

# **Efecto de prácticas de manejo del suelo y sus interacciones en la dinámica del carbono orgánico del suelo: Revisión de Literatura**

**Melida Melania Amores Mena**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano**  
**Honduras**  
Noviembre, 2020

ZAMORANO  
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

# **Efecto de prácticas de manejo del suelo y sus interacciones en la dinámica del carbono orgánico del suelo: Revisión de Literatura**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Melida Melania Amores Mena**

**Zamorano, Honduras**  
Noviembre, 2020

# **Efecto de prácticas de manejo del suelo y sus interacciones en la dinámica del carbono orgánico del suelo. Revisión de Literatura**

**Melida Melania Amores Mena**

**Resumen.** El manejo de los suelos agrícolas, incluida la labranza, la entrada de residuos vegetales, el aporte de fertilizantes y los cultivos de cobertura pueden alterar la cantidad y calidad del carbono orgánico del suelo. Muchos investigadores han comparado las ventajas y desventajas de las prácticas de labranza de conservación (LC) y la labranza convencional (LCV) sobre el almacenamiento del carbono en el suelo. Aunque los resultados son diversos, el conjunto de prácticas de agricultura de conservación muestra efectos positivos en la dinámica de este componente esencial de los ecosistemas terrestres. El objetivo central de esta revisión fue determinar el efecto de prácticas de manejo del suelo y sus interacciones sobre la dinámica del carbono orgánico del suelo (COS) en sistemas agrícolas. Los resultados evidencian el creciente interés en la investigación de este tópico en los últimos 20 años, especialmente con relación a los métodos de labranza. De acuerdo, con “Science Direct” el número de publicaciones pasó de 373 en el 2000 a 4,314 en el 2020, con un constante crecimiento anual. En tanto que, las prácticas de fertilización son las menos abordadas y las más controversiales. Lo anterior determina que, a pesar de los avances del conocimiento, es necesario abordar la investigación de la dinámica del carbono, bajo diferentes prácticas de manejo de suelos y en contextos locales. De esta manera, se podrán determinar las acciones más apropiadas para la conservación o incremento del almacenamiento del COS.

**Palabras clave:** Agro ecosistemas, cultivos de cobertura, fertilización, labranza de conservación, labranza convencional.

**Abstract.** Agricultural soils management, including tillage, use of vegetable residues, fertilizers, and cover crops can disrupt soil organic carbon quantity and quality. Many researchers have compared advantages and disadvantages of conservation and conventional tillage practices for soil carbon storage. Although results vary, conservation agriculture practices show positive effects on the dynamics of this essential component of terrestrial ecosystems. The main objective of this review was to determine effects of soil management practices and their interactions on soil organic carbon (SOC) in agricultural systems. Results indicate a growing interest in this topic over the last 20 years, especially in relation to tillage methods. According to Science Direct database, the number of publications increased from 373 in 2000 to 4,314 in 2020, with constant annual growth. Meanwhile, fertilization practices are the least addressed and the most controversial. Despite advances in knowledge, more research on best practices within distinct local contexts is needed to maximize SOC storage and conservation.

**Key words:** Agroecosystem, conservation tillage, conventional tillage, cover crop, fertilization.

# ÍNDICE GENERAL

Portadilla .....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen.....	iii
Índice General .....	iv
Índice de Cuadro y Figuras.....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>17</b>
<b>5. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>18</b>

## ÍNDICE DE CUADRO Y FIGURAS

Cuadro	Página
1. Prácticas agrícolas y dinámica COS.....	8

Figuras	Página
1. Reporte de publicaciones sobre efectos de las prácticas agrícolas y COS en revistas de los repositorios “Science Direct” y “Web of Science” .....	5
2. Reporte de investigaciones sobre el efecto de las prácticas agrícolas sobre el COS.....	7

# 1. INTRODUCCIÓN

El suelo se considera un recurso vulnerable a la degradación, el avance de la desertificación y la pérdida de biodiversidad debido a las actividades agrícolas y en la actualidad, al cambio climático. Este recurso juega un papel fundamental en la provisión de alimentos, la regulación hídrica y la dinámica del Carbono (C) del planeta, entre otros servicios ecosistémicos (SE). De acuerdo, con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2017) el suelo contiene reservas de carbono, superiores a las de la atmósfera y la vegetación terrestre. El COS es la fracción de la reserva de C que determina aspectos cruciales en la regulación del ciclo global (Lal, 2004). Además, ayuda a mantener la salud del suelo a largo plazo y soporta diversos procesos metabólicos, debido a sus efectos sobre la aireación, la retención del agua y la dinámica de nutrientes. Así como, en las emisiones gaseosas y la productividad de los cultivos (Lal, 2016).

El suelo como depósito almacena 2/3 del C global, tres veces más el carbono de las plantas y dos veces el C atmosférico (G. Wang et al., 2014). Este reservorio no es estático y se encuentra en constante movimiento a través de diversas formas moleculares y depende de las interacciones entre los factores ambientales y los sistemas biológicos (Lal, 2004). De esta manera, la reserva de COS más activa de los ecosistemas terrestres, puede verse afectada por pequeños cambios que generan grandes impactos en el balance global (Lal, 2004). Asimismo, las prácticas de manejo del suelo incrementan su dinámica y generan procesos de cambio en el almacenamiento. En este contexto, se ha determinado que desde 1850 el agotamiento del carbono orgánico del suelo (COS) en las tierras agrícolas, ha transferido alrededor de 70 giga tonelada (Gt) a la atmósfera (Amundson, 2001; Cardinael et al., 2017; Lal, 2004). La deforestación y posterior cambio de uso del suelo, las prácticas de manejo en la agricultura alteran los procesos de almacenamiento e incrementan la pérdida de carbono en el suelo. Por esta razón, una gestión adecuada influye en la cantidad, calidad, distribución y almacenamiento del COS en sistemas de producción agrícola.

De acuerdo con Singh, Setia, Wiesmeier y Kunhikrishnan (2018), los procesos que generan mayor pérdida de COS en el suelo agrícola son la labranza y quema de biomasa. La labranza se define como la manipulación mecánica del suelo para propósitos de producción de cultivos. Esta práctica afecta significativamente las características del suelo como la conservación del agua, la temperatura, los procesos de infiltración, la evapotranspiración y por supuesto, el mantenimiento del COS. En conjunto, las actividades de labranza y quema rompen la estructura del suelo y dejan expuesta la materia orgánica (MO), lo que conlleva pérdidas del COS vía mineralización (Singh et al., 2018). Sin embargo, existen métodos como la labranza de conservación (LC) y el manejo de la biomasa residual que pueden beneficiar el incremento del COS y MO mejorando su calidad y fertilidad. En este contexto, el suelo se convierte en un recurso de suma importancia y con un papel esencial en el presupuesto global de carbono (Houghton, 2007). Así, los suelos agotados en COS con un potencial como futuros sumideros a través del secuestro (Cardinael et al., 2017; Smith, 2004), a partir de prácticas de conservación y ciclaje de nutrientes. Por ejemplo, el manejo y entrada de residuos orgánicos y la cobertura permanente de los suelos determinan la dinámica del COS, mientras las prácticas de LC permiten su estabilización.

El material orgánico asociado a residuos de origen vegetal, animal o exudados se mueve de manera constante en el suelo. Los residuos son incorporados en forma de carbono orgánico (CO) por la acción de microorganismos heterótrofos. Estos procesos metabólicos son mediados por la disponibilidad de materia orgánica del suelo (MOS), los grupos de microorganismos y condiciones específicas de temperatura y contenido de agua en el espacio poroso. De esta manera, la relación entre la microbiota y los factores del suelo para la disgregación de la MO son muy relevantes (Marschner et al., 2008) y determinan los dos procesos esenciales en la dinámica del C, el almacenamiento y el secuestro.

El almacenamiento del carbono en el suelo se refiere al aumento de la concentración de COS en el tiempo, sin excluir ningún tipo de fracción (gruesa, mediana o fina). Este proceso depende directamente del secuestro de C y de la capacidad de sumidero de cada tipo de suelo. Adicionalmente, está sujeto a la compatibilidad e interacción entre los factores abióticos y bióticos (Chenu et al., 2019; Lal et al., 2015). En tanto que, el secuestro de carbono es el proceso de transferencia de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera al suelo y la respectiva reducción de su tasa por procesos de estabilización del COS a medio y largo plazo, lo que da lugar a un tiempo medio de residencia más estable (Chenu et al., 2019). La interacción entre estos dos procesos permite la transferencia, transformación y almacenamiento en el suelo, en formas lábiles y recalcitrantes. En general, la dinámica del carbono y su almacenamiento en el suelo, comprende tres etapas: 1) extracción de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera por medio de la fotosíntesis o a través de inlfujos; 2) transferencia de carbono a la planta y 3) transferencia de carbono al suelo por medio de los residuos vegetales (Kane, 2015). Bajo estas características, las actividades agrícolas y la gestión de los suelos determinan los procesos de secuestro o almacenamiento del COS en diferentes profundidades del perfil.

Los residuos de cultivos o de árboles de sombrío son ricos en carbono, pero en algunas ocasiones son utilizados de manera inapropiada. Los residuos incinerados liberan CO<sub>2</sub> a la atmósfera (H. Wang et al., 2020), mientras su gestión a través del ciclaje de nutrientes, ayudan al incremento del COS. También, los sistemas LC en conjunto con la incorporación de residuos y el manejo de cultivos de cobertura aumentan el contenido de COS en los horizontes superficiales del suelo (West, 2002). De acuerdo con Dong et al. (2017), la implementación de prácticas LC en sistemas productivos puede aumentar el COS entre 0.16 y 0.99 mg C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> y a su vez disminuir el 55% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Adicionalmente, la reincorporación de los residuos de cultivo al suelo crea una cobertura de protección que minimiza la erosión causada por el impacto del viento o escorrentía (Sharratt y Collins, 2018) y la consecuente pérdida de carbono en la superficie del suelo. Por ejemplo, los sistemas agroforestales y la producción de café bajo sombra muestran beneficios en estos aspectos, acumulan mayor cantidad de COS en los perfiles superiores del suelo (Thomazini et al., 2015), disminuyen la erosión y ofrecen ventajas al sistema productivo.

