

## Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México

---

Jorge Luis Nuñez-Peñaloza<sup>1</sup>

Joel Pérez-Nieto<sup>1,§</sup>

Jorge Víctor Prado-Hernández<sup>2</sup>

1 Departamento de Fitotecnia-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Federal México-Texcoco km 38.5, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230

2 Departamento de Suelos-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Federal México-Texcoco km 38.5, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230. ([jorg.nunezp@gmail.com](mailto:jorg.nunezp@gmail.com)).

Autor para correspondencia: [jpereznc@chapingo.mx](mailto:jpereznc@chapingo.mx)

---

### Resumen

Una estrategia para evaluar suelos es mediante índices de calidad que dependen de indicadores específicos sobre los suelos muestreados, el tipo de cultivo y el manejo realizado. Los indicadores son variables físicas, químicas o biológicas medibles, que afectan la capacidad del suelo al ejercer una o varias de sus funciones. El objetivo de esta investigación fue examinar el uso metodológico de las diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo usadas como indicadores de calidad para determinar índices de calidad del suelo en México, a través de una revisión bibliográfica realizada en el año 2022, para el período 2000-2021 mediante diversos buscadores de artículos científicos y palabras clave relacionadas al tema, con la finalidad de generar un diagnóstico y vislumbrar oportunidades de investigación. Se debe prestar mayor atención al estudio de la calidad de suelos en México, con base en información técnica y científica en regiones y estados dónde esta información siga siendo escasa. Producto de la revisión bibliográfica se propone como un conjunto de indicadores físicos: a la textura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, resistencia a la penetración, curva de retención de humedad y profundidad del suelo; como indicadores químicos: materia orgánica, pH, nitrógeno total, nitrógeno inorgánico, fósforo, potasio, calcio y magnesio y como indicadores biológicos: carbono en la biomasa microbiana, respiración del suelo, densidad de lombrices, deshidrogenasa,  $\beta$ -glucosidasa, ureasa, fosfatasa y a los hongos micorrízicos arbusculares, optando por un subconjunto de indicadores o por un conjunto mínimo de datos para conformar un índice de calidad de suelo.

### Palabras clave:

análisis de componentes principales, fertilidad física-química-biológica del suelo, propiedades del suelo.

## Introducción

Las presiones actuales sobre el suelo están alcanzando límites críticos, en concreto, los aumentos previstos en la producción de alimentos, fibras y combustibles que se exigen para alcanzar la seguridad alimentaria y energética suponen mayor presión sobre este recurso no renovable. En México se reportan la presencia de 25 de las 32 unidades de suelo que aparecen en la base referencial mundial del recurso suelo (WRB) por sus siglas en inglés. Dos de los problemas más importantes en la actualidad, por su extensión, que afectan a estos suelos en México son: la pérdida de suelo superficial por erosión hídrica (20 millones de hectáreas) y la degradación por disminución de la fertilidad (31.6 millones de hectáreas) (Álvarez-Arteaga *et al.*, 2020); sin embargo, para varios sectores de la sociedad actual, el conocimiento sobre esta problemática en muchas regiones del país es poco e incierto, lo cual explica el escaso interés que se pone sobre este recurso natural.

Una estrategia para evaluar la degradación de los suelos es mediante índices de calidad del suelo (íCS), que dependen de indicadores específicos relacionados con los suelos muestreados, el tipo de cultivo y su manejo (Bedolla-Rivera *et al.*, 2020). Los indicadores pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo medibles, que afectan la capacidad de éste para ejercer una de sus funciones (Castillo-Valdez *et al.*, 2021). Los indicadores físicos son propiedades físicas asociadas con el uso eficiente del agua, los nutrientes y el uso de agroquímicos; 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 y 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.

Los indicadores constituyen una herramienta poderosa para la toma de decisiones en el manejo y uso del suelo a escala local, regional y global, mediante su integración, se obtienen íCS, que son variables numéricas que permiten una evaluación más exacta y confiable de la calidad del suelo usando métodos estadísticos como el conjunto mínimo de datos (CMD) y el análisis de componentes principales (ACP) (Bedolla-Rivera *et al.*, 2020). Una vasta cantidad de parámetros físicos, químicos y biológicos se han incluido en investigaciones sobre calidad de suelos alrededor del mundo. Sin embargo, su integración en íCS es escaso e incierto y aún sigue siendo una tarea pendiente.

Con base en ello, el objetivo de esta investigación fue examinar el uso metodológico de las diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo usadas como indicadores de calidad para determinar íCS en México; a través, de una revisión bibliográfica mediante diversos buscadores de artículos científicos y palabras clave relacionadas al tema, con la finalidad de generar un diagnóstico y vislumbrar oportunidades de investigación.

## Materiales y métodos

La búsqueda de literatura se realizó en las bases de datos: ScienceDirect, Scopus, JSTOR, SciELO, Springer, Redalyc y Google Scholar. La revisión se hizo tanto en inglés, como en español y comprendió exclusivamente artículos en revistas científicas publicados entre el año 2000 y 2021. Las palabras usadas se concentraron en el título y palabras clave relacionadas con la fertilidad, calidad y salud de suelos en México; fueron: calidad, suelos, indicadores, índices y México. La elección final de los artículos se basó en la lectura del título, del análisis de la información presente en los apartados de resumen, metodología y conclusiones en cada uno de ellos, y finalmente, que condujera a la temática planteada en el objetivo.

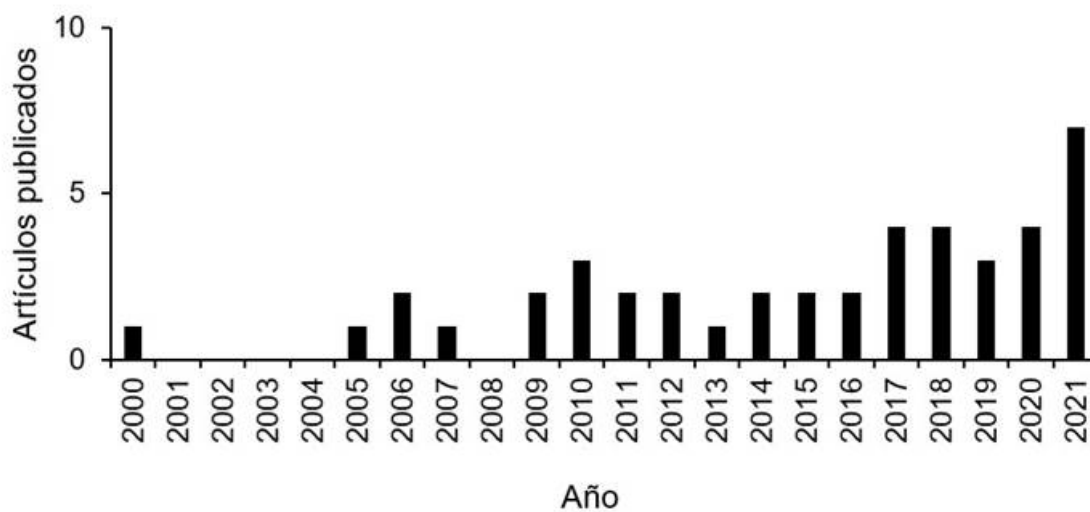
Con los criterios anteriores se encontraron 43 artículos científicos. Posteriormente, cada uno de ellos se llevó a una hoja de cálculo del programa Excel<sup>®</sup> donde se formó una bitácora con los siguientes apartados: año, autor principal, estado de la República Mexicana, dónde se realizó la investigación, indicadores físicos, indicadores químicos e indicadores biológicos del suelo

