

Indicadores de calidad de suelo y productividad sustentable con agricultura de conservación

Esteban Salvador Osuna-Ceja^{1,§}
Miguel Ángel Martínez-Gamiño²
J. Saúl Padilla-Ramírez¹
J. Pimentel-López³

1 Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. AP. 20. CP. 20660. Tel. 55 38718700.

2 Campo Experimental San Luis Potosí-INIFAP.

3 Campus San Luis Potosí-Colegio de Posgraduados

Autor para correspondencia: osuna.salvador@inifap.gob.mx.

Resumen

A partir del uso intensivo del arado de discos y su acción de volteo en los suelos agrícolas del semiárido de México ha generado degradación severa de propiedades físicas y químicas. El objetivo de este estudio fue evaluar el estado estructural de un suelo (Xerosol) sometido a agricultura de conservación, para conocer los indicadores de calidad del suelo (ICS) e índices de sustentabilidad. En un experimento de largo plazo (1995-2020), bajo una rotación maíz-triticale en riego, se evaluaron dos sistemas de manejo de suelo: 1) labranza convencional y 2) agricultura de conservación. Los indicadores evaluados fueron: textura, densidad aparente, carbono orgánico del suelo, Índice de estabilidad estructural, estabilidad de los agregados mediante el diámetro peso medio, porosidad total, distribución de poros, porosidad ocupada por aire, constantes de humedad (θ_s , CC y PMP), lámina de agua almacenada, conductividad hidráulica saturada, pH, conductividad eléctrica y rendimiento de grano y forraje. Los resultados mostraron diferencia estadística entre labranza convencional y agricultura de conservación ($\alpha=0.05$) en 18 de los 19 ICS analizados. La mayor sustentabilidad estimada fue para AC con 85% en comparación con labranza convencional que fue de 59%. La agricultura de conservación presentó mayor estabilidad estructural con valores mayores de porosidad y menor densidad aparente, lo cual es favorable para la sostenibilidad de la estructura del suelo y los rendimientos del cultivo.

Palabras clave:

agricultura de conservación, carbón orgánico del suelo, estabilidad de agregados, MESMIS, sustentabilidad.



Introducción

El suelo es un recurso natural que bajo agricultura intensiva, su aprovechamiento es poco sustentable y se ha demostrado afecta negativamente la calidad en sus tres aspectos principales: físico, químico y biológico (Astier-Calderón *et al.*, 2002; Dexter, 2004; Navarro *et al.*, 2008). Los sistemas agrícolas convencionales de producción de cultivos practican la labranza intensiva y aplican insumos externos como estrategias para incrementar la fertilidad del suelo y el rendimiento.

Las consecuencias del laboreo intensivo disminuyen la calidad del suelo, que se refleja en problemas de compactación, bajas tasas de infiltración de agua, deficiente aireación, pérdida de la biodiversidad edáfica, contaminación del suelo y el agua por el uso excesivo de agroquímicos, así como el incremento de la erosión (Verhulst *et al.*, 2015).

Por el contrario, la agricultura de conservación (AC) genera mayor sostenibilidad para la producción de cultivo, con atributos de productividad, estabilidad y resiliencia, al impactar positivamente la calidad del suelo, producto del mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo (Torres *et al.*, 2006; Verhulst *et al.*, 2015; FAO, 2016).

Las principales ventajas de la AC son: aumentar el contenido de materia orgánica (así como el secuestro de carbono) en la superficie del suelo, coadyuvar al desarrollo estructural y estabilidad de agregados, incrementar la retención de agua, reducir el escurrimiento y la erosión del suelo (Verhulst *et al.*, 2015). Lo anterior, promueve un aumento en la calidad física del suelo y del ambiente (Dexter, 2004).

Para cuantificar los cambios en la calidad física del suelo que produce la AC a largo plazo, es indispensable medir indicadores e índices cualitativos a través de la evaluación de las propiedades del suelo (físicas, químicas y biológicas), las cuales deben ser fáciles de medir, aún los más sensibles cambios generados por el conjunto de prácticas de manejo (cero labranza, retención de residuos en la superficie y rotación de cultivos) que integra la AC, a magnitudes que explicarían la calidad del suelo, que es un paso práctico orientado a tener sustentabilidad y resiliencia ambiental (Dexter, 2004; Navarro *et al.*, 2008; Verhulst *et al.*, 2015).