El aumento de las reservas de COS se considera una estrategia de beneficio mutuo, ya que permite la transferencia de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera, al tiempo que mejora la calidad y fertilidad de los suelos (Lal, 2004), lo cual soporta su productividad. Por esta razón, las estrategias deben estar enfocadas al aumento de los depósitos en suelos agrícolas. Las superficies del suelo poco disturbadas y cubiertas por organismos vegetales dan como resultado una descomposición gradual de la MOS, que se mantiene en el suelo durante largos períodos de residencia (Pezarico et al., 2013). Estas prácticas, además mejoran la estructura del suelo y contribuyen al ciclo de nutrientes, aumentando la disponibilidad para las plantas (de Souza et al., 2012; Thomazini et al., 2015). Procesos

contrarios suceden en agricultura convencional, donde la no rotación de cultivos y el uso de fertilizantes inorgánicos puede disminuir las reservas de COS en el suelo. En este sentido, Kane (2015) dice que el incremento de las entradas de fertilizantes nitrogenados no solo genera ineficiencias en el sistema, sino que los excesos afectan la relación carbono: nitrógeno (C: N) y por tanto, la dinámica del COS. Lo anterior determina que, el uso eficiente de los fertilizantes y su conjugación con enmiendas orgánicas es importante en el manejo de sistemas agrícolas más compatibles con el ambiente. Luan et al. (2019), dicen que la sustitución parcial de fertilizantes de síntesis con componentes orgánicos (abonos de estiércol y paja de maíz) aumentan las reservas de carbono orgánico entre el 15.3 y el 33.7% en perfil superficial del suelo. Sin embargo, es relevante evaluar el secuestro de carbono en el contexto de sistemas específicos de suelo, cultivo y condiciones ambientales y bajo diferentes estrategias de fertilización. Al mismo tiempo, realizar monitoreos en el perfil del suelo a mayor profundidad (Tengteng et al., 2020).

De otro lado, la rotación de cultivos reduce la vulnerabilidad de los suelos a la degradación e incrementa el almacenamiento de COS. Esta práctica de manejo aumenta las cantidades de MOS y mejora la estructura del suelo, lo que repercute en el aumento de las reservas de CO (Lupwayi y Rowland, 2011). En este contexto, Sánchez-Navarro et al. (2019), encontraron que sistemas de rotación de cultivos de leguminosas genera simbiosis entre la fijación de nitrógeno, el incremento de los procesos metabólicos y el aumento de la MOS, lo cual repercute en un mejor crecimiento en los microorganismos del suelo y acumulación de COS. En resumen, el manejo y desarrollo de diferentes prácticas agrícolas repercuten en el incremento o disminución del COS. Esto a su vez, tiene efectos sobre la calidad de los suelos y su función como soporte de la producción agrícola y regulador en la dinámica global del C. No obstante, el impacto puede variar dependiendo de las prácticas implementadas, los suelos y el contexto agrícola de interés.

Bajo las anteriores concepciones, el interés de investigar en el potencial de los suelos agrícolas bajo prácticas de conservación, como sumideros de carbono cobra gran relevancia en diferentes partes del mundo. Dado el considerable alcance de la temática sobre un tópico de interés global y la socialización de sus resultados a través de estudios publicados en revistas internacionales revisadas por pares, se busca desarrollar una síntesis de los múltiples enfoques y resultados a través de una revisión sistemática del conocimiento reportado en el período comprendido entre 2000 y 2020. Así, el objetivo central de esta revisión fue determinar el efecto de prácticas de manejo del suelo y sus interacciones sobre la dinámica del carbono orgánico del suelo en sistemas agrícolas.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### **Estrategia de búsqueda**

**Revisión de literatura.** Se realizó una búsqueda sistemática de artículos en las bases de datos disponibles en la Biblioteca virtual “Wilson Popenoe” de la Universidad de Zamorano. A través de 13 interacciones de palabras claves en inglés y español, descritos a continuación, y mediante su integración con los conectores booleanos “AND/OR”. La búsqueda se realizó en las bases de datos: “Scielo”, E - libro, “PubMed”, Agora, “Redalyc Scielo”, “Springer Link” y Oare. La búsqueda de publicaciones científicas se realizó usando los términos: carbono orgánico, carbono dinámico, fertilización, no-labranza, labranza de conservación, fertilidad del suelo, sistemas de cultivo, agregados del suelo, suelo tropical, almacenamiento de suelo orgánico, cultivo de cobertura, agricultura de conservación y calidad de suelo. Una segunda fase de búsqueda se realizó en bases de datos de suscripción “Scopus, Science Direct, Web of Science y Nature” con las mismas palabras listadas con anterioridad.

**Criterios de selección de artículos.** Los artículos seleccionados fueron aquellos artículos de investigación revisados por pares, y que se encontraran en un período de publicación comprendido entre 2000 - 2020. El punto de partida del enfoque de análisis fue evaluar los estudios que permitieran comprender cómo la implementación de diferentes prácticas agrícolas y sus interacciones tienen un efecto sobre la dinámica del COS. Se seleccionaron 44 artículos bajo estas características en inglés y español.

**Manejo y clasificación de la información.** Una vez seleccionados los artículos se realizó una base de datos en Excel contemplando información clave para cada estudio. Se incluyeron descriptores específicos de la de la publicación (e.g. cita, año y revista), el objetivo y la pregunta de investigación cuándo esta se encontraba de manera explícita o de lo contrario se construía a partir del objetivo, información geográfica y escala del análisis y práctica o prácticas agrícolas evaluadas con respecto a su efecto sobre el COS. Estos datos brindaron información sobre las tendencias en la investigación en la temática principal del estudio. Además, se incluyeron los resúmenes de las investigaciones y una estructura de análisis basada en la búsqueda de puntos de convergencia o divergencia entre los estudios seleccionados. Para el caso específico, si las prácticas se evaluaban de manera individual, si se determinaban interacciones entre pares o grupos de prácticas y en qué tipo de suelos se estaban evaluado.

**Prácticas agrícolas seleccionadas para el análisis.** Labranza mínima o cero, tipos de fertilización, asociación de cultivos y cultivos de cobertura. Como se determinó en el manejo y clasificación de la información, estas prácticas se analizaron como estrategias individuales o conjugadas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revisión determina que, bajo diferentes enfoques el análisis de las relaciones entre las prácticas de manejo de suelos en sistemas agrícolas y la pérdida o incremento del contenido de COS es un tema de relevancia mundial. La Figura 1, muestra el incremento del número de publicaciones científicas entre el año 2000 y 2020 en las bases de datos “Science Direct” y “Web of Science” a partir de la búsqueda explícita “Soil organic carbon and agricultural practices”. Estos resultados evidencian la importancia del tema y su creciente interés de estudio, no sólo por los impactos negativos de las actividades agrícolas sobre los suelos sino también, por las evidencias del efecto positivo de la implementación de prácticas alternativas de labranza y manejo de suelos sobre su conservación y calidad. El COS es un indicador de calidad del suelo y sostenibilidad de la actividad agrícola (Abbas et al., 2020; Lal, 2018; Malou et al., 2020; Yadav et al., 2019). El manejo agrícola, el clima y cambio de uso del suelo, como aspectos primordiales, determinan la alteración de sus reservas (Lal, 2018) y las pérdidas dependen de diversos factores como el grado de perturbación, el relieve y el tipo de suelo, entre otros (Chen, Arrouays, Angers, Martin y Christian, 2019). En esta dinámica, pequeños cambios en el contenido de COS pueden contribuir con incrementos significativos en la reserva de CO<sub>2</sub> atmosférico (Babu et al., 2020), razón por la cual las acciones mundiales en conservación de suelos en sistemas agrícolas se convierten en una meta conjugada para las organizaciones multilaterales, los gobiernos, la academia y los productores.

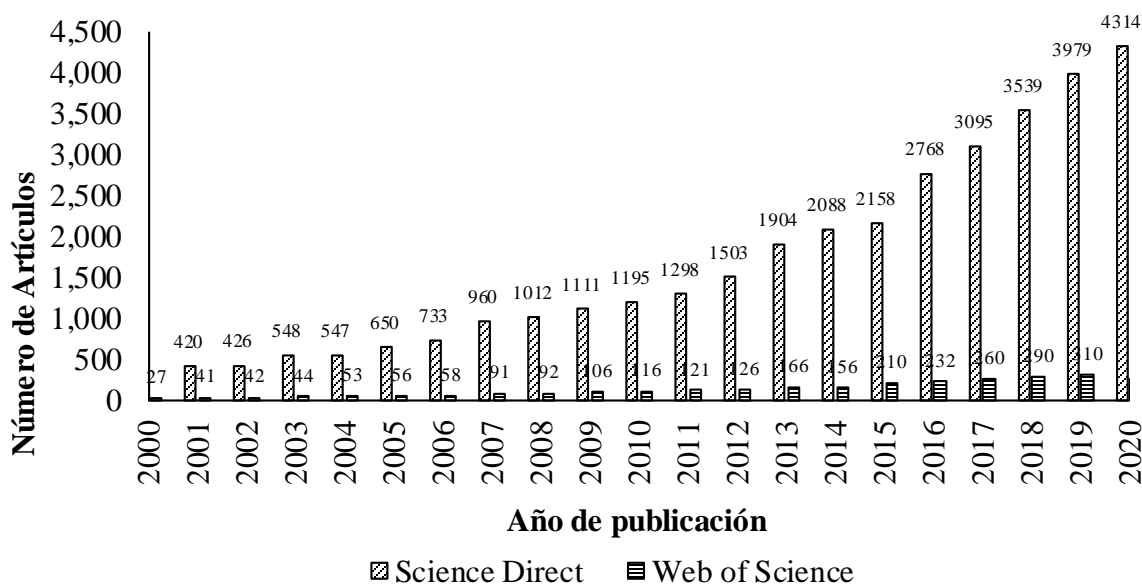


Figura 1. Reporte de publicaciones sobre efectos de las prácticas agrícolas y COS en revistas de los repositorios “Science Direct” y “Web of Science”

