, independiente de los valores absolutos medidos para cada indicador y serán adimensionales.

El objetivo de este trabajo es determinar varios índices de la calidad de los suelos (ICS) de la cuenca del lago de Valencia sometidos a diferentes usos, utilizando las actividades enzimáticas de los mismos. Algunos de los datos usados en este estudio ya fueron reportados en la parte I de esta serie de trabajos (Ruiz-Dager y Paolini, 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio fue realizado en la cuenca del lago de Valencia, la cual se encuentra ubicada en la región centro norte de Venezuela. El clima de la cuenca es tropical húmedo. En esta zona se presenta una marcada biestacionalidad climática, caracterizada por un período de bajas precipitaciones (enero, febrero y marzo), y otro de altas precipitaciones (junio, julio, y agosto), que varían entre 900 mm y 1150 mm, con un promedio anual de 1000 mm. La temperatura media anual es 24.6 °C.

Se escogieron diez suelos dentro de las tierras planas de la cuenca del lago de Valencia, cinco de ellos de origen lacustre y cinco de origen aluvial (Cuadro 1). Se incluyeron dos suelos bajo vegetación natural o nativa, uno lacustre (LVN) y otro aluvial (AVN), los cuales no han sido cultivados ni regados y por lo que se consideraron como suelo control en cada caso. Los suelos restantes se encuentran bajo cultivo de caña de azúcar o de banano y son regados con agua de distinto origen o composición.

Los suelos lacustres son muy pocos evolucionados, presentan un perfil de tipo A sobre C con alto contenido de carbonatos, originados por el retiro de las aguas del lago y clasifican todos como *Mollic Ustifluvents*, francosa, carbonática, mixta, isohipertérmica, y los aluviales son suelos recientes cuyo material parental proviene de los bloques montañosos adyacentes, profundos, neutros, fértiles, bien drenados y clasifican como *Fluentic Ustropepts*, francosa gruesa mixta

Cuadro 1. Características de los suelos estudiados.
Table 1. Characteristics of the soils studied.

Origen del Suelo	Uso del suelo	Siglas	Tipo de agua de riego
Lacustre	Vegetación nativa	LVN	Ninguna
		LC1	Lago de Valencia (no tratada)
	Caña de azúcar	LC2	Pozo profundo
		LC3	Residual no tratada
Aluvial	Banano	LB1	Embalse Taigüaigüay (tratada)
	Vegetación nativa	AVN	Ninguna
	Caña de azúcar	AC1	Río Aragua (Residual no tratada)
		AC2	Embalse Zuata (tratada)
	Banano	AB1	Embalse Zuata (tratada)
		AB2	Río Turmero (Residual no tratada)

isohipertérmica, a excepción del suelo AB2 que clasifica como *Fluventic Haplustolls* (Elizalde, Vilorio y Rosales, 2007).

Para estimar la calidad de los suelos de la Cuenca del Lago de Valencia se usaron tres expresiones matemáticas usando los datos indicados en el Cuadro 2:

a) Índice de alteración de suelos (IA3) propuesto por Puglisi *et al.* (2006) expresado por la siguiente ecuación:

$$IA3 = 7.87 * \beta\text{-GLU} - 8.22 * FAC - 0.49 * UR \quad (1)$$

Donde $\beta\text{-GLU}$ ($\mu\text{mol pNF g}^{-1} \text{h}^{-1}$), FAC ($\mu\text{mol pNF g}^{-1} \text{h}^{-1}$) y UR ($\mu\text{g N-NH}_4^+ \text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$) representan los valores de las actividades enzimáticas de β -glucosidasa, fosfomonoesterasa ácida y ureasa respectivamente.

b) Media Geométrica de actividad enzimática empleado por Hinojosa *et al.* (2004), García-Ruiz *et al.* (2008) y García-Ruiz *et al.* (2009) el cual se calcula como:

$$MG_{ac} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n AE} = \sqrt[n]{DH * ARG * FAC * FAL * GLU * UR * PROT} \quad (2)$$

Donde DH, ARG, FAC, FAL, GLU, UR y PROT representan los valores de las actividades enzimáticas deshidrogenasa, amonificación de la arginina, fosfomonoesterasa ácida, fosfomonoesterasa alcalina, β -glucosidasa, ureasa y proteasa respectivamente.

c) Uso de gráficos de radar o estrella y cálculo del área del polígono propuesto por Kuzyakov *et al.* (2020).