Dichos cambios de los atributos físicos asociados a las prácticas de labranza presentan síntomas que tienen una causa común: el deterioro de la estructura del suelo (arreglo geométrico y topológico de los poros que se forman entre los agregados del suelo y su estabilidad en tiempo y espacio). Los flujos de agua y gases y el crecimiento de las raíces están asociadas a este atributo del medio poroso (Osuna *et al.*, 2006; Martínez y Gómez, 2012).

El objetivo de este estudio fue evaluar el estado estructural de un suelo (Xerosol) sometido a agricultura de conservación, para conocer los indicadores de calidad del suelo (ICS) e índices de sustentabilidad.

Materiales y métodos

El ensayo se hizo en el Campo Experimental San Luis, que se ubica en las coordenadas geográficas 22° 13' 45.8" latitud norte y 100° 51' 01.5" longitud oeste a una altitud de 1 838 m. La precipitación y temperatura media anual es de 210 mm y 16.2 °C y el suelo es un Xerosol (CGSNEGI, 1995), de textura franco arcillo-arenosa, con pH de 8.1, con 1.4% MO y CE de 0.81 dS m⁻¹ con problemas de compactación en todo el perfil. El agua para riego registró una CE de 0.29 dS m⁻¹ y RAS de 1.26, baja en salinidad y sodicidad (Sarabia *et al.*, 2011).

Desde 1995 se conduce un experimento de largo plazo (25 años) bajo condiciones de riego, donde se compararon dos sistemas de manejo de suelo: 1) LC-labranza convencional barbecho más rastra (Br + Ra) y 2) agricultura de conservación (AC) con una rotación maíz-triticale. Cada unidad experimental tuvo 240 m² y se usaron dos repeticiones (Martínez *et al.*, 2019).

La cosecha de maíz grano se realizó en forma manual, cuando el grano mostró aproximadamente un 15% de humedad. Se cosecharon dos muestras al azar de 6 m de longitud por tratamiento en los dos surcos centrales de cada unidad experimental. En el caso del triticale, éste se cosechó cuando el grano presentaba un estado lechoso-masoso y se tomaron dos muestras de 1 m² por tratamiento.

En la etapa de cosecha del maíz ciclo primavera- verano (P-V) 2020, se colectaron muestras de suelo a 0-10 cm de profundidad en las que se determinaron: textura (% arcilla, limo y arena), CH-constantes de humedad (a saturación θ_s , capacidad de campo CC y punto de marchitamiento permanente PMP), pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO) y carbón orgánico del suelo (COS).

Se utilizaron los siguientes procedimientos: textura (hidrómetro de Bouyoucos), CH en olla y membrana de presión; CE en extracto; pH en una relación agua: suelo 2.5:1 (Page *et al.*, 1982), MO se realizó con el método de Walkley y Black (AS-07) y en el caso de COS se determinó con muestras de suelo preparadas según el método AS-01 (SEMARNAT, 2000).

La densidad aparente (ρ_b) se determinó mediante la barrena de doble cilindro (Jury *et al.*, 1991). La porosidad total (f_T) se estimó en base a la densidad real (ρ_a) igual a 2.65 Mg m⁻³. La distribución de poros correspondientes, del espacio poroso total del suelo, se determinaron a partir de las curvas de retención de humedad (Dexter, 2004).

Se estimó: la estabilidad de agregados del suelo en agua mediante el diámetro peso medio (DPM_a) según Franzluebbers *et al.* (2000) el índice de estabilidad estructural (IEE), de acuerdo con Duval *et al.* (2015) y la conductividad hidráulica saturada (K_s) con el método de Reynolds y Elrick (1990).

Se realizaron análisis de varianza de acuerdo con un diseño completamente al azar con dos repeticiones de las variables medidas, pruebas de medias mediante el criterio de Tukey (0.05) y correlación por pares de parámetros de los atributos medidos. Se usó el software statistical analysis systems, versión 9.1.3 (SAS, 2013) y se efectuó un análisis de sustentabilidad mediante el diagrama radial tipo Amiba (Maser *et al.*, 2000).

