

El manejo del suelo en la conservación de carbono orgánico

Bertha P. Zamora-Morales^{1§}
Mayra Mendoza-Cariño²
Dora Ma. Sangerman-Jarquín³
Abel Quevedo Nolasco⁴
Agustín Navarro Bravo³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Av. Progreso núm. 5, Barrio de Santa Catarina, Coyoacán, Ciudad de México. CP. 04010. ²Facultad de Estudios Superiores Zaragoza-Universidad Nacional Autónoma de México. Batalla 5 de mayo s/n esquina Fuerte de Loreto, Col. Ejército de Oriente, Iztapalapa, Ciudad de México. CP. 09230. (maymc-zaragoza@yahoo.com.mx). ³Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchan, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56250. (sangerman.dora@inifap.gob.mx; navarro468@yahoo.com.mx). ⁴Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, México. CP. 56230. (anolasco@colpos.mx).

§Autora para correspondencia: zamora.patricia@inifap.gob.mx.

Resumen

Las emisiones antrópicas de dióxido de carbono (CO₂), de metano (CH₄) y de óxido nitroso (N₂O), distinguen a estos gases de efecto invernadero (GEI) como los principales causantes del calentamiento global. Las cuales, provienen a escala mundial de los sectores energético (25.9%), industrial (19.4%), silvícola (17.4%) y agrícola (13.5%). Del total de los flujos de los GEI, el sector agrícola contribuye con 25% de CO₂, 55-60% de CH₄ y 65-80% de N₂O. El CO₂ se genera, principalmente, por la deforestación en las regiones tropicales, el CH₄, por la ganadería y cultivos de arroz, el N₂O por el uso de fertilizantes. México se ubica dentro de los 15 países con mayor producción de GEI. Aproximadamente, 30% del total de sus emisiones corresponden a los sectores agrícola, pecuario y forestal: dos terceras partes, se producen por las actividades de uso del suelo (incluido el cambio en su uso) y silvicultura el resto, por la agricultura y ganadería convencional. Debido a que el carbono orgánico del suelo se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, y en su contenido incide el manejo del suelo, se han desarrollado diversas prácticas que permitan favorecer su almacenamiento, en los sectores agropecuario y forestal del país. Sin embargo, se requiere de la instrumentación de políticas públicas, que beneficien la adopción y promoción de dichas prácticas y que, a la vez, faciliten el cumplimiento de los compromisos que ha adquirido México a nivel nacional e internacional, para minimizar sus emisiones GEI.

Palabras clave: carbono orgánico, gases efecto invernadero, labranza de conservación, secuestro de carbono, usos del suelo.

Recibido: octubre de 2018

Aceptado: noviembre de 2018

Introducción

Las emisiones antrópicas de CO₂, de metano (CH₄) y de óxido nitroso (N₂O), distinguen a estos gases de efecto invernadero (GEI) como los principales causantes del calentamiento en el planeta. De acuerdo con el panel intergubernamental de cambio climático (IPCC, 1996), la concentración actual de los GEI es la más alta de los últimos 160 000 años: el CO₂ aumentó más de 30%, el CH₄ 100% y el N₂O 15%.

De los GEI se distingue al CO₂ debido a su alta producción y tiempo de residencia en la atmósfera. Casanova-Lugo *et al.* (2011) mencionan que, a escala mundial, las cantidades totales anuales de CO₂ alcanzan 444 millones de toneladas. De esa cantidad, 70% se relaciona con diversos procesos de combustión de los sectores energético, industrial, de transporte y otros servicios, 30%, con cambios del uso del suelo asociados a la agricultura y a la ganadería convencional (Masera y Sheinbaum, 2004).

Robertson (2004) indica que las actividades agrícolas emiten 25% de los flujos de CO₂ antrópico, 55-60% del total de las emisiones de CH₄ y 65-80% de los flujos totales de N₂O. El CO₂ se genera, principalmente, por la deforestación en las regiones tropicales; el CH₄, de la ganadería y cultivos de arroz, el N₂O por el uso de fertilizantes en la agricultura (FAOSTAT, 2014). Honty (2011) sugiere que las actividades agropecuarias, la silvicultura y la deforestación, son responsables de 63% de las emisiones de GEI en América Latina.

Manejo del suelo y captura de carbono

En el suelo hay una cantidad de carbono orgánico (CO) tres veces mayor del que se almacena en la vegetación (Eswaran *et al.*, 1993) y representa 69.8% del total existente en la biosfera (FAO, 2002). Anualmente, en su proceso natural de respiración, libera entre 75 y 80 Gt (Giga toneladas) (Gt= mil millones de toneladas) de CO₂-C (Santacruz, 2010). Por lo que el suelo actúa como fuente o reservorio de carbono atmosférico, según el manejo que presente.

Existen evidencias de cuando un sistema agrícola se convierte en un bosque o pastizal, se obtiene una ganancia, cuya tasa de acumulación de CO en el suelo es de 0.338 o 0.332 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Post y Kwon, 2000). Si el cambio se presenta de agrícola a forestal bajo sistemas de manejo, la ganancia asciende hasta 7 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, en regiones templadas, entre 0.2 y 0.6 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ y en sistemas forestales tropicales y subtropicales, entre 1 y 7.4 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Izaurrealde *et al.*, 2001).