Este índice se basa en la comparación de las áreas del polígono generado por el gráfico radar de los valores de las actividades enzimáticas en el suelo control y en los suelos cultivados. Previamente se realiza una estandarización de los parámetros bajo estudio a la unidad, para ello se calcula: $stdP_i = P_{AGR} / P_{VEGNAT}$, donde P_{AGR} es el valor de la actividad enzimática particular para los suelos agrícolas cultivados con caña de azúcar o banano y P_{VEGNAT} el valor que toma la actividad de dicha enzima bajo la vegetación nativa. En nuestro caso, el polígono generado por las actividades de las enzimas estudiadas es un heptágono, donde el correspondiente al suelo bajo vegetación nativa tendrá radios de igual magnitud por lo tanto es un heptágono regular, a diferencia de los suelos cultivados para los cuales los radios serán diferentes, en otras palabras, un heptágono irregular. El área del heptágono se calcula como la sumatoria de las áreas de los siete triángulos escalenos individuales, en los que uno de los vértices está en el centro del gráfico y los otros dos vértices están constituidos por las magnitudes de dos radios consecutivos o adyacentes, y uno de los ángulos corresponde al ángulo central del polígono (51.43°) y luego se aplica la fórmula del área de un triángulo conociendo el valor de dos lados y el seno del ángulo formado por dichos lados o sea: $\text{Área} = 0.5 * stdP_i * stdP_j * \text{sen } 51.43^\circ$ donde $stdP_i$ y $stdP_j$ son los valores de dos actividades enzimáticas estandarizadas adyacentes y el área para cada polígono generado será la suma de los siete triángulos:

$$\text{Área} = 0.5 * \text{sen } 51.43^\circ * (\text{std}_{\text{DH}} * \text{std}_{\text{ARG}} + \text{std}_{\text{ARG}} * \text{std}_{\text{GLU}} + \text{std}_{\text{GLU}} * \text{std}_{\text{FAC}} + \text{std}_{\text{FAC}} * \text{std}_{\text{FAIC}} + \text{std}_{\text{FALC}} * \text{std}_{\text{UR}} + \text{std}_{\text{UR}} * \text{std}_{\text{Prot}} + \text{std}_{\text{Prot}} * \text{std}_{\text{DH}}) \quad (3)$$

Dicha fórmula se puede generalizar para cualquier número de parámetros usados en el grafico radar:

$$\text{Area} = 0.5 * \sum_{i=1}^n \text{stdP}_i * \text{stdP}_j * \text{sen} \left(\frac{2\pi}{n} \right) \quad (4)$$

Donde stdP_i y stdP_j son los parámetros i o j estandarizados, n número de parámetros utilizados y π (3.14).

Se define como índice de calidad de suelos por área, el cociente entre el área del polígono del suelo cultivado y el área del polígono del suelo bajo vegetación nativa o control; $\text{ICS}_{\text{Area}} = \text{Area}_{\text{CULT}} / \text{Area}_{\text{VN}}$.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 3 se resumen los resultados obtenidos para cada uno de los tres índices de calidad de suelos estimados con los atributos biológicos considerados.

Los índices que a continuación se describen se calcularon considerando solamente las actividades enzimáticas. El índice de alteración 3 (IA3) permite estimar la calidad del suelo a partir de los cambios de tres enzimas (β -glucosidasa, fosfatasa ácida y ureasa). El mismo fue validado por el autor original con tres suelos en condiciones alteradas y no alterados y

aplicado a datos de la literatura anteriores al trabajo en diferentes condiciones (erosionados, escombreras de mina recuperados por reforestación, bajo labranza convencional y cero labranzas y contaminados con metales pesados).