La implementación y desarrollo sistemas agrícolas sostenibles que maximizan la productividad, al tiempo que restauran la calidad e incrementan el contenido de COS, tienen acogida en diferentes partes del mundo, especialmente en suelos agrícolas tropicales. No obstante, los sistemas agrícolas

convencionales también continúan en crecimiento. Los estudios evidencian que, en estos sistemas, la labranza convencional (LCV) aumenta la degradación de los suelos y las reservas de carbono. Por el contrario, la LC tiene efectos positivos sobre la calidad de los suelos y su productividad. Este método protege los contenidos de COS y aumenta su secuestro al reducir la alteración del suelo. También, se ha determinado que la combinación de esta práctica con la incorporación de los residuos de cultivos ayuda a convertir los suelos agrícolas de fuentes a sumideros de C (Six et al., 2004; Guo et al., 2020). Como base principal, la LC se considera una de las prácticas de gestión agrícola más eficaz para mejorar la estructura del suelo, su calidad y salud (Doran et al., 1996; Guo et al., 2020). En tanto que, el ciclaje de los residuos de cultivo y la adición de enmiendas orgánicas aumentan la cantidad de MOS (Thomazini, Mendonça, Cardoso y Garbin, 2015). Aspectos que en conjunto redundan en la calidad y productividad de los suelos agrícolas.

Las estrategias de gestión que garantizan un aporte continuo y diversificado de materia orgánica permiten el logro de las siguientes acciones: (i) mayores depósitos de C en el suelo, (ii) la estabilización de la biomasa microbiana del C, (iii) una reducción de la pérdida de C a través de las emisiones de CO<sub>2</sub> - C y (iv) los mejores índices de calidad del suelo (Thomazini et al., 2015). Por lo tanto, la biogeoquímica de la MOS, como propiedad del suelo altamente compleja y dinámica, es de vital importancia para la salud y el funcionamiento ecológico de los agroecosistemas (Ondrasek et al., 2019). Adicionalmente, la MOS, compuesta predominantemente de carbono interviene en el ciclo global del C, incluido el secuestro y la emisión de C (por ejemplo, la respiración del suelo), lo cual determina los múltiples beneficios de la gestión apropiada de los suelos agrícolas como potencial reservorio de CO. El enfoque de esta gestión está relacionado con el anhelo de aumentar la productividad para satisfacer la creciente demanda de alimentos, evitando la degradación de los suelos y a su vez, convertirlos en sumideros en lugar de fuente de contaminantes atmosféricos (Busari, Kukal, Kaur, Bhatt y Dulazi, 2015). Así, el incremento de la materia orgánica del suelo y la LC, junto con la cobertura del suelo y la diversidad de cultivos (Corsi, Friedrich, Kassam, Pisante y de Moraes Sà, 2012) surgen como una opción viable para asegurar la producción sostenible de alimentos y mantener la integridad ambiental (Busari et al., 2015) de los agroecosistemas.

Las prácticas que en conjunto determinan la calidad y productividad de los suelos, se encuentran asociadas a la agricultura de conservación (AC). Corsi et al. (2012), definen la AC como un método de manejo de agroecosistemas para una productividad mejorada y sostenida, mientras se preserva y mejora la base de recursos y el ambiente. Agregan que la alteración mecánica mínima del suelo, la cobertura orgánica permanente del suelo y la diversificación de cultivos son los tres principios básicos de la AC. Estas acciones, además, contribuyen a la captura, almacenamiento e incremento del COS. Los principios de AC han sido acogidos y establecidos en diferentes sistemas productivos y se observan como un potencial de reconversión y conservación de suelos agrícolas en diferentes partes del mundo. Por lo anterior, el incremento en la evaluación y monitoreo constante de estas prácticas de manejo, principalmente por los efectos positivos de la LC *versus* los efectos negativos de la LCV, es evidente en el trópico y otros lugares del mundo. Asimismo, el efecto de los cultivos de cobertura o el aporte de enmiendas orgánicas en contraste con el uso de fertilizantes inorgánicos que afectan los reservorios de COS en tierras agrícolas.

En la Figura 2 se observa la relación de estudios analizados y que comprometen el monitoreo de las prácticas agrícolas sobre el incremento o pérdida del COS. Los resultados indican que existe un mayor interés en la evaluación de incidencia de las prácticas de labranza sobre este indicador de

calidad y productividad de suelos. Mientras que, los efectos de la asociación de cultivos es una de las prácticas que es evaluada con menor frecuencia. Aunque el punto clave de la labranza de conservación es mantener al menos el 30% de la superficie del suelo cubierta con residuos de cultivos después de la siembra para reducir la erosión del suelo por el agua o por el viento (Busari et al., 2015), este método implica el mínimo laboreo o la siembra directa sobre los residuos de la cosecha anterior. Lal (1990) describe la labranza de conservación como el método de preparación de la cama de siembra que incluye la presencia de mantillo de residuos y un aumento de la rugosidad de la superficie como criterios clave. Bajo estos aspectos, el interés de la investigación se centra en el análisis de procesos de conversión de LCV a LC. En este contexto de estudios, diferentes investigadores determinan que cuando el proceso se realiza de acuerdo con los principios de AC, puede mejorar la estructura del suelo, aumentar el carbono orgánico del suelo, minimizar los riesgos de erosión del suelo, conservar el agua del suelo, disminuir las fluctuaciones en la temperatura del suelo y mejorar la calidad del suelo y su capacidad reguladora (Busari et al., 2015).

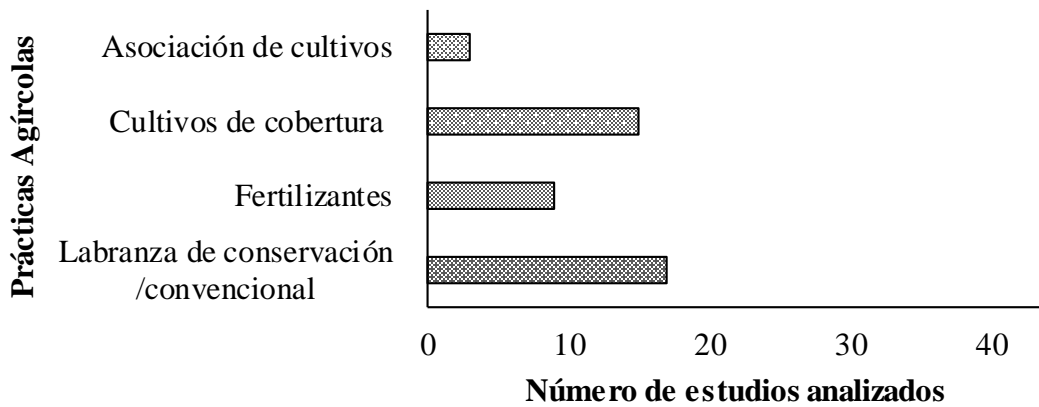


Figura 2. Reporte de investigaciones sobre el efecto de las prácticas agrícolas sobre el COS

En resumen, a nivel mundial, las prácticas de LC que incluyen labranza cero (LC) o labranza reducida (LR), con o sin retención de residuos, son ampliamente adoptadas en varios sistemas de producción como alternativa a la LCV. Lo anterior conlleva a que estas acciones se han convertido en un tema de investigación popular en ciencias del suelo y agricultura (Y. Li, Z. Li, Cui, Liang y Zhang, 2021). Bajo este enfoque, numerosos estudios reportan los efectos de diferentes prácticas de LC sobre las fracciones típicas de COS (Bongiorno et al., 2019; Sarker et al., 2018; Somasundaram, Reeves, Wang, Heenan y Dalal, 2017). Además, otras investigaciones muestran los impactos positivos de la combinación de la LC con el manejo de coberturas vegetales en la disminución de las pérdidas de carbono del suelo y la mitigación de los riesgos asociados con el calentamiento global (Abbas, Mohkum, Ishaq y Ahsan, 2020), así como en el aseguramiento de la producción sostenible de alimentos y el mantenimiento de la integridad ambiental (Busari et al., 2015).

De otro lado, Abbas et al. (2020), determinan que mantener prácticas de LCV pudo representar pérdidas de COS aproximadas de  $31$  a  $52 \times 10^6$  en el período comprendido entre 1990 y 2020. En contraste la LC, podría secuestrar entre  $80$  y  $129 \times 10^6$  mg COS según estimaciones conservadoras o cantidades tan altas como  $286 \times 10^6$  a  $468 \times 10^6$  mg COS en el mismo período de tiempo. La LCV no sólo afecta la dinámica del C en el suelo, sino que también, genera impactos relacionados con una mayor compactación, infiltración de agua en el perfil del suelo y pérdida de estructura que favorece procesos de erosión. Esto determina que las prácticas de LC en contraste con la LCV son en la actualidad, más populares y tienen como objetivo mejorar el secuestro de C del suelo y sus condiciones fisicoquímicas sin comprometer el rendimiento de los cultivos (Lal, 2015; Lal, Follett, Stewart y Kimble, 2007; Shakoor et al., 2021).

