

Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión

Agricultural management of Vertisols in Mexico: a review

Carlos Alberto Torres Guerrero¹, Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena^{1‡},
Carlos Alberto Ortiz Solorio¹ y Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena²

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

[‡] Autora responsable (castor@colpos.mx)

² Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Francisco I. Madero s/n, Hacienda El Canada. 66050 Gral. Escobedo, N. L., México.

RESUMEN

Los Vertisoles ocupan el 8.3% del territorio nacional y se consideran los suelos más productivos del país. A pesar de ello, las investigaciones sobre su manejo agronómico han sido llevadas a cabo sólo en algunas localidades del país o en campos experimentales que impide la transferencia de tecnología. Varios esfuerzos se han realizado por generar información en este tipo de suelos desde 1985, sobre todo en el Altiplano Mexicano y en la zona costera del Golfo de México donde son dominantes y presentan serios problemas de degradación; sin embargo, también son comunes en otras regiones de México en las cuales se cuenta con escasa información. El objetivo de esta investigación fue realizar una revisión bibliográfica acerca del manejo agronómico de Vertisoles en México y las modificaciones que sufren sus propiedades físicas y químicas. El análisis de la información indica que los Vertisoles presentan problemas de manejo en cuatro aspectos principales: a) mecanización; b) compactación, c) drenaje y d) fertilización. No obstante su complejidad, las caracterizaciones de sus propiedades edáficas se han realizado sólo con algunas determinaciones físicas o químicas. El entendimiento de los procesos de formación puede ayudar a generar prácticas agronómicas adecuadas para cada zona agroclimática y disminuir los problemas de degradación física (compactación) y química (declinación de la fertilidad) que se están presentando en nuestro país.

Palabras clave: propiedades edáficas; fertilización; labranza; degradación química y física.

SUMMARY

Vertisols cover 8.3% of Mexico's territory and are considered the most productive soils. Nevertheless, agronomic management research has been carried out only in experimental fields or some parts of the country. In consequence, the transfer of technology, nationally and internationally, is limited. Much effort has been made to generate information on these soils since 1985, especially on the Mexican highlands and the Gulf coast region of Mexico where they are dominant and serious problems of degradation exist. However, they are also common in other parts of Mexico where the information is deficient. This paper is a review of the literature on agronomic management of Vertisols and changes in their physical and chemical properties. The analysis indicates that there are Vertisol management problems in four main areas: a) mechanization; b) compaction, c) drainage, d) fertilization. Despite their complexity, characterizations of their properties have only been performed with some physical or chemical determinations. Knowing soil formation processes can help generate agronomic practices suitable for Vertisols in each agro-climatic zone and reduce the problems of physical (compaction) and chemical (fertility decline) degradation that occur in Mexico.

Index words: soil properties; fertilization; tillage; physical and chemical degradation.

Como citar la revisión:

Torres Guerrero, C. A., M. C. Gutiérrez Castorena, C. A. Ortiz Solorio y E. V. Gutiérrez Castorena. 2016. Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión. *Terra Latinoamericana* 34: 457-466.

Recibido: noviembre de 2015. Aceptado: agosto de 2016.
Publicado como revisión en *Terra Latinoamericana* 34: 457-466.

INTRODUCCIÓN

Los Vertisoles (del latín *verteré*; invertir) son suelos de más de 25 cm de profundidad, contienen más de 30% de arcillas, y se mezclan constantemente por procesos de expansión y contracción dando como resultado grietas profundas en la estación seca, caras de deslizamiento (*slickensides*) y agregados en forma de cuña (Soil Survey Staff, 2014). El microrelieve *gilgai* es peculiar en estos suelos, aunque no se encuentra comúnmente. Los Vertisoles se originan a partir de rocas ígneas o sedimentarias por meteorización o sedimentación donde se acumulan arcillas 2:1. Estos suelos se localizan principalmente en depresiones y áreas planas a onduladas, en climas tropicales, subtropicales, semiáridos a subhúmedos y húmedos, con una alternancia clara entre la estación seca y húmeda. La vegetación predominante es de sabana, bosque o pastizal (Coulombe *et al.*, 2000).

Las condiciones ambientales que conducen a la formación de un horizonte vértico o propiedades vérticas son aquellas donde ocurre precipitación suficiente para permitir el intemperismo de los materiales parentales, pero no tan alta como para producir lixiviación de bases; además de periodos secos, drenaje restringido y altas temperaturas (ISRIC, 2013).

A nivel mundial se considera que los Vertisoles cubren 335 millones de hectáreas y se presentan principalmente en los trópicos semiáridos, con una precipitación media anual de 500-1000 mm, pero también se encuentran en los trópicos húmedos. En México, ocupan 9.5 millones de ha, que representan 8.3% del territorio nacional (INEGI, 2014), y ocurren en diferentes zonas agroecológicas; de esa superficie 18% son de agricultura de temporal y 29.87% de riego (Ortiz y Gutiérrez, 1995, 1999). Estos suelos forman unidades puras con pocas asociaciones con otras clases de suelo, los cuales se concentran principalmente en el Altiplano Mexicano (Guanajuato y Querétaro) y en las planicies costeras del Golfo de México (Tamaulipas, Veracruz y Tabasco) (Sotelo *et al.*, 2006, 2008, 2013). Aunque también se encuentran en el Eje Neovolcánico Transmexicano en los estados de Michoacán, Morelos, Estado de México y Querétaro (Krasilnikov *et al.*, 2013) y en los distritos de riego de Sonora y Sinaloa (INEGI, 2014).

Los Vertisoles poseen un gran potencial productivo en granos (sorgo, trigo y maíz), caña de azúcar y

hortalizas (SIAP, 2015); sin embargo, presentan degradación física (66%) por compactación de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Colegio de Postgraduados (SEMARNAT-CP, 2002¹) o degradación química por declinación en su fertilidad (53%) (Moncada *et al.*, 2013). La contaminación con metales pesados (Siebe, 1994; Siebe y Cifuentes, 1995), residuos farmacéuticos y bacterias patógenas (Dalkmann *et al.*, 2012) son otros problemas que se presentan cuando son irrigados con aguas residuales.

