

La investigación científica en México: secuestro de carbono orgánico en suelos agrícolas y de agostadero

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

¹INIFAP. Av. Progreso núm. 5, Barrio de Santa Catarina, Del. Coyoacán, Ciudad de México. CP. 04010.
²Facultad de Estudios Superiores Zaragoza-UNAM. Batalla 5 de mayo s/n, esquina Fuerte de Loreto, Col. Ejército de Oriente, Iztapalapa, Ciudad de México. CP. 09230. ³Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchan, Texcoco, Estado de 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, Estado de México. CP. 56230.

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

Resumen

El carbono orgánico (CO) se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios, cuyas actividades bajo prácticas inadecuadas degradan los suelos. Este trabajo tuvo por objetivos: conocer la tendencia de la investigación científica en México, relacionada con la captura de CO en suelos agrícolas y de agostadero; y proponer líneas de estudio que respondan a las necesidades actuales de conocimiento. Se hizo una revisión sistemática en bases de datos en línea y en el acervo físico y digital de instituciones que estudian el tema, periodo 1990-2016. Se recopilaron 79 publicaciones, artículos científicos (64.6%) y tesis (29.1%), con notable incremento hacia la última década. El CO se estimó con técnicas analíticas, modelos computacionales y métodos matemáticos. Los estudios incluyeron varios enfoques: estimación de almacenes; fertilidad; dinámica del carbono; impactos de las prácticas de conservación del suelo y cambios de uso. El Colegio de Postgraduados sobresalió entre las instituciones que estudian el tema, por su número de investigaciones. También, el Estado de México y Tabasco por los estudios efectuados en sus territorios. Las investigaciones se difundieron en medios nacionales (59.6%) e internacionales (40.4%). El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y el Programa Mexicano del Carbono, así como los compromisos internacionales de México en materia de cambio climático, han apoyado y reorientado la investigación del tema. Se propusieron líneas de estudio, entre ellas: la estandarización de metodologías analíticas, indicadores de captura de CO y de emisiones de CO₂.

Palabras clave: almacenes de carbono, cambio climático, matorral, pastizal, prácticas de manejo de suelo.

Recibido: enero de 2019

Aceptado: febrero de 2019

El carbono orgánico del suelo (COS) se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, ya que influye en la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, las que definen su fertilidad y capacidad productiva (Sánchez *et al.*, 2004). Sin embargo, las prácticas agronómicas tradicionales y el mal manejo de la capacidad de carga animal en el sector ganadero, generan la erosión del carbono e impactos negativos en la fertilidad del suelo (Mchunu y Chaplot, 2012). Así, la agricultura convencional ha provocado la pérdida de 20 a 80 Mg C ha⁻¹ en las zonas agrícolas tropicales, que aunada a los cambios de uso de la tierra de los últimos 200 años, generaron disminuciones de 78 ±12 Pg de carbono (Lal, 2004).

A escala mundial, los suelos agrícolas ocupan alrededor de 38% de la superficie terrestre (12% cultivos y 26% pastizal inducido), lo que implica el uso de la tierra más extendido en el planeta (FAO, 2014). Esos suelos contienen 10% del total del almacén de CO (Paustian *et al.*, 1997). México tiene una superficie de 198 millones de hectáreas, 15% se utilizan para cultivos agrícolas y 58% para diversas formas de pastizales (SAGARPA, 2013). En la parte norte árida y semiárida del país, el uso pastoril está ampliamente difundido, donde los pastizales y matorrales son la base de la ganadería extensiva (Jurado-Guerra *et al.*, 2013).

El desarrollo de las actividades agropecuarias bajo prácticas inadecuadas, ha llevado a los suelos mexicanos, a distintos grados de deterioro. Entre ellos, la disminución del potencial productivo y las emisiones del carbono edáfico a la atmósfera, en forma de CO₂. Lo anterior, preocupa a la comunidad científica y a la sociedad en general, debido a sus repercusiones en los ámbitos de la productividad agroalimentaria y de cambio climático (CC).