El en Cuadro 1 se resumen los principales resultados de los estudios revisados y que relacionan las diferentes prácticas agrícolas con el contenido y dinámica del COS. Estos indican el efecto positivo de la LC y la LC y la adición de enmiendas orgánicas sobre el secuestro y almacenamiento del COS y la disminución de las emisiones de  $\text{CO}_2$ . Además, indican que los impactos de la LCV sobre la dinámica del carbono y la adición de fertilizantes inorgánicos sobre las reservas de COS tienden a ser negativos. Aunque esta última práctica de manejo de suelos agrícolas muestra resultados contrastantes en los estudios revisados. Por un lado, Zhang, Wang, Xu, Huang, Liu y Peng (2009), dicen que su aplicación generalmente mejora el rendimiento de los cultivos a corto plazo, pero apenas mantiene e incluso disminuye el COS. Hati et al., (2008) y J. Wang et al., (2018), muestran que la adición de fertilizantes nitrogenados no sólo mantiene el COS, sino que además disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero.

Cuadro 1. Prácticas Agrícolas y Dinámica COS

<b>Prácticas Agrícolas</b>	<b>Indicadores COS</b>	<b>Dinámica COS</b>	<b>Referencia</b>
Labranza cero	Mejora la fertilidad	Disminuye las emisiones de $\text{CO}_2$	(H. Wang et al., 2020); Prasad et al., 2016; Pareja et al., 2017; Mikanová et al., 2009; Ye et al., 2020)
Labranza cero + mantillo verde	Incremento de la MO	Mayor reserva de nutrientes y sustrato para microorganismos	(Mikanová et al., 2009; Mbuthia et al., 2015)
Labranza conservación	Mantiene agregados	Incremento de COS	(Ghimire et al., 2012; Mishra y Avishek 2020; Bach y Hofmockel 2015)
Labranza convencional	Ruptura de agregados	Perdida de COS y MO	(Mikanová et al., 2009; Pareja et al., 2017; Bongiorno et al., 2019; Ghimire et al., 2012; Prasad et al., 2016); (Basuri et

<b>Prácticas Agrícolas</b>	<b>Indicadores COS</b>	<b>Dinámica COS</b>	<b>Referencia</b>
			al., 2015; X. Wei et al., 2014)
Labranza mínima	Mantiene COS	Incremento en COS y MO	(Mikanová et al., 2009; Pareja et al., 2017; Bongiorno et al., 2019; Prasad et al., 2016)
Labranza subsolado	Mantiene COS	Disminuye las emisiones de CO <sub>2</sub>	(H. Wang et al., 2020)
Labranza con arado de vertedero	Mayor perturbación, acelera la descomposición de COS	Deteriora COS	(H. Wang et al., 2020; Lal et al., 2007; Ghimire et al., 2012; X. Huang et al., 2016)
Fertilizantes nitrogenados	Incremento pH	Disminución de biomasa microbiana C:N	(Hati et al., 2008; Ren et al., 2020)
Fertilizantes NPK + enmienda orgánica	Mantiene COS	Disminución de emisiones de CO <sub>2</sub> y N <sub>2</sub> O	(Hati et al., 2008; J. Wang et al., 2018)
Estiércol de Cerdo	Mayor contenido de C	Incremento COS	(J. Wang et al. 2018; Lun et al. 2016; Hui et al. 2017)
Estiércol de Cerdo + Nitrogeno y fosforo	Mejora la fertilidad	Incremento COS	(J. Wang et al., 2018)
Asociación de cultivo	Incremento COS	Fijación de nitrógeno atmosférico	(Sánchez-Navarro et al., 2019)
Asociación de cultivo + leguminosas	Mejora estructura	Incremento de COS, mayor absorción de nutrientes y mayor contenido de MO	(Ball et al., 2005)
Sistema agroforestal de café	Mantiene COS	Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub>	(Thomazini et al., 2015)
Cultivos de cobertura	Estabilidad de agregados	Aumento de COS	(Xiao et al., 2020; Guzmán et al., 2019)
Cultivos de cobertura (Avena sativa, Vicia dasycarpa)	Biomasa microbiana de C	Mejora el stock C lábil	(Mukumbareza, Muchaonyerwa y Chiduzza, 2015)
Cultivo de cobertura (barbecho, arveja, centeno)	Cantidad de COS	Sumidero de C	(Gong Li, Sakagami y Komatsuzaki, 2020)

En general, la implementación de diferentes prácticas de manejo en sistemas agrícolas puede afectar el secuestro y almacenamiento del COS y, por tanto, el presupuesto global de carbono, así como la calidad del suelo. Los estudios reportan diferentes hallazgos que permitieron un análisis más detallado, como se presenta a continuación.

### **Efectos de labranza convencional y de conservación en la dinámica de COS**

Como se describió antes, las investigaciones realizadas en diferentes partes del mundo determinan que la LCV generalmente, se realiza en sistemas productivos extensivos. Esta práctica, aunque provee las condiciones ideales para la germinación de semillas, en el mediano y largo plazo afecta significativamente las características del suelo, perturba los procesos de infiltración y disminuye el COS (Basuri et al., 2015). De acuerdo con Rahmati et al., (2020), la labranza convencional sigue siendo la norma de manejo en muchos lugares de zonas templadas, porque puede dar mayores rendimientos y al incorporar residuos y abonos permite la siembra temprana después del invierno. Además, los autores afirman que este tipo de labranza disminuye la dependencia de herbicidas y es adecuado para suelos mal drenados. No obstante, los efectos sobre los agregados del suelo y la pérdida de COS son evidentes. Por ejemplo, Grandy y Robertson (2006) demostraron que la alteración de los agregados mediante la LCV en suelos de zonas templadas expone las moléculas de carbono al ataque de microorganismos y rápidamente revierte todas las ganancias registradas por entrada de residuos y mayor contenido de MOS. Adicionalmente, Bogunovic, Pereira, Kistic, Sajko y Sraka (2018) y Nunes et al., (2015), informan que estas prácticas conducen a una compactación excesiva de las capas superficiales debido al intenso tráfico de maquinaria: Por lo cual, la adopción de prácticas de LC con o sin mantillo en suelos de estas latitudes, se consideran en la actualidad, como una alternativa para mantener la calidad de los suelos y aumentar su capacidad como reservorio de carbono.

Los estudios muestran que existe un creciente cuerpo de información que indica que la LC tiene diferentes efectos positivos sobre las propiedades del suelo y el almacenamiento de COS, pero también informa que estos efectos, pueden variar de acuerdo con el sistema particular elegido, las condiciones del clima y las características de los suelos (Busari et al., 2015). En este sentido, Shakoore et al. (2021), sostienen que la LC junto con prácticas complementarias como cultivos de cobertura y aporte de enmiendas orgánicas mejoran la estructura, evitan la erosión, incrementan la retención de agua y el contenido de COS del suelo en diferentes grados, pero son óptimas para su aplicación en sistemas agrícolas de zonas trópicas o templadas. Los impactos positivos dependerán de las propiedades del suelo y el tiempo de implementación de las acciones de LC. Los beneficios positivos se observan principalmente, sobre las propiedades físicas, biológicas y químicas en los perfiles superficial del suelo (Rahmati et al., 2020). Por ejemplo, En Göttingen, Alemania, Jacobs, Rauber y Ludwig (2009) encontraron que las acciones de LC por largos períodos de tiempo, en comparación con la labranza convencional, no solo mejoraban la estabilidad de los agregados, sino que también aumentaban las concentraciones de COS y la disponibilidad de N dentro de los agregados en el perfil superior (5 a 8 cm de profundidad). No obstante, en términos de conservación del agua, se ha encontrado que la labranza de conservación es más efectiva en los trópicos húmedos y subhúmedos (Busari et al., 2015).

En el anterior contexto, también Busari et al. (2015), determinaron que los sistemas de LC que mantenían una alta cobertura del suelo superficial en diferentes sistemas agroecológicos de zonas templadas y tropicales, provocaban cambios significativos en las propiedades del suelo,

especialmente en los centímetros superiores. Aspectos que son corroborados por diferentes autores, por ejemplo, Lal (1997), determinaba que los efectos positivos sobre las propiedades físicas del suelo eran generalmente más favorables con LC que en sistemas basados en la LCV. Asimismo, está comprobado que la LC mejora significativamente la conductividad hidráulica saturada e insaturada debido a la continuidad de los poros o al flujo de agua a través de muy pocos poros grandes (Busari et al., 2015). En general, suelos bien drenados, de textura ligera a media con bajo contenido de humus, responden mejor a la labranza de conservación (Butorac, 1994) especialmente a la labranza cero, lo que determina su potencial para recuperar suelos vulnerables a la degradación. Mientras que el uso de sistemas intensivos ocasiona erosión, ruptura de macro y microagregados del suelo lo que aumenta la escorrentía y, por consiguiente, disminuye las cantidades de COS y MO, a través de la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Basuri et al., 2015; Bongiorno et al., 2019; Ghimire et al., 2012; X. Huang et al., 2016; Mikanová et al., 2009; Pareja et al., 2017; Prasad et al., 2016; L. Wei, Xiaoyuan y Jingyan, 2012). De esta forma, nuevamente se evidencia que las prácticas de labranza en agricultura son determinantes en la conservación de los suelos y, por lo tanto, en la dinámica de COS.

En análisis específicos, X. Wei, Shao, Gale y Li (2014), determinaron que el cambio de uso de suelo y la LCV en suelos de zonas templadas, ocasionan una disminución aproximada entre el 30 y el 80% del COS a lo largo del tiempo. También, Ghimire et al. (2012) y Lal et al. (2007), concluyen que en sistemas tropicales las pérdidas de las reservas de COS se encuentran en un rango entre el 60 y el 70%. Lo anterior, se debe a que las prácticas de manejo de cultivo convencionales afectan la actividad microbiana, la materia y el carbono orgánico del suelo y, por tanto, el almacenamiento del carbono en el suelo. Por ejemplo, Sheng et al. (2015), determinaron que la labranza y el cambio de uso de suelo en la agricultura convencional, afecta las reservas de C en perfiles superficiales, específicamente entre los 0 y 20 cm, aunque también se observaron impactos sobre el COS a mayor profundidad (entre los 20 y 100 cm) del suelo. Además, que su efecto dependía de las entradas y salidas C. Lo cual indica que después del cambio de uso de suelo las entradas de C al perfil profundo del suelo pueden reducirse por la disminución del C existente en el perfil superficial. En el estudio también mencionan que el cambio de plantas de mayor desarrollo y longitud radicular por plantas de sistemas radiculares más superficiales y cortos, conducen a la disminución de entradas de C debido a la biomasa fina de las raíces, lo cual redundaría en pérdidas de COS lábil y recalcitrante. Por lo tanto, en el largo plazo los efectos de cambio de uso de suelo y el impacto de la LC y la LCV sobre las reservas de COS, deben considerarse a diferentes profundidades del suelo, como lo muestran un número de estudios más reducidos. Este enfoque de estudio es menos constante, pero también está ganando interés en los últimos años, ya que determina el potencial de los sistemas agrícolas para actuar como sumideros de carbono a nivel global.