De igual manera, los sistemas agroforestales remueven cantidades significativas de carbono de la atmósfera, ya que las especies arbóreas retienen dicho elemento, en su madera por tiempo prolongado. Estos sistemas podrían acumular entre 1.1 y 2.2 Pg en los próximos 50 años en todo el mundo (Albrecht y Kandji, 2003). Incluso, la vegetación secundaria de bosques naturales bajo prácticas adecuadas puede, superar la fijación de este gas con respecto al bosque nativo (Montaño *et al.*, 2016). Lo cual implica, que pequeños cambios en los almacenes del carbono orgánico del suelo (COS) afectan, directamente, el contenido de CO₂ en la atmósfera (Weihermuller *et al.*, 2011).

Sector agrícola

Los suelos agrícolas ocupan alrededor de 38% de la superficie terrestre (12% cultivos y 26% pastizal inducido), lo que representa el uso de la tierra más extendido en el planeta (FAOSTAT, 2014). En ellos, se almacena cerca de 10% del CO total de la superficie terrestre (Paustian *et al.*, 1997) y contribuyen con 30-35% de los GEI (Saynes *et al.*, 2016).

Los sistemas de producción agrícola constituyen uno de los factores que causan un importante incremento en las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Lal, 1997). Particularmente, la agricultura convencional ha ocasionado la pérdida de 20-80 Mg C ha⁻¹ en las zonas agrícolas tropicales; las actividades agrícolas y los cambios de uso del suelo de los últimos 200 años, han provocado pérdidas por alrededor de 78 ±12 Pg (Lal, 2004). Y es que a partir de que se incorporan nuevos suelos a la agricultura, hasta el establecimiento de sistemas intensivos de cultivo, se producen disminuciones de CO que fluctúan entre 30 y 50% del nivel inicial (Reicosky, 2002).

Lo anterior, debido a la reducción de la materia orgánica (MO) de la capa arable, derivada de un menor aporte e incorporación de residuos que a su vez propician un incremento en la temperatura del suelo; y la destrucción de macro y microagregados por el laboreo (Trumper *et al.*, 2009). Adicionalmente, la pérdida de material húmico de los suelos cultivados es superior a la tasa de formación de humus en suelos sin disturbio (Reicosky, 2002). Cuando las modificaciones ocurren en ecosistemas forestales o pastizales a sistemas agrícolas, las pérdidas representan entre 42 y 59%, respectivamente (Guo y Gifford, 2002).

Los sistemas de labranza que propician la manipulación mecánica del suelo con el fin de alterar su estructura y disminuir su resistencia a la penetración de las raíces, a la vez que lo transforman en un medio con las condiciones óptimas para que germinen las semillas y se desarrollen los cultivos, ocasionan la pérdida de CO, que en forma CO₂ fluye a la atmósfera (Janzen, 2003). Por lo que las pérdidas-ganancias de COS dependen de la forma de manejo agrícola y de su capacidad para tolerar o resistir el aumento de las concentraciones del CO₂ atmosférico (Janzen, 2003).

Diversas prácticas agronómicas se han desarrollado, a fin de favorecer la captura de carbono edáfico (West y Post, 2002). La labranza de conservación (LC) consiste en el menor movimiento posible del suelo (arado) y solo en la línea de la siembra, requiere manejar los residuos de la cosecha anterior (al menos 30%) para evitar la erosión y aumentar la fertilidad. Esta práctica, que incluye a la labranza reducida (LR) y a la labranza cero (LZ) (FAO, 2001) tiene capacidad potencial para secuestrar carbono en el suelo (Rasmussen y Parton, 1994). Independientemente del tipo de labranza, el ingreso de CO es inferior a la emisión de CO₂, lo que responde a la pérdida de MO conforme aumentan los años de agricultura (Wilson *et al.*, 2000). La rotación de cultivos y la introducción de varias especies en la LC, aumenta los beneficios productivos y ambientales.

El manejo de fertilización (MF) suministra los elementos nutrimentales necesarios para el desarrollo del cultivo y la fertilidad del suelo, a través del mejoramiento de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. El manejo de residuos de cosecha (MRC) también eleva la fertilidad y protege al suelo contra la erosión hídrica y eólica. Los residuos se aplican sobre la superficie o se incorporan mediante el arado tradicional o el de vertedera; en ambos casos, se descomponen y se transforman en abono orgánico para la próxima siembra. Esta práctica se puede combinar con LR y LZ.

Los residuos de cosecha pueden dificultar las labores de preparación del suelo previo a la siembra, por lo que en algunas zonas su manejo combina la quema, el empacado o su incorporación al suelo con el arado y la rastra (Fregoso, 2008). El mantenimiento de los residuos de cosecha aumenta el contenido de MO y favorece la actividad microbiana, la disponibilidad de nutrientes, la infiltración y almacenamiento de agua y los rendimientos de los cultivos (Prasad y Power, 1991).

La rotación de cultivos (RC) mantiene la fertilidad del suelo y reduce la erosión. La RC se puede realizar conjuntamente con otras prácticas (como cultivos intercalados, CI), para incrementar su utilidad. Los cultivos de cobertura (Cc) incluyen leguminosas, cereales o una mezcla de cultivos que se caracterizan por desarrollar un follaje abundante, el cual protege al suelo del impacto de las gotas de lluvia y de la acción del viento en forma más eficiente que los cultivos de escarda o en huertos. La producción de forraje o grano se puede incorporar al suelo para protegerlo de una etapa crítica de erosión y mejorar la fertilidad.

Los sistemas agroforestales (SAF) manejan especies leñosas en asociación con cultivos agrícolas o usos ganaderos. Se distinguen los de tipo: secuencial, donde se advierte una correspondencia cronológica entre los cultivos anuales y las plantaciones arbóreas que se suceden en el tiempo y los simultáneos, que integran en forma continua los cultivos anuales o perennes, árboles maderables, frutales o de uso múltiple o la ganadería.

