

Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática

E. Sarmiento¹, S. Fandiño¹, L. Gómez¹

(1) Facultad de ingeniería ambiental, Universidad Central, 110311 Bogotá, Colombia

*Autor de correspondencia: E. Sarmiento [esarmientor1@ucentral.edu.co].

> Recibido el 16 de junio de 2018 - Aceptado el 10 de septiembre de 2018

Sarmiento, E., Fandiño, S., Gómez, L. 2018. Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática. *Ecosistemas* 27(3):130-139. Doi.: 10.7818/ECOS.1598

Una importante problemática ambiental es la degradación y pérdida de suelo, particularmente por prácticas agrícolas convencionales. Éstas han conllevado a la alteración y detrimento de propiedades físicas, químicas y biológicas, fomentando la aparición de fenómenos como la erosión, la acidez, la salinidad, la compactación edáfica y la contaminación. Por tal motivo, se ha considerado fundamental evaluar el estado actual de un suelo bajo un uso específico y, para esto, se ha desarrollado el concepto de calidad del suelo. El objetivo de la presente revisión fue inferir las razones por las cuáles se emplean los índices de calidad del suelo más utilizados. Para ello, se realizó una búsqueda y análisis en artículos originales sobre los índices existentes, en la base de datos de referencias bibliográficas y citas SCOPUS utilizando la frase "Soil Quality Index" en el título de los artículos. Se recuperaron 70 artículos y, en ellos, se encontraron 32 índices. De éstos, un índice, el Índice Aditivo Ponderado, es el único claramente utilizado en múltiples investigaciones. Asimismo, este índice posee muchos más indicadores (67) que los demás, comparable únicamente con el segundo más utilizado (Índice Unificado). Los tres índices más populares poseen más de 20 indicadores, éstos son químicos, físicos, biológicos y químicos. Tomando como referencia los indicadores comunes a los tres índices más usados, podemos decir que un índice confiable debe contener C de biomasa microbiana, potencial de mineralización de N, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, porosidad, densidad aparente y conductividad hidráulica.

Palabras claves: agroecología; indicadores biológicos; indicadores de calidad suelo; índice SQLw; sostenibilidad edáfica

Sarmiento, E., Fandiño, S., Gómez, L. 2018. Indexes of soil quality. A systematic review. *Ecosistemas* 27(3):130-139. Doi.: 10.7818/ECOS.1598

One of the most critical environmental problems is the degradation and loss of soil, particularly by conventional agricultural practices. These practices have led to the alteration and degradation of physical, chemical and biological soil properties, resulting in erosion, acidity, salinity, soil compaction and pollution. Thus, the concept of soil quality has been developed to be able to evaluate the status of a soil under a specific use. The objective of the present review was to infer the reasons for choosing the soil quality indexes most used. To do this, a search and analysis of original articles on the existing soil quality indexes in the SCOPUS database was carried out, using the phrase "Soil Quality Index" in the title of articles as search criteria. We found 70 articles using 32 indexes. Of these, one index, the Weighted Additive Index, is the only one clearly used in multiple investigations. Also, this index has many indicators (67) than the others, comparable only with the second most used (Unified Index). The three most popular indexes have more than 20 indicators, which are physical, chemical and biological. There are 8 indicators used in the 3 most popular indexes, which should be used in a reliable soil quality index: Microbial C biomass, N potential mineralization, pH, electric conductivity, cationic exchange, porosity, density and water conductivity.

Keywords: agroecology; biological indicators; edaphic sustainability; Soil quality indicators; SQLw index

Introducción

La degradación del suelo se ha convertido en una de las mayores preocupaciones actuales, debido a su importancia para la preservación de la vida (García et al. 2010). El origen de esta problemática ambiental se ha asociado principalmente a la actividad agraria de tipo industrial, pues ésta involucra prácticas como el uso irracional de insumos químicos externos, el empleo de maquinaria pesada, los monocultivos, el sobrepastoreo, y la sobreexplotación de recursos hídricos, las cuales impactan de manera negativa al suelo (Ferrerías et al. 2007). Con el fin de evaluar la sostenibilidad de un suelo, se ha introducido el concepto de calidad del suelo. Éste se puede entender como la capacidad del suelo para desempeñarse dentro de los límites de un ecosistema natural o mejorado,

sostener la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del aire y el agua y sostener la salud humana y el hábitat (Doran y Parkin 1994).

Para evaluar la calidad de un suelo y, así, determinar si el uso que se le está dando es sostenible ecológicamente, se ha recurrido al uso de índices e indicadores. Éstos últimos son propiedades del suelo medibles que afectan la capacidad de éste de ejercer una de sus funciones (Bastida et al. 2008). Existen tres categorías principales: físicos, químicos y biológicos (Bautista et al. 2004). Los indicadores físicos están compuestos por aquellas propiedades físicas asociadas con el uso eficiente del agua, los nutrientes y el uso de agroquímicos. Por su parte, los indicadores químicos están relacionados con las condiciones químicas que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora

del suelo y la disponibilidad de nutrientes para plantas y otros seres vivos (García et al. 2012). Por último, los indicadores biológicos son aquellos organismos o procesos desarrollados por éstos que, con su presencia o abundancia, señalan cambios o estados de ciertas propiedades o procesos del suelo (Pinilla 2000).

Por otro lado, los índices de calidad del suelo son variables numéricas que se obtienen luego de incluir una serie de indicadores de tipo físico, químico y biológico (De Paul Obade y Lal 2015). Los índices permiten una evaluación más exacta y confiable de la calidad del suelo usando métodos estadísticos como el conjunto mínimo de datos (MDS) y el análisis de componentes principales (PCA) (Orozco 2011).

La selección de indicadores para la construcción de índices de calidad del suelo es un procedimiento en el que aún no se ha alcanzado un consenso dentro de la comunidad científica (Mukherjee y Lal 2014). Lo anterior se debe, entre otras razones, a que existe una escasa estandarización de las metodologías, algunas regiones presentan una heterogeneidad del suelo muy alta que dificulta la aplicabilidad de los índices, y otras regiones poseen una mala definición de las condiciones naturales del suelo (Bastida et al. 2008).