Las investigaciones del efecto de la labranza, el cambio de uso del suelo o las acciones integradas de manejo sobre la dinámica del COS a mayor profundidad, aunque son más escasas, muestran los impactos positivos o negativos. Por ejemplo, Bongiorno et al. (2019); Mikanová et al. (2009); Pareja et al. (2017); Prasad et al. (2016) y H. Wang et al. (2020), concluyen que la implementación de la LR como práctica de la LC incrementa el COS entre 0 y 60 cm de profundidad. Este efecto está relacionado con la menor alteración del suelo que provoca una mínima oxidación de la materia orgánica. Adicionalmente, la LC mantiene los macros y microagregados de suelo, incrementa el COS y, por consiguiente, la tasa de secuestro de carbono (Bach y Hofmockel 2015; Ghimire et al., 2012; Mishra y Avishek 2020). No obstante, los estudios para determinar los impactos a mayor



profundidad siguen siendo bajos debido a su costo y duración, por lo cual se recurre a los modelos bajo técnicas de mapeo digital de COS. Bajo este contexto, Six, Elliott y Paustian, (2000) propusieron un modelo para determinar el impacto de la formación y degradación de agregados del suelo en el que mencionan que existe una correlación entre los macroagregados del suelo, el ciclo de MOS y los contenidos de COS a mayor profundidad y LCV, ya que esta práctica ocasiona la ruptura de macroagregados disminuyendo la posibilidad de crear una nueva serie de agregados que permita la captura de C dentro de los mismos. Por lo tanto, la estabilidad de los agregados del suelo es utilizada en estos modelos para indicar el estado y dinámica del COS.

Finalmente, Batistão, Holthusen, Richert, Coutrim dos Santos y Costa Campos (2020), determinan que la estabilidad de COS depende del grado de perturbación de suelo. Como en la mayoría de los casos de los suelos agrícolas de manejo convencional esta es elevada, su grado de impacto también estará asociado con la resiliencia y resistencia de los factores bióticos y abióticos del suelo. Por otra parte, también enfatizan en la necesidad de comprender que el incremento del carbono a través de la implementación de LC no es indefinido y que depende de la dinámica de entradas y salidas de C y la acción de los procesos metabólicos del suelo. Por tanto, la implementación de estas acciones debe ir unida a otras prácticas de agricultura que determinen la conservación del suelo como base de la producción y la regulación de la dinámica global del C.

### **Uso de fertilizantes inorgánicos (FI)**

El uso de fertilizantes inorgánicos es un factor clave para el incremento de la producción agrícola. No obstante, su costo y los impactos sobre el suelo, cuestiona su eficiencia, la cual puede ser atribuida al tipo de suelo, clima, sistemas de cultivo y entradas de C. En general, los procesos de intensificación en la agricultura están relacionados con el uso de altas dosis de FI y el uso inadecuado de maquinaria para la labranza de los suelos. Aunque los FI son importantes para mantener la productividad de los sistemas agrícolas; su uso excesivo en conjunto con otras actividades como los sistemas de labranza (lo cual se evidenció anteriormente), llevan a considerar la agricultura intensiva, una de las principales fuentes de degradación de los suelos, irrupción de los ciclos biogeoquímicos, pérdidas de nutrientes por emisión e inestabilidad en la dinámica del carbono en el suelo. Por lo tanto, contribuyen en el impacto ambiental negativo sobre aguas, suelos y biodiversidad. Así, la aplicación periódica de fertilizantes nitrogenados ocasiona una reducción del COS, disminuye la biomasa microbiana y afecta la relación Carbono:Nitrógeno (C:N), lo que repercute en la calidad del suelo (Hati et al., 2008). Por esta razón, la eficiencia en uso o la acción combinada con otras estrategias de aporte de nutrientes, determina una nueva ruta de prácticas de manejo de suelos en modelos de agricultura de conservación.

En el anterior contexto, T. Li, Zhang, Bei, Li, Reinsch y Zhang (2020), evaluaron y concluyeron que la aplicación de fertilizantes orgánicos tiene un efecto positivo en la dinámica del COS ya que incrementan las entradas de C entre 10.5 y 19.8 mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en comparación con los fertilizantes inorgánicos compuestos (NPK), que determinan una disposición de C en el suelo menor (entre 10 y 13.1 mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Los mayores contenidos de carbono en el suelo, asociadas a los fertilizantes orgánicos están relacionadas con la combinación de residuos vegetales y de estiércol animal. Lo anterior, se relaciona con el incremento de la reserva de C lábil, así como con la mejora de la actividad microbiana del suelo y la estabilidad de los agregados (Y. Li, Z. Li, Cui, Liang y Zhang, 2021). Los ciclos del carbono y del nitrógeno en el suelo están estrechamente relacionados y controlados por diferentes procesos biológicos (Martínez, Galantini, Duval y López, 2017), por

esto determinan la relación C:N y la dinámica del COS. Además, la descomposición de la MOS a través de procesos biológicos es una parte clave de estos ciclos y cualquier cambio o alteración en la descomposición de la MOS ocasionada, por ejemplo, por el aporte de fertilizantes nitrogenados tiene impactos directos sobre la dinámica del COS y, por tanto, en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) como CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de nitroso (N<sub>2</sub>O) (Shakoor et al., 2021).

Lo anterior evidencia, que la calidad y fertilidad del suelo y el contenido de CO son afectados por el uso intensivo de fertilizantes. Hati et al. (2008) determinaron que aplicar fertilizantes con un alto contenido de nitrógeno a largo plazo disminuye el pH del suelo en el perfil superficial, lo que tiene un impacto en la actividad biológica y la estabilidad de los agregados del suelo. Por ejemplo, el uso de fertilizantes nitrogenados disminuye la actividad microbiana, el contenido de C y la relación C:N, ya que aumenta el contenido de aluminio intercambiable; acciones que en conjunto también provocan, una disminución en el rendimiento de cultivo y pérdidas del COS (Sharma y Suehla, 2003). No obstante, Hati et al. (2008), también encontraron que la acción combinada de fertilizantes inorgánicos (NPK), con residuos orgánicos y cal pueden incrementar el contenido de COS y la capacidad de retención de agua del suelo. Acciones relacionadas con el aumento de la porosidad del suelo por mayor presencia de MOS y mejoramiento de estructura entre los 15 y 40 cm de profundidad. Además, la adición de cal como enmienda, no solo aumenta el pH de suelo, sino que influye en el incremento del crecimiento de la raíz y, por tanto, se presentan, mayores ingresos de C al suelo. A pesar de estos resultados, la presente revisión evidencia que los efectos de los fertilizantes inorgánicos sobre el contenido de COS son menores que los de los aportes de estiércol y se encuentran evidencias contradictorias. Las discrepancias pueden estar relacionadas con la duración del experimento, los tipos de suelo, el clima, los aportes de FI y de carbono y los sistemas de cultivo analizados. Por lo tanto, será importante evaluar el secuestro de C en el contexto de sistemas específicos suelo-cultivo-ambiente bajo diferentes estrategias de manejo de fertilización, como lo concluyen Li et al. (2020).

La disponibilidad de nutrientes en los suelos agrícolas depende de la relación entre las entradas y salidas. Así mismo, las existencias de COS, las cuales cambian en respuesta al equilibrio entre las entradas y las salidas de C. Para los suelos agrícolas, los insumos son impulsados principalmente por el reciclaje de residuos de cultivos y las adiciones externas de C, como fertilizantes orgánicos, mientras que los productos son impulsados en gran medida por la tasa de descomposición microbiana del COS, que se ve afectado por el clima, el uso de la tierra y la labranza (Smith et al., 2012) y por el uso de fertilizantes (Hui et al., 2017). Por ejemplo, Liang, Li, Zhang, Gao, Wang y Shi (2019), determinaron que, en regiones subtropicales de China, los suelos con fertilidades y contenido de COS diferenciales tuvieron comportamientos diferenciales también. Así, los suelos con adición de fertilizantes inorgánicos compuestos (NPK) y NPK más MO y que ya contaban con un porcentaje alto de fertilidad, incrementaron el COS. Sin embargo, la aplicación de los mismos tratamientos en suelos con baja fertilidad provocó una reducción de COS en el perfil superficial del suelo. Los autores atribuyen este impacto a los efectos de la adición de los FI sobre composición natural y potencial de saturación de C del suelo.

Por otra parte, el análisis de los estudios evidencia que la adición de fertilizantes nitrogenados provoca la disminución de la biomasa microbiana y la posterior acidificación del suelo, lo que repercute en la dinámica del COS. En este contexto, Chen, Xiao, Zheng y Zhu (2020), concluyen que la aplicación periódica de nitrógeno y por largos periodos de tiempo (6 años), en sistemas forestales, disminuye la biomasa microbiana debido al incremento de N en el suelo. Además,

afectaron la abundancia de micorrizas y actinomicetos y su función simbiótica con las plantaciones principales, que repercutió en desbalances del ciclo biológico. Por lo contrario, la adición de fertilizantes orgánicos mostró incrementos en la actividad biológica. La aplicación de fertilizantes orgánicos con previa estabilización es importante para mantener o incrementar la actividad microbiana, mejorar de estabilidad de los agregados y mantener el pH óptimo para los procesos biogeoquímicos del C y N en los suelos agrícolas. De esta manera, el uso de diferentes enmiendas orgánicas, originadas de residuos vegetales y animales y en la actualidad el biochar o carbón vegetal originado de otros procesos, son considerados con mayor frecuencia en el manejo de suelos agrícolas.