empleados, grupo de suelos analizados y tipo de íCS empleado. A partir de esta bitácora se generó un diagnóstico del uso de indicadores e íCS en México.

## Resultados y discusión

Se encontraron 43 artículos científicos relacionados con el uso metodológico de las propiedades del suelo usadas como indicadores de su calidad en México. El número de artículos por año varió de cero a siete en promedio y aunque no se aprecia una tendencia directa de incremento de las publicaciones a través del tiempo, se visualiza que, en el período de 2015 al 2021 se publicaron 60.5% de los artículos científicos, en comparación con el período de 2000 al 2014 con sólo 39.5% de los artículos publicados (Figura 1).

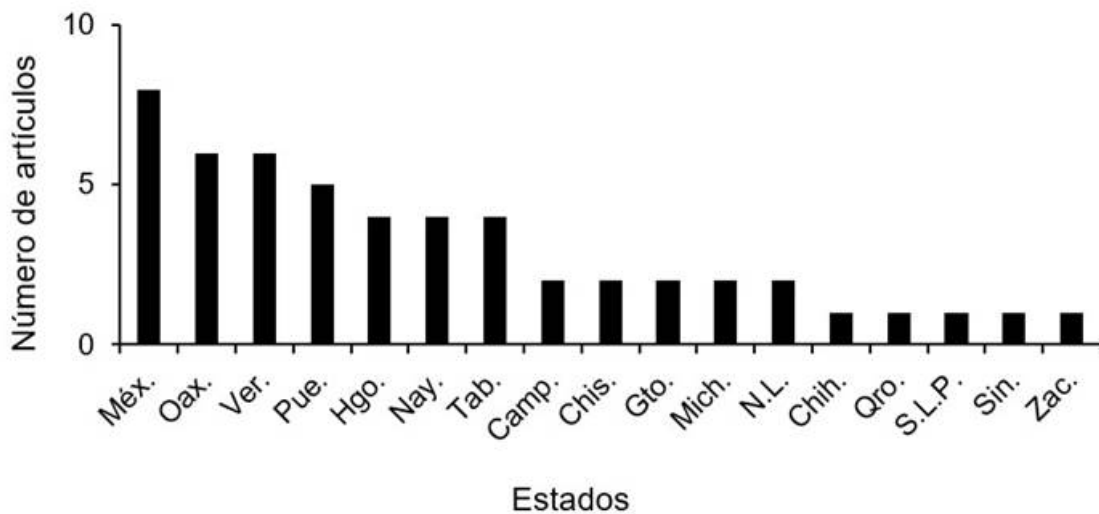
Figura 1. Número de artículos publicados en revistas científicas sobre calidad de suelos en México.



Con respecto al número de artículos publicados por estado, el Estado de México concentra la mayoría con ocho; le siguen Oaxaca y Veracruz con seis; Puebla con cinco; Hidalgo, Nayarit y Tabasco con cuatro; Campeche, Chiapas, Guanajuato, Michoacán y Nuevo León con dos y Chihuahua, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa y Zacatecas con uno respectivamente (Figura 2).



Figura 2. Distribución del número de artículos científicos sobre calidad de suelos encontrados por estado en México.

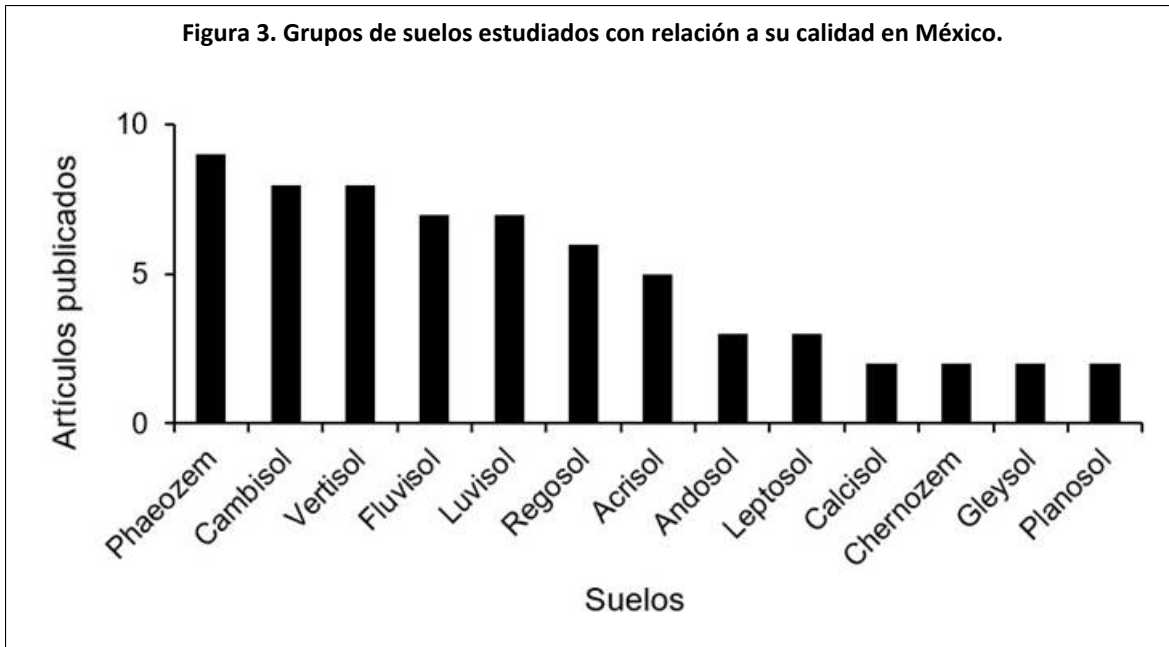


Es preciso mencionar que existen regiones dónde se han desarrollado más investigaciones sobre calidad de suelos, Texcoco en el Estado de México (Govaerts *et al.*, 2006; Pajares-Moreno *et al.*, 2010; Rodríguez-Serrano *et al.*, 2016; Fonteyne *et al.*, 2021), la región Mixteca en el estado de Oaxaca (Estrada-Herrera *et al.*, 2017; Santiago-Mejía *et al.*, 2018; Fonteyne *et al.*, 2021) y las regiones centro y montaña de Veracruz (Campos-Cascaredo *et al.*, 2007; Fernández-Ojeda *et al.*, 2016; de la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Peña-Morales *et al.*, 2021).

