

AGROPECUARIA**IMPACTO DE LOS CULTIVOS DE COBERTURA COMO PROMOTORES DEL SECUESTRO DE CARBONO EN EL SUELO DENTRO DE LA AGRICULTURA REGENERATIVA – UNA REVISIÓN****IMPACT OF COVER CROPS AS PROMOTERS OF SOIL CARBON SEQUESTRATION WITHIN REGENERATIVE AGRICULTURE – A REVIEW.****Autores:**

Gutiérrez, Grecia¹; Valery, Alexis²

¹ Departamento de Agronomía, Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela

² Grupo de Investigación en Biotecnología Agrícola y Ambiental, Decanato de Investigación, Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela

Corresponding Author: grecia.gutierrez@unet.edu.ve

RESUMEN

El uso intensivo del suelo con fines agrícolas ha generado la degradación progresiva del mismo, de tal manera que buscar soluciones efectivas para recuperar su salud y calidad se ha convertido en una necesidad imperante para la Agronomía. En este sentido, el uso de cultivos de cobertura ha sido una estrategia ampliamente estudiada en los últimos años, los trabajos publicados referentes al tema han sido muchos, y la orientación de los estudios, diferentes. Esta investigación tuvo como objetivo analizar a través de diferentes herramientas estadísticas, material científico relacionado con la variación de carbono orgánico en el suelo, tras la adopción de cultivos de cobertura, a fin de conocer la dinámica en general y variables involucradas en el proceso. Los artículos científicos seleccionados corresponden con los publicados entre los años 2017 y 2023, en cuyo contenido se encontró información acerca de: características edáficas del lugar, contenido de carbono orgánico antes y después de la incorporación de cultivos de cobertura, especie vegetal usada como cobertura, profundidad del suelo evaluado y tiempo de evaluación. Los resultados del análisis estadístico descriptivo sugieren que factores como profundidad del suelo, prácticas de labranza y sistemas de policultivos o mezclas de cultivos de cobertura están asociados a las ganancias de carbono, mientras que el análisis estadístico de pruebas paramétricas y no paramétricas pone en evidencia que cubrir el suelo es una práctica potencial para aumentar el contenido de carbono, solo cuando se hace de forma continua y por períodos de tiempo mayores a cuatro años. Del mismo modo, es claro que aun cuando factores climáticos y edáficos influyen en el proceso, es el tiempo la variable con mayor relevancia en la dinámica del secuestro de carbono en el suelo, cuando se emplean cultivos de cobertura en los sistemas agrícolas.

ABSTRACT

The intensive use of soil for agricultural purposes has generated its progressive degradation, in such a way that seeking effective solutions to recover its health and quality has become a prevailing need for agronomy, in this sense, the use of cover crops It has been a widely studied strategy in recent years, the published works on the subject have been many, and the orientation of the studies has been different. This research aimed to analyze, through different statistical tools, scientific material related to the variation of organic carbon in the soil, after the adoption of cover crops, in order to know the general dynamics and variables involved in the process. The selected scientific articles correspond to those published between the years 2017 and 2023 in whose content information was found about edaphic characteristics of the place, organic carbon content before and after the incorporation of cover crops, plant species used as cover, depth of the soil evaluated and evaluation time. The results of the descriptive statistical analysis suggest that factors such as soil depth, tillage practices and polyculture systems or cover crop mixtures are associated with carbon gains, while the statistical analysis of parametric and non-parametric tests shows that Covering the soil is a potential practice to increase carbon content, only when done continuously and for periods of time greater than four years; Likewise, it is clear that even though climatic and edaphic factors influence the process, time is the most relevant variable in the dynamics of carbon sequestration in the soil, when cover crops are used in agricultural systems.

Palabras clave: Carbono orgánico, cobertura vegetal, propiedades del suelo, manejo del suelo, clima.

Key words: Organic carbon, vegetation cover, soil properties, soil management, climate.