Por estas razones, el tema del secuestro del carbono en el suelo, ha cobrado interés en México en los últimos años. Es por ello, que los objetivos de este trabajo fueron: i) conocer la tendencia de la investigación científica de los últimos 26 años, relacionada con la captura de CO en los suelos agrícolas mexicanos, para identificar vacíos de información; y ii) proponer líneas de estudio, que permitan satisfacer las necesidades actuales de conocimiento y una mayor comprensión del tema.

En distintas bases de datos en línea, se hizo una revisión sistemática: ISI Web of Knowledge, Google Académico, Programa Mexicano del Carbono (PMC), ProQuest Natural Science collection y Science direct, se incluyó el registro del acervo físico y digital de las principales instituciones de investigación y académicas del país, cuyos temas de estudio se asocian con la captura del COS. En particular, Colegio de Postgraduados (COLPOS), Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM).

La búsqueda documental comprendió el periodo 1990 a 2016: se recopilaron artículos científicos, tesis, reportes técnicos y gubernamentales, libros, memorias de congresos y simposios, en los que se evitó la duplicidad del contenido. Las publicaciones se organizaron y analizaron en una base de datos en Excel, donde se llenaron espacios, entre ellos: autor, año, título, revista o editorial, entidad federativa de la investigación e instituciones participantes y otras unidades de estudio relacionadas con: los objetivos, metodologías para evaluar el COS, parámetros físicos, químicos y biológicos.

Durante la revisión, se reunieron 79 publicaciones: artículos científicos (64.6 %), tesis de licenciatura (15.2%), maestría (10.1%) y doctorado (3.8%); libros (2.5), memorias de congresos y de simposios (3.8 %). La búsqueda documental se realizó principalmente en bases de datos en

línea. Aunque se consultaron los acervos físicos de las dependencias señaladas anteriormente, los resultados obtenidos se pudieron mejorar; a través, del escrutinio exhaustivo de la literatura gris que albergan otras instituciones, donde el conocimiento permanece oculto por falta de difusión.

El periodo de interés partió desde el año 1990, pero la publicación más longeva corresponde a 1997. El registro de las mismas, se obtuvo conforme los siguientes lustros: 1997-2001, 5.1%, 2002-2006, 8.9%, 2007-2011, 22.8% y 2012-2016, 63.3%. Lo anterior, mostró una tendencia creciente en el desarrollo de la investigación en materia de captura de carbono en el suelo en México, con un notable incremento en la última década.

Publicaciones de acuerdo con la temática de estudio

Las investigaciones del primer lustro asociaron la captura del COS con el tipo de labranza y con técnicas analíticas. A partir del año 2002, los estudios se relacionaron con nuevos enfoques: estimación de las reservas edáficas según el tipo de suelo (19.4%), fertilidad (18.1%), prácticas de conservación del suelo (16.7%), cambios de uso (13.9%), calidad del suelo (8.3%), efectos del pastoreo extensivo (8.3%), metodologías y técnicas de laboratorio (8.3%), dinámica del carbono (5.6%) y cultivos agrícolas (5.6%).

El estudio de los cultivos se distribuyó de la siguiente manera: maíz (36.7%), frijol (15.2%), calabaza y trigo (6.3% cada uno), café y pastos (5.1% cada uno), alfalfa y cebada (3.8% cada uno), canola, diversas frutas y papa (2.5% cada uno), avena, higuera, sorgo, veza (1.3% cada uno).

Las investigaciones consideraron las siguientes unidades de estudio: tipo de suelo (11.9%), labranza convencional (7.7%) y reducida (8.4%), manejo de residuos (7.7%), fertilización orgánica (7%) e inorgánica (7.7%), sistemas agrícolas definidos por monocultivos (7.7%), rotación de cultivos (7%), cultivos intercalados (5.6%) y de cobertura (0.7%), cultivos bajo riego (3.5%) y de temporal (0.7%), sistemas agroforestales (1.4%), agroquímicos para control de plagas (2.8%), capacidad de carga animal (6.3%) y rotación de ganado (0.7%).