No obstante, diversos autores han dado argumentos para la selección de indicadores específicos. Por ejemplo, Bastida et al. (2008) han señalado que, si bien los indicadores químicos y físicos son los que habitualmente se emplean para la evaluación de la calidad de suelos agrícolas, los indicadores biológicos son más sensibles a los cambios que éstos y pueden soportar una concepción de calidad del suelo más amplia. Con esta última afirmación coinciden varios autores como Paz-Ferreiro y Fu (2013) y Marinari et al. (2006). Con respecto a los indicadores físicos, García et al. (2012) establecen seis indicadores como los necesarios para la evaluación de la calidad física del suelo: estructura, densidad aparente, estabilidad de los agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial y conductividad hidráulica. Por su parte, Bastida et al. (2008) anotan que, para suelos agrícolas, uno de los indicadores físicos fundamentales es la estabilidad de agregados, pues sirve para evaluar la resistencia de un suelo a la erosión.

García et al. (2012) también señalan que los indicadores químicos más usados son la disponibilidad de nutrientes, el carbono orgánico total, el carbono orgánico lábil, el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de absorción de fosfatos, la capacidad de intercambio catiónico, los cambios en la materia orgánica, el nitrógeno total y el nitrógeno mineralizable. Por su parte, Bastida et al. (2008) afirman que el indicador más ampliamente usado es el pH, el cual pertenece a esta categoría. Asimismo, señalan que, para suelos agrícolas, los otros indicadores químicos más utilizados son materia orgánica y carbono orgánico, puesto que dan una evaluación de la capacidad de mantener el crecimiento de plantas.

Para los indicadores biológicos, Bastida et al. (2008) señalan el C de la biomasa microbiana como uno de los más empleados, por su capacidad para indicar cambios en el suelo debido a prácticas de manejo o procesos de contaminación o remediación. Estos autores también escriben que otros indicadores ampliamente utilizados son aquellos relacionados con la actividad microbiana y aquellos relacionados con actividades enzimáticas. Entre los primeros, mencionan a la respiración microbiana como el más popular, y entre los segundos, a la actividad de la deshidrogenasa, seguida por fosfatasa, β -glucosidasa, ureasa y arilsulfatasa, respectivamente. Según Etchevers (1999), las propiedades biológicas tienen una estrecha relación con propiedades físicas como la agregación, y químicas como la capacidad de intercambio iónico y la disponibilidad de nutrientes, determinando que un suelo es fértil cuando conserva dichas propiedades. Según García et al. (2012) y Shao et al. (2008), los indicadores biológicos más empleados son la respiración microbiana, las actividades enzimáticas del suelo, el C de la biomasa microbiana, el N de la biomasa microbiana, el ergosterol, y la abundancia y diversidad de hongos y bacterias. Por su parte, Paz-Ferreiro (2006) afirma que los microorganismos del suelo presentan un elevado potencial para emplearse como indicadores de su calidad,

pero advierte que este tipo de medidas tiene el inconveniente de la elevada variabilidad de los sistemas biológicos.

Medina (2012) afirma que los indicadores biológicos son los más confiables, ya que de forma directa o indirecta guardan siempre relación con la actividad microbiana del suelo. Además, estos indicadores son muy sensibles a las perturbaciones y su evaluación es fácil y rápida. Igualmente, este autor señala que el potencial mineralizable de nitrógeno proporciona una estimación de nitrógeno disponible en el suelo. Según Gil-Sotres et al. (2005), cuando se evalúa la sostenibilidad del suelo y sus usos, los indicadores claves deben incluir parámetros biológicos porque son sensibles a las pequeñas modificaciones que puede sufrir el suelo en presencia de cualquier agente degradante. Los indicadores biológicos son los que integran una gran cantidad de factores que dañan la calidad del suelo, como la abundancia y subproductos de micro y macroorganismos (Karlen et al. 1997).

De manera similar a lo que sucede con los indicadores, no se ha logrado un consenso acerca de cuáles son los índices más confiables, ni en qué situaciones se deben emplear. Sin embargo, Bastida et al. (2008) identificaron, en una revisión de literatura, los índices más destacados hasta 2008. Si bien estos autores no basan su selección en la recurrencia en la literatura, sí afirman que los índices más importantes son siete. El primero es el cociente metabólico (qCO_2), el cual es el índice más simple que se emplea para evaluar la calidad del suelo. Éste se relaciona con la respiración y la biomasa microbiana, pero Bastida et al. (2008) afirman que no es muy confiable por su simplicidad. Los siguientes tres son índices multiparamétricos (SQIa, SQI Unificado y SQIw), los cuales se utilizan para establecer diferencias entre sistemas de manejo, contaminación, y tipo de vegetación, proporcionando información sobre la función de los microorganismos específicos y sus enzimas en los procesos claves relacionados con la funcionalidad del suelo. El índice de adición (SQIa) es útil para evaluar la calidad del suelo, a pesar de su sensibilidad a los valores unitarios de los parámetros que utiliza. Por otro lado, el índice unificado (SQI Unificado) puede ser utilizado para monitorear y predecir los efectos de los sistemas y la gestión agrícola. Por último, el índice aditivo ponderado (SQIw) es utilizado para evaluar la calidad del suelo de un determinado lugar o ecosistema, permitiendo la comparación entre las condiciones a nivel de parcelas, campo o cuenca bajo diferentes usos del suelo y prácticas de manejo facilitando las decisiones de gestión adaptativas que promuevan prácticas agrícolas sostenibles. El quinto es el índice biológico de calidad del suelo (BSQ), el cual sirve para evaluar la variación en relación con la degradación del ecosistema; éste se basa en el estudio de microartrópodos del suelo. El sexto es el índice bioquímico de fertilidad del suelo, el cual se emplea para comparar el efecto de la fertilización orgánica y mineral. Por último, Bastida et al. (2008) mencionan el índice relativo de estabilidad del suelo (RSSI), el cual sirve para evaluar la capacidad de un suelo para recuperarse después de la contaminación en función de la actividad enzimática.

Debido a la diversidad de índices e indicadores utilizados para evaluar la calidad del suelo, el objetivo principal de esta revisión sistemática es inferir las razones por las cuáles se emplean los índices de calidad del suelo más utilizados. Para esto, se propusieron como objetivos específicos (1) determinar los índices que más se emplean en la literatura y (2) comparar la composición de los índices de calidad del suelo empleados en la investigación basada en la experimentación u observación en la literatura. Dicho objetivo parte de la hipótesis de que la selección de un índice depende de su robustez, es decir, del tipo, la calidad y la cantidad de indicadores que posee.