Recibido: 10/07/2024 **Aprobado:** 16/12/2024

INTRODUCCIÓN

Diversos estudios evalúan constantemente el modelo de agricultura convencional y los resultados indican claramente, que la alta demanda de insumos y recursos, no tiene futuro sino se hacen cambios en su enfoque, según el criterio Pretty *et al.* citado por Wratten *et al.* (2019). Una clara evidencia es que la agricultura convencional, es una de las principales causas de perturbaciones climáticas, influenciada significativamente por cambios en las prácticas de uso de la tierra (Wratten *et al.*, 2019) actualmente un tema reconocido por su importancia.

Según Wratten *et al.* (2019) existe un alto y creciente nivel de interés en la “intensificación sostenible”, esta puede ser percibida como un paso de transición desde el uso desmedido de recursos hacia un sistema que utiliza principios ecológicos para promover la sostenibilidad, pero realmente la agricultura regenerativa se basa en la restauración de funciones ecológicas mediante la promoción de la biodiversidad funcional en los ecosistemas, es decir, su objetivo es revertir de manera progresiva los daños y desde allí garantizar la sostenibilidad, incluso para sistemas de producción extensos (Struik y Kuyper, 2017).

Según LaCanne y Lundgren (2018), la agricultura regenerativa se fundamenta en: reducir o eliminar la labranza, mitigar las consecuencias espacio-temporales del suelo desnudo, aumentar la diversidad de plantas en los cultivos e integrar sistemas pecuarios y agrícolas en uno solo.

De esta manera y en términos generales, la agricultura regenerativa puede ser definida como el conjunto de prácticas agrícolas aplicadas en sistemas ecológicos, y el uso de cultivos de cobertura, es sin duda una de ella. El carbono orgánico presente en el suelo (COS) es protagonista importante dentro de este concepto y además es determinante en la fertilidad, dado que favorece la agregación del suelo y consecuentemente interviene en propiedades físicas como humedad aprovechable, capacidad

de aireación, movimiento de agua e intercambio gaseoso.

También interviene en las propiedades químicas, como intercambio catiónico y valor de pH; del mismo modo, según Aguilera, citado por Martínez *et al.* (2008), dentro del componente biológico el COS actúa como fuente energética para los microrganismos del suelo. Paustian, citado Saynes *et al.* (2016) revela que la cantidad de COS ha disminuido en el tiempo, dado los efectos indirectos en las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera provenientes de actividades agrícolas, y como consecuencia la fertilidad y productividad de los suelos ha mermado significativamente. El COS se categoriza en dos fracciones, la primera es lábil, dinámica, rica en acción microbiana y susceptible a la descomposición o mineralización; la otra fracción en cambio es recalcitrante y estable, tardó años en formarse y está representada por compuestos húmicos de lenta descomposición, gracias a su alto peso molecular, estructuras complejas, irregulares y aromáticas, e interacción con los minerales del suelo (Burbano, 2018).

Por otra parte, los cultivos de cobertura (CC) son los cultivos establecidos entre dos cultivos de verano, no son pastoreados, incorporados al suelo ni cosechados, permaneciendo en la superficie para proteger el suelo y liberar nutrientes a través de la degradación de la biomasa aérea y radicular (Angeli *et al.*, 2022). Una vez que su crecimiento o desarrollo son interrumpidos mediante métodos mecánicos o químicos se mantienen en la superficie sin incorporar, dando continuidad a su función protectora. Para que su adopción sea viable, los CC no deben afectar el establecimiento del cultivo comercial, ni comprometer su rendimiento al reducir las reservas de agua. Además, deben aportar un nivel adecuado de carbono (C) que promueva la estabilidad en la relación C:N para garantizar una cobertura de residuos duradera, favorecer la estructuración superficial y la descomposición del material orgánico (Angeli *et al.*, 2022).