La selección y frecuencia de dichas unidades de estudio dentro de las investigaciones, se atribuyó a la inquietud que se generó en la comunidad científica en torno a dos escenarios: i) el vínculo entre la pérdida de carbono edáfico y sus efectos en el CC; y ii) el desarrollo de estrategias agronómicas para mejorar la fertilidad y productividad de los suelos. Ambos aspectos, constituyen en la actualidad, retos en las agendas nacional e internacional.

Tendencia en el uso de metodologías

De acuerdo con Jones (2010), la investigación sobre cuantificaciones del secuestro de carbono se fundamenta en tres metodologías: el monitoreo del almacén de carbono, aproximaciones experimentales y modelaje. En ese contexto, los estudios reportaron que el contenido de COS se evaluó en la materia orgánica (81%), en la biomasa microbiana (12%) y en la biomasa de raíces (8%). Principalmente, se utilizaron técnicas analíticas (combustiones húmeda y seca, fumigación-extracción y analizadores elementales), seguidas de modelos computacionales y métodos matemáticos (Cuadro 1). Entre las técnicas de combustión húmeda, sobresalió la de Walkley y Black (1934) y en las de fumigación-extracción la de Vance *et al.* (1987).

Cuadro 1. Metodologías empleadas en México, para evaluar el contenido de carbono orgánico en suelos

| Materia orgánica | | Biomasa microbiana | | Biomasa de raíces | |
|-------------------------|------|--------------------------|-----|--------------------------|-----|
| Método | (%) | Método | (%) | Método | (%) |
| Combustión húmeda | 48.2 | Fumigación-extracción | 75 | Analizadores elementales | 50 |
| Combustión seca | 28.9 | Analizadores elementales | 17 | Modelos matemáticos | 38 |
| Modelos computacionales | 10.8 | Isótopos de carbono | 8 | MacDiken (1997) | 13 |
| Modelos matemáticos | 4.8 | | | | |
| Isótopos de carbono | 3.6 | | | | |
| Pérdida por ignición | 3.6 | | | | |
| Total | 100 | | 100 | | 100 |

En algunas publicaciones, se explicó que entre las razones por las que se eligieron esas técnicas, fue su bajo costo económico, lo que facilitó procesar múltiples muestras de suelo. Mientras que los modelos matemáticos y de cómputo, se favorecieron porque permitieron manejar una gran cantidad de datos en corto tiempo, fueron asequibles y ‘no destructivos’. Lo anterior, dejó ver que pese a la existencia de diversas metodologías para cuantificar el COS, la disponibilidad financiera fue un factor que condicionó su uso. Paralelamente, se acrecentó el desarrollo y uso de modelos de simulación, como es el caso del modelo RothC (Coleman y Jenkinson, 2005), que predicen el potencial del secuestro de COS y la dinámica de carbono bajo diferentes escenarios.

Por otro lado, se detectó la necesidad de estandarizar las técnicas analíticas, ya que fue difícil equiparar los resultados producidos en los estudios, debido a la heterogeneidad de las condiciones bajo las que se realizaron las mediciones. Ese proyecto permitiría: generar resultados en un mismo esquema, la homogeneidad de los datos para su comparación, prevenir la ocurrencia de errores y minimizar la variabilidad de los resultados.

En México, los experimentos de los cambios del COS son de corta duración (González-Molina *et al.*, 2011), lo que dificulta, estimar el almacenamiento temporal o pérdida del COS (Kaonga y Coleman, 2008). Conforme las publicaciones registradas, 2.9% evaluaron el COS durante el ciclo del cultivo, 17.1%, en un año, 31.4%, en más de dos años y 48.6%, fueron muestreos aislados y sin seguimiento. Mientras que gran parte de las investigaciones, se realizaron en parcelas experimentales, bajo muestreos destructivos.