En años recientes el índice IA3 ha permitido por ejemplo, diferenciar la calidad del suelo en pastizales de la zona húmeda de Galicia, España (Paz-Ferreiro, Trasar, Leirós, Seoane y Gil, 2009); en plantaciones de manzano bajo manejo orgánico y convencional en Sudáfrica (Meyer, Wooldridge y Dames, 2014), en suelos de Italia enmendados con residuos de la industria del olivar (Innangi *et al.*, 2017) y en suelos de diferentes orígenes en Sudáfrica, donde se usaron aguas residuales de la industria vitícola y municipales (Van Huyssteen, Mulidzi, Meyer y Wooldridge, 2020) y más recientemente en suelos enmendados con biochar y lixiviados de vermicomposts en Italia (Becagli, Arduini y Cardelli, 2022). Todos los anteriores estudios asocian valores más negativos del IA3 con una mejor calidad de suelos. De acuerdo a los resultados de este estudio, se pudo observar que las puntuaciones del IA3 de los suelos bajo vegetación nativa fueron menores que las correspondientes a los suelos cultivados (Cuadro 3), lo que coincide con los hallazgos de otras investigaciones (Leirós, Trasar, García y Gil, 1999; Trasar-Cepeda, Leiros, Seoane y Gil, 2000). En el caso de los suelos lacustres, los que estaban sembrados con caña de azúcar reflejaron las mayores puntuaciones de IA3, mientras que, en los suelos aluviales, los valores más altos de IA3 se registraron en los que se encontraban

Cuadro 2. Actividades enzimáticas promedio en suelos de la cuenca del Lago de Valencia.

Table 2. Mean enzymatic activities of soils of the Valencia Lake watershed.

Suelos	Deshidrogenasa	Amonif. Arginina	Fosfomono. Acida	Fosfomono. Alcalina	β -glucosidasa	Ureasa	Proteasa
----- $\mu\text{g Producto g}^{-1} \text{h}^{-1}$ -----							
LVN	746.2	9.66	897.8	2112.0	218.1	81.2	404.4
LC1	327.1	3.76	317.0	961.1	44.1	42.1	200.8
LC2	315.9	3.39	395.2	995.7	50.9	47.9	177.6
LC3	167.7	7.09	435.0	942.7	64.3	62.0	290.6
LB1	379.9	4.34	503.1	1088.6	116.2	86.4	311.4
AVN	536.2	6.44	358.1	1336.3	109.9	86.1	296.3
AC1	307.9	4.70	175.7	787.5	67.0	31.6	147.6
AC2	198.8	4.02	152.0	807.0	38.0	36.4	114.7
AB1	18.0	2.83	97.8	302.6	18.4	16.5	67.4
AB2	69.3	3.31	134.3	553.8	42.6	24.9	105.9

Cuadro 3. Índices de calidad para suelos de la cuenca del Lago de Valencia bajo diversos tipos de manejo.
Table 3. Soil quality indices for the Lake Valencia basin under different types of management.

	Índices Enzimáticos		
	IA3	MG _{ac}	IC _{Area}
Suelos Lacustres			
LVN	-80.5	267	1.00
LC1	-36.9	105	0.17
LC2	-43.9	109	0.18
LC3	-52.4	128	0.27
LB1	-65.5	161	0.40
Suelos Aluviales			
AVN	-57.1	173	1.00
AC1	-22.1	94	0.30
AC2	-24.7	79	0.21
AB1	-17.7	57	0.12
AB2	-12.8	32	0.05

bajo banano (Cuadro 3). Para ambos tipos de suelos, las puntuaciones más altas del índice de alteración IA3 se presentaron en los sitios que revelaron los mayores valores del cociente de eficiencia metabólica qCO_2/C_{org} (Ruiz-Dager y Paolini, 2021). Al correlacionar estas dos variables, se observó entre las mismas una correlación positiva y estadísticamente significativa ($P < 0.05$), en la que el mejor ajuste se logró con la regresión logarítmica, que arrojó un $R^2 = 0.710$ (Figura 1).

Este hallazgo respalda los resultados obtenidos al calcular el índice de alteración IA3, ya que los valores

más bajos del qCO_2/C_{org} corresponden a los suelos en los cuales los microorganismos son más eficientes desde el punto de vista energético, mientras que los valores más altos podrían reflejar una disminución de la biomasa microbiana y un sustrato menos rico y de menor calidad en carbono orgánico (Dilly, 2005). En consecuencia, el índice IA3 estaría discriminando los suelos con mayor o menor alteración desde el punto de vista microbiológico.