El uso de biochar como enmienda orgánica o sustituto de fertilizantes inorgánicos se determina con un elemento importante ya que puede incrementar la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la retención de agua en el suelo, la estabilidad de agregados y el contenido de C. Además, reduce las emisiones de  $N_2O$  desde el suelo a la atmósfera (Gul, Whalen, Thomas, Sachdeva y Deng, 2015). Desde esta perspectiva, Du, Zhao, Wang y Zhang (2017), determinaron que el uso de biochar como sustituto de fertilizantes inorgánicos aumenta significativamente la cantidad de agregados del suelo, esto es cerca de un 40.6% más en comparación del tratamiento control (24.4%). Lo cual significa, mayor contenido de COS y estabilidad de la calidad y fertilidad. Así mismo, Oechaiyaphum, Ullah, Shrestha, y Datta (2020) encontraron que la aplicación de enmiendas orgánicas a largo plazo (más de 10 años), en este caso biofertilizantes, abonos de origen animal e incorporación de residuos en sistemas agrícolas mejora significativamente la fertilidad del suelo, el contenido de MOS y reduce el contenido de nitrógeno disponible para lixiviación o procesos de desnitrificación, por tanto, flujos de  $N_2O$  a la atmósfera. Del mismo modo, en el estudio encontraron que el contenido de nitrógeno total y el fósforo disponible disminuyeron y COS incrementó con la incorporación de residuos de paja de arroz. Sin embargo, el manejo y el aumento del COS depende directamente del manejo del sistema agrícola (Luan et al., 2019).

En resumen, las prácticas de agricultura de conservación, en este caso el manejo de fertilizantes orgánicos como sustituto de fertilizantes inorgánicos tienen efectos positivos sobre la fertilidad y calidad de los suelos, aspectos que repercuten en el secuestro y almacenamiento del carbono del suelo, la productividad de los cultivos y la reducción de las emisiones de  $CH_4$ ,  $CO_2$  y  $N_2O$  desde suelos agrícolas.

### **Manejo de cultivo de cobertura (CC)**

El cambio de la cobertura del suelo y la implementación de diferentes prácticas de manejo pueden afectar en gran medida el presupuesto global de carbono (C) y la calidad del suelo (Thomazini et al., 2015). Por esta razón, el cambio de prácticas agrícolas convencionales de suelos desnudos en monocultivos es actualmente revaluada, como lo determinan diferentes estudios. Los sistemas de asociación de cultivos y los cultivos de cobertura en sistemas agroforestales tienden a incrementar el contenido de COS. Por ejemplo, los sistemas agroforestales pueden disminuir las emisiones de  $CO_2$  aumentando las reservas de C en el sistema suelo – planta, mejorando a su vez la regulación hídrica y de nutrientes (Ruiz, Hurtado, Carrillo y Parrado, 2019). También, Singh, Sarkar, Hussain, Bolan y Churchman (2018), encontraron que los sistemas forestales en el Himalaya tenían un contenido de COS alto en el perfil superficial del suelo ( $163.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Sin embargo, en suelos hortícolas se encontró un contenido de COS alto también ( $144.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), aunque no había asociación de cultivos, los suelos permanecieron cubiertos por residuos verdes y el aporte de

nutrientes se hizo por adición de enmiendas orgánicas. Esto indica que las prácticas agrícolas de conservación restauran las propiedades fisicoquímicas del suelo y mejoran las reservas de COS.

El manejo de cultivos CC no sólo mejora las propiedades físicas de los suelos, sino que también, aumenta la retención de humedad del suelo, el N disponible y contenido de C (Qi y Helmers, 2010). Además, esta práctica disminuye la probabilidad de erosión del suelo, mejora la estabilidad de los agregados e incrementa la actividad enzimática (Blanco-Canqui, Mikha, Presley, y Claassen, 2011), que contribuye en la dinámica y almacenamiento del COS. Estos beneficios son reportados por diferentes estudios. Por ejemplo, Dube et al. (2012), determinan que la rotación de cultivos junto con el manejo de cultivos de cobertura de avena y pasto incrementan la cantidad de carbono total y la materia orgánica disponible para los procesos metabólicos y se hacen más evidentes los impactos positivos, en períodos superiores a 5 años. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta la acción de los microorganismos ya que estos se encuentran fuertemente ligados a la biomasa microbiana del carbono (Wang, Post y Mayes, 2013). También, Mukumbareza, Muchaonyerwa y Chiduzza (2015) concluyen que el uso de leguminosas como cultivos de cobertura incrementan el contenido de C lábil mejorando la actividad microbiana del suelo para la degradación de la MO, lo que a su vez mejora la fertilidad de los suelos, al disponer nutrientes para las siguientes rotaciones. Para el desarrollo óptimo de estas prácticas, Balkcom, Duzy, Kornecki y Price (2016), recomiendan comprender los efectos del tiempo de permanencia de cada CC en el suelo, lo que depende de sus características fisiológicas, la temperatura y la humedad del suelo, así como también, de las características de manejo y las operaciones de siembra.

En general, la integración de leguminosas en cultivos de rotación o CC tiene efectos importantes como fuentes de C y N. Sin embargo, su asociación con los procesos metabólicos y la abundancia de bacterias Gram negativas como *Rhizobium* incrementan los beneficios (Pucciariello et al., 2019). Adicionalmente, las leguminosas contienen productos vegetales secundarios con potencial alelopático (Razavi, 2011) y estos compuestos al liberarse por los exudados de raíces reducen el crecimiento de plantas competidoras (Jabran, Mahajan, Sardana, y Chauhan, 2015). Por lo anterior, para la elección del tipo de leguminosas se deben tener en cuenta aspectos como el tipo de suelo, las condiciones climáticas y la asociación de cultivos, ya que de esto dependerá los beneficios sinérgicos que se puedan dar y su efecto en el contenido de COS. Por ejemplo, Oliviera, Barré, Trindade, y Virto (2019), indican que el manejo del CC y la rotación con caupí (*Vigna unguiculata*) después del manejo del monocultivo de triticale y la nueva siembra de triticale sin aporte de fertilizantes, no sólo mejoró la estructura del suelo, sino que también incrementó la densidad de las raíces del cultivo, la cantidad de hifas y la disponibilidad de MOS, lo que representa una mayor actividad biológica en los suelos y posterior almacenamiento del COS.

Los cultivos de cobertura tienen efectos sobre las tasas de N utilizable para las comunidades microbianas y su posterior disponibilidad en formas asimilables para las plantas del sistema (Mbutia et al., 2015). La asociación de cultivo y los CC de leguminosas como arveja en plantaciones de trigo, tienen efectos positivos en la disponibilidad de nutrientes y las entradas de carbono en el suelo. La arveja fija mayor cantidad de N y lo dispone para la microbiota del suelo, lo cual incrementa la productividad y la calidad del suelo (Mbutia et al., 2015). Así mismo, el rendimiento en cultivo de algodón es mayor cuando se manejan CC de leguminosas debido al incremento de la disponibilidad de N y mayor cantidad de residuos que mejoran la retención de agua en el suelo y el desarrollo radicular de las plantas, además de incrementar la MOS (Nouri, Lee, Yoder, Jagadamma, Walker, Yin y Arelli, 2020). También, Navarro-Sánchez, Zornoza, Faz y

Fernández (2019), encontraron que la rotación de cultivos en sistemas productivos de brócoli y melón con CC de leguminas (habas y caupí), no sólo se incrementó en contenido de N y C, sino que hubo un efecto altamente significativo en la estabilidad de los agregados (329%), en comparación con el monocultivo de brócoli (91%). Los autores, determinaron el efecto de los CC y su importante rol en la calidad de MO acumulada por residuos vegetales, que fue mejorando por la dinámica de la rizodeposición y la actividad microbiana.

Los procesos microbianos en los suelos y su efecto en el almacenamiento del COS dependen también de la actividad enzimática, por tanto, de las prácticas agrícolas que se realicen. Bajo agricultura de conservación, LC, manejo de CC y rotación de cultivos se incrementa la calidad de C total y enzimas como la b-glucosidasa, ureasa, deshidrogenasa y fosfatasa, activan los mecanismos catabólicos y disponibilidad C, N, P, elementos que son importantes en la nutrición de las plantas (Ricón y Muñoz, 2005). Las actividades enzimáticas del suelo intervienen en diferentes reacciones bioquímicas que suceden dentro del suelo como un sistema complejo y heterogéneo que benefician los sistemas productivos y la calidad de los suelos. Estos procesos metabólicos, además están estrechamente relacionados con las propiedades físicas, químicas y biológicas, por tanto, son sensibles a los cambios generados por el manejo agrícola y la dinámica del COS. Por lo anterior, las prácticas combinadas de LC, el aporte de enmiendas orgánicas y el manejo de CC, así como la rotación de cultivos incrementan la actividad enzimática, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de COS y la productividad de los cultivos (Sainju, Singh, Whitehead y Wang, 2006).

## 4. CONCLUSIONES

- El carbono orgánico de los suelos es un indicador relevante en la actualidad, debido a su papel en el mantenimiento de la calidad de los suelos y en las acciones de mitigación del cambio climático. Comprender su compleja dinámica en agroecosistemas puede determinar las acciones de reconversión agrícola más eficientes.
- La síntesis de los análisis permitió la comprensión de los efectos de las prácticas de labranza, el cambio de uso del suelo, la gestión de nutrientes y la disponibilidad de agua en los suelos sobre la dinámica del CO y su relación con la calidad de los suelos, la productividad de los agroecosistemas y la retroalimentación con el presupuesto global de carbono.
- Los resultados del análisis evidencian el aumento del interés en investigación sobre los efectos del manejo de suelos agrícolas, ya que este puede alterar la cantidad y calidad del COS en los agroecosistemas. Las acciones desarrolladas a partir de este conocimiento contribuyen a una mejor comprensión de las ventajas y desventajas de las prácticas de labranza sobre su potencial como sumidero de carbono.