En los SAF se emplean prácticas sostenibles de bajos insumos que minimizan la alteración de los suelos y plantas, se privilegia a la vegetación perenne y al reciclaje de nutrientes, por lo que también contribuye al almacenaje de carbono a largo plazo (Nair, 2004). En los SAF, el potencial de captura varía entre 12 y 228 t ha⁻¹ (Dixon, 1995), con valores significativos en las zonas tropicales húmedas, cuya posibilidad de secuestro alcanza 70 t ha⁻¹ en la biomasa aérea, 25 t ha⁻¹ en los primeros 20 cm de profundidad del suelo (Mutuo *et al.*, 2005). Los SAF retienen el carbono en la vegetación y en el suelo con una tasa de 0.2 a 3.1 t ha⁻¹ año⁻¹, lo que sugiere un potencial de secuestro de hasta 7 Gt de carbono en un periodo aproximado de 50 años (Casanova-Lugo *et al.*, 2011). Los SAF tienen poder de mitigación de GEI cuando se conservan los residuos de cosecha, ya que se reduce la labranza y se introducen cultivos de cobertura (Lal, 2003). El acolchado (Ac) se cubre el suelo con un material, generalmente orgánico, para mantener la humedad y el calor del suelo, y estimular el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Sector forestal

La vegetación juega un papel importante en el ciclo integral del carbono, por lo que los bosques constituyen un elemento esencial en el secuestro de CO₂ atmosférico, además de actuar como reguladores del clima global. Los ecosistemas forestales almacenan más de 80% de carbono en comparación con otros reservorios terrestres (Six *et al.*, 2002). A escala mundial, los bosques contienen 861 Pg de carbono, del que 44% forman parte del suelo, 42% de la biomasa aérea, 8% de la madera muerta y 5% del mantillo (Pan *et al.*, 2011).

Los bosques tropicales contienen 32% de carbono en el suelo; los templados y boreales 60% (Pan *et al.*, 2011). Particularmente, los bosques templados ocupan 10 000 000 km² en el planeta: representan 25% del área forestal, 8% de la superficie continental y 13.7% de la productividad primaria neta mundial (Galicia *et al.*, 2016); con una reserva de CO de 175 Pg en la biomasa aérea y de 262 Pg en el suelo (Haine *et al.*, 2003 en Galicia *et al.*, 2016). Sin embargo, la transformación

de los bosques en otros usos de suelo ha disminuido las reservas de carbono edáfico en aproximadamente 22% (Murty *et al.*, 2002), también se ha alterado el flujo natural de CO₂ entre el suelo y la atmósfera (por la fotosíntesis y la respiración), el cual se ha estimado en 50 Pg año⁻¹ (Brown *et al.*, 1996).

Los bosques tropicales tienen una tasa de deforestación de 13 000 000 ha año⁻¹ (PNUMA, 2007, en Álvarez y Rubio, 2013), lo que liberó entre 1 y 2 t ha⁻¹ de carbono en la década de 1990; es decir, de 15 a 20% de las emisiones anuales globales de los GEI (Fearnside and Laurance 2003). En la actualidad, la deforestación es la responsable de 10% de las emisiones antrópicas de los GEI, para la apertura de nuevas tierras de cultivo y para el aprovechamiento maderable.

En el contexto de América Latina y el Caribe, México es el segundo emisor de GEI, a partir de los cambios de uso de suelo y del sector forestal, este es responsable 27% de las producciones totales del país (UNFCCC, 2005). En México, alrededor de 40% del área ocupada, originalmente por los bosques templados se transformó por otros usos de la tierra, como el agrícola y el pastoreo (Challenger, 1998). En la actualidad, dichos ecosistemas ocupan un área de 323 305 km², que representa 17% del territorio nacional (Gamboa y Galicia, 2011), cuyo potencial de captura de carbono se ha estimado en 200 y 327 Mg ha⁻¹ en la vegetación y en el suelo, respectivamente (Monreal *et al.*, 2005).

Las estimaciones más recientes del sector forestal indican que las emisiones nacionales de CO₂ son de 87×10⁶ (±34.4) Mg año⁻¹, de las que 74.2% se originan por la pérdida de biomasa, 5.6% por el aprovechamiento de los bosques, 34.8% por escapes de carbono edáfico y una compensación de -14.8 % correspondiente al secuestro de carbono en terrenos abandonados (De Jong *et al.*, 2010). Los ecosistemas áridos y semiáridos constituyen un tercio de la superficie terrestre global y 60% del territorio mexicano (Montaño *et al.*, 2016). En ellos, el suelo es el principal almacén de carbono, constituye entre 45 y 90% en la biomasa del matorral y pastizal, respectivamente. El cambio de uso de suelo disminuye en esas zonas, hasta 50% de su contenido de CO.

De acuerdo con estimaciones del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (Valdés, 2010), los humedales ocupan 570 millones de hectáreas, lo que significa alrededor 6% de la superficie terrestre, y se distribuyen en lagos (2%), turberas de gramíneas o carrizo (30%), pantanos (20%) y llanuras aluviales (15%). En el año de 2002 existían aproximadamente 4.5 millones de hectáreas de vegetación hidrófila en México, correspondiente a humedales, donde los manglares se extendían sobre 240 000 km² de la zona costera (Valdés, 2010). Los suelos de manglar se distinguen por presentar promedios bajos de descomposición de MO y un alto potencial de almacenamiento de carbono, por lo que constituyen una alternativa para el secuestro de ese elemento (Moreno *et al.*, 2002).