El análisis arrojó información de varios grupos de suelos (WRB) estudiados en México, con al menos dos artículos por grupo (Figura 3). Algunos otros grupos estudiados fueron: Plintisol, Solonchak, Litosol, Planosol, Lixisol, Durisol, Solonetz y Technosol (Alcalá *et al.*, 2009; Huerta *et al.*, 2009; Pajares-Moreno *et al.*, 2010; Alejo-Santiago *et al.*, 2012; Fonteyne *et al.*, 2021; Martínez-Rodríguez *et al.*, 2021). En siete artículos no se hace referencia explícita a algún grupo de suelo en particular (Prieto-Méndez *et al.*, 2011, 2013; Rodríguez-Serrano *et al.*, 2016; de la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Murillo-Cuevas *et al.*, 2019; Acevedo-Gómez *et al.*, 2020; Peña *et al.*, 2021) y en Govaerts *et al.* (2006), Campos-Cascaredo *et al.* (2007), Bautista-Cruz *et al.* (2012) y Chavarin-Pineda *et al.* (2021) se reportan los suelos Mollisol, Andisol, Ultisol, Inceptisol y Entisol bajo la nomenclatura de la Soil Taxonomy del Departamento de EE.UU (USDA).



Figura 3. Grupos de suelos estudiados con relación a su calidad en México.



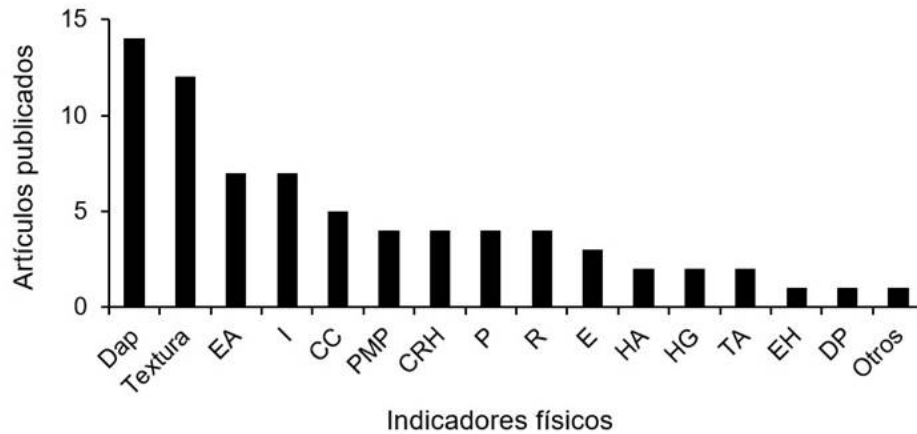
### Indicadores físicos

Al analizar la frecuencia de estudio de los indicadores físicos en los artículos científicos, se encontró que la densidad aparente (Armida-Alcudia *et al.*, 2005; Campos-Cascaredo *et al.*, 2007; Bugarín *et al.*, 2010; Prieto-Méndez *et al.*, 2013; Murray *et al.*, 2014; Zavala-Cruz *et al.*, 2014; Fernández-Ojeda *et al.*, 2016; Muñoz-Iniestra *et al.*, 2017; Cantú-Silva *et al.*, 2018; Santiago-Mejía *et al.*, 2018; de la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2020; Chavarin-Pineda *et al.*, 2021; Peña-Morales *et al.*, 2021); textura (Prieto-Méndez *et al.*, 2011; Zavala-Cruz *et al.*, 2014; Muñoz-Iniestra *et al.*, 2017; Cantú-Silva *et al.*, 2018; Montañó-Arias *et al.*, 2018; Santiago-Mejía *et al.*, 2018; de la Cruz-Elizondo y Fontalvo Buelvas, 2019; López-Báez *et al.*, 2019; Acevedo-Gómez *et al.*, 2020; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2020; Bedolla-Rivera *et al.*, 2020; Cruz-Flores *et al.*, 2020; Peña-Morales *et al.*, 2021).

Estabilidad de agregados (Sustaita-Rivera *et al.*, 2000; Govaerts *et al.*, 2006; Medina-Méndez *et al.*, 2006; Prieto-Méndez *et al.*, 2013; Hernández-González *et al.*, 2018; Castillo-Valdez *et al.*, 2021; Fonteyne *et al.*, 2021) son las propiedades físicas mayormente elegidas como indicadores físicos de calidad del suelo (Figura 4). Estos indicadores están relacionados con servicios ecosistémicos y funciones ecológicas del suelo muy importantes, tal y como lo sugieren Bünemann *et al.* (2018).



**Figura 4. Indicadores físicos del suelo frecuentemente estudiados en México. Dap= densidad aparente; EA= estabilidad de agregados; I= infiltración; CC= capacidad de campo; PMP= punto de marchitez permanente; CRH= curva de retención de humedad; P= porosidad; R= resistencia a la penetración; E= estructura, HA= humedad aprovechable; HG= humedad gravimétrica; TA= tamaño de agregados; EH= espesor de horizontes; y DP= diámetro de poros.**



Para medir la densidad aparente se reporta el método del cilindro, para la textura el hidrómetro de Bouyoucos, estabilidad de agregados a través del tamizado en húmedo y seco, la infiltración mediante el doble cilindro, capacidad de campo con olla de presión, punto de marchitez permanente con membrana de presión, curva de retención de humedad a 33, 50, 150, 500, 1 000 y 1 500 kPa, porosidad total utilizando el valor de densidad aparente y densidad real de 2.65 Mg m<sup>-3</sup>, resistencia a la penetración con ayuda de un penetrómetro dinámico, humedad aprovechable como la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente y humedad gravimétrica pesando una muestra de suelo húmeda, secándola a 105 °C durante 24 h para obtener el peso de suelo seco.