La media geométrica de las actividades enzimáticas (MGae) es un índice general para resumir información de las enzimas con diferentes unidades y rango de

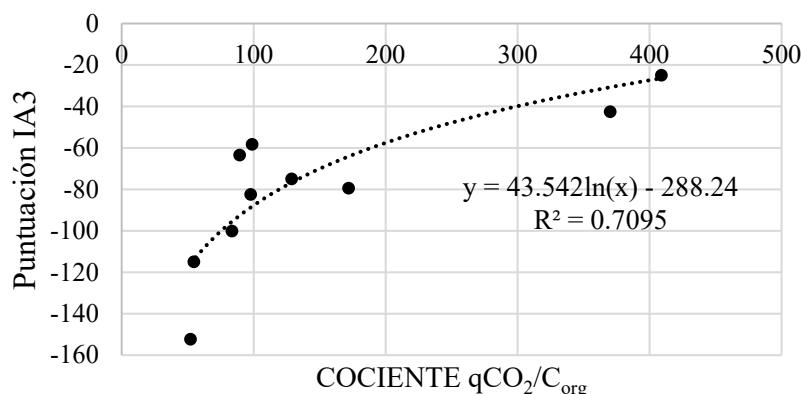


Figura 1. Correlación entre las puntuaciones del índice de alteración IA3 y el cociente de eficiencia metabólica qCO_2/C_{org} en los suelos estudiados.

Figure 1. Correlation between alteration index scores IA3 and metabolic efficiency ratio qCO_2/C_{org} in the studied soils.

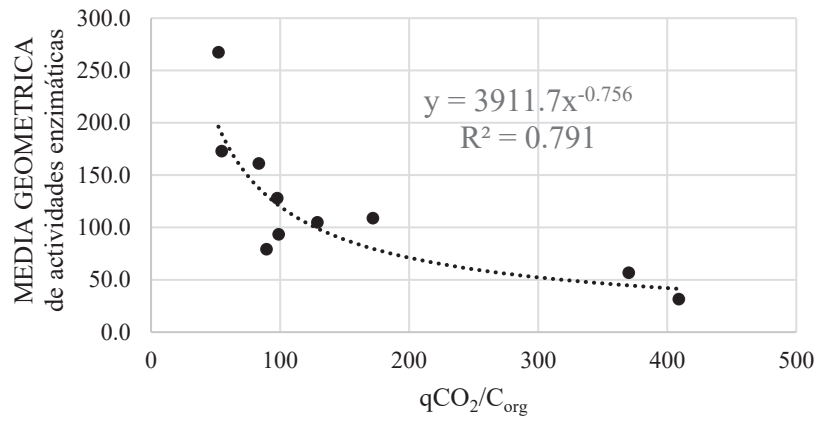


Figura 2. Correlación entre la MGae y el cociente de eficiencia metabólica qCO_2/C_{org} en los suelos estudiados.

Figure 2. Correlation between MGae and the metabolic efficiency ratio qCO_2/C_{org} in the studied soils.