Materiales y métodos

Se realizó una revisión sistemática de literatura en la base de datos de referencias bibliográficas y citas Scopus. En ella, se seleccionaron los artículos originales que tuvieran la frase “soil quality index” en el título. Como criterio de inclusión, se eligieron los artí-

culos publicados entre 2001 y 2017 en idioma inglés, español o portugués. Posteriormente, se excluyeron manualmente artículos que no trataran de índices de calidad del suelo y se verificó que no hubiera artículos repetidos.

De los artículos seleccionados, se extrajeron los índices empleados y los indicadores que los conforman, y se tabularon. Para los índices, se calculó su recurrencia en las publicaciones y se estableció, para cada uno, el número de indicadores que lo constituían. Para los indicadores, se clasificaron según su tipo (físico, químico, biológico o bioquímico) y se determinó su recurrencia en los índices. Realizado esto, se pasó a establecer cuáles eran los índices más empleados, con más indicadores y su composición en términos de tipos de indicadores. Posteriormente, se contabilizó cuáles eran los indicadores más frecuentes en los índices. Para la corroboración de la hipótesis de investigación, se compararon la recurrencia de un índice en las publicaciones con los indicadores que lo comprendían, la cantidad de estos presentes, y su conformación según el tipo de indicadores.

Resultados y Discusión

Se obtuvieron 70 artículos originales que tenían el término «índice de calidad del suelo» en el título. En éstos, se encontraron 32 índices en total (**Tabla 1**). La mayoría de los artículos empleaban un solo índice exceptuando cuatro artículos, que utilizaron dos o más índices. Éstos fueron: [Nabiollahi et al. \(2017\)](#) que utilizó 3 índices; y [Barbiroli et al. \(2004\)](#), [Freitas et al. \(2012\)](#), y [Sharma y](#)

[Arora \(2010\)](#) que utilizaron 2 índices. Además, la mayoría de los índices (53.2%) sólo aparecen una vez en los artículos. Únicamente cinco índices aparecen más de dos veces: MSQI, BSQ, SQIa, SQI Unificado, y SQIw, los cuales aparecen 3, 4, 5, 6 y 23 veces, respectivamente (**Tabla 1**).

Comparando con los índices más comunes mencionados por [Bastida et al. \(2008\)](#), se encuentra que sólo uno de los mencionados por ellos, el BSQ, se encuentra entre los índices más utilizados en la literatura estudiada. Al ser la investigación de [Bastida et al. de 2008](#), tal vez se puede pensar que la elaboración de índices ha cambiado notoriamente en los últimos diez años y que los índices anteriormente empleados, han sido reemplazados en la actualidad por índices que se consideran más adecuados a pesar de que tengan una baja cantidad de indicadores, como es el caso del IND.

Hay que reseñar que no todos los índices son utilizados en todos los tipos de suelos (**Tabla 2**). El SQIw se utiliza en suelos de cultivo de trigo, maíz, remolacha, soya, frijol, pastizales, labranza, praderas degradadas y no degradadas. En segundo lugar, se encuentra el índice unificado, que es empleado en suelo sedimentarios costeros, latosoles, suelos de cultivo de café agroforestal, suelos no alterados por la intervención antropogénica, suelos semiáridos, suelos agrosilvopastoriles, suelos forestales y suelos de selva tropical. Luego se encuentra el SQIa el cual es utilizado en suelos forestales, andisoles, semiáridos, francos arcillosos y bosques naturales. El AQI se emplea en un tipo de suelo forestal teniendo similitud con el índice anterior. Por otro lado, el MSQI es utilizado sólo para suelos mineros recuperados. El SQIw modifi-

Tabla 1. Índices de calidad del suelo empleados en los artículos examinados, número de artículos donde aparecen y número de indicadores que se usan para su cálculo.

Table 1. Soil quality indexes, number of papers where used and number of indicators used by each index.

Índice	Abreviatura	Recurrencia	Indicadores empleados
Índice Bioquímico de la calidad del suelo	Cp=Cm	1	12
Índice de la evaluación integral de calidad del suelo	SAI	1	11
Índice ERY	ERY	1	22
Índice de trofismo del suelo forestal	ITGL	1	5
Índice integrado de calidad del suelo	IQI	1	10
Índice visual de calidad del suelo	-	1	18
Índice de materia orgánica del suelo	-	1	20
Índice Agronómico de la calidad del suelo	AQI	1	24
Índice no ponderado	SQIn	1	6
Índice de calidad del suelo derivado de Collembolan	-	1	7
Índice de calidad del suelo asociado a la recarga de agua subterránea	IQSRA	1	4
Índice de trazado	-	1	9
Índice de granja	-	1	9
Índice de eficiencia de producción relativa de la calidad del suelo	RPEI	1	5
Índice de la calidad del suelo mineral	-	1	6
Índice físico de la calidad del suelo	-	1	5
Índice sintético altamente informático de la calidad del suelo	IND	1	2
Índice aditivo ponderado modificado	SQIw modificado	2	22
Índice Ponderado	-	2	15
Índice espectral de la calidad del suelo	SSQI	2	20
Índice relativo de la calidad del suelo	RSQI	2	15
Índice de carbono orgánico del suelo	-	2	15
Índice Nemoro de calidad del suelo	SQIn	2	16
Índice Multifuncional de calidad del suelo	-	2	20
Índice del diámetro del peso medio agregado	AMWD	2	14
Índice de deterioro del suelo	-	2	18
Índice de acondicionamiento del suelo	SCI	2	9
Índice de calidad del suelo de la Mina	MSQI	3	23
Índice Biológico de calidad del suelo	BSQ	4	21
Índice de Adición	SQIa	5	26
Índice Unificado	Unificado	6	45
Índice aditivo ponderado	SQIw	23	67

Tabla 2. Índices más populares con el tipo de suelo donde se emplean y referencias.**Table 2.** Most popular indexes with the type of soil where they are used and references.