Con respecto a los métodos usados para determinación de los indicadores físicos del suelo con el fin de evaluar su calidad, cabe destacar que deben considerarse indicadores que limiten el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil del suelo, y deben ser medidos en lugar de derivados. Para integrar un CMD podrían considerarse la textura (% arenas, % limos y % arcillas), densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, resistencia a la penetración, curva de retención de humedad y profundidad del suelo (Bünemann *et al.*, 2018).

## Indicadores químicos

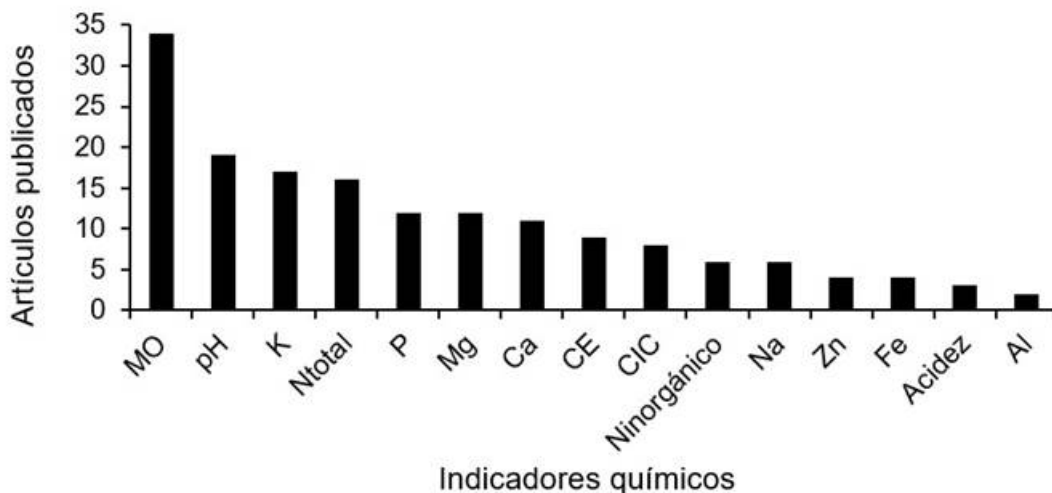
El carbono orgánico o materia orgánica del suelo es la propiedad del suelo más usada como indicador químico (Sustaita-Rivera *et al.*, 2000; Armida-Alcudia *et al.*, 2005; Medina-Méndez *et al.*, 2006; Bugarín *et al.*, 2010; Uribe-Hernández *et al.*, 2010; Prieto-Méndez *et al.*, 2011; Alejo-Santiago *et al.*, 2012; Murray *et al.*, 2014; Zavala-Cruz *et al.*, 2014; Cruz-Ruiz *et al.*, 2015; Fernández-Ojeda *et al.*, 2016; Estrada-Herrera *et al.*, 2017; Hernández-Ordoñez *et al.*, 2017; Muñoz-Iniestra *et al.*, 2017; Rangel-Peraza *et al.*, 2017; Cantú-Silva *et al.*, 2018; Hernández-González *et al.*, 2018; Santiago-Mejía *et al.*, 2018; de la Cruz-Elizondo y Fontalvo Buelvas, 2019; López-Báez *et al.*, 2019; Acevedo-Gómez *et al.*, 2020; Castillo-Valdez *et al.*, 2021; Duché-García *et al.*, 2021; Fonteyne *et al.*, 2021; Martínez-Rodríguez *et al.*, 2021; Peña-Morales *et al.*, 2021),

Le sigue el pH (Bugarín *et al.*, 2010; Uribe-Hernández *et al.*, 2010; Prieto-Méndez *et al.*, 2011; Bautista-Cruz *et al.*, 2012; Alejo-Santiago *et al.*, 2012; Fernández-Ojeda *et al.*, 2016; Estrada-Herrera *et al.*, 2017; Muñoz-Iniestra *et al.*, 2017; Rangel-Peraza *et al.*, 2017; Yáñez-Díaz *et al.*, 2018; de la Cruz-Elizondo y Fontalvo Buelvas, 2019; López-Báez *et al.*, 2019; Acevedo-Gómez

*et al.*, 2020; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2020; Cruz-Flores *et al.*, 2020; Castillo-Valdez *et al.*, 2021; Fonteyne *et al.*, 2021; Martínez-Rodríguez *et al.*, 2021; Peña-Morales *et al.*, 2021)

Potasio intercambiable (Govaerts *et al.*, 2006; Prieto-Méndez *et al.*, 2011; Alejo-Santiago *et al.*, 2012; Zavala-Cruz *et al.*, 2014; Palma-López *et al.*, 2015; Fernández-Ojeda *et al.*, 2016; Estrada-Herrera *et al.*, 2017; Santiago-Mejía *et al.*, 2018; López-Báez *et al.*, 2019; Acevedo-Gómez *et al.*, 2020; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2020; Cruz-Flores *et al.*, 2020; Chavarin-Pineda *et al.*, 2021; Duché-García *et al.*, 2021; Fonteyne *et al.*, 2021; Martínez-Rodríguez *et al.*, 2021; Trejo *et al.*, 2021), nitrógeno Kjeldahl (Govaerts *et al.*, 2006; Campos-Cascaredo *et al.*, 2007; Pajares-Moreno *et al.*, 2010, 2011; Prieto-Méndez *et al.*, 2011; Cruz-Ruiz *et al.*, 2015; Palma-López *et al.*, 2015; Fernández-Ojeda *et al.*, 2016; Hernández-Ordoñez *et al.*, 2017; Muñoz-Iniestra *et al.*, 2017; Hernández-González *et al.*, 2018; Santiago-Mejía *et al.*, 2018; Acevedo-Gómez *et al.*, 2020; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2020; Chavarin-Pineda *et al.*, 2021; Duché-García *et al.*, 2021) y fósforo (Alejo-Santiago *et al.*, 2012; Bautista-Cruz *et al.*, 2012; Palma-López *et al.*, 2015; Fernández-Ojeda *et al.*, 2016; Estrada-Herrera *et al.*, 2017; Hernández-Ordoñez *et al.*, 2017; López-Báez *et al.*, 2019; Acevedo-Gómez *et al.*, 2020; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2020; Castillo-Valdez *et al.*, 2021; Martínez-Rodríguez *et al.*, 2021; Trejo *et al.*, 2021) (Figura 5).