Los cultivos de cobertura ofrecen varias ventajas, entre las cuales destacan: la fijación de nitrógeno para reducir la aplicación de fertilizantes, reducción de la población de malezas y uso de herbicidas, infiltración y disponibilidad de agua en el perfil, distribución oportuna de nutrientes, reducción de la compactación, ampliación del área porosa y la más importante para el caso en estudio, los CC son fuente significativa en el suministro de materia orgánica al suelo (MO), componente necesario para alcanzar y mantener la productividad. Suelos con altos contenidos de MO son más friables, tienen mayor capacidad de intercambio catiónico, y dinamismo en la actividad - diversidad biológica, contribuyendo a la salud del ecosistema, por último, los también llamados cultivos de barbecho, protegen al suelo de agentes degradantes como las precipitaciones y los vientos, al tiempo que reducen las emisiones de carbono a la atmósfera y preservan el carbono estable que se encuentra encapsulado dentro de los agregados, resguardándolo de la degradación microbiana, respecto a los suelos desnudos y expuestos por completo a los agentes ambientales (Khangura *et al.*, 2023).

El enfoque de este estudio se centró en el uso de cultivos de cobertura, como fuente importante de materia orgánica, que tras procesos de descomposición se transforma en carbono orgánico. Sin embargo, Lal (2004) afirma que el potencial de los cultivos de cobertura para aumentar las reservas de COS, fomentar suelos fértiles y reducir los efectos del cambio climático, se ha destacado en muy pocos estudios; las pruebas científicas son limitadas a razón de dos factores: en primera instancia, la evidencia cuantitativa integral sobre el efecto de los cultivos de cobertura sobre el COS se obtiene a largo plazo; en segundo lugar, no es posible evaluar de forma aislada la influencia de factores ambientales estrechamente relacionados con el proceso, tal como son las propiedades del suelo y el clima sobre la variación de COS después de la introducción de cultivos de cobertura al sistema agrícola (Khangura *et al.*, 2023)

Bajo estos fundamentos la aplicación de un metanálisis que permita derivar una función de

respuesta capaz de describir y proyectar los cambios en las reservas de COS en función del tiempo y de la especie vegetal usada como cobertura en diferentes ecosistemas, resulta una alternativa viable y oportuna para desarrollar investigaciones en lapsos de tiempos cortos (Khangura *et al.*, 2023).

Esta investigación fue clasificada como tipo documental de nivel descriptivo– correlacional, cuyo objetivo se basó en la revisión sistemática de material científico nacional e internacional, referente a la variación de carbono orgánico en el suelo antes y después de la introducción de coberturas vegetales, publicado en los últimos siete años, siendo apremiante que su contenido incluyera características edáficas del lugar y especies vegetales empleadas. El contenido seleccionado y calificado como relevante fue compilado en forma tabulada, generando una amplia matriz de datos, que posteriormente fue sometida a tratamiento estadístico para dar lugar al establecimiento de relaciones entre los cultivos de cobertura y el secuestro de carbono en el suelo, mismas en las que destacaron el tipo de suelo, así como la práctica constante e ininterrumpida a través del tiempo, como variables influyentes en las variaciones positivas del COS.

MÉTODO

Conjunto de datos

Se revisaron de manera exhaustiva 50 artículos (Tabla 1), los cuales contenían la información requerida en función de los siguientes criterios:

- 1- Artículos científicos estructurados en: resumen, introducción, metodología, resultados y discusión, provenientes únicamente de revistas científicas, las cuales presenten una revisión de los artículos antes de ser publicados, con acceso abierto. Se excluyeron trabajos de aplicación profesional de pregrado y posgrado, así como contenido en formato de resumen.
- 2- Exposición del contenido de COS antes y después de la introducción de CC.
- 3- Experimentos compuestos por una o más parcelas de CC al mismo tiempo que, una parcela de iguales dimensiones en estado de barbecho o tratamiento control (suelo desnudo),

a fin de determinar la variación de COS en ambas condiciones. Del mismo modo ambas parcelas debían ubicarse en el mismo campo experimental.

4- Una vez terminado el tiempo de crecimiento del CC, estos fueron utilizados como abono verde o mantillo, pero nunca cosechados.