Dada la relevancia de los Vertisoles en la producción de cultivos, en sus implicaciones en la población rural o urbana debido a su degradación y los posibles cambios que pueden sufrir por eventos climáticos, se consideró necesario realizar una revisión bibliográfica tanto de literatura gris (memorias de congresos o tesis) y de revistas científicas sobre su manejo agronómico, con particular énfasis en la modificación de sus propiedades físicas, químicas y su fertilidad.

ESBOZO HISTÓRICO DEL ESTUDIO DE VERTISOLES EN MÉXICO

Sin duda en México se han realizado esfuerzos para comprender a los suelos arcillosos. Dos han sido quizá los mayores intentos para reconocer, entender, clasificar y manejar esta clase de suelos. El primero se concretó en la Reunión Nacional sobre el Manejo de Suelos Arcillosos y su implicación en la agricultura realizada en Celaya, Guanajuato en 1985 (Ruíz *et al.*, 1985²). La Segunda Reunión Nacional se llevó a cabo diez años después en Mérida, Yucatán (Ruíz, 1995). En esta reunión se propuso la creación del Programa Nacional para el estudio de los suelos arcillosos de México. El objetivo era desarrollar una agricultura sustentable en cuanto al requerimiento nutricional de los cultivos, necesidades de fertilizantes y manejo agronómico, pero este programa nunca logró concretarse.

A pesar de la importancia agronómica de los Vertisoles en nuestro país, al ser de los suelos con mayor potencial productivo, no existe una revisión bibliográfica que permita un análisis de los avances que se han alcanzado en los últimos 26 años, específicamente sobre su manejo agronómico. La degradación física y química que presentan la mayoría de ellos en más de 66% (Moncada *et al.*, 2013), justifica la necesidad urgente de realizar un eficiente

¹ SEMARNAT-CP (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados). 2002. Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la República Mexicana, a escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México.

² Ruíz Figueroa, J. F., B. Ortiz Villanueva y C. A. Ortiz Solorio. 1985. Memorias de la Primera Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya, Guanajuato, México.

manejo agronómico que conduzca a su rehabilitación o conservación.

PROPIEDADES FÍSICAS Y MANEJO

Las investigaciones más importantes realizadas sobre el efecto del manejo agronómico acerca de la modificación de las propiedades físicas y químicas en Vertisoles de México se reportan en el Cuadro 1. La mayoría de ellas analizan propiedades como: densidad aparente, retención de humedad, textura y permeabilidad y pocas evalúan los agregados (formación, estabilidad y distribución) y porosidad del suelo.

De acuerdo con estas investigaciones, la primera modificación con el cambio de uso del suelo de un ecosistema natural, es la compactación e incremento en la densidad aparente. El paso de maquinaria pesada (Sánchez-Vera *et al.*, 2003) o el pisoteo del ganado, cuando los Vertisoles se usan como agostaderos (Geissen *et al.*, 2009), son los responsables de incrementar la densidad aparente (hasta 10%) degradando al suelo por compactación (SEMARNAT-CP, 2002¹), sobre todo en la zona costera del Golfo (Krasilnikov *et al.*, 2013). En ese sentido es importante generar prácticas agronómicas que disminuyan la densidad aparente (Dap) en términos de resistencia mecánica, retención de agua o porosidad, para ello es necesario llevar a cabo investigaciones más integrales de los Vertisoles.

Algunos investigadores proponen realizar subsoleos (Ribón *et al.*, 2003), o bien utilizar tractores multiradados, en suelos con pendientes menores de 1% y poca pedregosidad (Gutiérrez-Rodríguez *et al.*, 2004). Otros indican que el tránsito reiterado del sistema de rodaje de los diferentes tractores (pesado, medio y ligero), altera la resistencia a la penetración y aumenta la Dap (Gutiérrez-Rodríguez *et al.*, 2012).

La incorporación de residuos de cosechas anteriores es otra forma de mejorar las condiciones físicas del suelo en un sistema de trigo-maíz-algodón (Lee-Rodríguez y Núñez, 1985³) o en caña de azúcar (Sánchez-Hernández *et al.*, 2003). Castellanos (1985⁴) demostró que al agregar estiércol en diferentes concentraciones (hasta 120 kg ha⁻¹) en cultivos de alfalfa, disminuye la Dap, aumenta la retención de agua aprovechable, y mejora la estructura del suelo. Por su parte, Sánchez-Hernández *et al.* (2003, 2006) recomiendan aportar vermicomposta de cachaza y estiércol bovino (1:1) para disminuir la Dap en 13% (de

1.34 a 1.16 Mg m⁻³). La distribución de agregados y el diámetro medio ponderado (indicador de estabilidad de estructura del suelo) incrementaron con el aumento en la cantidad de material orgánico agregado. De hecho, la adición de material orgánico a los Vertisoles es crucial para la formación de macro-agregados resistentes al agua (>2 mm); mientras que los microagregados son más susceptibles a sufrir degradación física por los procesos de humedecimiento y secado (Bravo-Garza *et al.*, 2005, 2009, 2010).

Otro factor que determina la fertilidad física de los Vertisoles es el tipo de labranza, para ello se han realizado diversas investigaciones con el fin de analizar los cambios en las propiedades del suelo. Mora *et al.* (2001) compararon tres manejos agronómicos en rotaciones de maíz-trigo: labranza convencional con quema de residuos, labranza convencional con incorporación de residuos y labranza cero con residuos sobre la superficie. Los resultados indican que la Dap en la labranza cero fue mayor en comparación con la labranza convencional; mientras que el contenido de humedad en la capa superficial se incrementó de 2 a 5% en la labranza cero. Además, en labranza cero la incorporación de residuos orgánicos incrementó la porosidad, permeabilidad y se redujo la compactación (Covarrubias, 1985⁵). En contraste con la labranza convencional, la cual modifica la capacidad de retención de agua por la escasa magnitud de su porosidad (Oleschko *et al.*, 1993) y se puede formar un piso de arado (impidiendo la penetración de las raíces) cuando se emplea la siembra directa (Fuentes *et al.*, 2009).