Resultados y discusión

Se detectó diferencia entre la AC y la LC ($\alpha= 0.05$) en el contenido de arena y limo (Cuadro 1), no hubo diferencia estadística en arcilla, aunque lo anterior no modificó la clasificación textural franco arcillo-arenosa (Verhulst *et al.*, 2015). En densidad aparente (ρ_a) se observaron diferencia estadística ($\#= 0.05$) entre tratamientos (Cuadro 1). El valor más bajo lo presentó la el tratamiento con AC + 33% C, lo cual se atribuyó al desarrollo de una mejor estructura porosa propiciada por el mayor contenido de materia orgánica (MO) y la ausencia de compactación por el tránsito de maquinaria (Hamza y Anderson, 2005).

Cuadro 1. Efecto de los sistemas de manejo del suelo sobre el contenido de arena, limo y arcilla, densidad aparente (ρ_b), materia orgánica (MO), carbón orgánico del suelo (COS), índice de estabilidad estructural (IEE) y diámetro peso medio de agregados estables al agua (DPM_a). Campo Experimental San Luis, 2020.

Sistemas	Arena	Limo (g kg ⁻¹)	Arcilla	ρ_b (Mg m ⁻³)	MO (g kg ⁻¹)	COS	IEE (%)	DPM _a (mm)
				0-10 cm				
Labranza convencional	413.8 b	327 a	259.2 a	1.37 a	12.66 b	6.74 b	2.91 b	0.14 b
Agricultura de conservación	502.3 a	220.8 b	276.9 a	1.19 b	45.92 a	20.06 a	11.49 a	1.2 a
CV (%)	7.43	13.89	8.09	4.94	12.86	24.14	16.1	18.28

Promedios con distinta letra en una columna por parámetro son estadísticamente diferentes según Tukey (0.05).

Los valores de COS en 0-10 cm fue estadísticamente diferente entre ambos sistemas de manejo ($\alpha= 0.05$). El mayor valor de COS lo presenta el suelo bajo AC con relación al suelo con LC (Cuadro 1). Esto reflejó la mayor masa de raíces y la acumulación de residuos vegetales en la capa superficial del suelo que existen bajo el sistema de la AC, respecto al suelo cultivado con LC (Duval *et al.*, 2015).

El índice de estabilidad estructural (IEE) es un estimador de la 'capacidad de recuperación o resiliencia' de la estructura del suelo, el cual relaciona el COS con la textura del suelo (limo + arcilla). Los valores del índice de estabilidad estructural (IEE) indican diferencia estadística ($\neq 0.05$) entre tratamientos (Cuadro 1), por lo que se observó un estado estructural del suelo mayor en la AC con relación a la LC.

En el Cuadro 1 se observó que la estabilidad estructural a través del DPM_a presentó diferencias ($\alpha= 0.05$) entre tratamientos. La AC presentó un valor de DPM_a moderadamente estable con un valor promedio de 1.2 mm, frente a la LC con un valor promedio de 0.14 mm, considerado un estado estructural muy inestable (Le Bissonais, 1996). DPM_a aumentó con el tiempo en la AC, debido al aporte de residuos, lo que sugiere un efecto de la MO en el incremento de la estabilidad estructural dentro de los primeros 10 cm de profundidad. Lo anterior se manifestó después de 25 años con la AC, en donde el suelo tiende a presentar resiliencia estructural.

La porosidad total, y su clasificación en macroporos, mesoporos y microporos reportaron diferencias entre tratamientos ($\alpha= 0.05$). La AC presentó los valores más altos, en comparación con la LC. Esto indica que las aportaciones continuas de residuos y su descomposición superficial, incrementan la incorporación de MO al suelo y propicia un desarrollo de una estructura más porosa (Osuna *et al.*, 2006). Este estudio mostró que la continua labranza disminuyó significativamente estas diferentes clases de poros, en aproximadamente 12, 14 y 15%, respectivamente, con respecto a la AC.

En el caso de la LC, el barbecho más rastra causa daños significativos en la estabilidad estructural por lo que se reduce la porosidad, la infiltración del agua y el intercambio gaseoso; afectan negativamente el crecimiento y desarrollo de la raíz y su aporte a la parte aérea de los nutrientes y agua necesario para el desarrollo de la planta (Ceballos *et al.*, 2010).

Para la porosidad ocupada por aire (f_a), se registraron diferencias ($\neq 0.05$) entre sistemas de manejo. En la prueba de medias de f_a (Cuadro 1), la AC tuvo un contenido volumétrico de aire superior a la LC, lo cual representa un 14% más alto. Esta tendencia se correlaciona con la disminución de f_{ma} y f_{me} detectada en el suelo con la LC.