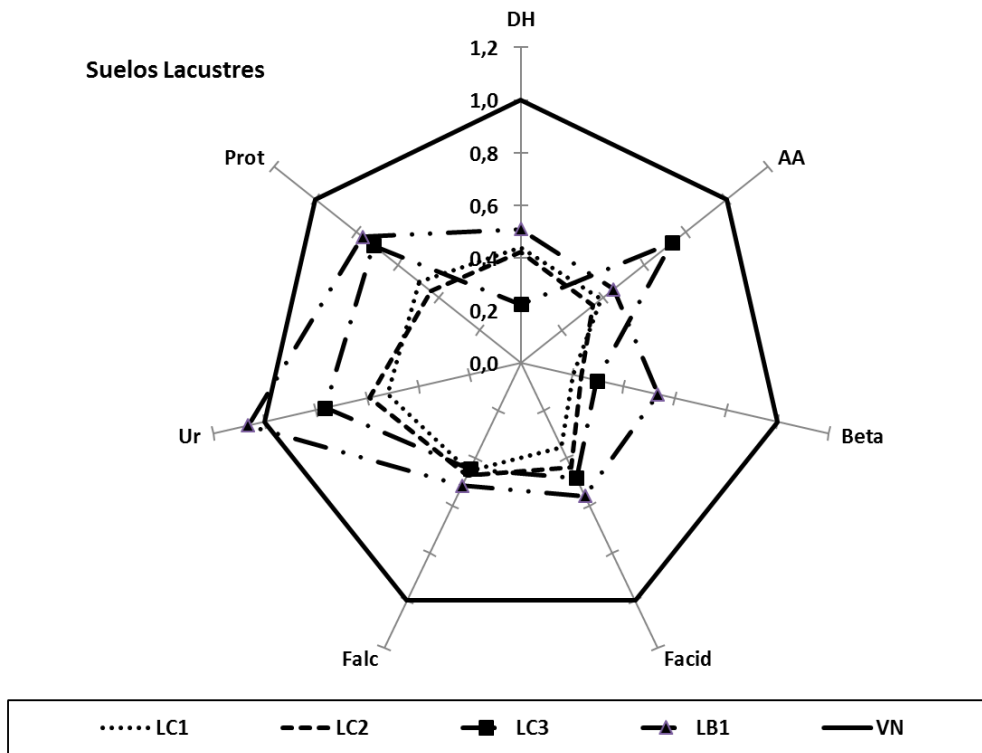


Figura 3. Índice de Calidad de Suelo por Área (ICS_{Area}) para los suelos lacustres bajo diferentes tipos de uso: suelos cultivados con caña de azúcar (C), banano (B) y vegetación nativa (VN).

Figure 3. Soil Quality Index by Area (ICS_{Area}) for lacustrine soils under different types of use: soils cultivated with sugar cane (C), banana (B) and native vegetation (VN).

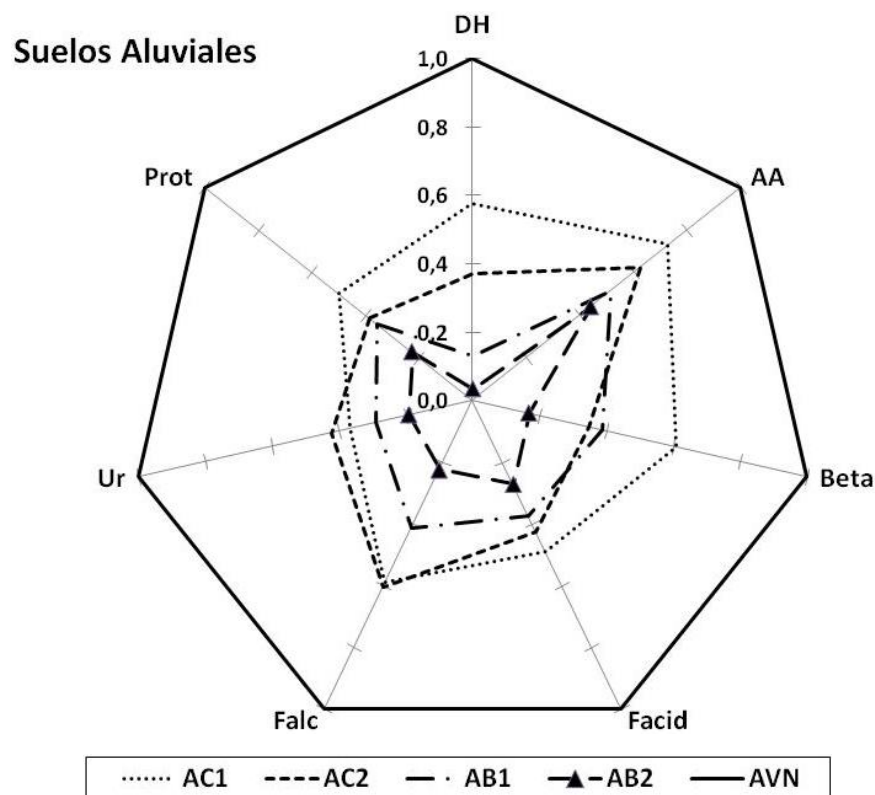


Figura 4. Índice de Calidad de Suelo por Área (ICS_{Area}) para los suelos aluviales bajo diferentes tipos de uso: suelos cultivados con caña de azúcar (C), banano (B) y vegetación nativa (VN).

Figure 4. Soil Quality Index by Area (ICS_{Area}) for alluvial soils under different types of use: soils cultivated with sugarcane (C), banana (B) and native vegetation (VN).

variación (Hinojosa *et al.*, 2004). La MGae ha sido utilizada como un índice de la calidad del suelo en diferentes situaciones, así por ejemplo en sitios contaminados con metales pesados (Hinojosa *et al.*, 2004), en suelos sometidos a prácticas de manejo orgánico y convencional (García-Ruiz *et al.*, 2008; García-Ruiz *et al.*, 2009), en suelos enmendados con biochar (Paz-Ferreiro, Gascó, Gutiérrez y Méndez, 2012) y en suelos agrícolas bajo barbecho (Sharma *et al.*, 2016), en los que ha logrado discriminar entre las distintas situaciones evaluadas. En esas investigaciones, los suelos que presentaban las mejores condiciones desde el punto de vista microbiológico, mostraron mayores valores de la MGae.