La agricultura de conservación es una práctica agronómica que propone reducción del laboreo de las tierras (cero labranza), rotación de cultivos y adición de residuos de cosechas anteriores (Oleschko *et al.*, 1996; Fuentes *et al.*, 2009). No obstante, no siempre se obtienen resultados que mejoren la calidad física de los Vertisoles sobre todo en zonas áridas (Gutiérrez Castorena *et al.*, 2015).

El drenaje y las propiedades hídricas de los Vertisoles, también son factores importantes que dificultan su manejo agronómico. Los procesos de humedecimiento y secado pueden colapsar a la estructura del suelo y afectar seriamente a los cultivos rompiendo sus raíces (Ortega-Larrocea *et al.*, 2001). La aparición de grietas se debe a la pérdida de humedad por debajo de los 10 g g⁻¹, fenómeno que se observa

³ Lee-Rodríguez V. y R. Núñez Escobar. 1985. Efecto de la adición de residuos de cosecha sobre las propiedades físicas de un suelo arcilloso del Valle del Yaqui. En: J. F. Ruiz F., B. Ortiz V. y C. A. Ortiz S. (eds.). Memorias de la 1a. Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya, Gto., México.

⁴ Castellanos, J. 1985. El uso de la materia orgánica como mejorador de las características físicas de un suelo arcilloso. En: J. F. Ruiz F., B. Ortiz V. y C. A. Ortiz S. (eds.). Memorias de la 1a. Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya, Gto., México.

⁵ Covarrubias, J. M. 1985. Sistemas de labranza con maíz en suelos con permeabilidad deficiente. En: J. F. Ruiz F., B. Ortiz V. y C. A. Ortiz S. (eds.). Memorias de la 1a. Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya, Gto., México.

Cuadro 1. Principales investigaciones realizadas en Vertisoles, en México.

Autor	Año	Lugar	Cultivo	Fertilización	Manejo agronómico	Propiedades edáficas modificadas/rendimientos
Castellanos ⁴	1985	Matamoros, Coahuila	Alfalfa	60 Kg N ha ⁻¹ solo al testigo	Incorporación de estiércol de bovino	Retención de humedad, infiltración, Dap, MO
Covarrubias ⁵	1985	La Marina, Tamaulipas	Maíz	No especificado	Labranza tradicional y de conservación	Porosidad, permeabilidad y salinidad.
Lee-Rodríguez y Núñez ³	1985	Cd. Obregón, Sonora	Rotación trigo-maíz-algodón.	0-120 kg ha ⁻¹ barbecho 0-40 kg ha ⁻¹	Adición, quema y extracción de residuos de cosecha.	Estabilidad de agregados, humedad aprovechable, infiltración, Dap y resistencia a la penetración
Laird <i>et al.</i> ⁶	1985	Guanajuato	Maíz y sorgo temporal	0-80 kg ha ⁻¹ de Nitrógeno	Diferentes dosis de fertilización nitrogenada.	Aumento de rendimiento de cultivos
Rosales y Figueroa	1985	Mexicali, Baja California Norte	Pasto ryegrass	Estiércol bovino	Diferentes prácticas de labranza y aplicación de estiércol bovino.	MO, N y P en el suelo.
Oleschko <i>et al.</i>	1996	Guanajuato	Alfalfa, maíz, sorgo, trigo, brócoli, cebolla, zanahoria y chayote	No especificado	Diferentes manejos agronómicos combinando cultivos con labranza tradicional y de conservación.	Dap, N total y MO.
Salgado <i>et al.</i>	2000	Tabasco	Caña de azúcar	0-0-0 y hasta 200-80-80 NPK	Diferentes dosis de fertilización NPK.	Aumento de rendimiento de cultivo
Mora <i>et al.</i>	2001	Guanajuato	Trigo	No especificado	Diferentes sistemas de labranza (Convencional y de conservación) y quema de residuos.	Dap, resistencia a la penetración
Salinas-García <i>et al.</i>	2001	Michoacán	Maíz	La recomendada para cada región de Michoacán	Labranza cero, convencional y mínima.	COS, biomasa microbiana, N y P.
Espinosa <i>et al.</i>	2002	Chontalpa, Tabasco	Sorgo	120-80-60 NPK	Evaluación de la eficiencia en utilización de fertilizantes nitrogenados aplicados en diferentes etapas de cultivo.	Eficiencia en el uso de N en el cultivo.
Salinas-García <i>et al.</i>	2002	Michoacán	Maíz	La recomendada para cada región de Michoacán	Labranza cero y convencional con incorporación de residuos.	Dap, N, biomasa microbiana, COS, P extractable.
Ribón <i>et al.</i>	2003	Santa Rosalía, Tabasco	Caña de azúcar	120-60-60	Cultivo de caña de azúcar durante 5-30 años.	MO y N total del suelo.
Salgado <i>et al.</i>	2003	Tabasco	Caña de azúcar	0-0-0 y hasta 160-35-67 NPK	Diferentes dosis de fertilización NPK y dinámica de invertasas.	Aumento del rendimiento y contenido de N en el suelo.
Sánchez Hernández <i>et al.</i>	2003	Chontalpa, Tabasco	Caña de azúcar	No especificado	Adición de rastrojos de cosecha de caña de azúcar.	Contenido de humedad residual, pH, N total y P-Olsen

⁶ Laird, R. J., G. Rodríguez, H. y B. A. Ruíz. 1985. Respuesta del maíz de temporal a la fertilización en los Vertisoles de El Bajío, México. En: J. F. Ruíz F., B. Ortiz V. y C. A. Ortiz S. (eds.). Memorias de la 1a. Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya, Gto., México.

Cuadro 1 (continuación). Principales investigaciones realizadas en Vertisoles, en México.