El valor del contenido de agua a saturación (θ_s) fue mayor para la AC ($0.496 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) que en LC ($0.419 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para la profundidad 0-10 cm ($\alpha= 0.05$) (Cuadro 2). Los contenidos de agua a CC y PMP fueron diferentes ($\alpha= 0.05$) también más altos para la AC que para la LC, dando valores mayores de humedad aprovechable en términos de lámina (L_a), lo cual se atribuyó a que la porosidad y el contenido de MO fueron mayores en la AC, con respecto a la LC. Resultados similares han sido reportados por Rubio *et al.* (2008).

Cuadro 2
Efecto de los sistemas de manejo del suelo sobre la porosidad total (f_T) y su clasificación: macroporos (f_{ma}), mesoporos (f_{me}) y microporos (f_{mi}) y porosidad ocupada por aire (f_a), contenido de agua a saturación (θ_s), capacidad de campo (CC), punto de marchitamiento permanente (PMP), lámina de agua aprovechable (L_a) y conductividad hidráulica saturada (K_s). Campo Experimental San Luis, 2020.

Sistemas	f_T	f_{ma}	f_{me}	f_{mi}	f_a	θ_s	CC	PMP	L_a	K_s
	(cm cm ⁻³)								(cm)	(cm hr ⁻¹)
	0-10 cm									
LC	0.49 b	0.06 b	0.221 b	0.204 b	0.282 b	0.419 b	0.316 b	0.166 b	1.97 b	0.154 b
AC	0.55 a	0.067 a	0.252 a	0.235 a	0.321 a	0.496 a	0.377 a	0.192 a	2.29 a	8.5 a
CV (%)	6.09	4.98	3.27	2.88	2.35	6.91	9.12	7.89	7.91	32.12

Labranza convencional (LC); agricultura de conservación (AC). Promedios con distinta letra en una columna por parámetro son diferentes. Tukey (0.05).

Con relación a la K_s , se observó que ésta fue más alta en la AC en comparación con la LC, lo cual confirma la degradación de la estructura por efecto del laboreo del suelo. El análisis de los datos muestra que la movilidad del agua es claramente superior en el suelo con la AC, evidenciando su mayor capacidad para transportar y redistribuir el agua a través del medio poroso, debido a la creación de poros grandes, estables y continuos que producen mayores tasas de infiltración en la capa arable (Shukla *et al.*, 2003; Navarro *et al.*, 2008).

Los valores promedios de pH fueron de 7.9 para la AC y de 8.3 en la LC y cuya diferencia fue significativa ($\alpha= 0.05$). La tendencia a disminuir de este parámetro en el suelo con AC, probablemente se deba a la acumulación de MO en la capa superficial del suelo, ya que genera acidez por el proceso de descomposición o quizás puede deberse al efecto acidificante de los fertilizantes con nitrógeno y fósforo aplicados de manera más superficial en la AC que con la LC (Verhulst *et al.*, 2015; Báez *et al.*, 2017). Por su parte, la CE presentó valores de 0.76 y 1.4 $dS\ m^{-1}$ y hubo diferencia entre ambos tratamientos ($\alpha= 0.05$). El mayor valor lo presentó el suelo con AC; sin embargo, este parámetro está aún por abajo del valor crítico señalado (<3) (Shukla *et al.*, 2003).

Se encontró una correlación ($p < 0.05$) entre 138 de los 171 pares de atributos del suelo. La p_a se correlacionó fuerte y negativamente con f_a , f_T , f_{ma} , DPM_a y IEE ($r \geq 0.8$). Altas correlaciones positivas fueron obtenidas entre DPM_a y IEE, COS, K_s , e_s , MO y f_{ma} ($r > 0.82$) y correlaciones negativas con pH y L_i ($r \geq 0.72$). La K_s fue alta y positivamente correlacionada con MO, COS, IEE, $\#_s$, f_{ma} , f_a y f_T ($r \geq 0.74$) y correlacionada negativamente con pH ($r = -0.8$). La CE y pH se correlacionaron negativamente ($r = -0.9$). Por el contrario, la MO se correlacionó significativa y positivamente con COS, IEE, f_{ma} y f_a ($r \neq 0.74$), así como también, L_a se correlacionó significativamente f_{me} , f_{mi} , f_T , f_{ma} y f_a (≥ 0.72).