Esto repercute en el avance del conocimiento. Es necesario monitorear el COS en experimentos de larga duración, ya que los cambios son lentos y difíciles de detectar (Roldan *et al.*, 2005). Así lo confirman los estudios de labranza de conservación, en los que periodos menores de dos años, impiden observar diferencias significativas, contrario a aquellos mayores de cinco años (Alonso y Aguirre, 2011). Lo anterior, expone la necesidad de desarrollar la investigación, con base en experimentos de largo tiempo, en formas holística (a nivel de agroecosistemas) y organizada, para precisar las reservas de carbono en los ámbitos local, regional y global.

Investigaciones por entidad federativa

Las publicaciones indicaron los estados de la República Mexicana donde se efectuaron los estudios: Estado de México (28.75%), Tabasco (12.5%), Chiapas, Oaxaca, Veracruz (6.25% cada uno), Hidalgo (5%) Ciudad de México, San Luis Potosí, Yucatán (3.75% cada uno), Baja California Sur, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Michoacán, Morelos, Nayarit, Tlaxcala (2.5% cada uno), Aguascalientes, Puebla y Sonora (1.25% cada uno).

Participación y productividad de instituciones académicas y de investigación

Las dependencias que estudiaron el tema de secuestro de COS se concentran en el Cuadro 2. El COLPOS, la UNAM y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), sobresalen por el número de estudios publicados.

Cuadro 2. Instituciones académicas y de investigación en México, que estudian el tema del secuestro de carbono en suelo.

| Institución académica o de investigación | Participación (%) |
|--|-------------------|
| Colegio de Postgraduados (COLPOS) | 28.9 |
| Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) | 14.8 |
| Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) | 8.1 |
| Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) | 5.2 (cada uno) |
| Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Instituto Politécnico Nacional (IPN) | 4.4 (cada uno) |
| Centro Internacional del Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT) | 3.7 |
| Instituto de Ecología, AC. | 2.96 |
| Universidad Veracruzana, Universidad Autónoma de Chihuahua, Instituto Tecnológico de Roque. | 1.48 (cada uno) |
| Centro de Investigación Científica de Yucatán, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste SC, Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México (CVCCCM), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Escuela Nacional de Estudios Superiores, Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, AC, Instituto Tecnológico Agropecuario Núm. 10 de Torreón, Coahuila, Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca, Instituto Tecnológico de Sonora, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Universidad de la Sierra Juárez, Universidad Autónoma de Yucatán, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y Universidad M. San Nicolás de Hidalgo. | 0.74 (cada uno) |
| Total | 100% |

Cabe resaltar, que las publicaciones de 1997-2001 correspondieron al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y COLPOS, con apoyo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). A partir del lustro 2002-2006, se suman las de la UNAM y de la UACH, en la última década de análisis, se integraron las de otras instituciones (Cuadro 2). En el total de investigaciones registradas, se apreció escasa participación internacional.

Los artículos científicos se dieron a conocer en medios nacionales (59.6%) e internacionales (40.4%). Entre los primeros, se distinguieron el PMC y las revistas científicas arbitradas: *Agrociencia*, *Terra Latinoamericana*, *Revista Chapingo* (Serie Ciencias Forestales y del Ambiente y Serie Zonas Áridas) y *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (REMEXCA). En el marco internacional, las revistas científicas: *Agricultura Técnica*, *Applied Soil Ecology*, *Chilean Journal of Agricultural Research*, *Forest Ecology and Management*, *Global Change Biology*, *Interciencia*, *Journal Soils Sediments*, *Journal of Agricultural Science*, *Journal of Tropical Ecology*, *Plant and Soil*, *Soil & Tillage Research*, *Soil Biology and Biochemistry* y *Tropical and Subtropical Agroecosystems*.

Factores de influencia en el avance científico

Según Ortiz (1993), el desarrollo institucional y el fortalecimiento académico de la ciencia del suelo en México, permitieron la construcción de políticas públicas que definieron y marcaron la actividad agropecuaria en el país a mediados del siglo pasado. Las cuales, influyeron en el deterioro de los suelos y afectaron alrededor de 45% del territorio (SEMARNAT-COLPOS, 2002).