5- El o los tratamientos no fueron parte de una combinación de aportes de carbono, como por ejemplo cultivos de cobertura más estiércol o algún otro material de origen orgánico, de esta manera los cultivos de cobertura fueron la única fuente de carbono.

6- Exposición del tiempo en el que se evaluó el, o los tratamientos.

Tabla 1. Fragmento de la información tabulada

| Referencia | País | Variación de carbono (%) | Tiempo (años) |
|--------------------------------------|-------------------|--------------------------|---------------|
| Rigon <i>et al.</i> (2020) | Brasil | -6,86 a 12,37 | 12 |
| Sainju <i>et al.</i> (2018) | EE. UU. | -4,46 a 19,13 | 4 |
| Radicetti <i>et al.</i> (2019) | Italia | 6,03 a 11,21 | 2 |
| Repullo <i>et al.</i> (2021) | España | -14 a 20,51 | 1 |
| Gattullo <i>et al.</i> (2020) | Italia | 59,61 a 123,85 | 1 y 3 |
| Salcedo <i>et al.</i> (2022) | Perú | 29,71 a 31,15 | 0,5 |
| Ghimire <i>et al.</i> (2019) | EE. UU. | -14,08 a 1,08 | 1 |
| Chalise <i>et al.</i> (2018) | EE. UU. | 0,84 a 1,98 | 3 |
| Blanco-Canqui <i>et al.</i> (2023) | EE. UU. | 8,33 | 8 |
| Romaníuk <i>et al.</i> (2018) | Buenos Aires | 15 a 51 | 1 |
| Decker <i>et al.</i> (2022) | EE. UU. | -1,33 a 30,05 | 4 |
| Lozano <i>et al.</i> (2018) | Venezuela | -18,37 a 28,57 | 2 y 4 |
| Schaefer <i>et al.</i> (2020) | EE. UU. | 0,81 | 1 |
| Landriscini <i>et al.</i> (2020) | Argentina | -2,24 a 19,02 | 9 |
| González <i>et al.</i> (2017) | Argentina | 5,56 a 16,67 | 6 |
| Fernández <i>et al.</i> (2020) | Argentina | 0,53 a 3,74 | 8 |
| Peregrina (2019) | España | 4,92 a 301,64 | 5 |
| Scaglione <i>et al.</i> (2023) | Argentina | 14,97 a 33,16 | 0, 5 |
| Ramos <i>et al.</i> (2020) | Brasil | 11,1 a 46,73 | 0,6 |
| Rittl <i>et al.</i> (2023) | Noruega | 3,23 | 2 |
| Tyler (2021) | EE. UU. | -4 a 6,12 | 1 |
| Kuneski <i>et al.</i> (2023) | Brasil | -25,5 a 325 | 9 |
| Crotty y Stoate (2019) | Reino Unido | -11,6 a -5,25 | 0,4 |
| Khan <i>et al.</i> (2021) | Canadá | 6,27 a 11,07 | 1,4 |
| Mubvumba <i>et al.</i> (2023) | EE. UU. | 22,11 | 3 |
| Brewer <i>et al.</i> (2023) | EE. UU. | 7 a 60,71 | 3 |
| Thapa <i>et al.</i> (2021) | EE. UU. | 3,18 a 18,41 | 5 |
| Whag <i>et al.</i> (2023) | China | 22,12 | 5 |
| Novara <i>et al.</i> (2020) | Italia | 9,20 | 8 |
| Topps <i>et al.</i> (2021) | EE. UU. | -15,78 a 47,37 | 0,19 |
| Sánchez <i>et al.</i> (2019) | EE. UU. | 35,16 | 2 |
| Büchi <i>et al.</i> (2018) | Suiza | -12,5 a 181,82 | 3 |
| Johnson <i>et al.</i> (2021) | EE. UU. | -1,78 a 15,18 | 2 |
| Pokhrel <i>et al.</i> (2021) | EE. UU. | -26,25 a 14,38 | 3 |
| Rorick y Kladivko (2017) | EE. UU. | -17,78 a 17,74 | 2 |
| Centurión <i>et al.</i> (2023) | Península Ibérica | 3,96 | 2 |
| Villarreal <i>et al.</i> (2021) | Argentina | 3,51 | 1 |
| Scavo <i>et al.</i> (2021) | Italia | -17,87 a 10,17 | 0,65 |
| Abad <i>et al.</i> (2023) | España | 13,03 a 33,12 | 1,25 |
| Nascente y Stone (2018) | Brasil | -19,83 a 34,17 | 3 |
| Qi <i>et al.</i> (2020) | China | -17,10 a 39,47 | 3 |
| Zhang <i>et al.</i> (2022) | EE. UU. | 511,11 a 1455,56 | 7 |
| De Mello Frasca <i>et al.</i> (2023) | Brasil | 7,49 a 13,68 | 3 |
| Sharifi y Hajiaghaei-Kamranib (2023) | Canadá | -137,10 | 3,25 |
| Cazorla <i>et al.</i> (2017) | Argentina | -1,14 a 14,11 | 13 |