Índice	Tipo de suelo	Bibliografía
índice aditivo ponderado (SQIw)	Pastizal, praderas degradadas y no degradadas, cultivos de trigo, cultivos de remolacha, cultivo de maíz, cultivo de soya, cultivos de pastizal, cultivos de frijol, cultivo de labranza convencional, cultivos rotativos, cultivos de cinceles como sistemas de labranza reducida, Cultivos en mesetas semi-áridos	Masto et al. (2007), Masto et al. (2008), Aghasi et al. (2010), Qi et al. (2009), Candemir et al. (2010), Dadhwal et al. (2011), Sharma et al. (2011), Armenise et al. (2013), Li et al. (2013), Li et al. (2013), Sharma et al. (2014), Ivezić et al. (2015), Nakajima et al. (2015), Sharma et al. (2015), Veum et al. (2015), Hammac et al. (2016), Raiesi (2016), Raiesi & Kabiri (2016), Sofi et al. (2016), Supriyadi et al. (2016), Liu et al. (2017), Nabiollahi et al. (2017), Şeker et al. (2017)
Índice Unificado (SQI unificado)	Suelos sedimentos costeros, suelos no alterados tanto en sustratos mineralizados como en sustratos no mineralizados cercanos, suelos Latosol Amarillo distrófico, selva tropical, cultivos de café agroforestal, ecosistemas naturales con la mínima intervención antropogénica, suelos agrosilvopastoriles, suelos latosol Rojo-Amarillos, suelos semiáridos, suelos forestales	Costa et al. (2011), Blecker et al. (2012), Freitas et al. (2012), Do Carmo-Lucio et al. (2014), Gelaw et al. (2015), Thomazini et al. (2015)
índice de Adición (SQIa)	Suelo forestal, suelos bajo semiárido, suelos Andisoles, Bosques naturales, Suelo arenó-arilloso	Andrews et al. (2002), Andrews et al. (2003), Vasu et al. (2016), Leite et al. (2017), Nabiollahi et al. (2017)
Índice Agronómico de la calidad del suelo (AQI)	Suelo forestal	Barbiroli et al., 2004
índice de calidad del suelo de la Mina (MSQI)	Zona de bosque de sal natural no perturbada (<i>Shorea robusta</i>) contigua y una sobrecarga nueva no recuperada, suelos mineros recuperados	Mukhopadhyay et al. (2014), Pietrzykowski (2014), Mukhopadhyay et al. (2016)
índice ERY	Suelos de labranza convencional, rotativos, cinceles como sistemas de labranza reducida	Basak et al., 2016
índice aditivo ponderado (SQIw) modificado	Árido, semiárido, suelo de labranza, suelo limoso	Ancona et al. 2010, Hussain et al. 1998
Índice Biológico de calidad del suelo (BSQ)	Suelos de labranza convencional, rotativos, cinceles como sistemas de labranza reducida	Castillo & Joergensen (2001), Singh et al. (2009), Aspetti et al. (2010), Bobul'ská et al. (2015)

cado es empleado en suelos áridos, semiáridos, limosos y de labranza. Por otra parte, el índice ERY y el BSQI utilizan los mismos tipos de suelos, los cuales son suelos de labranza convencional, rotativos, y labranza reducida (Tabla 2).

Los índices presentan una cantidad muy heterogénea de indicadores, yendo desde el índice sintético altamente informativo de la calidad del suelo (IND) con dos hasta el índice aditivo ponderado (SQIw) con 67. Como se puede apreciar en la tabla 1, no existe una relación clara entre la cantidad de veces que se emplea un índice en investigación y el número de indicadores que contiene.

Los tres índices con 21 o más indicadores que no son ampliamente utilizados son el SQIw modificado (21 indicadores), el ERY (22 indicadores) y el AQI (24 indicadores). El primero es utilizado en dos artículos, mientras los siguientes sólo aparecen en una investigación cada uno. Para el caso del índice ERY, éste puede haber sido empleado en una sola investigación porque éste es exclusivo para evaluar la calidad del suelo en cultivos de arroz y éste es la única investigación que se ocupa de este tipo de cultivos. Sin embargo, no es claro por qué los otros dos índices no vuelven a ser empleados en la literatura, pues fueron propuestos por primera

vez en 2009 y 2011 y no se restringen a un tipo especial de condiciones o cultivo.

Con respecto a los cinco índices más populares, se encontró que el primero es el que tiene más indicadores (67), el segundo es el segundo con más indicadores (45), el tercero es el tercero con más indicadores (26), pero el cuarto es el séptimo con más indicadores (21), mientras el quinto es el quinto con más indicadores (Tabla 1). Puede no sorprender que el BSQ sea el cuarto índice más popular a pesar de contar con 21 indicadores, pues Bastida et al. (2008) ya lo habían señalado como un índice ampliamente utilizado. Según estos autores, esto se debe a que evalúa de manera satisfactoria la calidad de un suelo afectado por diferentes tipos de contaminación, basándose en microorganismos representativos en la estructura, función y composición de los sistemas ecológicos.

Si se entiende la robustez de un índice como la variedad de tipos de indicadores y la cantidad de éstos, se podría afirmar que, efectivamente, el índice más empleado en la literatura (SQIw) es el más robusto, pues, por un lado, tiene una cantidad de indicadores muy superior al resto y, por otro lado, tiene una distribución relativamente homogénea de tipos de indicadores.

No existe una tendencia única en la composición de los indicadores de los cinco índices más populares (**Fig. 1**). El primer índice (SQLw) es el único en tener una composición bastante proporcional entre los indicadores químicos, biológicos y físicos, mientras que el segundo tiene una proporción mucho mayor de indicadores químicos (58%) frente a los físicos (27%) y biológicos (11%). Asimismo, exceptuando el SQLw donde la proporción de indicadores químicos, físicos y biológicos es pareja, no existe un tipo de indicadores que claramente exceda a los otros. Efectivamente, el AQI y el SQI Unificado tienen una proporción superior de indicadores químicos (63% y 58% respectivamente), pero el BSQ y el SQLw modificado tienen una proporción mayor de indicadores biológicos (57% y 43%, respectivamente). Si se amplía el análisis a los ocho índices con más indicadores, el comportamiento es similar. En conjunto, la mayoría de indicadores utilizados en la literatura analizada son químicos (88) seguidos por los indicadores biológicos (51) y físicos (35) con un número mucho menor de indicadores bioquímicos (5) (**Fig. 2**).

Llama la atención que tres índices contienen únicamente indicadores químicos y biológicos. Esto refuta, en cierto modo, la hipótesis de Bastida et al. (2008), pues no contienen indicadores físicos. La tendencia en los ocho índices más populares es dar más peso a los indicadores químicos que a los físicos, lo que modifica la hipótesis de Bastida et al. (2008), en que, si bien varios autores tienen preferencia por los indicadores biológicos, los indicadores químicos siguen siendo los que más se emplean en la construcción de índices robustos. Sólo dos índices no soportan esta afirmación. Por un lado, y como ya se anotó, el índice SQLw tiene una distribución prácticamente homogénea con respecto a los indicadores químicos, físicos y biológicos y, por otro lado, el índice SQIa tiene como mayor proporción a los indicadores físicos (**Fig. 1**).