En el presente estudio, los suelos que se encontraban bajo vegetación nativa presentaron los valores más altos de la media geométrica, seguidos por los valores promedios de los suelos bajo caña de azúcar y banano, en el orden: Vegetación Nativa > Caña de azúcar > Banano (Cuadro 3).

En promedio, las MGae de los suelos cultivados con caña de azúcar y banano resultaron ser 53.2% y 70.3% menores que la MGae de los suelos bajo vegetación natural, respectivamente. En concordancia con los resultados obtenidos para el índice de alteración IA3, los valores más altos de la MGae se presentaron en los sitios que mostraron los menores valores del cociente de eficiencia metabólica qCO_2/C_{org} , por lo que al relacionar estas dos variables, se obtuvo una correlación negativa y estadísticamente significativa ($P < 0.05$), en la que el mejor ajuste se logró con la regresión potencial, que arrojó un $R^2 = 0.791$ (Figura 2), y que estaría vinculando la MGae con un parámetro que integra la respiración basal, la biomasa microbiana y el contenido de carbono orgánico en un solo valor, cuya magnitud indica que los microorganismos son más eficientes desde el punto de vista energético en la medida en que este cociente es menor. De los resultados podría inferirse que la MGae logró discriminar entre los suelos con condiciones más favorables o desfavorables para la actividad microbiana.

Un gráfico de radar es un método gráfico de visualización de datos multivariados en dos dimensiones, donde tres o más variables cuantitativas son representadas en ejes o radios a partir de un mismo punto y cada radio representa una variable cuya longitud es proporcional a la magnitud de la variable. La posición relativa y el ángulo de los ejes es típicamente poco informativo. Se traza una línea que conecta los valores para cada uno de los radios y se forma un polígono y se compara la forma y el tamaño de los mismos. Kuzyakov *et al.* (2020) definieron un índice de calidad de suelos como el cociente del área para parcelas degradadas y el área de la parcela natural o no degradada y fue validado en dos cronosecuencias de restauración en suelos desarrolladas bajo un bosque deciduo (Luvic Phaeozem) y otro bajo estepa seca (Calcic Chernozem) en Rusia, en los cuales tenían parcelas agrícolas de más de cien años en uso, pero con diferentes años de abandono; los datos demostraron una mayor degradación en Phaeozem que en el Chernozem y que la recuperación es más rápida en el Chernozem (aprox. 20 años) en comparación con el Phaeozem que requiere casi 70 años.

En las Figuras 3 y 4 se muestran los gráficos de radar para cada tipo de suelo (lacustre y aluvial) bajo los dos tipos de uso de la tierra (caña de azúcar y banano) donde vemos que ambos usos disminuyen la calidad del suelo al compararse con el suelo bajo vegetación nativa (no deteriorado) y confirma lo encontrado por los otros índices. Llama la atención que aquellos suelos lacustres cultivados que reciben aportes orgánicos externos presentaron los mayores índices (Cuadro 3), como es el caso del suelo lacustre bajo caña de azúcar (LC3) regado con aguas residuales o el suelo bajo cultivo de banano (LB1), el cual además de ser regado con aguas servidas tratadas, adicionalmente recibe gallinaza como enmienda orgánica y para este último suelo la actividad de la enzima ureasa resultó ligeramente mayor que en el suelo bajo vegetación nativa y por consiguiente dicho vértice sobresale en el gráfico de radar. En el caso de los suelos aluviales cultivados, todos ellos reciben aguas de los ríos Aragua y Turmero altamente contaminados y eventualmente, de acuerdo a la disponibilidad, aguas del embalse Zuata; los suelos sembrados con bananos (AB1 y AB2), los cuales anteriormente estaban cultivados con maíz, probablemente ya degradados, presentan menores índices a diferencia de los cultivados con caña de azúcar.

CONCLUSIONES

Se comprobó que las propiedades bioquímicas, en particular las actividades enzimáticas, son apropiados indicadores de la calidad del suelo y con ellas fue posible estimar tres diferentes índices de calidad.