Autor	Año	Lugar	Cultivo	Fertilización	Manejo agronómico	Propiedades edáficas modificadas/rendimientos
Sánchez-Vera <i>et al.</i>	2003	Cárdenas-Coatzacoalcos, Tabasco	Caña de azúcar	No especificado	Efecto de manejo (maquinaria) en tres agroecosistemas diferentes.	Dap
Bravo-Garza <i>et al.</i>	2005	Nuevo León	Maíz	No especificado	No especificado.	N, COS, estabilidad de agregados
Follett <i>et al.</i>	2005	Celaya, Guanajuato	Trigo, maíz, frijol y sorgo	250 Kg ha ⁻¹ N	Labranza cero, convencional, rotación de cultivos y adición de residuos orgánicos.	Dinámica y secuestro de C
García Silva <i>et al.</i>	2005	Valle de Santiago, Gto.	Maíz y cebada	No especificado	Siembra directa con residuos. Siembra convencional quema de residuos. Siembra directa sin residuos.	COS, MO y huminas.
García Silva <i>et al.</i>	2006	Valle de Santiago, Gto.	Maíz-sorgo Cebada-trigo	180-60-0 NPK	Siembra directa y convencional con manejo de residuos de cosecha.	Dap, COS y MO.
Ramírez-Barrientos <i>et al.</i>	2006	Valle de Santiago, Guanajuato	Trigo	No especificado	Labranza cero.	Dap, MO, pH, N total, P y CIC.
Sánchez- Hernández <i>et al.</i>	2006	Chontalpa, Tabasco	No especificado	No especificado	Aplicación de Vermicomposta de cachaza.	Dap, agregados, C total y MO.
Vidal-Martínez <i>et al.</i>	2006	Montecillo, Edo. de México	Brócoli	0-140 partes de K	Manejo convencional y fertirrigación en invernadero.	Aumento en rendimientos y contenido de K.
Bolio-López <i>et al.</i>	2008	Santa Rosalía, Tabasco	Caña de azúcar	No especificado	Dinámica de potasio en cultivos de caña de diferentes edades.	Contenido de K y aumento del rendimiento.
Fregoso Tirado.	2008	Valle de Santiago, Guanajuato	Maíz, trigo y cebada	250-100-0 280-150-90 NPK	Labranza de conservación.	Mejor fertilidad química con labranza conservación. acidificación en todos los tratamientos
Rivera Hernández <i>et al.</i>	2009	Campeche	Maíz	80-100 kg ha ⁻¹ P	Diferentes concentraciones de fertilización con fósforo.	pH, humedad del suelo y cantidad de P
Bravo-Garza <i>et al.</i>	2009	Linares, Nuevo León	Maíz	No especificado	Labranza tradicional	Contenido de humedad y distribución de agregados.
Bravo-Garza <i>et al.</i>	2010	Noreste de México	Maíz	No especificado	No especificado.	Agregados estables en agua y MOP
Rivera Hernández <i>et al.</i>	2010	Campeche	Maíz	80-100 kg ha ⁻¹ P	Diferentes concentraciones de fertilización con fósforo y contenidos de humedad.	Humedad del suelo y fertilización con Fosfato
Gutiérrez-Rodríguez <i>et al.</i>	2012	Valle Toluca, Edo. México	Trigo	No especificado	Efecto de rodaje de tres tipos de tractores agrícolas.	Aumento de la resistencia a la penetración.

Dap = densidad aparente; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; MOP = materia orgánica particulada; COS = carbono orgánico del suelo; N = nitrógeno; P = fósforo.

en zonas de cultivo y no así en zonas con cobertura vegetal (Navar *et al.*, 2002). Esto provoca que en la temporada de lluvias las grietas se llenen de sedimento para posteriormente colapsarse y formar escorrentías en las que se puede presentar pérdida o erosión del suelo. Geissen *et al.* (2008) proponen resolver este fenómeno con la instalación de barreras vivas para evitar la formación de cárcavas. Sin embargo, es necesario conocer el origen de formación y los materiales parentales de los Vertisoles para ofrecer un manejo adecuado debido a la variabilidad de materiales (ígneo y sedimentario) y condiciones climáticas necesarias para la formación de estos suelos (Geissen *et al.*, 2007; Krasilnikov *et al.*, 2013).

PROPIEDADES QUÍMICAS Y MANEJO

La fertilidad química de los Vertisoles ha sido estudiada en cambios de uso del suelo y en diversos manejos agronómicos; aunque la mayor parte de estas investigaciones han sido realizadas comparando diferentes sistemas de labranza y sólo contemplando algunas propiedades como materia orgánica (MO) y pH.

Con el cambio de uso de suelo, por ejemplo, de una selva a un cultivo de caña de azúcar o para realizar prácticas de agostadero se ha reportado una disminución drástica en el contenido de MO y pérdida de la estructura (Rosales y Figueroa, 1985⁷). Medinilla *et al.* (2014) encontraron una reducción en el contenido de MO de 3% y degradación de agregados de origen biológico en tan solo un año. Estos cambios son atribuidos a la naturaleza, volumen y grado de humificación de la materia orgánica (Oleschko *et al.*, 1996).

García-Silva *et al.* (2006) mencionan que los decrementos en el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) se deben al escaso desarrollo de la estructura de los Vertisoles, en donde el C al ser liberado de los agregados queda fácilmente disponible para los microorganismos del suelo. Estudios posteriores en este mismo sitio, indican que el contenido de ácidos húmicos (AH) y fúlvicos (AF), así como su relación (AH/AF) disminuye en Vertisoles con labranza convencional en comparación con los sometidos a manejo agronómico donde se gestionan los residuos de cosechas o se emplea la siembra directa. El proceso responsable es la lixiviación y afecta no sólo al C

sino también a elementos móviles como el nitrógeno (García-Silva *et al.*, 2005; 2006). En el caso del pH, P, K y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se ha mencionado que no sufren modificaciones a través de los años con los sistemas de labranza (Ribón *et al.*, 2003).

Las prácticas agronómicas recomendadas para restablecer la fertilidad química en la mayoría de los suelos agrícolas con problemas de compactación como los Vertisoles son el subsoleo e incorporación de diferentes fuentes de MO (Coulombe *et al.*, 2000). El subsoleo es utilizado para evitar la acumulación de MO sólo en la superficie y optimizar la fertilización con N en el caso de un pastizal y el cultivo de caña (Sánchez-Vera *et al.*, 2003). Otros autores recomiendan la mínima alteración del suelo (agricultura de conservación), para que la biomasa microbiana y nutrientes como el N inorgánico y P extractable se puedan concentrar en la superficie del suelo (0-10 cm), y de esa manera promover mejores condiciones para la captura de carbono (Salinas-García *et al.*, 2001, 2002).