Si se acepta ya sea la hipótesis de Medina (2012) de que los indicadores más confiables para el establecimiento de la calidad de un suelo son los biológicos, o la de Gil-Sotres et al. (2005) de que una buena evaluación de la calidad del suelo debe basarse en indicadores biológicos, los indicadores que se emplean en la literatura aún no tienen la robustez adecuada. Únicamente en el BSQ los indicadores biológicos superan a los químicos, pero este

índice tiene el problema de sólo contener indicadores de estos dos tipos.

Continuando con la hipótesis de Gil-Sotres et al. (2005), se podría pensar que el ERY es un índice más robusto o confiable que el SQLw, pero este último tiene una cantidad de indicadores muy superior al primero (67 contra 22), explicando su popularidad. Esto podría explicar también la popularidad del segundo indicador (SQI Unificado), pues este tiene una cantidad de indicadores que dobla al ERY (45). Además, si bien la proporción de indicadores químicos (58%) casi que cuadruplica la de biológicos (15%), este índice posee los cuatro tipos de indicadores. Sin embargo, la cantidad de indicadores biológicos del ERY (10) es mayor al del SQI Unificado (7). Lo anterior, deja abierta la evaluación de la calidad del índice ERY y, por lo tanto, las causas de su poca utilización hasta el momento.

Si se aceptan las hipótesis de Bastida et al. (2008) y Medina (2012) de que los indicadores biológicos son los más confiables por ser los más sensibles a los cambios, los indicadores más robustos son el SQLw y el ERY, seguidos del SQI Unificado y el SQIa (**Fig. 1**).

Resumiendo, se puede decir que tres de los elementos que constituyen el concepto de robustez de un índice son la cantidad de indicadores, su heterogeneidad y su proporción. Si bien el tercero, el cuarto y el quinto índice en popularidad contienen 26, 21 y 23 indicadores, respectivamente, el índice más ampliamente empleado posee 67 indicadores y es seguido por uno con 45 indicadores. Esto sugiere que para la selección o construcción de un índice confiable se debería contar con una cantidad superior a 30 ó 40 indicadores.

Con respecto a su heterogeneidad y proporción, los resultados son más problemáticos. Se observa que los tres índices más empleados contienen indicadores de los cuatro tipos, lo que podría llevar a concluir que un buen índice es aquel que está conformado por indicadores biológicos, químicos, físicos y bioquímicos. Sin embargo, si se analizan los ocho índices, se aprecia que una cifra importante (37.5%) corresponde a índices constituidos por indicadores biológicos y químicos exclusivamente. Por otro lado, el único índice altamente empleado está constituido por una proporción prácticamente igual de indicadores químicos, físicos y biológicos.



Figura 1. Porcentaje de los tipos de indicadores en los ocho índices más usados.

Figure 1. Percentage of types of indicators in eight widely used indexes.

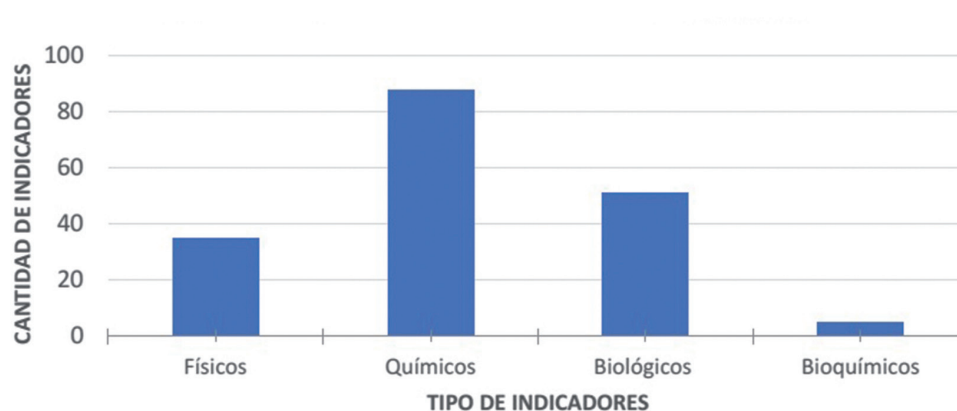


Figura 2. Número de indicadores por cada tipo.

Figure 2. Amount of indicators with respect to the type of indicator.

cos, pero la proporción de indicadores bioquímicos es bastante inferior. Así, se podría lanzar la hipótesis para corroboración de que un índice con una buena cantidad de indicadores de tipo químico y biológico es confiable o, por lo menos, tiene una confiabilidad media.

Pasando a los indicadores particulares que constituyen los índices, se observa que éstos no corroboran en su totalidad a lo planteado en la literatura. Bastida et al. (2008) afirman que los indicadores químicos más utilizados son materia orgánica y carbono orgánico, pero en nuestro análisis de 32 índices encontramos que están en el segundo y quinto lugar, respectivamente (Tabla 3). El pH es el indicador químico que más aparece en los índices (84.4%), haciéndolo en una proporción muy superior al carbono orgánico y a la capacidad de intercambio catiónico que son los segundos indicadores de este tipo más empleados (46.9%).

La capacidad de absorción de fosfatos mencionada por García et al. (2012), dentro de los indicadores químicos más empleados, no es empleada por los ocho índices con más indicadores (Tabla 4). Sin embargo, el único indicador bioquímico que señalan, el potencial de mineralización de nitrógeno, es uno de los dos indicadores bioquímicos empleados más de una vez en estos índices.

La apreciación de Paz-Ferreiro (2006) de que los microorganismos pueden ser un muy buen indicador de la calidad del suelo es confirmada por nuestro estudio porque la biomasa microbiana del suelo es el indicador biológico más utilizado (Tabla 3 y 4). Asimismo, tres de los ocho indicadores comunes a los índices que usan más de 20 indicadores corresponden a actividad microbiana (Tabla 4). Igualmente, Bastida et al. (2008) escribe que los indicadores biológicos más populares son respiración microbiana y el C

Tabla 3. Indicadores más recurrentes en índices de calidad del suelo.

Table 3. Most frequent indicators in soil quality indexes.