Armentano (1981) indicó en la década de 1980, que 230 000 ha de manglares en los trópicos habían sido transformados a estanques piscícolas, lo que estimó, ocasionaría la liberación de 86 250 000 t de carbono en los años subsiguientes, como consecuencia de la exposición de los suelos y el restablecimiento del equilibrio natural. Se calcula que después de 10 a 20 años esos depósitos habían liberado a la atmósfera entre cuatro y nueve millones de toneladas de carbono (Valdés *et al.*, 2011).

En los bosques naturales, el carbono del suelo está en equilibrio, el cual se modifica cuando se produce una alteración. De acuerdo con la FAO (2002), cada año se deforestan entre 15 y 17 millones de hectáreas, principalmente en los trópicos. En tanto que, la conversión de tierras forestales y pastos a superficie arable ha supuesto una pérdida significativa del CO, previamente almacenado en el suelo y una liberación a la atmósfera de CO₂ (Álvaro *et al.*, 2010).

En México se han presentado tres modelos de deforestación: i) en bosques templados tropicales y subtropicales, para la agricultura de subsistencia y el pastoreo de ganado; ii) en bosques tropicales debido a la colonización bajo la reforma agraria; y iii) para actividades de ganadería y agricultura de gran escala (Jhonson *et al.*, 2009). Sin embargo, el implemento de ciertas prácticas para el manejo de los ecosistemas forestales puede incrementar el secuestro de carbono; por ejemplo, el desarrollo natural de los bosques y de su biomasa, un menor aprovechamiento de los recursos maderables (Niles, 2002), el repoblamiento de vegetación secundaria o por reforestación (Guo y Gifford, 2002) y aforestación -plantación de especies arbóreas en sitios donde no existían, al menos en los últimos 50 años-, entre otras (Six *et al.*, 2002).

Paul *et al.* (2002) señalan que después de 10 años de haberse efectuado la aforestación en un suelo con antecedentes agrícolas, el COS aumenta 0.87% por año en los primeros 30 cm de profundidad (1.88% por año en los 10 cm). Guo y Gifford (2002) registran que dicho aumento se presenta en razón de 18%. Andrade y Muhammand (2003) citan que cuando la deforestación es inminente, se necesita un manejo correcto para minimizar las pérdidas de carbono, por lo que los sistemas agroforestales remueven cantidades significativas de CO₂ atmosférico.

Debido a la tala y a los cambios de uso de suelo de los ecosistemas forestales de México, la reforestación y la aforestación, se han estudiado como prácticas del manejo del suelo para conservar el carbono edáfico. Las cuales, tienen numerosos beneficios, entre los que se encuentran el mejoramiento de los suelos por aporte de MO y penetración de raíces, protección contra la erosión hídrica y regulación del ciclo hidrológico, restauración del ecosistema, aumento y conservación de la diversidad biológica, hábitat para fauna terrestre y avifauna, y absorción de CO₂ de la atmósfera que reduce el impacto de los GEI.

Sector pecuario

Las tierras de pastoreo representan cerca de 30% de la superficie terrestre. Ocupan 3200 millones de hectáreas y almacenan entre 200 y 420 miles de millones megagramos por hectárea (Mg ha⁻¹= t ha⁻¹) de carbono (FAO, 2002), lo que equivale a 70 Mg ha⁻¹, cantidad similar a la almacenada en los suelos forestales (Trumbmore *et al.*, 1995). Particularmente, en las áreas tropicales de pastoreo, el carbono edáfico y en las herbáceas se estima entre 16 y 48 t ha⁻¹ (Houghton *et al.*, 1985).

Los pastizales de gramíneas mejoradas, comparados con las sabanas, secuestran más carbono en las partes profundas del perfil del suelo, lo que hace que este quede menos expuesto a los procesos de oxidación y por tanto, a su pérdida como gas (Fisher *et al.*, 1994). Y es que las gramíneas utilizadas en la producción animal tropical, en general, son de metabolismo C₄; característica que aumenta su capacidad para integrar el gas en la MO de las plantas (Botero, 1999). Cuando ese material se consume por los animales, entre 30 y 70% regresa al suelo en forma de heces y orina, lo que asegura la reincorporación de MO.

El uso del suelo determina, en gran medida, la descomposición de la MO (Fisher *et al.*, 1994). Un suelo agrícola pierde 40% del carbono edáfico que existía cuando su uso era forestal; un pastizal, 20% (después de cinco años de tumba). Aunado a ello, las pobres prácticas de manejo en las tierras de pastoreo han conducido al decaimiento de las reservas de carbono en las últimas décadas, al respecto, el sobrepastoreo es la principal causa (Lal, 2004a). Por un lado, la ganadería reduce la cobertura vegetal con consecuencias en la fertilidad del suelo y en la erosión del carbono (Mchunu y Chaplot, 2012). Por otra parte, el pisoteo de los animales reduce el espacio poroso y la infiltración. Así, el sobrepastoreo disminuye el desarrollo de la biomasa y los insumos de carbono que se asocian al suelo.

Las actividades pecuarias, debido al mal manejo de la capacidad de carga, presentan baja productividad en los pastizales y agostaderos, lo que con frecuencia conduce a su abandono; esto permite que se desarrollen especies consideradas como invasoras e indeseables por los productores, ya que desconocen sus cualidades como mitigadoras del cambio climático (Yerena *et al.*, 2014). El potencial de captura de carbono disminuye con el aumento del tiempo de abandono de los sistemas: se considera que los individuos de mayor edad presentan menor crecimiento y productividad, lo cual se relaciona con el secuestro de carbono (Yerena *et al.*, 2014).