Varias investigaciones han demostrado que, con la reducción de la labranza, la actividad biológica mejora la estructura del suelo y se presenta mayor tasa de recambio de nutrientes, lo que hace al sistema más dinámico, sobre todo después de 10 años con este manejo (Fregoso Tirado *et al.*, 2008). Asimismo, los procesos de salinización son detenidos o aminorados y la saturación del suelo se reduce (Covarrubias, 1985⁵). Ramírez-Barrientos *et al.* (2006) indican que aquellas características que presentan detrimento en labranza cero, como la porosidad y la retención de humedad, no afectan demasiado el desarrollo de los cultivos y los rendimientos son cercanos a los obtenidos con labranza convencional. De la misma manera, se indica que con la adición de estiércol bovino, practicando labranza mínima o cero (Castellanos, 1985⁴) o con la incorporación de residuos vegetales, se incrementan los contenidos de Nt, MO, P, Ca, Mg y CIC (Rosales y Figueroa, 1985⁷; Lee-Rodríguez y Núñez 1985³; Oleschko *et al.*, 1996; Sánchez-Hernández *et al.*, 2003, 2006; Ramírez-Barrientos *et al.*, 2006).

En algunas ocasiones no hay cambios en las variables químicas por la incorporación de MO, debido a la nula descomposición del rastrojo de cosecha que no permite cambios en las variables Nt, P-Olsen y pH (Sánchez-Hernández *et al.*, 2003). En ese sentido, es importante la incorporación de los residuos de cosecha,

⁷ Rosales, R. y J. M. Figueroa Vargas. 1985. Diferentes prácticas de labranza para rye grass en suelos arcillosos del Valle de Mexicali. Distrito de riego 014. SARH. Primera reunión nacional sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Del 2 al 5 de octubre de 1985. Celaya, Gto. Memorias. UACh, Suelos. Chapingo, México.

irrigación o modificación en el régimen de humedad del suelo e investigación en la actividad biológica para determinar la tasa de captura de C (Gutiérrez Castorena *et al.*, 2015).

FERTILIZACIÓN Y MANEJO

Gran parte de la investigación acerca de la fertilización en Vertisoles se ha realizado en cultivos de caña de azúcar, gracias a los esfuerzos de un grupo de investigación multidisciplinario en el Campus Tabasco, del Colegio de Postgraduados. Salgado-García *et al.* (2000) propusieron una dosis óptima de fertilización para la caña de azúcar de 160-80-80 kg ha⁻¹ (N-P-K) que se aplica en bandas y después recomiendan enterrar el fertilizante para incrementar los rendimientos. Si se realiza esta última práctica, la eficiencia de recuperación del N es de 20%, superior a la obtenida mediante la aplicación superficial; además, es necesario que la fertilización se realice a los tres meses después de la siembra (Salgado-García *et al.*, 2001). Esta tendencia también fue observada en sorgo en donde se recomienda fraccionar las dosis de fertilizante para aumentar la eficiencia del N (Espinosa *et al.*, 2002). En otros trabajos, Salgado-García *et al.* (2003) demostraron que al agregar 160-35-67 kg ha⁻¹ (N-P-K), aplicado como una mezcla de sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄, superfosfato triple (10Ca (H₂PO₄)₂-H₂O-2HF) y KCl, enterrado tres meses después del rebrote, se producen los mayores incrementos en el rendimiento de la caña de azúcar en comparación con el testigo en los Vertisoles.

Palma-López *et al.* (2002) propusieron un sistema integrado de fertilización (N, P, y K) para el ingenio azucarero Azucarmex, Tabasco. Utilizaron un modelo conceptual fundamentado en el balance entre la demanda del nutrimento por el cultivo, el suministro que hace de éste el suelo y la eficiencia del fertilizante. Las dosis de fertilización obtenidas debieron ser ajustadas para generar una recomendación viable para la caña de azúcar en cada clase de suelo (Fluvisol, Vertisol, Cambisol, Luvisol y Leptosol), donde los Vertisoles son la unidad de suelo que ocupa mayor área (36.9% del total del ingenio). En este caso particular la dosis recomendada fue de 34, 0, 105 kg ha⁻¹ NPK, debido a que los Vertisoles tienen la capacidad para restablecer sus propiedades químicas; sin embargo, las propiedades físicas pueden ser modificadas impidiendo el enraizamiento de la caña de azúcar, pero este fenómeno puede ser revertido con el subsoleo.

Los autores indican que las dosis recomendadas por el modelo pueden lograr sus máximos rendimientos si el resto de las labores de cultivo (resiembra, drenaje y variedades empleadas) se realizan en tiempo.

La fertilización con N y la implementación de sistemas de cero labranza con rotación de cultivos tienen el potencial de incrementar el secuestro de SOC y mantener altos rendimientos de cultivos como sorgo, trigo, maíz y caña de azúcar en los Vertisoles irrigados del centro de México. También las cantidades de C incrementan sus concentraciones dependiendo de la cantidad de N agregado; este efecto se ve magnificado cuando se emplea la labranza de conservación y rotación de cultivos (Follett *et al.*, 2005). La fertilización con P en Vertisoles está relacionada con la humedad del suelo, al aumentar la tensión entre la matriz del suelo y las moléculas de agua. Ocurre después un déficit de P, y las plantas sufren estrés afectando algunos parámetros como altura, diámetro y peso de hojas (Rivera-Hernández *et al.*, 2009; 2010).

Existen, aunque en menor cantidad, algunos esfuerzos por investigar la dinámica de otros nutrientes en la fertilización de Vertisoles. El K⁺ ha sido quizá uno de los nutrientes más estudiados en estos suelos, debido a su alta capacidad amortiguadora que limita su disponibilidad (Bolio-López *et al.*, 2008). Este elemento abunda de manera natural en algunos suelos principalmente cuando se forman a partir de rocas ígneas; sin embargo, es necesario agregar fertilizantes potásicos para aumentar los rendimientos de cosecha tanto en manejo convencional (Zúñiga-Estrada *et al.*, 2010) como en fertirriego (Vidal-Martínez *et al.*, 2006), sobre todo en suelos derivados de otro tipo de materiales parentales (rocas sedimentarias o metamórficas). Lozano García *et al.* (2011) recomiendan utilizar labranza mínima como una forma de liberar más K⁺ a la solución del suelo en la capa arable.