Estos índices demostraron que el uso agrícola causa una perturbación del balance natural del suelo, siendo el orden: vegetación natural > caña de azúcar > banano. El índice de alteración (IA3) y la media geométrica enzimática (MGe) correlacionaron significativamente con el cociente de eficiencia metabólica ($q\text{CO}_2/C_{\text{org}}$). Los gráficos de radar para cada tipo de suelo (lacustre y aluvial) bajo los dos tipos de uso de la tierra (caña de azúcar y banano) confirmaron lo encontrado por los otros índices. Los suelos sembrados con ambos cultivos mostraron una menor calidad en comparación con los suelos de referencia bajo vegetación nativa.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

El conjunto de datos utilizados y analizados en este estudio son propiedad del Laboratorio de Fertilidad de suelos de la Universidad Central de Venezuela y están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

Se contó con el financiamiento y apoyo de los Laboratorios de Fertilidad de suelos y Agrología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, Núcleo Maracay.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Magaly Ruiz-Dager (M.R.D) y Jorge Paolini (J.P). Análisis: M.R.D y J.P. Metodología: M.R.D y J.P. Escritura y preparación del borrador original: M.R.D y J.P. Ambos autores han leído y están de acuerdo con la versión final publicada de este manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

M.R.D agradece a las autoridades de la Universidad Nacional Experimental Rómulo Gallegos por el apoyo administrativo y al Postgrado de Ciencia del Suelo de la Universidad Central de Venezuela por la formación académica adquirida durante el desarrollo de este trabajo. A los Doctores Roberto Villafañe y Franky Méndez por su contribución en la selección y el muestreo de los suelos estudiados, y por la información relativa a los mismos, así como a los propietarios de las fincas muestreadas por el acceso a sus tierras y el apoyo logístico en el campo. A la TSU Ana Torres y la ingeniera Linda Marilyn Aular, por su ayuda en la realización de los análisis de laboratorio. Los autores agradecen al editor técnico y a los revisores de Terra Latinoamericana por las observaciones para mejorar este artículo.

LITERATURA CITADA

- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardela, C. A. (2004). The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society America Journal* 68(6), 1945–1962. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>
- Aponte, H., Medina, J., Butler, B., Meier, S., Cornejo, P., & Kuzyakov, Y. (2020). Soil quality indices for metal (loid) contamination: An enzymatic perspective. *Land Degradation & Development*, 737, 2700–2719. <https://doi.org/10.1002/ldr.3630>
- Bachmann, G., & Kinzel, H. (1992). Physiological and ecological aspects of the interaction between plant roots and rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(6), 543–552. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90079-D](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90079-D)
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma*, 147(3-4), 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>
- Becagli, M., Arduini, I., & Cardelli, R. (2022) Using biochar and vermiwash to improve biological activities of soil. *Agriculture*, 12(2), 178. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020178>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Duen, G., De Goude, R., ... Brussaard, L. (2018). Soil quality- A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120(1), 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Cardoso-Nogueira, E. J. B., Vasconcellos-Figueiredo, R. L., Bini, D., Miyauchi-Horta, M. Y., Dos Santos-Alcantara, C., Alves-Lopes, P. R., ... Nogueira, M. A. (2013). Soil health: looking for sustainable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Scientia Agricola*, 70(4), 274–289. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Cerri, C. E. P., Franco, A. L. C., Tormena, C. A., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS One*, 11(3), e0150860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>
- Dilly, O., & Blume, H. P. (1998). Indicators to assess sustainable land use with reference to soil microbiology. *Advances in GeoEcology*, 31, 29–36.
- Dilly, O. (2005). Microbial energetics in soils. In P. Buscot & A. Varma (Eds.). *Microorganisms in soils: roles in genesis and functions. Soil Biology, Volume 3.* (pp. 123–138). Berlin, Germany: Springer https://doi.org/10.1007/3-540-26609-7_6
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. En W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment.* (pp. 3–21). Madison, WI, USA: SSSA Special Publications <https://doi.org/10.2136/sssaspepub35.c1>
- Elizalde, G., Vilorio, J., & A. Rosales. (2007). Geografía de suelos de Venezuela. En *GeoVenezuela, Volumen 2. Medio físico y recursos ambientales* (pp. 433–435). Caracas, Venezuela: Fundación Empresas Polar.
- Filip, Z. (2002). International approach to assessing soil quality by ecologically-related biological parameters. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88(2), 169–174. [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(01\)00254-7](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(01)00254-7)
- García-Ruiz, R., Ochoa, V., Hinojosa, M. B., & Carreira, J. A. (2008). Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9), 2137–2145. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.023>
- García-Ruiz, R., Ochoa, V., Viñegla, B., Hinojosa, M. B., Peña-Santiago, R., Liébanas, G., ... Carreira, J. A. (2009). Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: Influence of seasonality and site features. *Applied Soil Ecology*, 41(3), 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.004>
- Gianfreda, L., & Rao, M. A. (2019). Soil enzymes activities for soil quality assessment. In J. C. Sanchez Hernandez (Ed.) *Bioremediation of agricultural soils* (pp. 239–261). Boca de Ratón, FL, USA: CRC Press <https://doi.org/10.1201/9781315205137-12>
- Hinojosa, M. B., García-Ruiz, R., Viñegla, B., & Carreira J. A. (2004). Microbiological rates and enzyme activities as indicators of functionality in soils affected by the Aznalcollar toxic spill. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(10), 1637–1644. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.006>
- Innangi, M., Niro, E., D'Ascoli, R., Danise, T., Proietti, P., Nasini, L., ... Fioretto, A. (2017). Effects of olive pomace amendment on soil enzyme activities. *Applied Soil Ecology*, 119, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.015>
- Kuzyakov, Y., Gunina, A., Zamanian, K., Tian, J., Luo, Y., Xu, X., ... Guillaume, T. (2020). New approaches for evaluation of soil