Por lo anterior, en la actualidad se presenta un cambio en el manejo de los pastizales, a fin de proporcionar algunos servicios ambientales a la sociedad, como la captura de carbono (Brown y Thorpe, 2008). Por ejemplo, la revegetación de pastizales degradados ofrecen un potencial global de mitigación de GEI de hasta 300 Pg C (Ravindranath y Ostwald, 2008).

En México, el uso pastoril de la tierra está ampliamente difundido, sobre todo hacia el norte árido y semiárido, donde los pastizales y matorrales son la base de la ganadería extensiva (Jurado *et al.*, 2013). Jiménez (1989) considera que 50% del territorio (± 98 millones de hectáreas), está ocupado por diversas comunidades vegetales adaptadas al pastoreo con animales, como la pradera natural (pastizal), matorrales, selva tropical caducifolia y bosques mixtos de coníferas y encinos. Arroyo (1990) puntualiza que 38% del territorio se utiliza como tierra de pastoreo, del cual 76% se localiza en el norte del país.

En el país, las prácticas de manejo de suelo en el sector pecuario, son limitadas. Al respecto, se han estudiado la rotación de ganado y la capacidad de carga animal. El pastoreo rotacional intensivo consiste en destinar para ese fin un área en un período de tiempo relativamente corto (menor a un año), en el que se alternan lapsos cortos de pastoreo intensivo (una alta presión animal), con períodos de largo descanso, para que la pradera se recupere. La carga animal implica el número de animales que pastorean cierta superficie por un tiempo determinado, se expresa como la cantidad de unidad animal por hectárea. Es decir, una unidad animal como una vaca adulta (de 450 kg con becerro al pie) o bien, su equivalente.

Entre los beneficios de estas prácticas de manejo de suelo, se pueden citar la obtención de forraje de mejor calidad, mayor control del consumo y ración del alimento para el ganado, equilibrio entre la cantidad de forraje producido (por unidad de superficie) y su óptimo aprovechamiento por el ganado; captura de carbono y menores emisiones de CO₂. En este sentido, la rotación del ganado en potreros permite la captura de COS debido a que la vegetación se recupera entre los periodos de pastoreo y descanso.

Conclusiones

En el contexto del cambio climático, el carbono orgánico del suelo ha recibido particular atención en los últimos años. Esto se debe a su influencia dentro del ciclo global del carbono y a que representa, la principal reserva de dicho elemento en el medio terrestre.

Esto ha derivado en un creciente desarrollo de investigaciones sobre el comportamiento del carbono edáfico, desde métodos analíticos y modelos predictivos para determinar su contenido en el suelo, hasta evaluaciones de distintas prácticas en el manejo del suelo que coadyuven a mantener y a incrementar dichas reservas.

Aun cuando se han realizado diversas investigaciones que han contribuido a la generación de conocimiento y que estas han permitido un mayor entendimiento sobre la importancia de la conservación e incremento del carbono en el suelo, el tema ‘captura de carbono orgánico’ con relación a las prácticas de manejo del suelo, en los sectores agropecuario y forestal de México, se encuentra en proceso de desarrollo.

Literatura citada

- Acosta, M.; Etchevers, J. D.; Montreal, C.; Quednow, K. e Hidalgo, C. 2001. *In*: simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, del 18 al 20 de octubre de 2001. Valdivia, Chile. 120-128 pp.
- Albrecht, A. and Kandji, S. T. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agric. Ecosys. Environ.* 99(1-3):15-27.
- Álvarez, S. y Rubio, A. 2013. Línea base de carbono en bosque mixto de pino-encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO₂FIX V.3.2 Rev. Chapingo Ser. Cienc. Fores. Amb. 19(1):125-137.
- Álvaro, J.; Cantero, C.; López, M. y Arrué, J. L. 2010. Fijación de Carbono y reducción de emisiones de CO₂. *Agricultura de conservación: aspectos agronómicos y medioambientales*. Eumedia. España. 89-96 pp.
- Andrade, J. H. y Muhammand, I. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agrofostería en las Américas*. 10(39-40):109-116.
- Armentano, T. V. 1981. Conference: potential significance of tropical organic soils for the carbon balance of the terrestrial biosphere. (No. doe/ev/10725-2; conference-8110167-1). Institute of Ecology. Indianapolis, USA. 85-97 pp.
- Arroyo, G. 1990. Regiones agrícolas de México: modernización agrícola, heterogeneidad estructural y autosuficiencia alimentaria. *In*: Martínez, A. C. (Ed.). *Balance y perspectivas de los estudios regionales en México*. CIIH-UNAM. México, DF. 147-222 pp.
- Báez, P. A. 2008. Formación de agregados y captura de carbono en materiales de origen volcánico de México. Capítulo I. Formación de agregados y secuestro de carbono en tepetates cultivados de la cuenca del río Texcoco, Estado de Hidalgo. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo. Estado de México, México. 155 p.
- Bernal, G. I. 2015. Estimación de los almacenes de carbono en suelos forestales y uso agropecuario en la localidad El Suchual de Santa Ana, Municipio de Tlatlaya, Estado de México. Tesis. Facultad de Planeación Urbana y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México, México. 100 p.