CONSIDERACIONES FINALES ACERCA DEL MANEJO DE VERTISOLES

De acuerdo con la revisión de literatura se puede indicar que hay cuatro líneas o estrategias que se deben seguir en el manejo agronómico de los Vertisoles en México, las cuales son:

a) Mecanización: Los suelos deben ser preparados para la siembra en momentos específicos (según el contenido de humedad), para que el paso de la maquinaria o de la tracción animal no se vea

impedido y pueda prepararse el terreno de manera adecuada (Sánchez-Vera *et al.*, 2003). Algunas alternativas que se proponen son: uso de cultivos de cobertura para evitar la pérdida de humedad; mantener el contenido de humedad con riegos o calendarizar los riegos para el paso de la maquinaria; dejar una cubierta de rastrojo (aunque puede conllevar a fenómenos de compactación con el tiempo) y adicionar estiércol. También es necesario aumentar la investigación tanto de implementos y rodamientos necesarios para la mecanización de los Vertisoles.

b) Compactación. Este fenómeno está relacionado tanto con el paso de la maquinaria como con las técnicas agrícolas. En el primer caso, hay un creciente interés para utilizar diferentes sistemas arado-tractor que repercutan de manera reducida su paso a través del terreno, lo que implicará un ahorro sustancial en la preparación del terreno para la siembra. Además, se está recomendando la agricultura de conservación o la labranza convencional con incorporación de residuos; aunque es necesario puntualizar que se deben de considerar las condiciones ambientales y socioeconómicas para el éxito de estas prácticas.

c) Drenaje. Esta práctica debe ser prioritaria, ya que de esto depende en gran medida los cambios en las características físicas y químicas por lo que es necesario aumentar la investigación hidráulica tanto en los sistemas de temporal como los de riego.

d) Fertilización. La aplicación de macro y micronutrientes (mediante material orgánico o sintético) son importantes para obtener mayores rendimientos y hacer productivos los agro-ecosistemas. Sin embargo, hasta la fecha pocos han sido los intentos por generar información para los Vertisoles de México con un enfoque de sistemas y no con un modelo de "caja negra". En ese sentido, es prioritario optimizar las prácticas de fertilización con sistemas integrados que involucren el levantamiento de suelos para indicar cómo son y en dónde ocurren.

Es conveniente también considerar los factores de formación de los Vertisoles y sus procesos pedogenéticos, debido a la gran mega-diversidad de condiciones que ocurren en nuestro país. Aunque todos comparten el proceso de vertización, es necesario tomar en cuenta los procesos de alcalinización y salinización los cuales están relacionados con su degradación; mientras que los procesos de melanización o antropogenización indican que el manejo de los Vertisoles es el correcto. La caracterización de materiales parentales ha sido

realizada por Sotelo *et al.* (2013) en los estados de Veracruz y Tamaulipas y estudios geológicos por Geissen *et al.* (2007) en Campeche.

Finalmente, es importante resaltar que la mayoría de las investigaciones fueron realizadas en centros de investigación principalmente en Villa Diego, Valle de Santiago, Guanajuato; Chontalpa, Tabasco; Campeche y Linares, Nuevo León y pocos han sido realizados directamente con productores que posean parcelas con esta clase de suelo. Además, una gran cantidad de estudios no clasificaron el suelo dónde se realizó el experimento, lo que es una limitante para la transferencia de tecnología a nivel nacional e internacional.

CONCLUSIONES

- Aunque se han realizado algunas investigaciones para establecer el manejo de Vertisoles en México, estas se han generado principalmente en campos experimentales y contemplando sólo algunas de sus propiedades. La mayoría de las recomendaciones para mejorar su fertilidad química son muy generales se pueden aplicar a diversas clases de suelo, lo que significa una pobre comprensión de sus propiedades, además hay una escasa relación con la fertilidad física.
- La degradación de los Vertisoles por compactación y declinación de su fertilidad física se ha incrementado con los años en nuestro país. Una alternativa que se está promoviendo es la labranza de conservación, sin considerar que estos suelos se presentan en diversas regiones agroecológicas con diferentes factores y procesos pedogenéticos que requieren investigación puntual.
- Los Vertisoles son uno de los suelos más productivos de nuestro país, por lo que es indispensable que exista una o varias instituciones responsables de generar y aplicar conocimiento en diversas prácticas agronómicas y se considere a los diferentes actores sociales.

LITERATURA CITADA

- Bolio-López, G. I., S. Salgado-García, D. J. Palma-López, L. C. Lagunes-Espinoza, M. Castelán-Estrada y J. D. Etchevers B. 2008. Dinámica del potasio en Vertisoles y Fluvisoles cultivados con caña de azúcar *Terra Latinoamericana* 26: 253-263.
- Bravo-Garza, M. R. and R. B. Bryan. 2005. Soil properties along cultivation and fallow time sequences on Vertisols in Northeastern Mexico. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 473-481.