**Figura 5. Indicadores químicos del suelo frecuentemente estudiados en México. MO= materia orgánica (carbono orgánico); pH= potencial de hidrógeno; K= potasio, Ntotal= nitrógeno total; P= fósforo; Mg= magnesio; Ca= calcio; CE= conductividad eléctrica; CIC= capacidad de intercambio catiónico; Ninorgánico= nitrógeno inorgánico; Na= sodio; Zn= zinc; Fe= hierro; Al= aluminio.**



Para determinar el contenido de carbono orgánico los artículos reportan el método de Walkley-Black y el contenido de materia orgánica al multiplicar el carbono orgánico por algún factor: 1.724 o 2. El pH lo determinaron en una suspensión de suelo: agua: 1:1, 1:2 o 1:2.5, utilizando además cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) o cloruro de potasio (KCl) con ayuda de un potenciómetro. El K, Ca y Mg lo determinaron en la mayoría de los artículos usando una solución extractora de acetato de amonio (1 N pH = 7). El nitrógeno total lo determinaron mediante el procedimiento de digestión de Kjeldahl o micro-Kjeldahl. Para el fósforo aprovechable se reportan los procedimientos de Bray & Kurtz, Olsen y ácido cítrico.

Los indicadores químicos deben describir las interacciones suelo-planta, disponibilidad y movilidad de nutrientes, agua para las plantas y otros organismos. Un CMD sería considerando materia orgánica, pH, nitrógeno, fósforo y bases intercambiables (Bünemann *et al.*, 2018).

## Indicadores biológicos

Las propiedades biológicas más recurrentemente usadas como indicadores de calidad de suelos fueron carbono en biomasa microbiana (Armida-Alcudia *et al.*, 2005; Campos-Cascaredo *et al.*, 2007; Pajares-Moreno *et al.*, 2010; Estrada-Herrera *et al.*, 2017; Cruz-Flores *et al.*, 2020); respiración (Pajares-Moreno *et al.*, 2010; Rodríguez-Serrano *et al.*, 2016; de la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Bedolla-Rivera *et al.*, 2020); lombrices (Huerta *et al.*, 2009; de la Cruz-Elizondo y Fontalvo-Buelvas, 2019; Castillo-Valdez *et al.*, 2021; Peña-Morales *et al.*, 2021); enzimas involucradas en el metabolismo intracelular, nitrógeno, carbono y fósforo (Pajares-Moreno *et al.*, 2010, 2011; Cruz-Ruiz *et al.*, 2015; Cruz-Flores *et al.*, 2020); mesofauna y macrofauna edáfica (Uribe-Hernández *et al.*, 2010; Rodríguez-Serrano *et al.*, 2016; Murillo-Cuevas *et al.*, 2019) y hongos micorrízicos arbusculares, bacterias y actinomicetos (Murillo-Cuevas *et al.*, 2019; Cruz-Flores *et al.*, 2020; Duché-García *et al.*, 2021; Trejo *et al.*, 2021).

Para determinar el carbono en la biomasa microbiana en los artículos revisados se reportan los métodos de fumigación-incubación; para la respiración del suelo se reporta el método de la cámara cerrada; para las lombrices se menciona el método de extracción de monolitos de suelo de dimensiones de 25 cm x 25 cm x 30 cm de profundidad; las enzimas mediante diversas metodologías como se describe Pajares-Moreno *et al.* (2010); mesofauna y macrofauna por el embudo de Berlese, una descripción de esta metodología se describe detalladamente en Rodríguez-Serrano *et al.* (2016) y la cuantificación de hongos, bacterias y actinomicetos en diferentes medios de cultivo, según se describe en Murillo-Cuevas *et al.* (2019); Duché-García *et al.* (2021). Un CMD sería considerando el carbono en la biomasa microbiana, respiración del suelo, densidad de lombrices, enzimas: deshidrogenasa, #-glucosidasa, ureasa y fosfatasa, y hongos micorrízicos arbusculares (Bünemann *et al.*, 2018).

## Índices empleados

La mayoría de los artículos consultados usan un conjunto de propiedades físicas, químicas o biológicas como indicadores de calidad, empleando para ello el valor o contenido de dicha propiedad, comparándolo con intervalos previamente establecidos o reportados como se describe en Yáñez-Díaz *et al.* (2018); Martínez-Rodríguez *et al.* (2021). Otros autores (Prieto-Méndez *et al.*, 2013; Estrada-Herrera *et al.*, 2017; Muñoz-Iniestra *et al.*, 2017; Hernández-González *et al.*, 2018; Duché-García *et al.*, 2021) emplean ecuaciones para normalizar los valores de las propiedades del suelo utilizadas como indicadores.

$$V_i = \frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad 1)$$

$$V_i = 1 - \frac{I_m - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad 2)$$

Donde:  $V_i$ : valor normalizado del indicador (lineal);  $I_m$ = valor experimental de la propiedad del suelo considerada como indicador;  $I_{\min}$ = valor mínimo de la propiedad del suelo considerada como indicador;  $I_{\max}$ = valor máximo de la propiedad del suelo considerada como indicador.

La ecuación (1) se aplica a aquellos indicadores de calidad donde son convenientes valores elevados (carbono orgánico) y la ecuación (2) a aquellos donde convienen valores bajos (densidad aparente). El ACP se reporta por varios autores como útil en la definición de íCS (Govaerts *et al.*, 2006; Campos-Cascaredo *et al.*, 2007; Bautista-Cruz *et al.*, 2012; Rangel-Peraza *et al.*, 2017; Cruz-Flores *et al.*, 2020; Bedolla-Rivera *et al.*, 2020; Castillo-Valdez *et al.*, 2021; Chavarin-Pineda *et al.*, 2021; Duché-García *et al.*, 2021; Fonteyne *et al.*, 2021; Martínez-Rodríguez *et al.*, 2021).



Para la conformación de un CMD a través de indicadores de calidad, se eligen los componentes principales que expliquen al menos una parte significativa de la variabilidad (80%) con un valor propio >1 (eigenvalor). Los indicadores con los pesos más altos tienen mayor influencia en la calidad del suelo dentro de cada componente principal, para el caso sólo se consideran a los indicadores dentro del intervalo de 10%:  $ICS_c - 0.1 \cdot ICS_c$ . Donde:  $ICS_c$  = peso del indicador de calidad del suelo con mayor peso dentro del componente principal.