- Botero, B. J. A. 1999. Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de carbono. *In: Agroforestería para la producción animal en América Latina. Boletín 143: Estudio FAO. Producción y sanidad animal. In: II Conferencia Electrónica sobre Agroforestería para la Producción Animal en América Latina. 75-92 p.*
- Brown, J. B. and Thorpe, J. 2008. Climate change and rangelands: responding rationally to uncertainty. *Rangelands. 30(1):3-6.*
- Brown, S.; Sathaye, J.; Cannell, M. and Kauppi, P. E. 1996. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. Cambridge University Press. USA. 724 p.
- Casanova, L. F.; Petit, A. J. y Solorio, S. J. 2011. Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. Forest. Amb. 17(1):133-143.*
- Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). DF, México. 847 p.
- Conant, R. T.; Paustian, K.; Del Grosso, S. J. and Parton, W. J. 2005. Nitrogen pools and fluxes in grassland soils sequestering carbon. *Nutr. Cycling Agroecosyst. 71(1):239-248.*
- Contreras, M. J. 2014. Almacenes de carbono edáfico en sistemas productivos en la comunidad de Cevatí, San José Del Rincón, Estado de México. Tesis. Universidad del Estado de México. Estado de México, México. 88 p.
- Cruz, C. J. C. 2010. Evaluación de las concentraciones de carbono orgánico secuestrado en suelos de áreas reforestada de Milpa Alta y Tlalpan, Distrito Federal. Reporte de Servicio Social. DF, México. 57 p.
- De Jong, B.; Anaya, C.; Maser, O.; Olguín, M.; Paz, F.; Etchevers, J.; Martínez, R. D.; Guerrero G. and Balbontín, C. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecol. Manag. 260(10):1689-1701.*
- Dendooven, L.; Patino, Z. L.; Verhulst, N.; Luna, G. M.; Marscha, R. and Govaerts, B. 2010. Global warming potential of agricultural systems with contrasting tillage and residue management in the central highlands of Mexico. *Agric. Ecosys. Environ. 152:50-58.*
- Dixon, R. K. 1995. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? *Agrof. Systems 31(2):99-116.*
- Espinoza, Z. M. A. y Rivera, V. J. A. 2013. Estimación de carbono en suelos de selva baja caducifolia en el municipio de Zacazonapan, México. Tesis. Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Estado de México, México. 97 p.
- Eswaran, H.; Van Den Berg, E. and Reich, P. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J. 57(1):192-194.*
- FAO. 2001. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96. Rome, Italy. 58 p.
- FAO. 2002. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Roma, Italia. 64 p.
- FAOSTAT. 2014. The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. <http://faostat3.fao.org/home/E>. 2014.
- Fearnside, P. M. and Laurance, W. F. 2003. Comment on determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests'. *Science. 299:1015-1015.*

- Fisher, M. J.; Rao, I. M.; Ayarza, C. E.; Lascano, C. E.; Sanz, J. I.; Thomas, R. J. and Vera, R. R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature*. 371:236-238.
- Fregoso, T. L. E. 2008. Cambios en las características químicas y microbiológicas de un Vertisol inducidos por sistemas de labranza de conservación. *Terra Latinoam.* 26(2):161-170.
- Galicia, L.; Gamboa, C. A. M.; Cram, S.; Chávez, V. B.; Peña, R. V.; Saynes, V. y Siebe, C. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoam.* 34(1):1-29.
- Gamboa, C. A. M. and Galicia, L. 2011. Differential influence of land use/cover change on topsoil carbon and microbial activity in low-latitude temperate forests. *Agric. Ecosys. Environ.* 142(1):280-290.
- González, M. L.; Etchevers, B. J. D. e Hidalgo, M. C. 2008. Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia.* 42(7):741-751.
- González, O. I. 2014. Almacenes de carbono orgánico en tres sitios con diferente cobertura vegetal de la zona federal del Ex-Lago de Texcoco. Tesis de licenciatura. Facultad de Planeación Urbana y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México. 141 p.
- Guo, L. B. and Gifford, R. M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global Change Biol.* 8(4):345-360.
- Hernández, L. F. J. 2014. Línea base de carbono en suelos con el sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) y biomasa aérea. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo. Estado de México, México. 150 p.
- Honty, G. 2011. Cambio climático: negociaciones y consecuencias para América Latina. Coscoroba Ediciones. Montevideo, Uruguay. 177 p.
- Houghton, R. A.; Boone, R. D; Melillo, J. M.; Palm, C. C.; Woodwell, G. M.; Myers, N.; Moore, B. and Skole, D. 1985. Net flux of carbon dioxide from tropical forest in 1980. *Nature.* 316(9):617- 620.
- INE-SEMARNAT. 2006. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México: tercera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático. DF, México.
- IPCC. 1996. Intergubernamental Panel Climate Change Climate Change 1995: the science of Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change; Houghton, J. T.; Meira, L. G. Filho, Callander, B. A.; Harris, N.; Kattenberg, A. and Maskel, K. (Eds.). Cambridge University Press. Cambridge, UK. 573 p.
- Izaurrealde, R. C.; Rosenberg, N. J. and Lal, R. 2001. Mitigation of climatic change by soil carbon sequestration: issues of science, monitoring, and degraded lands. *Adv. Agron.* 70(1):1- 75.
- Janzen, H. H. 2003. Agricultural soils: their place in the global carbon cycle. *In: soil organic carbon and agriculture: developing indicators for policy analyses.* Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development. Smith, S. (Ed.). Paris, France. 11-20 pp.
- Jiménez, M. A. 1989. La producción de forrajes en México. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Banco de México-FIRA. Chapingo, Estado de México, México. 100 p.
- Johnson, T. M.; Alatorre, C.; Romo, Z. y Liu, F. 2009. México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono. Banco Mundial en coedición con Mayol Ediciones, SA. Colombia. 153 p.