| | | | |
|-------------------------------|-----------|----------------|------|
| Abán <i>et al.</i> (2022) | Argentina | 25,25 | 13 |
| Muchanga <i>et al.</i> (2020) | Japón | 2,36 a 18,15 | 1 |
| de Souza <i>et al.</i> (2023) | EE. UU. | -12,80 a 13,68 | 0,13 |
| Tellería <i>et al.</i> (2022) | Argentina | -7,14 a 46,94 | 0,5 |
| Sanabria <i>et al.</i> (2021) | Perú | 41,98 a 74,05 | 1 |

La agrupación de material científico efectivo constituyó la primera etapa de la presente investigación, denominada revisión de literatura.

Construcción de la base de datos

La información se compiló de forma tabulada, bajo el formato de un documento xlsx, con las siguientes características y parámetros: Título del estudio, año de publicación, país donde se desarrolló el estudio, clima clasificado según el sistema empírico de Köppen, basado en características de precipitación y temperatura, precipitación media anual (mm), clasificación taxonómica del suelo según los órdenes descritos en el Sistema Nacional de Clasificación de

Suelos de Estados Unidos (USDA) y en la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (World Reference Base for Soil Resources - WRB), clase textural del suelo, porcentaje de arena (%), limo (%) y arcilla (%). CC como sistema de monocultivo. CC como sistema de policultivo o mezcla. Cultivo comercial del sistema en estudio. Área cubierta por CC (m^2). Tipo de Labranza (convencional, conservacionista o labranza cero). Establecimiento del cultivo de cobertura (permanente o temporal).

La variación del contenido de carbono evaluado (%) se determinó mediante la Ecuación 1:

$$\text{Variación de carbono (\%)} = 100 * \frac{\text{Contenido de carbono final} - \text{Contenido de carbono inicial}}{\text{Contenido de carbono inicial}}$$

Ecuación 1

Parte de los datos de la variación de carbono se determinó en diferentes unidades, razón por la cual fue necesario hacer conversiones, sumatorias y promedios a fin de ajustarlos al formato requerido. Además de esto, es preciso señalar que la variación de carbono orgánico expresada de forma porcentual fue la única variable cuyos valores fueron calculados en esta investigación

También se tomó en consideración el tiempo de evaluación (años) y la profundidad del suelo a la que se evaluó el contenido de COS.

Análisis estadístico descriptivo

Durante la construcción de la base de datos y su posterior culminación, se observó el efecto de algunas variables sobre los cambios en el contenido de COS, así como el valor potencial de ciertos datos que ofrecen la oportunidad de estudiar de forma más amplia el proceso de secuestro de carbono en suelo, concebido como un fenómeno que integra diferentes conceptos, según el propósito de su práctica. El análisis

descriptivo surgió a partir de la observación detallada de los registros y su tratamiento en el software estadístico RStudio versión 2024.09.1 y el programa informático de cálculo Excel, se expresó en términos porcentuales y de frecuencia.