- health, sensitivity and resistance to degradation. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7(3), 282-288. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020338>
- Leirós, M.C., Trasar-Cepeda, C., García-Fernández, F., & Gil-Sotres, F. (1999). Defining the validity of a biochemical index of soil quality. *Biology Fertility of Soils*, 30(1), 140-146. <https://doi.org/10.1007/s003740050600>
- Meyer, A. H., Wooldridge, J., & Dames, J. F. (2014). Relationship between soil alteration index three (AI3), soil organic matter and tree performance in a 'Cripp's Pink'/M7 apple orchard. *South African Journal of Plant and Soil*, 31(3), 173-175. <https://doi.org/10.1080/02571862.2014.944229>
- Mijangos, I., Pérez, R., Albizu, I., & Garbisu, C. (2006). Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme and Microbial Technology*, 40(1), 100-106. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.10.043>
- Nortcliff, S. (2002). Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 161-168. [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(01\)00253-5](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(01)00253-5)
- Paz-Ferreiro, J., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., Seoane, S., & Gil-Sotres, F. (2009). Biochemical properties in managed grassland soils in a temperate humid zone: modifications of soil quality as a consequence of intensive grassland use. *Biology and Fertility of Soils*, 45(7), 711-722. <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0382-y>
- Paz-Ferreiro, J., Gascó, G., Gutiérrez, B., & Méndez, A. (2012). Soil biochemical activities and geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48(5), 511-517. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0644-3>
- Paz-Ferreiro, J., & Fu, S. (2013). Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations. *Land Degradation & Development* 27(1): 14-25. <https://doi.org/10.1002/ldr.2262>
- Puglisi, E., Del Re, A. A. M., Rao, M. A., & Gianfreda, L. (2006). Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1673-1681. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.11.021>
- Ruiz-Dager, M., & Paolini, J. (2021). Indicadores biológicos de suelos lacustres y aluviales de Venezuela bajo diferentes usos. Parte 1. Actividad microbiana y coeficientes ecofisiológicos. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-11. e922. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.922>
- Sharma, K.L., Srinivasa-Rao, Ch., Suma-Chandrika, D., Nandini, N., Munnalal., Sammi Reddy, K., ... Satish-Kumar, T. (2016). Assessment of GMean biological soil quality indices under conservation agriculture practices in rainfed Alfisol soils. *Current Science*, 111(8), 1383-1387. <https://doi.org/10.18520/cs/v111/i8/1383-1387>
- Trasar-Cepeda, C., Leiros, M. C., Seoane, S., & Gil-Sotres, F. (2000). Limitations of soil enzymes as indicators of soil pollution. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(13), 1867-1875. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00160-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00160-7)
- Van Huyssteen, I., Mulidzi, A. R., Meyer, A. H., & Wooldridge, J. (2020). Alteration Index Three facilitates interpretation of β -glucosidase, acid-phosphatase and urease activities in soils irrigated with diluted winery wastewater. *South Africa Journal Enology Viticulture*, 41(2), 238- 244. <https://doi.org/10.21548/41-2-4195>