- Jurado, G. P.; Saucedo, T. R.; Morales, N. C. y Martínez, S. M. 2013. Carbono orgánico del suelo y su relación con la condición en pastizales y matorrales de Chihuahua. 55-61 pp. *In:* Paz, P. F.; Wong, G. J.; Bazan, M. y Saynes, V. (Eds.). 2013. Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2013. Programa Mexicano del Carbono. Estado de México, México. 702 p.
- Lal, R. 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil Tillage Res.* 43(1):81-107.
- Lal, R. 2003. Offsetting global CO₂ emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degradation and Development.* 14(3):309-322.
- Lal, R. 2004a. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science.* 304(5677):1623-1627.
- Lal, R. 2004b. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma.* 123(1-2):1-22.
- López, R. L. L. and Bueno, H. P. 2015. Estimation of potential CO₂ emission in agricultural soils of two watersheds in Durango State. *Rev. Chapingo Ser. Zonas Áridas.* 14(2):219-226.
- Martínez, R. V.; Hernández, A. E.; Vázquez, A. A.; Monterroso, R. A. y Almaraz, S. J. 2013. Carbono almacenado en tres usos de suelo del monte Tlálóc. Programa Mexicano del Carbono. Paz, P. F.; Wong, G.; Bazan J. M. y Saynes, V. (Eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: síntesis a 2013. Programa Mexicano del Carbono. Estado de México, México. 702 p.
- Masera, O. y Sheinbaum, C. 2004. Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional. *In:* Fernández, A. Martínez J. y Osnaya, P. (Eds.). Cambio climático: una visión desde México. INE-SEMARNAT, México. 355-368 pp.
- Mchunu, C. and Chaplot, V. 2012. Land degradation impact on soil carbon losses through water erosion and CO₂ emissions. *Geoderma.* 177(1):72-79.
- Monreal, C. M.; Etchevers, J. D.; Acosta, M.; Hidalgo, C.; Padilla, J.; López, R. M.; Jiménez, L. and Velázquez, A. 2005. A method for measuring above-and below-ground C stocks in hillside landscapes. *Canadian J. Soil Sci.* 85(Special Issue):523-530.
- Montaño, N. M.; Ayala, F.; Bullock, S. H.; Briones, O.; García, O. F.; García, S. R.; Maya, Y.; Perroni, Y.; Siebe, C.; Tapia, T. Y.; Troyo, E. y Yépez, E. 2016. Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoam.* 34(1):39-59.
- Moreno, C. E.; Guerrero, A.; Gutiérrez, C. M. C.; Ortiz, S. C. A. y Palma, D. J. 2002. Los manglares de Tabasco: una reserva natural de carbono. *Madera y Bosques.* 1:115-128.
- Murty, D.; Kirschbaum, M.; McMurtrie, R. and McGilvray, H. 2002. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biol.* 8(2):105-123.
- Mutuo, P. K.; Cadisch, G.; Albrecht, A.; Palm, C. A. and Verchot, L. 2005. Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutr. Cycling Agroecosy.* 71(1):43-54.
- Nair, P. K. 2004. Agroforestry: Trees in support of sustainable agriculture. *In:* Hillel, H.; Rosenzweig, C.; Powlson, D.; Scow, K.; Singer, M. and Sparks, D. (Eds.). *Encyclopedia of Soils in the Environment.* Elsevier, London, UK. 35-44. pp.
- Niles, J. O. 2002. Tropical forests and climate change. *In:* Schneider, S.; Rosencranz A. and Niles, J. (Eds.). *Climate Change policy: a survey.* Island Press, Washington, USA. 565 p.