## 5. LITERATURA CITADA

- Abbas, F., Mohkum, H., Ishaq, W. y Ahsan, A. (2020). A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices. *Journal of environmental management*, 268, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110319>
- Aguilera, E., Guzman, G. y Alonso, A. (2015). Greenhouse gas emissions from conventional and organic cropping systems in Spain. *Agron.Sustain.Dev*, 725-737.
- Al-Kaisi, M., Yin, X. y Lich, M. (2005). Soil Carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 105, 635-647.
- Amundson, R., (2001). The carbon budget in soils. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 29, 535–562. DOI: 10.1146/annurev.earth.29.1.535
- Anaya, C. y Sannwald, E. (2015). Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics after conversion of tropical forest to traditional sugarcane agriculture in East Mexico. *Soil and Tillage Research*, 147, 20-29.
- Aschi, A., Aubert, M., Riah-Anglet, Wassila, Nélieu, S., Dubois, C. y Trinsoutrot-Gattin, I. (2017). Introduction of faba bean in crop rotation: Impacts on soil chemical and biological characteristics. *Applied Soil Ecology*, 219-228.
- Bach, E., y Hofmockel, K. (2015). A time for every season soil aggregate turn over stimulates decomposition and reduces carbon loss in grasslands managed for bioenergy. *Bioenergy*, 588-599.
- Balkcom, K., Duzy, L., Kornecki, T. y Price, A. J. (2016). Timing of Cover Crop termination: Management Considerations for the Southeast. *Crop, Forage and Turfgrass Management*.
- Basuri, M., Kukal, S., Kaur, A., Bhatt, R. y Dulazi, A. (2015). Conservation tillage impact on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, 119-129.
- Batistão, C.A., Holthusen, D., Richert, J.M., Coutrim dos Santos, L.A. y Costa Campos, M.C. (2020). Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. *Geoderma*, 363, 114130. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114130>
- Blanco-Canqui, H., Mikha, M., Presley, D. y Claassen, M. (2011). Addition of Cover Crops Enhances No-Tillage Potential for Improving Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 1471-1482.
- Bogunovic, I., Pereira, P., Kusic, I., Sajko, K. y Sraka, M. (2018). Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in. *Catena*, 160, 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.009>
- Bongiorno, G., Büneman, E. K., Oguejofor, C., Meier, J., Gort, G., Comans, R., Mäder, P., Brussaard, L. y de Goede, R. (2019). Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, 28-50.

- Busari, M. A., Kukal, S. S., Kaur, A., Bhatt, R. y Dulazi, A. A. (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(2), 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>
- Butorac, A. (1994). *Conservation tillage in Eastern Europe*. In: M. R. Carter (Ed.), *Conservation tillage in temperate agroecosystems* (pp. 357–374). Boca Raton: Lewis Publisher.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Béral, C., Barthès, B. G., Dupraz, C., Durand, C., Kouakoua, E. y Chenu, C. (2017). Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 236, 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>
- Chaudhary, S., Dheri, G. y Brar, B. (2017). Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and managment indez under rice-whaet cropping system. *Soil and Tillage Research*, 59-66.
- Chenu, C., Angers, D. A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D. y Balesdent, J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, 188, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Corsi, S., Friedrich, T., Kassam, A., Pisante, M. y de Moraes Sà, J. C. (2012). Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from conservation agriculture: A literature review, integrated crop management (101 pp.). Vol. 16. Rome: AGP/FAO
- Dabney, S., Delgado, J., Meisinger, J., Schomberg, H., Liebigh, M., Kaspar, T., . . . y Reeves, W. (2010). Using cover crops and cropping systems for nitrogen management. *Advances in nitrogen managment for water quality*, 231-282.
- de Souza, H.N., Goede, R. G. M., Brussaard, L., Cardoso, I. M., Duarte, E. M. G., Fernandes, R.B.A., Gomes, L.C. y Pulleman, M. M. (2012). Environment Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 146 (1), 179–196. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.007>
- Du, Z.-L., Zaho, J.-K., Wang, Y.-D. y Zhang, Q.-Z. (2015). Biochar addition drives soil agregation and carbon sequestration in aggregate fraction from an intensive agrixultural system. *J Soil Sediments*, 581-589.
- Fultz, L. M., Moore-Kucera, J., Zobeck, T. M., Acosta-Martínez, V., Wester, D. B. y Allen, V. G. (2013). Organic carbon dynamics and soil stability in five semiarid agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 181, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.004>
- Ghimire, R., Adhikari, K., Chen, Z.-S., Shah, S. C. y Dahal, K. R. (2012). Soil organic carbon sequestration as affected by tillage, crop residue and nitrogen application in rice-wheat rotatio system. *Paddy Water Enviromental*, 95-102.
- Grandy, A. S. y Robertson, G. P. (2006). Aggregation and Organic Matter Protection Following Tillage of a Previously Uncultivated Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1398–1406. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0313>
- Guo, Y., Fan, R., Zhang, X., Zhang, Y., Wu, D., Mclaughlin, N., Zhang, S., Chen, X., Jia, S. y Liang, A. (2020). Science of the Total Environment Tillage-induced effects on SOC



- through changes in aggregate stability and soil pore structure. *Science of the Total Environment*, 703(4888), 134617. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134617>
- Haddaway, N., Hedlund, K., Jackson, L., Katterer, T., Lugato, E., Thomsen, I., . . . y Isberg, P.-E. (2017). How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*, 6-30.
- Hati, K., Swarup, A., Mishra, B., Manna, M.C, Wanjari, R., Mandal, K.G and Misra, A. (2008). Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol. *Geoderma*, 173-179.
- Hergoualc'h, K., Blanchard, E., Skiba, U., Henault, C. y Harmand, J.M. (2012). Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 148: 102– 110. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.018>
- Houghton, R. A. (2007). Balancing the Global Carbon Budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 313-347. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140057>
- Huang, X., Jiang, H., Li, Y., Ma, Y., Tang, H., Ran, W. y Shen, Q. (2016). The role of poorly crystalline iron oxides in the stability of soil aggregate-associated organic carbon in a rice–wheat cropping system. *Geoderma*, 1-10.
- Huang, Y., Ren, W., Wang, L., Hui, D., Grove, J., Yang, X. y Go, B. (2018). Greenhouse gas emissions and crop yield in no-tillage systems: a meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 144-153.
- Hui, L., Wen-ting, F., Xin-hua, H., Ping, Z., Hong-Jun, G., Nan, S. y Ming-gang, X. (2017). Chemical fertilizers could be completely replaced by manure to maintain high maize yield and soil organic carbon (SOC) when SOC reaches a threshold in the Northeast China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 937-946.
- Jacobs, A., Rauber, R. y Ludwig, B. (2009). Soil & Tillage Research Impact of reduced tillage on carbon and nitrogen storage of two Haplic Luvisols after 40 years. *Soil and Tillage Research*, 102(1), 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.08.012>
- Lal, R., Follett, S. y Kimble, G. (2007). Soil Carbon Sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil Science*, 943-956.
- Lal, R. (1997). Long-term tillage and maize monoculture effects on a tropical Alfisol in western Nigeria. I. Crop yield and soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 42, 145–160.
- Lal, R. (2015). Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability* 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Lal, R. (2018). Promoting “4 per Thousand” and “Adapting African Agriculture” by south-south cooperation: conservation agriculture and sustainable intensification. *Soil Tillage Res.* <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.015>
- Lal, R., (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123, 1–22. [doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032)
- Li, J.H., Li, F., Li, W.J., Chen, S., Abbott, L.K. y Knops, J.M.H. (2018). Nitrogen additions promote decomposition of soil organic carbon in a Tibetan alpine meadow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 82, 614. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.12.0417>

- Li, T., Zhang, Y., Bei, S., Li, X., Reinsch, S. y Zhang, H. (2020). Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates. *Catena*, 194, 104739. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104739>
- Li, Y., Li, Z., Cui, S., Liang, G. y Zhang, Q. (2021). Microbial-derived carbon components are critical for enhancing soil organic carbon in no-tillage croplands: A global perspective. *Soil and Tillage Research*, 205, 104758. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104758>
- Liang, F., Li, J., Zhang, S., Gao, H., Wang, B. y Shi, X. (2019). Two-decade long fertilization induced changes in subsurface soil organic carbon stock vary with indigenous site characteristics. *Geoderma*, 337, 853–862. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.033>
- Lu, X. (2019). Fertilizer Types Affect Soil Organic Carbon Content and Crop Production: A Meta-analysis. *Agricultural Research*, 94-101.
- Luan, H., Gao, W., Huang, S., Tang, J., Li, M., Zhang, H. y Chen, X. (2019). Partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments affects soil organic carbon composition and stability in a greenhouse vegetable production system. *Soil & Tillage Research*, 191, 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.009>
- Lun, F., Canadell, J. G., He, L., Yang, B., Liu, M.-c., Yuan, Z. y Li, W.-h. (2016). Estimating cropland carbon mitigation potentials in China affected by three improved cropland practices. *Journal of Mountain Science*, 1840-1854.
- Malou, O.P., Sebag, D., Moulin, P., Chevallier, T., Badiane-Ndour, N. Y., Thiam, A. y Chapais-Lardy, L. (2020). The Rock-Eval® signature of soil organic carbon in arenosols of the Senegalese groundnut basin. How do agricultural practices matter? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 301, 107030. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107030>
- Martínez, J.M., Galantini, J.A., Duval, M.E. y López, F.M., (2017). Tillage effects on labile pools of soil organic nitrogen in a semi-humid climate of Argentina: a long-term field study. *Soil Tillage Res.* 169, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.02.001>
- Mbuthia, L. W., Acosta-Martínez, V., DeBryun, J., Schaeffer, S., Tyler, D., Odoi, E., Mpheshea, M., Walker, F. y Eash, N. (2015). Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 89, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.016>
- Mikanová, O., Javurek, M., Simon, T., Friedlová, M. y Vach, M. (2009). The Effect of tillage system on some microbial characteristics. *Soil and Tillage Research*, 72-76.
- Mishra, G. y Avishek, S. (2020). Studying the relationship between total organic carbon and soil carbon pools under different land management systems of Garo hills, Meghalaya. *Journal Environment Management* 257.
- Mukumbareza, C., Muchaonyerwa, P. y Chiduza, C. (2015). Effects of oats and grazing vetch cover crops and fertilisation on microbial biomass and activity after five years of rotation with maize. *South African Journal of Plant and Soil*, 189-197.
- Nouri, A., Ph, D., Lee, J., Yoder, D. C., Jagadamma, S., Walker, F. R., Yin, X. y Arelli, P. (2020). Management duration controls the synergistic effect of tillage, cover crop, and nitrogen