En la actualidad, la mayoría de las tierras agrícolas en temporal están bajo un sistema de producción de labranza intensivo (Cotler *et al.*, 2016), lo que ha llevado a la pérdida de fertilidad de los suelos; a una menor capacidad para retener el agua y al detrimento de su estabilidad estructural. Esto a su vez, ha favorecido los procesos erosivos y la pérdida de COS. Por otro lado, el conocimiento sobre suelos de pastizales y matorrales en el país, es escaso (SAGARPA-INIFAP, 2013) y en lo referente a los almacenes de carbono y a los efectos del pastoreo, solo existe información a nivel macro (Segura-Castruita *et al.*, 2005). Ambas situaciones, propiciaron el estudio de suelos desde la década de los 90's, especialmente, de aquellos de uso agropecuario.

De gran importancia, ha sido el surgimiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en el año de 1970. El cual; a través, de apoyo financiero y de la instrumentación de diversos programas hasta la fecha, ha favorecido el desarrollo científico del país en lo que refiere a la generación del conocimiento, transferencia y uso de tecnología y formación de recursos humanos. Es importante resaltar, que lo anterior se enriquece con la labor de los Centros de Investigación y de las Redes temáticas que dependen del CONACYT. Donde la disponibilidad de los laboratorios nacionales, permite un mayor progreso.

Por otra parte, desde el establecimiento del PMC en el año 2005 (en vínculo con el Instituto Nacional de Ecología), la investigación del ciclo del carbono se ha orientado al contexto del CC y en ese sentido, se ha promovido la enseñanza académica en áreas prioritarias. Es oportuno mencionar, que el PMC ha estimulado las comunicaciones con dependencias gubernamentales incidentes en el tema, y ha participado en el desarrollo de políticas públicas asociadas con el CC.

Cabe mencionar, que México es miembro activo del Protocolo de Kyoto. El cual, es un acuerdo internacional que derivó de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático y entró en vigor en febrero de 2005. El protocolo pretende que los países desarrollados reduzcan sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en cinco por ciento para el año 2012, con respecto a sus niveles de 1990. Uno de sus mayores retos, es lograr que los suelos agrícolas del planeta se transformen en sumideros de carbono y que su captura sea cuantificable, en los que se incluye a los suelos de pastoreo, debido a que ocupan grandes extensiones y almacenan entre 200 y 400 Gt de carbono (FAO, 2000).

El tratado, contempla tres mecanismos de acción: aplicación conjunta, comercio de emisiones y mecanismo de desarrollo limpio (MDL). El MDL implica las actividades de mitigación del CC entre países en vías de desarrollo (México) e industrializados. Bajo la premisa de que los GEI modifican el clima y se distribuyen de manera uniforme en la atmósfera, el secuestro de esos gases en cualquier sitio del planeta, produce el mismo efecto. Por lo tanto, los países desarrollados pueden asumir sus compromisos de reducción de emisiones, a través de proyectos en países en desarrollo.

Lo anterior, mediante la compra de bonos de carbono o con financiamiento para proyectos de captura o de abatimiento de los GEI, en otros países y acreditándolas como propias. Para que México participe en este mercado, se requiere conocer la dinámica del carbono en sus ecosistemas, así como las modificaciones que se presentan en su flujo, a causa de cambios de usos de suelo (Yerena-Yamallel *et al.*, 2011).

Adicionalmente, México y Francia firmaron en 2015, un convenio de cooperación científica para incrementar la productividad en el campo (SAGARPA, 2015). El cual permite; a través, del vínculo entre las áreas científicas- áreas científicas de la SAGARPA: Colegio de Posgraduados (COLPOS), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA)- de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y del Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) por sus siglas en francés, la investigación y el lineamiento de acciones que en el marco de CC, inciden en el mejoramiento de suelos para uso agrícola, rehabilitación de agostaderos e impulso a la acuacultura.