Indicadores	Recurrencia	Tipo de indicador
Calcio	5	Químico
Magnesio total	5	Químico
Deshidrogenasa	5	Biológico
Fosfatasa alcalina	5	Biológico
Fósforo total	5	Químico
Porosidad	5	Físico
Sodio total	5	Químico
B-glucosidasa	6	Biológico
Nitrógeno Total	6	Químico
Ureasa	6	Biológico
Potencial de mineralización de Nitrógeno	7	Biológico
Conductividad Hidráulica	9	Físico
Estabilidad de agregados	9	Físico
Textura	9	Físico
Materia orgánica	11	Químico
C de Biomasa microbiana	13	Biológico
Conductividad eléctrica	13	Químico
Capacidad de intercambio catiónico	15	Químico
Carbono orgánico	15	Químico
Densidad aparente	22	Físico
pH	27	Químico

Tabla 4. Frecuencia de cada indicador en los 8 índices que utilizan más indicadores.**Table 4.** Frequency of each indicator in the 8 indexes with the highest number of indicators.

Indicadores	Recurrencia en los 8 índices con más indicadores	Tipo
N de Biomasa microbiana	2	Biológico
Capacidad de agua disponible	2	Físico
β -glucosidasa	2	Biológico
Contenido de humedad	3	Físico
Estabilidad de agregados	3	Físico
Fosfatasa Ácida	3	Biológico
Fosforo Disponible	3	Químico
Potencial de Mineralización de Carbono	3	Biológico
Respiración microbiana	3	Biológico
Ureasa	3	Biológico
Potencial de Mineralización de Nitrógeno	4	Biológico
Conductividad Eléctrica	4	Químico
Conductividad hidráulica	4	Físico
Densidad aparente	4	Físico
Deshidrogenasa	4	Biológico
Fosfatasa Alcalina	4	Biológico
Materia orgánica	4	Químico
Nitrógeno Total	4	Químico
Porosidad	4	Físico
Textura	4	Físico
Carbono Orgánico	5	Químico
Capacidad de intercambio catiónico	5	Químico
Nitrógeno Disponible	5	Químico
C de Biomasa microbiana	6	Biológico
pH	8	Químico

de biomasa microbiana para ver la actividad microbiana, y la deshidrogenasa, fosfatasa, β -glucosidasa, ureasa y arilsulfatasa en la actividad enzimática, pero en nuestro trabajo se encontró que dentro las únicas notoriamente utilizadas son el C de biomasa microbiana, la ureasa y la β -glucosidasa (**Tabla 3**). Además, el potencial de mineralización de carbono se encuentra en dos de los tres índices más populares y el potencial de mineralización de nitrógeno en los tres índices. Esto apoya parcialmente lo planteado por [Shao et al. \(2008\)](#) y [García et al. \(2012\)](#), que consideran que los indicadores biológicos más empleados son la respiración microbiana, las actividades enzimáticas del suelo, el ergosterol, los hongos, las bacterias, la C de biomasa microbiana y la N de biomasa microbiana.

Igualmente, las hipótesis de [García et al. \(2012\)](#) sobre indicadores físicos son parcialmente confirmadas. Por un lado, estos autores afirman que los indicadores físicos más usados son estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial y conductividad hidráulica, respectivamente. No obstante, en los 32 índices encontrados, se observó que, de los cuatro indicadores físicos más utilizados, hay uno que no es mencionado por estos autores –textura– y que su orden de recurrencia es distinto. Efectivamente, los cuatro indicadores físicos más utilizados son densidad aparente, textura, estabilidad de agregados y conductividad hidráulica, respectivamente. [Bastida et al. \(2008\)](#) no son tan específicos con los indicadores físicos, limitándose a decir que la estabilidad de agregados es fundamental, lo cual es parcialmente validado en la literatura, pues éste es el segundo indicador físico más empleado, pero sólo se usa en 9 de los 32 índices que contienen indicadores físicos.

Conclusiones

Los índices más empleados en la literatura son el Índice aditivo ponderado (SQLw), el Índice unificado (SQI Unificado), el Índice de adición (SQIa), el Índice biológico de la calidad del suelo (BSQ) y el Índice de calidad del suelo de la mina (MSQI). No obstante, el SQLw supera notablemente en recurrencia (23 veces) a los demás, lo que permite señalar que este es el único índice que es ampliamente aceptado en la investigación.

Se comparó la composición de los índices de calidad del suelo más empleados en la investigación empírica. El índice aditivo ponderado (SQLw) está compuesto por 67 indicadores de los cuales (31%) son físicos, (31%) son químicos y (37,3%) son biológicos; el índice unificado (SQI Unificado) se compone de 45 indicadores de los cuales (26,7%) son físicos, (57,8%) son químicos y (15,6%) son biológicos; el índice de adición (SQIa) contiene 26 indicadores de los cuales (46%) son físicos, (35%) son químicos, y (19%) son biológicos; el índice biológico de la calidad del suelo (BSQ) posee 21 indicadores de los cuales (43%) son químicos y (57%) son biológicos. Por último, el índice de calidad del suelo de la mina (MSQI) contiene 23 indicadores (26%) físicos, (57%) son químicos y (17%) son biológicos.

Hay ocho indicadores que son usados en los tres índices más populares, 3 químicos, 3 físicos y 2 biológicos (**Tabla 5**). Si tomamos estos índices como la base para la evaluación de los índices de calidad del suelo, se podría decir, entonces, que un índice para ser confiable debe contener estos ocho indicadores: C de biomasa microbiana, potencial de mineralización de N, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, porosidad, densidad aparente y conductividad hidráulica.

Tabla 5. Frecuencia de los indicadores en los 3 índices más populares.**Table 5.** Frequency of the indicators in the 3 most popular indexes.