- Bravo-Garza, M. R., R. B., Bryan, and P. Voroney. 2009. Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. *Geoderma* 151: 150-156.
- Bravo-Garza, M. R., P. Voroney, and R. B. Bryan. 2010. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of ^{14}C labeled maize residues and wetting and drying cycles in Vertisols. *Soil Biol. Biochem.* 42: 953-959.
- Coulombe, C. E., L. P. Wilding, and J. B. Dixon. 2000. Vertisols. pp. 269-286. *In*: M. E. Sumner (ed.). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. New York, NY, USA.
- Espinosa F., J., E. Carrillo A., D. J. Palma L., J. J. Peña C. y S. Salgado G. 2002. Eficiencia de la fertilización nitrogenada en sorgo con la técnica isotópica ^{15}N , en un Vertisol con drenaje subsuperficial. *Terra* 20: 129-139.
- Follett, R. F., J. Z. Castellanos, and E. D. Buenger. 2005. Carbon dynamics and sequestration in an irrigated Vertisol in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 83: 148-158. doi. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.02.013>.
- Fregoso Tirado, L. F. 2008. Cambios en las características químicas y microbiológicas de un Vertisol inducidos por sistemas de labranza de conservación. *Terra Latinoamericana* 26: 161-170.
- Fuentes, M., B. Govaerts, F. de León-González, C. Hidalgo, L. Dendooven, K. D. Sayre, and J. D. Etchevers. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *Eur. J. Agron.* 30: 228-237.
- García Silva, R., D. Espinosa Victoria, B. Figueroa Sandoval, N. E. García Calderón, J. F. Gallardo Lancho y P. Paneque Rondón. 2005. Efecto de la siembra directa en las reservas orgánicas de un Vertisol de Guanajuato, México. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 14: 38-44.
- García Silva, R., D. Espinosa Victoria, B. Figueroa Sandoval, N. E. García Calderón y J. F. Gallardo Lancho. 2006. Reservas de carbono orgánico y de fracciones húmicas en un Vertisol sometido a siembra directa. *Terra Latinoamericana* 24: 241-251.
- Geissen, V., C. Kampichler, J. J. López-de Llergo-Juárez, and A. Galindo-Alcántara. 2007. Superficial and subterranean soil erosion in Tabasco, tropical Mexico: Development of a decision tree modeling approach. *Geoderma* 139: 277-287.
- Geissen, V., J. G. López de Llergo-Juárez, A. Galindo-Alcántara y R. Ramos-Reyes. 2008. Erosión superficial y carstificación en Macuspana, Tabasco, Sureste de México. *Agrociencia* 42: 605-614.
- Geissen, V., R. Sánchez-Hernández, C. Kampichler, R. Ramos-Reyes, A. Sepulveda-Lozada, S. Ochoa-Goana, B. H. J. de Jong, E. Huerta-Lwanga, and S. Hernández-Daumas. 2009. Effects of land use change on some properties of tropical soils- An example from Southeast Mexico. *Geoderma* 151: 87-97.
- Gutiérrez-Castorena, E. V., M. C. Gutiérrez-Castorena, and C. A. Ortiz-Solorio. 2015. Carbon capture and pedogenetic processes by change of moisture regime and conventional tillage in Aridisols. *Soil Tillage Res.* 150: 114-123. doi. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.02.001>.
- Gutiérrez-Rodríguez, F., A. González Huerta, R. Serrato Cuevas y T. H. Norman Mondragón. 2004. Evaluación tecnológico-explotativa del conjunto multirrado-tractor J. D. Modelo 4235, en la labor de preparación primaria de un suelo Vertisol. *Cienc. Ergo Sum* 11: 171-176.
- Gutiérrez-Rodríguez, F., A. González Huerta, D. J. Pérez-López, O. Franco-Mora, E. J. Morales-Rosales, P. Saldívar-Iglesias y C. G. Martínez-Rueda. 2012. Compactación inducida por el rodaje de tractores agrícolas en un Vertisol. *Terra Latinoamericana* 30: 1-7.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Conjunto de datos vectorial Edafológico escala 1: 250 000 Serie II (Continuo Nacional). Edición: 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- ISRIC (International Soil Reference and Information Centre). 2013. The Vertisols. Disponible en www.isric.org/isric/webdocs/docs/major_soils_of_the_world/set3/vr/vertisol.pdf. (Consulta: noviembre 15, 2013).
- Krasilnikov, P., M. C. Gutiérrez-Castorena, R. J. Ahrens, C. O. Cruz-Gaistardo, S. Sedov, and E. Solleiro-Rebolledo. 2013. The soils of Mexico. Springer Science+Business Media Dordrecht. Netherlands.
- Lozano-García, B., L. Parras-Alcántara y J. L. Muriel-Fernández. 2011. Soil tillage effects on monovalent cations (Na^+ and K^+) in vertisols soil solution. *Catena* 84: 61-69.
- Medinilla-Salinas, L., M. de la C. Vargas-Mendoza, S. López-Ortiz, C. Ávila-Reséndiz, W. Bruce-Campbell, and M. C. Gutiérrez-Catorena. 2014. Growth, productivity and quality of *Megathyrsus maximus* under cover from *Gliricidia sepium*. *Agrofor. Syst.* 87: 891-899.
- Moncada de la Fuente, J., M. Anaya Garduño, C. Ortiz Solorio, P. Sánchez García y J. Chacón Rodríguez. 2013. Folleto técnico. Suelo: Protejamos el suelo que nos da vida. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.
- Mora, M., V. Ordaz, J. Z. Castellanos, A. Aguilar Santelises, F. Gavi y V. Volke H. 2001. Sistemas de labranza y sus efectos en algunas propiedades físicas en un Vertisol, después de cuatro años de manejo. *Terra* 19: 67-74.
- Navar, J., J. Mendez, R. B. Bryan, and N. J. Kuhn. 2002. The contribution of shrinkage cracks to bypass flow during simulated and natural rainfall experiments in northeastern Mexico. *Can. J. Soil Sci.* 82: 65-74.
- Oleschko, K., J. D. Etchevers B., and L. Osorio J. 1993. Pedological features as indicators of the tillage effectiveness in Vertisols. *Soil Tillage Res.* 26: 11-31.
- Oleschko, C., J. D. Etchevers, and A. Hernández. 1996. Structure and pedofeatures of Guanajuato (México) Vertisol under different cropping systems. *Soil Tillage Res.* 37: 15-36.
- Ortega-Larrocea, M. P., C. Siebe, G. Becárd, I. Méndez, and R. Webster. 2001. Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal spores in the soil of the Mezquital Valley of Mexico. *Appl. Soil Ecol.* 16: 149-157.
- Ortiz S., C. A. y M. C. Gutiérrez C. 1995. Clasificación de Vertisoles en la taxonomía de suelos versión 1992. pp. 231-236. *In*: J. F. Ruiz Figueroa (ed.). *Manejo de suelos arcillosos para una agricultura sustentable*. 2a Reunión Nacional sobre Suelos Arcillosos del 10 al 14 de Noviembre de 1994. Mérida, Yucatán, México.
- Ortiz S., C. A. y M. C. Gutiérrez Castorena. 1999. Fundamentos de pedología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Palma-López, D. J., S. Salgado G., J. J. Obrador O., A. Trujillo N., L. del C. Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruíz B. y M. A. Carrera M. 2002. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra* 20: 347-358.