- Pan, Y.; Birdsey, R. A.; Fang, J.; Houghton, R.; Kauppi, P. E.; Kurz, W. A.; Phillips, O. L.; Shvidenko, A.; Lewis, S. L.; Canadell, J. G.; Ciais, P.; Jackson, R. B.; Pacala, S. W.; Maguire, A. D.; Piao, S.; Rautiainen, A.; Sitch, S. and Hayes, D. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*. 333(6045):988-993.
- Paul, K. I.; Polglase, P. J.; Nyakuengama, J. G. and Khanna, P. K. 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecol. Manag.* 168(1):241-57.
- Paustian, K.; Collins, H. P. and Paul, E. A. 1997. Management controls on soil carbon. *In*: Paul, E. A. K.; Paustian, E. T.; Elliot, C. V. and Cole, C. V. (Eds.). *Soil organic matter in temperate agroecosystems: long-term experiments in North America*. CRC Press, Boca Raton, FL., USA. 15-49 pp.
- PECC. 2009. Programa especial de cambio climático. *In*: Jhonson, T. M.; Alatorre, C.; Romo, Z. y Lui, F. 2010. *Low-carbon development for Mexico*. The World Bank, Washington, DC, USA. 186 p.
- Post, W. M. and Kwon, K. C. 2000. Soil carbon sequestration and landuse change: processes and potential. *Global Change Biol.* 6(1):317-327.
- Prasad, R. and Power, J. F. 1991. Crop residue management: literature review. *Advances of soil Sci.* 15(1):205-251.
- Rasmussen, P. E. and Parton, W. J. 1994. Long term effect of residue management in wheat - fallow: I. Inputs, yield, and soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58(2):523-530.
- Ravindranath, N. H. and Ostwald, M. 2008. Carbon inventory methods. *Handbook for greenhouse gas inventory, carbon mitigation and roundwood production projects*. Springer Science. Netherlands. 314 p.
- Reicosky, D. C. 2002. Long - term effect of moldboard plowing on tillage - induced CO₂ loss, *In*: Kimble, J. M.; Lai, R. and Follet, R. F. *Agricultural practices and polices for carbon sequestration in soil*. Lewis Publishers. Papers form symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus. OH, USA. 87-96 pp.
- Robertson, P. 2004. Abatement of nitrous oxide, methane, and other non-CO₂ greenhouse gases: The need for a system approach. pp. 493-506. *In*: Field, C. R. and Raupach, M. R. (Eds.). *The global carbon cycle integrating humans, climate, and the nature world*. Scope. 62. Island Press. Washington, DC, USA. 534 p.
- SAGARPA. 2007. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. *Labranza de conservación*. *In*: Jhonson, T. M.; Alatorre, C.; Romo, Z. y Lui, F. 2010. *Low-Carbon Development for Mexico*. The World Bank. Washington, DC, USA. 186 p.
- SAGARPA. 2016. Te va a encantar la iniciativa "4 por 1000". Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). México. <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/te-va-a-encantar-la-iniciativa-4-por-1000>.
- Santacruz, D. A. M. 2010. Diseño de redes de muestreo óptimas para el monitoreo del carbono orgánico del suelo en el C. I. La Libertad mediante la aplicación de algoritmos genéticos. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 162 p.
- Saynes, S. V.; Etchevers, B. J. D.; Paz, P. F. y Alvarado, C. L. O. 2016. Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoam.* 34(1):83-96.
- Segura, C. M. A.; Sánchez, G. P.; Ortiz, S. C. A. y Gutiérrez, C. Ma. Del C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoam.* 23(1):21-28.
- Six, J.; Callewaert, P.; Lenders, S.; De Gryze, S.; Morris, S. J.; Gregorich, E. G.; Paul, E. A. and Paustian, K. 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66(1):1981-1987.

- Soto, P. L.; Anzueto, M.; Mendoza, J.; Jiménez, F. G. and de Jong, B. 2010. Carbon Stocks in Organic Coffee Systems in Chiapas, Mexico. *Agroforest Syst.* 78(1):39-51.
- Torres, G A.; Orozco, H. E.; Mireles, L. P. y Álvarez, A. G. 2013. Estimación de captura de carbono en suelos, bajo diferentes sistemas productivos agropecuarios en el municipio de Zacazonapan, Estado de México. 114-117 pp. *In: Programa Mexicano del Carbono.* Paz, P. F J.; Wong, G.; Bazan, M. y Saynes, V. (Ed.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: síntesis a 2013. Programa Mexicano del Carbono. Estado de México, México. 702 p.
- Torres, G. A. A. 2013. Estimación de captura de carbono en suelos bajo diferentes sistemas productivos agropecuarios en el municipio de Zacazonapan, Estado de México. Tesis. Facultad de Planeación Urbana y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Estado de México, México. 94 p.
- Torres, R. J. A.; Espinoza, D. W.; Reddiar, K. L. y Vázquez, A. A. 2011. Secuestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio de Huatusco, Veracruz. *Trop. Subtrop. Agroecosys.* 13(3):543-549.
- Trumbmore, S. E.; Davidson, E. A.; Barbosa de C, P.; Nepstad, D. D. and Martinelli, L. A. 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochem. Cycles.* 9(4):515-528.
- Trumper, K.; Bertzky, M.; Dickson, B.; Van der Heijden, G.; Jenkins M. y Manning, P. 2009. ¿La Solución Natural? El papel de los ecosistemas en la mitigación del cambio climático. Informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 76 p.
- UNFCCC. 2005. United nations framework convention on climate change sixth compilation and synthesis of initial national communications from parties not included in annex I to the convention. *In: United Nations. 2005. Inventories of Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases.* 20 p.
- Valdés, V. E. 2010. Evaluación del carbono y nutrientes edáficos por clase de geoforma y tipo de manglar en Marismas Nacionales, Nayarit. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo. Estado de México, México. 241 p.
- Valdés, V. E.; Valdez, H. J. I.; Ordaz, C. V. M. y Gallardo, L. J. 2011. Evaluación del carbono orgánico en suelos de los manglares de Nayarit. *Rev. Mex. Cienc. Forest.* 2(8):48-58.
- Vela, C. G.; López B. J. y Rodríguez, G. M. de L. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).* 77:18-30.
- Weihermüller, L.; Lamers, M. and Reichstein, M. 2011. Introduction to production, transport, and emission of trace gases from the vadose zone to the atmosphere. *Vadose Zone J.* 10(11):151-155.
- West, T. O. and Post, W. M. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Science Society. Published in Soil Sci. Soc. Am.* 66(6):1930-1946.
- Wilson, M. G.; Quintero, C. E.; Boschetti, N. G.; Benavidez R. A. y Mancuso, W. A. 2000. Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Rios. *Rev. Fac. Agron.* 20(1):23-30.
- Yerena, Y. J. I.; Jiménez, P. J.; Alanís, R. E.; Aguirre, C. O. A.; González, T. M. A. y Treviño, G. E. J. 2014. Dinámica de la captura de carbono en pastizales abandonados del noreste de México. *Trop. Subtrop. Agroecosys.* 17:113-121.