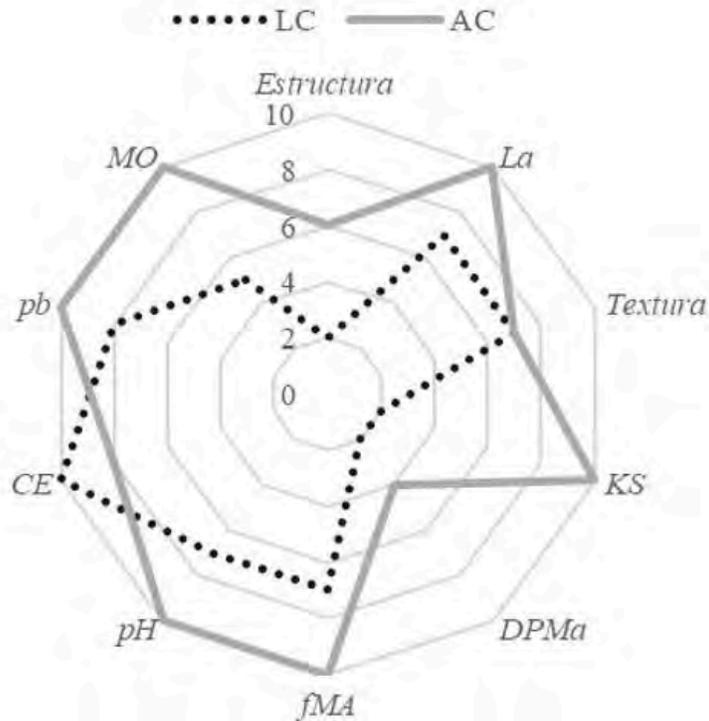
La calidad física del suelo se define en base a sus propiedades intrínsecas, así como su capacidad productiva y de amortiguadores ambientales (Astier-Calderón *et al.*, 2002). La AC, produce un mejoramiento de la calidad física edáfica, ya que se percibe, en general, incrementos y decrementos en el valor de algunos atributos, relacionados con la estructura y su estabilidad.

Por ejemplo, puede incrementarse la tasa de infiltración o de aireación, debido a un aumento de la cantidad de macroporos, a un mayor tamaño y estabilidad de agregados y una mayor cantidad de MO, que producen incrementos en la transmisión, y disponibilidad de agua del suelo para las plantas en el largo plazo (25 años), lo cual coincide con otros autores (Navarro *et al.*, 2008; García *et al.*, 2018).

Mediante el diagrama radial tipo AMIBA (Masera *et al.*, 2000), se pudo visualizar gráficamente las deficiencias de cada sistema de manejo a partir de los indicadores seleccionados (Figura 1). La AC presentó un valor de sustentabilidad de 85%, mientras que la LC alcanzó 59% (Cuadro 3). La AC tendió hacia el valor óptimo de sustentabilidad en la mayoría de los atributos, mientras que LC se retrajo hacia el centro de la gráfica (Figura 1). Se infiere que la calidad del suelo con AC se encuentra en una condición eficiente y más sustentable que LC (Alonso, 2004; Altieri y Nicholls, 2005).



Figura 1. Comparación de la sustentabilidad de la labranza convencional (LC) y la agricultura de conservación (AC) por medio del marco de evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales incorporando indicadores de sustentabilidad (MESMIS).



Cuadro 3. Selección y ponderación de indicadores de suelo bajo dos sistemas de manejo. Campo Experimental San Luis, 2020.

Indicador	VR	LC	AC
Estabilidad de la estructura	10	2	6
2. Lámina de agua aprovechable (La, cm)	10	7	10
3. Tipo de textura	10	7	7
4. Conductividad hidráulica saturada (K_s , $cm\ hr^{-1}$)	10	4	10
5. Diámetro peso medio de agregados estables en agua (mm)	10	2	4
6. Porosidad de macroporos ($cm\ cm^{-3}$)	10	7	10
7. pH del extracto de saturación	10	7	10
8. C.E. del extracto de saturación ($dS\ m^{-1}$)	10	10	8
9. Densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$)	10	8	10
10. Materia orgánica ($g\ kg^{-1}$)	10	5	10

Indicador	VR	LC	AC
Total favorable máximo posible (suma superior)	100	59	85

Shukla *et al.* (2003).