- Ramírez-Barrientos, C. E., B. Figueroa-Sandoval, V. Ordaz-Chaparro y V. H. Volke-Haller. 2006. Efecto del sistema de labranza cero en un Vertisol Terra Latinoamericana 24: 109-118.
- Ribón C., M. A., S. Salgado García, D. J. Palma López y L. C. Lagunes Espinoza. 2003. Propiedades químicas y físicas de un Vertisol cultivado con caña de azúcar. *Interciencia* 28: 154-159.
- Rivera-Hernández, B., E. Carrillo-Ávila, J. J. Obrador-Olán, J. F. Juárez-López, L. A. Aceves Navarro, and E. García-López. 2009. Soil moisture tension and phosphate fertilization on yield components of A-7573 sweet corn (*Zea mays* L.) hybrid in Campeche, Mexico. *Agric. Water Manage.* 96: 1285-1292.
- Rivera-Hernández, B., E. Carrillo-Ávila, J. J. Obrador-Olán, J. F. Juárez-López, and L. A. Aceves-Navarro. 2010. Morphological quality of sweet corn (*Zea mays* L.) ears as response to soil moisture tension and phosphate fertilization in Campeche, Mexico. *Agric. Water Manage.* 97: 1365-1374. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04.001>.
- Ruíz Figueroa, J. F. 1995. Manejo de suelos arcillosos para una agricultura sustentable. Trabajos presentados en la segunda reunión nacional sobre manejo de suelos arcillosos, Mérida, Yucatán. Chapingo, México. ISBN: 9688843032 9789688843031
- Salgado G., S., E. R. Núñez, J. J. Peña, J. D. Etchevers, D. J. Palma y M. R. Soto H. 2000. Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* 34: 689-698.
- Salgado G., S., R. Núñez E., J. J. Peña C., J. D. Etchevers B., D. J. Palma L. y M. R. Soto H. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante en soca de caña de azúcar sometida a diferentes manejos de fertilización. *Terra* 19: 155-162.
- Salgado G., S., R. Núñez, J. J. Peña, J. D. Etchevers, D. J. Palma y M. R. Soto H. 2003. Manejo de la fertilización en el rendimiento, calidad del jugo y actividad de invertasas en caña de azúcar. *Interciencia* 28: 576-580.
- Salinas-García, J. R., J. de J. Velázquez-García, M. Gallardo-Valdez, P. Díaz-Mederos, F. Caballero-Hernández, L. M. Tapia-Vargas, and E. Rosales-Robles. 2002. Tillage effects on microbial biomass and nutrient distribution in soils under rain-fed corn production in central-western Mexico. *Soil Tillage Res.* 66: 143-152. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00022-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00022-3).
- Salinas-García, J. R., A. D. Báez-González, M. Tiscareño-López, and E. Rosales-Robles. 2001. Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 59: 67-79. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00187-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00187-2).
- Sánchez-Hernández, R., D. J. Palma López, J. J. Obrador Olán y U. López Noverola. 2003. Efecto de los rastrojos sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo Vertisol y rendimientos de caña de azúcar (*saccharum officinarum* L.) en Tabasco, México. *Interciencia (Venezuela)* 28: 404-407.
- Sánchez Hernández, R., D. J. Palma López, M. D. Hidalgo Moreno, V. Ordaz-Chaparro y G. S. Benedicto Valdés. 2006. Regeneración estructural de un suelo arcilloso por aportes de Vermicompost en la Chontalpa, Tabasco, México. *Univer. Cienc.* 22: 13-26.
- Sánchez-Vera, G., J. J. Obrador Olán, D. J. Palma López y S. Salgado García. 2003. Densidad aparente en un Vertisol con diferentes agrosistemas. *Interciencia* 28: 347-351.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2016. Cierre de la producción agrícola por estado. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>. (Consulta: enero 15, 2016).
- Siebe, C. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 10: 15-21.
- Siebe, C. and E. Cifuentes, 1995. Environmental impact of wastewater irrigation in central México: An overview. *Int. J. Environ. Health Res.* 5: 161-173.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. 12th ed. US Department of Agriculture; Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Sotelo R., E., M. C. Gutiérrez-Castorena, C. A. Ortiz-Solorio, G. Cruz-Bello y M. A. Segura-Castruita. 2006. Identificación de Vertisoles de origen sedimentario a través de su firma espectral. *Agric. Téc. Méx.* 32: 303-312.
- Sotelo-Ruíz, E. D., M. del C. Gutiérrez-Castorena, G. M. Cruz-Bello, and C. A. Ortiz Solorio 2013. Physical, chemical, and mineralogical characterization of Vertisols to determine their parent material. *Interciencia* 38: 488-495.
- Sotelo-Ruíz, E., Ma. del C. Gutiérrez-Castorena, C. A. Ortiz Solorio, G. Cruz Botello y M. A. Segura-Castruita. 2008. Historia y desarrollo de la clasificación de Vertisoles en el sistema FAO y taxonomía de suelos. *Terra Latinoamericana* 26: 325-332.
- Vidal-Martínez, J. L., R. Núñez E., I. Lazcano F., J. D. Echevers B. y R. Carrillo G. 2006. Nutrición potásica del brócoli (*Brassica oleracea*) con manejo convencional y fertirrigación en un Vertisol en invernadero. *Agrociencia* 40: 1-11.
- Zúñiga-Estrada, L., J. J. Martínez-Hernández, G. A. Baca-Castillo, A. Martínez-Garza, J. L. Tirado-Torres, J. Kohashi-Shibata y J. Cruz-Díaz. 2010. Efecto de la fertilización con potasio en un Vertisol sobre la relación cantidad/intensidad (Q/I). *Terra Latinoamericana* 28: 319-325.