Indicadores	Recurrencia en los 3 índices más populares	Tipo de indicador
Resistencia de penetración	2	Físico
Diámetro del peso agregado	2	Físico
Distribución de tamaño de partícula	2	Físico
Humedad	2	Físico
Temperatura	2	Físico
Agua disponible	2	Físico
Base de saturación	2	Químico
Arilsulfatasa	2	Biológico
Carbonato de calcio equivalente	2	Químico
Carbono orgánico	2	Químico
Cobre	2	Químico
Deshidrogenada	2	Biológico
Estabilidad de agregados	2	Físico
Fosfatasa ácida	2	Biológico
Fosfatasa alcalina	2	Biológico
Fósforo	2	Químico
Hierro	2	Químico
Calcio	2	Químico
Magnesio	2	Químico
Manganeso	2	Químico
Materia orgánica	2	Químico
Nitrógeno	2	Químico
Nitrógeno total	2	Químico
Porcentaje de sodio intercambiable	2	Químico
Potencial de Mineralización de Carbono	2	Biológico
Respiración microbiana	2	Biológico
Textura	2	Físico
Zinc	2	Químico
C de Biomasa microbiana	3	Biológico
Capacidad de intercambio catiónico	3	Químico
Conductividad eléctrica	3	Químico
Conductividad hidráulica	3	Físico
Densidad aparente	3	Físico
pH	3	Químico
Porosidad	3	Físico
Potencial de mineralización de nitrógeno	3	Biológico

Referencias

- Aghasi, B., Jalalian, A., Honarjoo, N. 2010. The Comparison of Some Soil Quality Indexes in Different Land uses of Ghareh Aghaj Watershed of Semirom, Isfahan, Iran. *International Journal of Environmental and Earth Sciences* 76-80.
- Ancona, V., Bruno, D., Lopez, N., Pappagallo, G., Uricchio, V. 2010. A Modified Soil Quality Index to Assess the Influence of Soil Degradation Processes on Desertification Risk: The Apulia Case. CNR – *National Research Council - IRSA, Water Research Institute Via F. de Blasio 5, 70123 Bari, Italy*, 45-55
- Andrews, S., Florab, C., Mitchell, J., Karlana, D. 2003. Growers' perceptions and acceptance of soil quality indices. *Geoderma* 114(3-4): 187-213.
- Andrews, S., Karlen, D., Mitchel, J. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90: 25-45.
- Armenise, E., Redmile-Gordon, M., Stellacci, A., Ciccicarese, A., Rubino, P. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil & Tillage Research* 130: 91-98.
- Aspetti, G., Boccelli, R., Ampollini, D., Attilio, A. D., Capri, E. 2010. Assessment of soil-quality index based on microarthropods in corn cultivation in Northern Italy. *Ecological Indicators*, 129-135.
- Barbiroli, G., Giovanni, C., & Andrea, R. 2004. A New Approach to Elaborate a Multifunctional Soil Quality Index. *Developments in Soil Science*, 201-202.
- Basak, N., Ashim, D., Tarik, M., Satadeep, R., Bholanath, S., Sunanda, B., & Biswapati, M. 2016. Assessing soil-quality indices for subtropical rice-based cropping systems in India. *CSIRO*, 20-29.
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147:159-171.
- Bautista, E. D., Gutierrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13: 90-97.
- Blecker, S., Stillings, L., Amacher, M., Ippolito, J., DeCrappeo, N. 2012. Development of vegetation based soil quality indices for mineralized terrane in arid and semi-arid regions. *Ecological Indicators* 20: 65-74.
- Bobul'ská, L., Fazekasova, D., Angelovicova, L., Kotorova, D. 2015. Impact of ecological and conventional farming systems on chemical and biological soil quality indices in a cold mountain climate in Slovakia. *Bio-logical Agriculture & Horticulture* 31(3): 205-218.