Cuando más de un indicador de calidad es retenido en los diferentes componentes principales con la regla anterior, se realiza un análisis de redundancia mediante una correlación de Pearson. Si existe correlación significativa, se retiene el indicador con más peso, de lo contrario ambos indicadores son retenidos. Después de normalizar los indicadores de calidad retenidos mediante alguna de las ecuaciones 1-9, se procede a generar los íCS a través de las ecuaciones 10 y 11 (Bedolla-Rivera *et al.*, 2020; Martínez-Rodríguez *et al.*, 2021).

$$V_l = \frac{I_m}{I_{\max}} \quad 3); \quad V_{nl} = \frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{I_m}{I}\right)^{-2.5}\right\}} \quad 4); \quad f(x)_l = \begin{cases} 0.1, & \&x \leq L \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{x-L}{U-L}, & \&L \leq x \leq U \\ 1, & \&x \geq U \end{cases} \quad 5)$$

$$V_l = \frac{I_{\min}}{I_m} \quad 6); \quad V_{nl} = \frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{I_m}{I}\right)^{2.5}\right\}} \quad 7); \quad f(x)_l = \begin{cases} 1, & \&x \leq L \\ 1 - 0.9 \times \frac{x-L}{U-L}, & \&L \leq x \leq U \\ 0.1, & \&x \geq U \end{cases} \quad 8)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0.1, & \&x < L, \quad x > U \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{x-L}{U-L}, & \&L \leq x < L_1 \\ 1 - 0.9 \times \frac{x-L}{U-L}, & \&U_1 \leq x < U \\ 1, & \&L_1 \leq x < U_1 \end{cases} \quad 9)$$

Donde:  $V_{nl}$ ,  $f(x)_l$  = valor normalizado del indicador (no lineal y lineal, respectivamente); ecuaciones 3-5 = mayor valor del indicador es mejor; ecuaciones 6-8 = menor valor del indicador es mejor; ecuación 9 = valor óptimo; # valor promedio del indicador en el área de estudio; L = umbral inferior; U = umbral superior;  $L_1$  y  $U_1$  = valor del indicador para una línea base inferior y superior.

$$\acute{I}CS_A = \sum_{i=1}^n S_i / n \quad 10)$$

$$\acute{I}CS_{PA} = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad 11)$$

Donde:  $\acute{I}CS_A$ ;  $\acute{I}CS_{PA}$  = índice de calidad de suelo (aditivo y ponderado aditivo, respectivamente);  $S_i$  = indicador de calidad de suelo normalizado; n = número de indicadores de calidad de suelo en el CMD;  $W_i$  = ponderación obtenida al dividir el porcentaje de varianza explicada por el componente principal entre el porcentaje de varianza acumulada por los componentes principales retenidos.

De la situación antes expuesta, se desprende la necesidad de mayores esfuerzos para generar conocimientos sobre la calidad de los suelos ya que la información es escasa y la existente se concentra sólo en algunas regiones del país para algunos grupos de suelos. Para atender esta

situación en México, se requiere el desarrollo de indicadores e índices de calidad y salud del suelo basados en propiedades físicas, químicas, biológicas con fundamento en información técnica y científica en el corto (2022-2024), mediano (2025-2030) y largo plazos (más allá de 2030).

## Conclusiones

Debe prestarse mayor atención al estudio de los indicadores e índices de calidad de los suelos en México. Esta atención debe focalizarse a nivel estatal, regional o en grupos de suelos donde no se cuenta con información. Se propone como indicadores físicos: textura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, resistencia a la penetración, curva de retención de humedad y profundidad del suelo; como indicadores químicos: materia orgánica, pH, nitrógeno total, nitrógeno inorgánico, fósforo, potasio, calcio y magnesio; y como indicadores biológicos: carbono en la biomasa microbiana, respiración del suelo, densidad de lombrices, deshidrogenasa, #-glucosidasa, ureasa, fosfatasa y hongos micorrízicos arbusculares.

Del conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos debe optarse por un subconjunto de estos o su reducción a un conjunto mínimo de datos para conformar un índice de calidad del suelo.

## Bibliografía

- 1 Acevedo-Gómez, R.; Sánchez-Hernández, M. A.; Gómez-Merino, F. C.; Ponce-Peña, P.; González-Lozano, M. A.; Navarro-Moreno, L. and Poisot, M. 2020. Soil Quality of Ananas comosus Cultivation Land in the Papaloapan Basin Region of Mexico after Wastes Addition as Fertilizer Supplement. *Agriculture*. 10(5):1-12. Doi: 10.3390/agriculture 10050173.
- 2 Alcalá, J.; Sosa, M.; Moreno, M.; Rodríguez, J. C.; Quintana, C.; Terrazas, C. y Rivero, O. 2009. Metales pesados en suelo urbano como un indicador de la calidad ambiental: ciudad de Chihuahua, México. *Multequina*. 18(2):53-69.
- 3 Alejo-Santiago, G.; Salazar-Jara, F. I.; García-Paredes, J. D.; Arrieta-Ramos, B. G.; Jiménez-Meza, V. M. y Sánchez-Monteón, A. L. 2012. Degradación físico-química de suelos agrícolas en San Pedro Lagunillas, Nayarit. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 15(2):323-328.
- 4 Álvarez-Arteaga, G.; Ibáñez-Huerta, A.; Orozco-Hernández, M. E. y García-Fajardo, B. 2020. Regionalización de indicadores de calidad para suelos degradados por actividades agrícolas y pecuarias en el altiplano central de México. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*. 22(2):5-19.
- 5 Armida-Alcudia, L.; Espinosa-Victoria, D.; Palma-López, D. J.; Galvis-Spínola, A. y Salgado-García, S. 2005. Carbono en biomasa microbiana y carbono soluble como indicadores de calidad de Vertisoles cultivados con caña azucarera. *Terra Latinoamericana*. 23(4):545-551.
- 6 Bautista-Cruz, A.; del Castillo, R. F.; Etchevers-Barra, J. D.; Gutiérrez-Castorena, M. del C. and Baez, A. 2012. Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery after clearing of a tropical montane cloud forest in Mexico. *Forest Ecology and Management*. 277(1):74-80. Doi: 10.1016/j.foreco.2012.04.013.
- 7 Bedolla-Rivera, H. I.; Negrete-Rodríguez, M. L.; Medina-Herrera, M. D. R.; Gámez-Vázquez, F. P.; Álvarez-Bernal, D.; Samaniego-Hernández, M.; Gámez-Vázquez, A. J. and Conde-Barajas, E. 2020. Development of a soil quality index for soils under different agricultural management conditions in the Central Lowlands of Mexico: physicochemical, biological and ecophysiological indicators. *Sustainability*. 12(22):9754. Doi: 10.3390/su12229754.