El análisis estadístico para el rendimiento de grano y materia seca de maíz y triticale reportó diferencia entre sistemas de manejo ($\alpha= 0.05$) (Cuadro 4). Los mayores rendimientos de grano y forraje de maíz y triticale obtenidos en la AC, se atribuyen a la mejora de la calidad del suelo, asociada con la estabilidad y resiliencia de la estructura edáfica. La relación AC/LC indica que el rendimiento relativo de ambos cultivos en la AC superó en 54 y 34% a la LC debido al mejoramiento sustentable de los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo (Martínez-Gamiño *et al.*, 2019).

Cuadro 4. Rendimiento promedio de grano de maíz y materia seca (MS) de triticale con labranza de convencional (LC) y agricultura de conservación (AC). Campo Experimental San Luis, 2020.

Cultivos en rotación	Rendimiento de grano y MS ($t\ ha^{-1}$)	
	Maíz	Triticale
LC	6.9 b	6.5 b
AC	10.5 a	8.7 a
AC/LC (%)	154	134

LC= labranza convencional; AC= agricultura de conservación; promedios con distintas letras en una columna son estadísticamente diferentes según Tukey (0.05).

Conclusiones

El suelo estudiado se caracteriza por una estabilidad estructural frágil. Este problema se acentúa con el uso de prácticas intensivas de labranza, como el arado y la rastra que favorecen la erosión hídrica y eólica en estos suelos del semiárido, por lo que la AC es una alternativa más promisoría para una resiliencia estructural sostenible en estos suelos de condiciones secas.

La introducción de la AC que combina los tres principios de manejo: labranza cero, retención de residuos en la superficie y rotación de cultivos, promueven a mediano y largo plazo la conservación y mejoramiento de la calidad del suelo; favorecen la estabilidad estructural y aumentan el contenido de COS y la transmisión y retención de agua en el suelo. Esta técnica, posibilita el desarrollo de una agricultura sustentable en las zonas semiáridas de México.

En el suelo con AC, la mayoría de los atributos que representan, las propiedades físicas, químicas y de transmisión de agua fueron indicadores apropiados para evaluar la degradación de la calidad del suelo, puesto que mostraron sensibilidad al impacto de las prácticas de labranza. Esto indica que el sistema estructural es susceptible a la degradación física; AC presentó mejor estabilidad estructural y un mayor incremento del COS, lo cual es favorable para la sostenibilidad del sistema estructural del suelo y rendimientos del cultivo.

Bibliografía

- 1 Alonso, M. A. M. 2004. Impactos socioeconómicos de la agricultura ecológica. *In*: Marrón, J. M. J. y García, F. G. (Coord.) Agricultura Medio Ambiente y Sociedad. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. 280 p.
- 2 Altieri, M. A. and Nicholls, C. I. 2005. Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture. United Nations Environment Programme. DF. 290 p.
- 3 Astier-Calderón, M.; Maass-Moreno, M. y Etchevers-Barra, J. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*. 36(5):605-620.