En ese contexto, la iniciativa ‘4 x 1 000’ para la sustentabilidad y cuidado del medio ambiente en los procesos de producción agropecuarios, promovida por el IRD, se enmarca en el uso de materia orgánica en suelos y mejores prácticas agrícolas para la captura de carbono. Por lo que se espera, que el convenio potencialice en el sector agropecuario, los estudios relacionados con la mitigación y adaptación al CC.

Esto implica, que el escaso presupuesto que la SAGARPA destina a la conservación de suelos (2.12% del monto total disponible por la dependencia federal en 2014), y que se invierte en más de 80% a la infraestructura hidráulica (Cotler *et al.*, 2016), se debe consignar a estudios sobre carbono de suelos. Para que México asuma los compromisos que ha adquirido en materia de CC y disminuya 50% de las emisiones de los GEI, el gobierno debe disponer entre 0.7 y 2.21% del PIB anual (224 000 millones de pesos al año) y evitar la pérdida de 6.2% del PIB (630 000 millones de pesos al año) por impactos medioambientales (SEMARNAT, 2009).

Líneas propuestas para la investigación en México

El potencial del secuestro de carbono de los suelos agrícolas y de agostadero mexicanos se desconoce a escala nacional, debido a la escasa información disponible. El análisis de este trabajo, permitió identificar algunos vacíos en el conocimiento, los que se exponen en seguida, como necesidades y propuestas de líneas de investigación.

- Estandarización de metodologías analíticas para evaluar el contenido de CO.
- Un inventario completo y en constante actualización de las reservas de CO en suelos agrícolas y de agostadero (pastizales y matorrales).

- Estimar el potencial secuestro de carbono de los suelos agrícolas y de agostadero, así como de sus emisiones de CO₂.
- Indicadores de captura de CO y de emisiones de bióxido de carbono, de acuerdo con las prácticas de manejo de uso del suelo.
- Diseño y transferencia de tecnologías para el secuestro de CO en suelos agrícolas y de agostadero.
- Instrumento de política pública nacional que, en concordancia con normas y leyes vigentes, precise la adopción de prácticas de manejo del suelo, para:
- Favorecer el secuestro y conservación de carbono en suelos agrícolas y de agostadero.
- Auspiciar la adopción tecnologías para el secuestro de carbono a través de incentivos económicos
- Cumplir los compromisos de México, con respecto a convenios internacionales.

Adicionalmente, es indispensable difundir los resultados de los estudios que ya se forjaron en las instituciones académicas y de investigación del país y que constituyen fuentes importantes de la comunicación del conocimiento. Por lo que se requiere, digitalizar los acervos físicos y así, favorecer la accesibilidad a la información e incrementar su impacto.

Conclusiones

México ha tenido notables avances en la ciencia del suelo. Sin embargo, aún falta mucho por conocer. Para determinar las condiciones actuales que se presentan en el país, en particular sobre el secuestro de CO en los suelos agrícolas y de agostadero, se requiere conformar equipos científicos interdisciplinarios que colaboren a escalas local, regional y nacional. Así como dirigir la investigación a un esquema congruente y jerarquizado que permita concretar metas a corto, mediano y largo plazo; y en consecuencia, alcanzar los niveles de productividad científica de los países desarrollados.