- Candemir, F., Gulser, C. 2010. Effects of Different Agricultural Wastes on Some Soil Quality Indexes in Clay and Loamy Sand Fields. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42:13–28.
- Castillo, X., Joergensen, R. 2001. Impact of ecological and conventional arable management systems on chemical and biological soil quality indices in Nicaragua. *Soil Biology & Biochemistry* 42: 1591-1597.
- Costa, J., Gamero, C. A., Lanca, J., Mirás-Avalos, J. 2011. Determination of the quality index of a Paleudult under sunflower culture and different management systems. *Soil & Tillage Research*, 112: 167–174.
- Dadhwal, K., Mandal, D., & Shrimali, S. 2011. Soil Quality Index for Different Land Use Systems in Northwestern Hilly Region of India. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 59:169-176.
- De Paul Obade, V., Lal, R. 2015. A standardized soil quality index for diversefield conditions. *Science of the Total Environment* 541: 424-434.
- Do Carmo-Lucio, F., Veras-de Lima, H., Rodrigues, A., Oliveira, P., Leal, E. 2014. Physical And Chemical Soil Quality Index In Irrigated Acai Plantations, Eastern Amazon, Brazil. *Agrociencia* 48: 361-375.
- Doran, J., Parkin, T. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. *Soil Science Society of America*, 3 - 21.
- Etchevers, B. 1999. Indicadores de calidad de suelos. En: Conservación y restauración de suelos. México D.F: *Universidad Nacional Autónoma de México y Programa Universitario del Medio Ambiente*.
- Ferreras, L., Magra, G., Besson, P., Kovalevski, E., García, F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *SciELO* 25(2): 159-172.
- Freitas, D. F., Naves, M., Cardoso, E., Curi, N. 2012. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. *Ciencia Agronômica* 43: 417-428.
- García, A., y Correa, D. 2010. Uso de indicadores de calidad del suelo como estrategia para prevenir su degradación. *Sociedad ecuatoriana de la ciencia del suelo*, 1-19.
- García, Y., Ramirez, W., Sánchez, S. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Matanzas, Cuba: Central España Republicana.
- Gelaw, A. M., Singh, B. R., Lal, R. 2015. Soil Quality Indices for Evaluating Smallholder Agricultural Land Uses in Northern Ethiopia. *Sustainability* 7: 2322-2337.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M., Seoane, S. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 877-887.
- Hammac, W. A., Stott, D. E., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. 2016. Crop, Tillage, and Landscape Effects on Near-Surface Soil Quality Indices in Indiana. *Soil & Water Management & Conservation*, 1638–1652.
- Hussain, I., Olson, K., Wander, M., Karlen, D. 1998. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil & Tillage Research* 50, 237-249.
- Ivezić, V., Singh, B. R., Gvozdić, V., Lončarić, Z. 2015. Trace Metal Availability and Soil Quality Index Relationships under Different Land Uses. *Soil Science Society of America Journal* 79(6): 1629-1637.
- Karlen, D. L., Mausbach, M., Dorán, J., Cline, R., Harris, R., Schuman, G. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest editorial). *Soil Science Society of America Journal* 61(1): 4-10.
- Leite, H. M., Concha, C. M., Gaspar, O. 2017. Soil quality index of an Oxisol under different land uses in the Brazilian Savannah. *Geoderma Regional* 10: 183-190.
- Li, P., Zhang, T., Wang, X., Yu, D. 2013. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil & Tillage Research* 126: 112-118.
- Li, Y., Dong, S., Wen, L., Wang, X., Wu, Y. 2013. Assessing the soil quality of alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau using a modified soil quality index. *Environ Monit Assess* 185: 8011–8022.
- Liu, J., Wu, L., Dong, C., Zhuguang, Y., Changjiang, W. 2017. Development of a soil quality index for Camellia oleifera forestland yield under three different parent materials in Southern China. *Soil & Tillage Research* 176: 45–50.
- Marinari, S., Mancinelli, R., Campiglia, E., Grego, S. 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecological Indicators*, 701-711.
- Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Purakayastha, T. J., Patra, A. K., & Singh, D. 2008. Soil Quality Indices For Evaluation Of Long-Term Land Use And Soil Management Practices In Semi-Arid Sub-Tropical India. *Land Degradation & Development* 6:516–529.
- Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., & Patra, A. K. 2007. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environ Monit Assess* 136: 419-435.
- Medina, M. 2012. *Caracterización Bioquímica y Microbiológica de un Suelo de Pradera de Dactylis Glomerada y Medicago Sativa Bajo Diferentes Proporciones de Siembra*. Universidad de Salamanca, España.
- Mukherjee, A., Lal, R. 2014. *Comparison of Soil Quality Index Three Methods*. *PLoS one* 9(8): e105981.
- Mukhopadhyay, S., Maiti, S., Masto, R. 2014. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. *Ecological Engineering* 71: 10-20.
- Mukhopadhyay, S., Masto, R., Yadav, A., George, J., Ram, L., & Shukla, S. 2016. Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil. *Science of the Total Environment* 542: 540-550.
- Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Eskandari, S. 2017. Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science* 64(5): 696-707.
- Nakajima, T., Lal, R., Jiang, S. 2015. Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio. *Soil & Tillage Research* 146: 323–328.
- Orozco, D. D. 2011. *Propuesta de indicadores de calidad edafológicos para valorar la influencia de los sistemas productivos sobre algunas propiedades físicas y químicas en suelos oxisoles del piedemonte llanero colombiano*. Universidad Nacional De Colombia, Colombia.
- Paz-Ferreiro, J. 2006. *Propiedades bioquímicas de suelos de prado de Galicia*. Universidad de Santiago de Compostela, España.
- Paz-Ferreiro, J., Fu, S. 2013. *Biological Indices for Soil Quality Evaluation: Perspectives and Limitations*. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Pietrzykowski, M. 2014. Soil quality index as a tool for Scots pine (Pinus sylvestris) monoculture conversion planning on afforested, reclaimed mine land. *Journal of Forestry Research* 25: 63-74.
- Pinilla, G. 2000. *Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia*. *Compilación bibliográfica*. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia.
- Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., Gu, Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149: 325–334.
- Raiesi, F. 2016. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators* 75: 307-320.
- Raiesi, F., Kabiri, V. 2016. Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. *Ecological Indicators* 71: 198-207.
- Şeker, C., Özyatekin, H., Neşiş, H., Gümüş, İ., Dedeoğlu, M., Atmaca, E., Karaca, Ü. 2017. Assessment of soil quality index for wheat and sugar beet cropping systems on an entisol in Central Anatolia. *Environ Monit Assess* 189:135.
- Shao, Y., Weixin, Z., Juecui, S., Lixia, Z., Hanping, X., Wensheng, S., Shenglei, F. 2008. Nematodes as indicators of soil recovery in tailings of a lead/zinc mine. *Soil Biology & Biochemistry*, 2040–2046.
- Sharma, A., y Arora, S. 2010. Soil Quality Indices and Relative Production Efficiency for Maize and Wheat Crops in Agroclimates of Northwest India. *soilsci*, 44-49.
- Sharma, K. L., Grace, J. K., Mishra, P. K., B.Venkateswarlu, Nagdeva, M. B., Gabhane, V. et al. 2011. Effect of Soil and Nutrient-Management Treatments on Soil Quality Indices under Cotton-Based Production System in Rainfed Semi-arid Tropical Vertisol. *Communications in soil science and plant analysis* 42(11): 1298-1315.
- Sharma, K. L., Maruthi, G. R., Suma, D., Kusuma, J., Sharma, S. K., Thakur, H. S. et al. 2014. Effects of Conjunctive Use of Organic and Inorganic Sources of Nutrients on Soil Quality Indicators and Soil Quality Index in Sole Maize, Maize + Soybean, and Sole Soybean Cropping Systems in Hot Semi-arid Tropical Vertisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2118–2140.
- Sharma, K. L., Sharma, S. C., Bawa, S. S., Singh, S., Chandrika, D. S., Grace, J. K. et al. 2015. Effects of Conjunctive Nutrient Management on Soil Fertility and Overall Soil Quality Index in Submountainous Inceptisol Soils under Rainfed Maize (Zea mays L.)–Wheat (Triticum aestivum) System. *Communications in soil science and plant analysis* 46(1): 47-61.

- Singh, G., Kumar, D., Marwaha, T., Singh, A. 2009. Influence of tillage, water regimes and integrated nitrogen management practices on soil quality indices in rice (*Oryza sativa* L.) in the Indo-Gangetic plains. *Archives of Agronomy and Soil Science* 55: 439–450.
- Sofi, J. A., Bhat, A. G., Kirmal, N. A., Wani, J. A., Lone, A. H., Ganie, M. A., Dar, G. I. 2016. Soil quality index as affected by different cropping systems in northwestern Himalayas. *Environ Monit Assess* 188:161.
- Supriyadi, Hartati, S., Machfiroh, N., Ustiatik, R. 2016. Soil Quality Index in the Upstream Of Bengawan Solo River Basin According to the Soil Function in Nutrient Cycling Based on Soybean Production in Agroforestry. *Agrivita Journal of Agricultural Science* 38(1): 55-63.
- Thomazini, A., Mendonça, E., Cardoso, I., Garbin, M. 2015. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. *Geoderma Regional* 5:15-24.
- Vasu, D., Kumar, S., Kumar, S., Perumal, V., Tiwary, P., Tiwary, P. et al. 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma* 282: 70-79.
- Veum, K. S., Sudduth, K. A., Kremer, R. J., & Kitchen, N. R. 2015. Estimating a Soil Quality Index with VNIR Reflectance Spectroscopy. *Soil & Water Management & Conservation* 79: 637–649.