- 4 Báez-Pérez, A.; Limón-Ortega, A.; González-González, L.; Ramírez-Barrientos, C. E. y Bautista-Cruz, A. 2017. Efecto de las prácticas de agricultura de conservación en algunas propiedades químicas de los vertisoles. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8(4):759-772.
- 5 Ceballos, V. D.; Hernández, O. I. y Vélez, J. L. 2010. Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas de un Andisol del departamento de Noriño. *Revista de Agronomía*. 27(1)40-48.
- 6 Dexter, A. R. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. 120:201-214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>.
- 7 Duval, M. E.; Galantini, J. A.; Martínez, J. M.; López, F. M. y Wall, L. G. 2015. Evaluación de la calidad física de los suelos de la región pampeana: efecto de las prácticas de manejo. *Ciencias Agronómicas-Revista XXV-año 15-2015/033-043*.
- 8 FAO. 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Conservation Agriculture. <http://www.fao.org/ag/ca/6c.html>.
- 9 Franzluebbers, A. J.; Haney, R. L.; Honeycutt, C. W. Schomberg, H. H. and Hons, F. M. 2000. Flux of carbon dioxide following Rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(2):613-623. <https://pubag.nal.usda.gov>.
- 10 García, D. Y.; Cárdenas, J. F. y Silva, P. A. 2018. Evaluación de sistemas de labranza sobre propiedades fisicoquímicas y microbiológicas en un Inceptisol. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 35(1):16-25. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.79>.
- 11 Hamza, M. A. and Anderson, W. K. 2005. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*. 82(2):121-145. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.79>.
- 12 Jury, W. A.; Gardner, W. R. and Gardner, W. H. 1991. *Soil physics*. 5th Ed. John Wiley and Sons. New York. 328 p.
- 13 Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47:425-437. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.79>.
- 14 Martínez, A. y Gómez, J. 2012. Elección de los agricultores en la adopción de tecnologías de manejo de suelos en sistemas de producción de algodón y sus cultivos en rotación en el Valle cálido del alto magdalena. *Revista Corpoica*. 13(1):62-70. <http://www.redalyc.org/articulo.oa>.
- 15 Martínez-Gamiño, M. A.; Osuna-Ceja, E. S. y Espinosa-Ramírez, M. 2019. Impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades del suelo y rendimiento de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10(4):765-778. Doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1640>.
- 16 Maser, O.; Astier, M. y López-Ridaura, S. 2000. *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS*. Mundi Prensa, GIRA, UNAM, DF. 160 p. https://www.researchgate.net/profile/Marta-Astier/publication/299870632_Sustentabilidad_y_manejo_de_recursos_naturales_El_Marco_de_evaluacion_MESMIS/links/57068f7f08aea3d280211802/Sustentabilidad-y-manejo-de-recursos-naturales-El-Marco-de-evaluacion-MESMIS.pdf.
- 17 Navarro, B. A.; Figueroa, S. B.; Martínez, M. M. R.; González, C. F. V. y Osuna, C. E. S. 2008. Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. *Agricultura Técnica en México*. 34(2):151-158. <https://www.researchgate.net/>.
- 18 Osuna-Ceja, E. S.; Figueroa-Sandoval, B.; Oleschko, M. K.; Flores-Delgadillo, L.; Martínez-Menes, M. R. y González-Cossío, F. V. 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*. 40(1):27-38. <http://www.redalyc.org/articulo.oa>.

- 19 Page, A. L.; Miller, R. H. and Keeney, D. R. 1982. Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties. Agronomy No. 9. ASA and SSSA. Madison, WI, USA. 1159 p. <https://onlinelibrary.wiley.com>.
- 20 Reynolds, W. and Elrick, D. 1990. Pondered infiltration from a single ring: analysis of steady flow. Soil Sci. Soc. Am. J. 54(5):1233-1241. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400050006x>.
- 21 Rubio, C. M.; Llorens, P. and Gallart, F. 2008. Uncertainty and efficiency of pedotransfer functions for estimating water retention characteristics of soil. European Journal of Soil Science. 59(2):339-347. Doi:10.1111/j.1365-2389.2007.01002.x.
- 22 Sarabia, M. I. F.; Cisneros, R. A. J.; Aceves, D. A.; Durán, H. M. G. y Castro, J. L. 2011. Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del valle de San Luís Potosí. México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 27(2):103-113. <http://www.scielo.org.mx>.
- 23 SAS Institute. 2013. Statistical Analysis Software. Versión 9.1.3, edit. SAS Institute Inc. Cary, NC. USA. <http://www.sas.com/en us/software/analytics/stat.html#>>.
- 24 SEMARNAT. 2000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. No. NOM-021-SEMARNAT-2000, Inst. Diario Oficial de la Federación, México. 85 p. <http://www.semarnat.gob.mx/node/18>.
- 25 Shukla, M. K.; Lal, R. and Ebinger M. 2003. Tillage effects on physical and hydrological properties of a typic Argiaquoll in Central Ohio. Soil Science. 168(11):802-811. Doi: 10.1097/01.ss.0000100470.96182.4a.
- 26 Verhulst, N. I. y Bram, G. F. 2015. Agricultura de Conservación, ¿mejora la calidad del suelo a fin de obtener sistemas de producción sustentable? Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz Y Trigo (CIMMYT). 18 p. <https://repository.cimmyt.org>.



Indicadores de calidad de suelo y productividad sustentable con agricultura de conservación

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 July 2024
Date accepted: 01 October 2024
Publication date: 17 December 2024
Publication date: Nov-Dec 2024
Volume: 15
Issue: 8
Electronic Location Identifier: e2970
DOI: 10.29312/remexca.v15i8.2970

Categories

Subject: Artículo

Palabras claves:

Palabras claves:

agricultura de conservación
carbón orgánico del suelo
estabilidad de agregados
MESMIS
sustentabilidad

Counts

Figures: 1
Tables: 4
Equations: 0
References: 26
Pages: 0