Literatura citada

- Alonso, B. M. y Aguirre, M. F. J. 2011. Efecto de labranza de conservación sobre las propiedades del suelo. *Terra Latinoam.* 29(2):113-121.
- Coleman, K. and Jenkinson, S. D. 2005. ROTHC-26.3- a model for the turnover of carbon in soil: model description and windows users guide. IACR-Rothamsted, Harpenden. 45 p.
- Cotler, H.; Martínez, M. y Etchevers, J. D. 2016. Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación políticas públicas. *Terra Latinoam.* 34(1):125-138.
- FAO. 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Informes sobre recursos mundiales de suelos 88. 120 p.
- FAO. 2014. The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. Food and agriculture organization of the United Nations. <http://faostat3.fao.org/home/E>. 2014.
- González-Molina, L.; Etchevers-Barra, J. D.; Paz-Pelatt, F.; Díaz-Soliz, H.; Fuentes-Pontes, M. H.; Covalada-Ocón S. and Pando-Moreno, M. 2011. Performance of the RothC-26.3 model in short-term experiments in Mexican sites and systems. *The J. Agric. Sci.* 149(4):415-425.
- Jones, M. A. 2010. Potential for carbon sequestration in the temperate grassland soils. *In: FAO. 2009. Grassland carbon sequestration: management, policy and economics. Proceedings of the workshop on the role of grassland carbon sequestration in the mitigation of climate change.* Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 342 p.

- Jurado-Guerra, P.; Saucedo-Terán, R.; Morales-Nieto, C. y Martínez-Salvador, M. 2013. Carbono orgánico del suelo y su relación con la condición en pastizales y matorrales de Chihuahua. *In: Paz, P. F.; Wong, G.; Bazan, J. 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.*
- Kaonga, M. L. and Coleman, K. 2008. Modelling soil organic carbon turnover in improved fallows in Eastern Zambia using the RothC-26.3 model. *Forest Ecol. Manag.* 256(5):1160-1166.
- Lal, R. 2004. Soil Carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma.* 123(1-2):1-22.
- MacDiken, K. 1997. A Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International. Arlington, VA, USA. 87 p.
- Mchunu, C. and Chaplot, V. 2012. Land degradation impact on soil carbon losses through water erosion and CO₂ emissions. *Geoderma.* 177:72-79.
- Ortiz, S. C. A. y Cuanalo de la Cerda, H. 1993. Evolución de la ciencia del suelo en México. *Ciencia.* 23-32 pp.
- Paustian, K.; Collins, H. P. and Paul, E. A. 1997. Management controls on soil carbon. *In: Paul, E. A.; Paustian, K.; Elliot, E. T. 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.*
- Roldán, A.; Salinas, J. R. G.; Alguacil, M. M. and Caravaca, F. 2005. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field. *Appl. Soil Ecol.* 30(1):11-20.
- SAGARPA. 2013. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. El suelo y la producción agropecuaria. <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/El%20suelo%20y%20la%20produccion%20agropecuaria.pdf>.
- SAGARPA. 2015. Impulsan México y Francia cooperación científica para incrementar productividad en el campo. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). <https://www.gob.mx/sagarpa/prensa/impulsan-mexico-y-francia-cooperacion-cientifica-para-incrementar-productividad-en-el-campo>.
- SAGARPA-INIFAP. 2013. Almacén y captura de carbono en pastizales y matorrales de Chihuahua. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca (SAGARPA)-Alimentación-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). México, DF. 33 p.
- Sánchez, J. E.; Harwood, R. R.; Willson, T. C.; Kizilkaya, K.; Smeenk, J.; Parker, E.; Paul, E. A.; Knezek, B. D. and Robertson, G. P. 2004. Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. *Agron. J.* 96(3):769-775.
- Segura-Castruita, M. A.; Sánchez-Guzmán, P.; Ortiz-Solorio, C. A. y Gutiérrez-Castorena, M. C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoam.* 23(1):21-28.
- SEMARNAT-COLPOS. 2002. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Colegio de Posgraduados. Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México, DF.
- SEMARNAT. 2009. La economía del cambio climático en México. Síntesis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/2009-economia-cc-mex.pdf>.
- Vance, E. D.; Brookes, P. C. and Jenkinson, D. S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 19(6):703-707.

- Walkley, A. and Black, I. A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37(1):29-38.
- Yerena-Yamallel, J.; Jiménez-Pérez, J.; Aguirre-Calderón, O. A. y Treviño-Garza, E. J. 2011. Concentración de carbono en la biomasa aérea del matorral espinoso tamaulipeco. *Rev. Chapingo, Ser. Cienc. Forest. Amb.* 17(2):283-291.