- 8 Bugarín, J.; Bojórquez, J. I.; Lemus, C.; Murray, R. M.; Hernández, A.; Ontiveros, H. y Aguirre, J. 2010. Comportamiento de algunas propiedades físicoquímicas del suelo con diferente sistema silvopastoril en la Llanura Norte de Nayarit. *Cultivos Tropicales*. 31(2):48-55.
- 9 Bünemann, E. K.; Bongiorno, G.; Bai, Z.; Creamer, R. E.; De Deyn, G.; de Goede, R.; Fleskens, L.; Geissen, V.; Kuyper, T. W.; Mäder, P.; Pulleman, M.; Sukkel, W.; van Groenigen, J. W. and Brussaard, L. 2018. Soil quality a critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. 120(1):105-125. Doi: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030.
- 10 Campos-Cascaredo, A.; Oleschko-Lutkova, K.; Etchevers-Barra, J. D. and Hidalgo-Moreno, C. 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano. Mexico. *Forest Ecology and Management* . 248(3):174-182. Doi: 10.1016/j.foreco.2007.05.004.
- 11 Cantú-Silva, I.; Díaz-García, K. E.; Yáñez-Díaz, M. I.; Gonzalez-Rodríguez, H. y Martínez-Soto, R. A. 2018. Caracterización físicoquímica de un calcisol bajo diferentes sistemas de uso de suelo en el noreste de México. *Rev. Mex. Cienc. Forest.* 9(49):59-86. Doi: 10.29298/rmcf.v9i49.153. DOI: 10.29298/rmcf.v9i49.153.
- 12 Castillo-Valdez, X.; Etchevers-Barra, J. D.; Hidalgo-Moreno, C. M. I. y Aguirre-Gómez, A. 2021. Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana* . 39(1):1-12. Doi: 10.28940/terra.v39i0.698.
- 13 Chavarin-Pineda, Y.; Reynoso, E. C.; Torres, E.; Cruz-Flores, G.; Tenorio-Arvide, M. G.; Linares-Fleites, G. and Valera-Pérez, M. Á. 2021. Soil quality in volcanic soils in a forest biosphere reserve in Mexico. *Soil and Water Research*. 16(4):217-227. Doi: 10.17221/108/2020-SWR.
- 14 Cruz-Flores, G.; Guerra-Hernández, E. A.; Valderrábano-Gómez, J. M. y Campo-Alvés, J. 2020. Indicadores de calidad de suelos en bosques templados de la Reserva de la Biosfera los Volcanes, México. *Terra Latinoamericana* . 38(4):781-793. Doi: 10.28940/terra.v38i4.421.
- 15 Cruz-Ruiz, E.; Cruz-Ruiz, A.; Vaca, R.; del Águila, P. and Lugo, J. 2015. Assessment of soil parameters related with soil quality in agricultural systems. *Life Science Journal*. 12(1):154-161. Doi: 10.1145/3132847.3132886.
- 16 De la Cruz-Elizondo, Y. y Fontalvo-Buelvas, J. C. 2019. Evaluación de la calidad del suelo de un huerto urbano en Xalapa, México. *Suelos Ecuatoriales*. 49(1 y 2):29-37. Doi: 10.47864/SE(49)2019p29-37-102.
- 17 Duché-García, T. T. A.; Ocampo-Fletes, I.; Cruz-Hernández, J.; Hernández-Guzmán, J. A.; Macías-López, A.; Jiménez-García, D. y Hernández-Romero, E. 2021. Grupos microbianos en un agroecosistema milpa intercalda con árboles frutales en Valles Altos de Puebla, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* . 24(2):1-17.
- 18 Estrada-Herrera, I. R.; Hidalgo-Moreno, C.; Guzmán-Plazola, R.; Almaraz-Suarez, J. J.; Navarro-Garza, H. y Etchevers-Barra, J. D. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*. 51(1):813-831.
- 19 Fernández-Ojeda, P. R.; Cristóbal-Acevedo, D.; Villanueva-Morales, A. y Uribe-Gómez, M. 2016. Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. *Rev. Mex. Cienc. Forest.* 7(35):65-77.
- 20 Fonteyne, S.; Burgueño, J.; Albarrán-Contreras, B. A.; Andrio-Enríquez, E.; Castillo-Villaseñor, L.; Enyanche-Velázquez, F.; Escobedo-Cruz, H.; Espidio-Balbuena, J.; Espinosa-Solorio, A.; García-Meza, P.; González-Galindo, F.; González-Regalado, J.; Govaerts, B.; López-Bustamante, J. D.; López-Ramírez, A.; Martínez-Gamiño, M. A.; Martínez-Hernández, F.; Mora-Gutiérrez, M.; Nieves-Navarro, A. I.; Noriega-González, L. A.; Núñez-Peñaloza, O.; Osorio-Alcalá, L.; de la Piedra-Constantino, R.; Ponce-Lira, B.; Rivas-Jacobo, I. C.; Saldivia-Tejeda, A.; Tapia-Moo, C. A.; Tapia-Naranjo, A.; Uribe-