- rate on cotton yield and yield stability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 301, 107007. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107007>
- Nunes, M.R., Denardin, J.E., Pauletto, E.A., Faganello, A. y Spinelli Pinto, L.F (2015) Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil & Tillage Research*, 148, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.007>
- Ondrasek, G., Bakić Begić, H., Zovko, M., Filipović, L., Meriño-Gergichevich, C., Savić, R. y Rengel, Z. (2019). Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. *Science of the Total Environment*, 658, 1559–1573. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.243>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2017). Soil Organic Carbon the hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Pareja, E., Plaza, D., Ramos, M., Lampurlanés, J., Fuentes, J. y Cantero, C. (2017). Long-term no-till as a means to maintain soil surface structure in an agroecosystem transformed into irrigation. *Soil and Tillage Research*, 221-230.
- Pezarico, C.R., Vitorino, A.C.T., Mercante, F.M. y Daniel, O. (2013). Indicadores de qualidade do solo em sistemas agrofloretais. *Amaz. J. Agric. Environ. Sci.* 56, 40–47. DOI: 10.4322/rca.2013.004
- Prasad, J., Rao, S. C., Srinivas, K., Jyothi, C., Venkateswarlu, B., Ramachandrapa, B. y Mishra, P. (2016). Effect of ten years of reduced tillage and recycling of organic matter on crop yields, soil organic carbon and its fractions in Alfisol of semi arid tropics of southern India. *Soil and Tillage Research*, 131-139.
- Pucciariello, C., Boscari, A., Tagliani, A., Brouquisse, R., Perata, P., Sant, S. y Avanzati, S. (2019). Exploring legume-rhizobia symbiotic models for waterlogging tolerance. *Frontiers in Plant Science*. 10: 578. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00578>
- Qi, Z. y Halmers, M. J. (2010). Soil Water Dynamics under winter, rye, cover crop in Central Iowa. *Special Section: Artificial Drainage*, 53-60.
- Ren, W., Banger, K., Tao, B., Yang, J., Huang, Y. y Tian, H. (2020). Global pattern and change of cropland soil organic carbon during 1901-2010: Roles of climate, atmospheric chemistry, land use and management. *Geography and Sustainability*, 59-69.
- Rühlemann, L. y Schmidtke, K. (2015). Evaluation of monocropped and intercropped grain legumes for cover cropping in no-tillage and reduced tillage organic agriculture. *European Journal of Agronomy*, 83-84
- Ruiz-Agudelo, C.A., Hurtado, S.L., Carrillo, Y.P y Parrado, C.A. (2019). Lo que sabemos y no sabemos sobre los sistemas agroforestales tropicales y la provisión de múltiples servicios ecosistémicos. Una revisión. *Ecosistemas* 28(3): 26-35. doi: 10.7818/ECOS.1697
- Sánchez-Navarro, V., Zornoza, R., Faz, Á. y Fernández, J. (2019). Comparing legumes for use in multiple cropping to enhance soil organic carbon, soil fertility, aggregates stability and vegetables yields under semiarid conditions. *Scientia Horticulturae*, 835-841.
- Sarker, J.R., Singh, B.P., Cowie, A.L., Fang, Y., Collins, D., Badgery, W. y Dalal, R.C. (2018). Agricultural management practices impacted carbon and nutrient concentrations in soil aggregates, with minimal influence on aggregate stability and total carbon and nutrient

- stocks in contrasting soils. *Soil Tillage Res.* 178, 209–223. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.019>.
- Shakoor, A., Shahbaz, M., Farooq, T. H., Sahar, N. E., Shahzad, S. M., Altaf, M. M. y Ashraf, M. (2021). A global meta-analysis of greenhouse gases emission and crop yield under no-tillage as compared to conventional tillage. *Science of the Total Environment*, 750, 142299. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142299>
- Sharma, P., Singh, A., Kahlon, C., Brar, A., Grover, K., Dia, M. y Steiner, R. (2018). The rolce of cover crops towars sustainable soil health and agricultural. *American Journal of Plant Science*, 1935-1951.
- Sharratt, B. S. y Collins, H. (2018). Wind Erosion Potential Influenced by tillage in an irrigated potatao-sweet corn rotation in the Columbia Basin. *Agronomy, soils and envitormental quality*, 110, 842-849.
- Shekinah, D. y Stute, J. (2018). Sunn Hemp: A legume Cover Crop with potential fot the Midwest? *Sustain. Agric. Res.*, 63-69.
- Sheng, H., Zhou, P., Zhang, Y., Kuzyakov, Y., Zhou, Q., Ge. y Wang, C. (2015). Loss of labile organic carbon from subsoil due to land-use changes in subtropical China. *Soil Biology and Biochemistry*, 88, 148-157.
- Sierra, J., Causeret, F., Diman, J. L., Publicol, M., Desfontaines, L., Cavalier, A. y Chopin, P. (2015). Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 213, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.015>
- Singh, M., Sarkar, B., Hussain, S., Ok, Y.S., Bolan, N.S. y Churchman, G.J. (2018). Correction to influence of physico-chemical properties of soil clay fractions on the retention of dissolved organic carbon. *Environ. Geochem. Hlth.* 40. 563–563. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0045-0>.
- Six, Elliott, E. y Paustian, K. (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 2099-2101.
- Smith, P. (2004). Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *Eur. J. Agron.* 20, 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2003.08.002>
- Smith, P., Davies, C.A., Ogle, S., Zanchi, G., Bellarby, J., Bird, N., Boddey, R.M., McNamara, N.P., Powlson, D., Cowie, A., Van Noordwijk, M., Davis, S.C., Richter, D.B., Kryzanowski, L., Van Wijk, M.T., Stuart, J., Kirton, A., Eggar, D., Newton- Cross, G., Adhya, T.K. y Braimoh, A. (2012). Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon: current capability and future vision. *Global Change Biol.* 18, 2089–2101.
- Sochorová, L., Jansa, J., Verbruggen, E., Hejcman, M., Schellberg, J., Kierse, E. T. y Johnson, N. C. (2016). Long-term agricultural management maximazing hay production can significaly reduce belowground C storage. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104-114.

- Somasundaram, J., Reeves, S., Wang, W., Heenan, M. y Dalal, R. (2017). Impact of 47 years of no tillage and stubble retention on soil aggregation and carbon distribution in a Vertisol. *Land Degradation. Dev.* 28, 1589–1602. <https://doi.org/10.1002/ldr.2689>.
- Tengteng, L., Yunlong, Z., Shuikuan, B., Xiaolin, L., Sabine, R., Hongyan, Z. y Junling, Z. (2020). Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates. *CATENA* 194, 341-353.
- Thomazini, A., Mendonça, E. S., Cardoso, I. M. y Garbin, M. L. (2015). SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. *Geoderma Regional*, 5, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.02.003>
- Treadwell, D., Creamer, N. y Baldwin, K. (2010). An Introduction to cover crop species for organic farming systems . *Agron.*, 136-146.
- Wang, G., Wang, E., Huang, Y. y Xu, J. (2014). Soil Carbon sequestration potential as affected by management practices in northern China: A simulation study. *Pedosphere*, 24, 529-543.
- Wang, H., Wang, S., Yu, Q., Zhang, Y., Wang, R., Li, J. y Wang, X. (2020). No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-retained farming system. *Journal of Environmental Management*, 110-261.
- Wang, J., Wang, K., Wang, X., Ai, Y., Zhang, Y. y Yu, J. (2018). Carbon sequestration and yields with long-term use inorganic fertilizers and organic manure in six-crop rotation system. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 87-98.
- Wei, G., Xiaoyuan, Y. y Jingyan, W. (2012). The effect of chemical fertilizer on soil organic carbon renewal and CO<sub>2</sub> emission a pot experiment with maize. *Plant Soil*, 85-94.
- Wei, X., Shao, M., Gale, W. y Li, L. (2014). Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. *Scientific reports*, 4(1), 1-6.
- Xiao, L., Yao, K., Li, P., Liu, Y., Chang, E., Zhang, Y. y Zhu, T. (2020). Increased soil aggregate stability is strongly correlated with root and soil properties along a gradient of secondary succession on the Loess Plateau. *Ecological Engineering*, 105-671.
- Ye, Y., Xiao, S., Liu, S., Zhang, W., Zhao, J., Hongsong, C. y Kelin, W. (2020). Tillage induces rapid loss of organic carbon in large macroaggregates of calcareous soils. *Soil and Tillage Research*, 199, 104549.
- Zhang, W. J., Wang, X. J., Xu, M. G., Huang, S. M., Liu, H. y Peng, C. (2009). Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China. *Biogeosciences*, 7(2), 409–425. <https://doi.org/10.5194/bg-7-409-2010>