- Guerrero, M. A.; Vilchis-Ramos, R.; Villa-Alcántara, J. and Verhulst, N. 2021. Effects of conservation agriculture on physicochemical soil health in 20 maize-based trials in different agroecological regions across Mexico. *Land Degradation & Development*. 32(6):2242-2256. Doi: 10.1002/ldr.3894.
- 21 Govaerts, B.; Sayre, K. D. and Deckers, J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*. 87(2):163-174. Doi: 10.1016/j.still.2005.03.005.
  - 22 Hernández-Ordoñez, J. O.; Gutiérrez-Castorena, M. del C.; Ortiz-Solorio, C. A.; Sánchez-Guzmán, P. y Ángeles-Cervantes, E. 2017. Calidad de andosols en sistemas forestal, agroforestal y agrícola con diferentes manejos en Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana*. 35(2):179-189. Doi: 10.28940/terra.v35i2.201.
  - 23 Hernández-González, D. E.; Muñoz-Iniestra, D. J.; López-Galindo, F. y Hernández-Moreno, M. M. 2018. Impacto del uso de la tierra en la calidad del suelo en una zona semiárida del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *BIOCyT*. 11(43):792-807.
  - 24 Huerta, E.; Kampichler, C.; Geissen, V.; Ochoa-Gaona, S.; De Jong, B. and Hernández-Daumás, S. 2009. Towards an ecological index for tropical soil quality based on soil macrofauna. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 44(8):1056-1062.
  - 25 López-Báez, W.; Reynoso-Santos, R.; López-Martínez, J.; Villar-Sánchez, B.; Camas-Gómez, R. y García-Santiago, J. O. 2019. Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10(4):897-910. Doi: 10.29312/remexca.v10i4.1764.
  - 26 Martínez-Rodríguez, Ó. G.; Can-Chulim, Á.; Ortega-Escobar, H. M.; Bojórquez-Serrano, J. I.; Cruz-Crespo, E.; García-Paredes, J. D. y Madueño-Molina, A. 2021. Fertilidad e índice de calidad del suelo de la cuenca del río San Pedro en Nayarit. *Terra Latinoamericana*. 39(1):1-13. Doi: 10.28940/terra.v39i0.766.
  - 27 Medina-Méndez, J.; Volke-Haller, V.; González-Ríos, J.; Galvis-Spínola, A.; Santiago-Cruz, M. y Cortés-Flores, J. 2006. Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en Luvisoles del estado de Campeche. *Universidad y Ciencia*. 22(2):175-189. Doi: 10.19136/era.a22n2.320.
  - 28 Muñoz-Iniestra, D. J.; Chávez-Mosqueda, M.; Godínez-Álvarez, H. O. y Cuéllar-Arellano, N. A. 2017. Cambios edáficos en islas de fertilidad y su importancia en el funcionamiento de un ecosistema del valle de Tehuacán Puebla, México. *Terra Latinoamericana*. 35(2):123-133. Doi: 10.28940/terra.v35i2.142.
  - 29 Murillo-Cuevas, F. D.; Adame-García, J.; Cabrera-Mireles, H. y Fernández-Viveros, J. A. 2019. Fauna y microflora edáfica asociada a diferentes usos de suelo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 6(16):23-33. Doi: 10.19136/era.a6n16.1792.
  - 30 Murray, R. M.; Orozco, M. G.; Hernández, A.; Lemus, C. y Nájera, O. 2014. El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 18(1):23-31.
  - 31 Pajares-Moreno, S.; Gallardo-Lancho, J. F. y Etchevers-Barra, J. D. 2010. Indicadores bioquímicos en suelos de un transecto altitudinal en el Eje Neovolcánico mexicano. *Agrociencia*. 44(3):261-274.
  - 32 Pajares-Moreno, S.; Gallardo-Lancho, J. F.; Masciandaro, G.; Ceccanti, B. and Etchevers-Barra, J. D. 2011. Enzyme activity as an indicator of soil quality changes in degraded cultivated Acrisols in the Mexican Trans-volcanic Belt. *Land Degradation and Development*. 22(3):373-381. Doi: 10.1002/ldr.992.
  - 33 Palma-López, D. J.; Salgado-García, S.; Martínez-Sebastian, G.; Zavala-Cruz, J. y Lagunes-Espinoza, L. del C. 2015. Cambios en las propiedades del suelo en

- plantaciones de eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 2(5):163-172.
- 34 Peña-Morales, D. I.; de la Cruz-Elizondo, Y.; Ruelas-Monjardin, L. C. y Fontalvo-Buelvas, J. C. 2021. Evaluación de la calidad del suelo en agroecosistemas tropicales de Xalapa y Emiliano Zapata en el estado de Veracruz, México. *Suelos Ecuatoriales* . 51(1 y 2):25-36. Doi: 10.47864/SE(51)2021p25-36-139.
  - 35 Prieto-Méndez, J.; Prieto-García, F.; Acevedo-Sandoval, O. y Méndez-Marzo, M. 2013. Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del Estado de Hidalgo, México. *Agronomía Mesoamericana*. 24(1):83-91.
  - 36 Prieto-Méndez, J.; Rubio-Arias, H.; Prieto-García, F.; Roman-Gutiérrez, A. D.; Méndez-Marzo, M. A. and Acevedo-Sandoval, O. A. 2011. Soil quality in terms of Physical-Chemical-Metal properties for barely (*Hordeum vulgare*) production in the state of Hidalgo, Mexico. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 10(2):230-237.
  - 37 Rangel-Peraza, J. G.; Padilla-Gasca, E.; López-Corrales, R.; Medina, J. R.; Bustos-Terrones, Y.; Amabilis-Sosa, L. E.; Rodríguez-Mata, A. E. and Osuna-Enciso, T. 2017. Robust Soil quality index for tropical soils influenced by agricultural activities. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*. 6(4):199-221. Doi: 10.4236/jacen.2017.64014.
  - 38 Rodríguez-Serrano, A. C.; Cristóbal-Acevedo, D.; Álvarez-Sánchez, E. y Uribe-Gómez, M. 2016. Indicadores de calidad de un suelo para la producción de maíz bajo sistemas agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 16(1):3263-3275.
  - 39 Santiago-Mejía, B. E.; Martínez-Menez, M. R.; Rubio-Granados, E.; Vaquera-Huerta, H. y Sánchez-Escudero, J. 2018. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema Lama-Bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*. 15(2):275-288. Doi: 10.22231/asyd.v15i2.796.
  - 40 Sustaita-Rivera, F.; Ordaz-Chaparro, V.; Ortiz-Solorio, C. y de León-González, F. 2000. Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debidos al uso agrícola. *Agrociencia*. 34(4):379-386.
  - 41 Trejo, D.; Sangabriel-Conde, W.; Gavito-Pardo, M. E. and Banuelos, J. 2021. Mycorrhizal inoculation and chemical fertilizer interactions in pineapple under field conditions. *Agriculture*. 11(10):1-8. Doi: 10.3390/agriculture11100934.
  - 42 Uribe-Hernández, R.; Juárez-Méndez, C. H.; Montes de Oca, M. A.; Palacios-Vargas, J. G.; Cutz-Pool, L. y Mejía-Recarmier, B. E. 2010. Colémbolos (Hexapoda) como bioindicadores de la calidad de suelos. *Rev. Mexicana de Biodiversidad*. 81(1):153-162. Doi: 10.22201/ib.20078706e.2010.001.188.
  - 43 Yáñez-Díaz, M. I.; Cantú-Silva, I. y González-Rodríguez, H. 2018. Efecto del cambio de uso de suelo en las propiedades químicas de un vertisol. *Terra Latinoamericana*. 36(4):369-379. Doi: 10.28940/terra.v36i4.349.
  - 44 Zavala-Cruz, J.; Salgado-García, S.; Marín-Aguilar, Á.; Palma-López, D. J.; Castelán-Estrada, M. y Ramos-Reyes, R. 2014. Transecto de suelos en terrazas con plantaciones de cítricos en Tabasco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 1(2):123-137.

## Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 May 2023
Date accepted: 01 August 2023
Publication date: 16 August 2023
Publication date: August 2023
Volume: 14
Issue: 6
Electronic Location Identifier: e3148
DOI: 10.29312/remexca.v14i6.3148

### Categories

Subject: Artículo

### Palabras clave:

**Palabras clave:**

análisis de componentes principales  
fertilidad física-química-biológica del suelo  
propiedades del suelo.

### Counts

Figures: 5

Tables: 0

Equations: 11

References: 44

Pages: 0