Análisis estadístico

Dada la naturaleza del estudio, los datos de tipo categóricos son amplios y al igual que los registros numéricos, su estudio es importante para comprender la dinámica del proceso del secuestro de carbono en el suelo. A las variables cualitativas les fue aplicada la prueba de chi-cuadrado para evaluar la posible dependencia entre ellas, a través del software estadístico RStudio.

Dentro de la Agronomía es común encontrar ensayos o situaciones en las que utilizar los modelos clásicos de regresión no es suficiente para comprender a profundidad la dinámica del proceso estudiado, por lo que es necesario recurrir al uso de modelos mixtos que permitan

modelar los datos de forma más flexible. En este caso, la complejidad de los datos recabados justifica el uso de una prueba de regresión lineal de mínimos cuadrados ordinarios (OLS), esta prueba se realizó a través del software estadístico RStudio, con un nivel de confiabilidad de 95%. Como criterios para la interpretación de resultados se consideró:

- Valores de $t < 1.96$ indican parámetros estadísticamente no significativos.
- Valores de $t > 1.96$ indican parámetros estadísticamente significativos.
- Valores para el test de Durbin-Watson cercanos a 2 indican que no hay autocorrelación.
- Valores para el test de Durbin-Watson inferiores a 2 que indican autocorrelación positiva.
- Valores para el test de Durbin-Watson superiores a 2 que indican autocorrelación negativa.
- Valores para el test de Jarque – Bera bajos o medios indican distribución normal de los datos.
- Valores para el test de Jarque-Bera altos indican que la distribución de los datos no es normal.

La variable dependiente fue la variación de carbono y las variables independientes correspondieron a el contenido de arcilla (%), arena (%) y limo (%), cultivo usado como cobertura vegetal, cultivo comercial, área evaluada(m^2), establecimiento del cultivo de cobertura y tiempo de evaluación (años).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Formato de los artículos

Dentro del conjunto de 50 escritos, 49 de ellos fueron de tipo experimental, y solo 1 de tipo revisión, que proporcionó por completo la información requerida. Todos guardaron la estructura convencional de un artículo científico, el idioma de publicación original de todos fue inglés.

Sitios experimentales y años de publicación

El conjunto de datos incluyó un total 14 países diferentes, siendo Estados Unidos quienes tuvieron mayor participación con 34% de los estudios evaluados, seguido por Argentina con 18 % y Brasil con 10 %, lo que evidencia que se trata de un tema relevante y en desarrollo para países caracterizados por la intensa actividad agrícola, como son estos. El 38% restante incluye países europeos, asiáticos y suramericanos, destacando la participación de Venezuela con un apartado que tuvo lugar en la Estación Experimental “La Iguana”, estado Guárico. Por otro lado, la mayor cantidad de artículos efectivos corresponden a los años 2020, 2021 y 2023, respectivamente, lo que indica que el secuestro de carbono en el suelo usando cultivos de cobertura es un tema en desarrollo exponencial, y de cara al futuro es posible esperar mayor protagonismo en el ámbito científico, afirmación que coincide con lo expuesto por Decker *et al.* (2022) quien afirma que existe una necesidad cada vez mayor de adoptar prácticas de agricultura de conservación como cultivos de cobertura, labranza de conservación y rotaciones de cultivos para restaurar los suelos degradados.

Clima

Solo 50% de los estudios mostraron datos concretos de clima, donde resaltan zonas templadas y húmedas (32%), mediterráneas (16%), áridas y semiáridas (20%) y tropicales (32%). Las bondades climáticas de los trópicos son ampliamente conocidas, estos se caracterizan por ser biodiversos y ofrecer condiciones favorables para el desarrollo de la agricultura, mientras que, en zonas estacionales el clima representa mayores desafíos para la producción de alimentos (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2021). Consecuentemente, en esta investigación 68% de los experimentos se desarrollaron en regiones donde tanto invierno, como verano, son estaciones con condiciones muy agresivas y limitantes para la agricultura, afectando la salud y productividad del suelo. Visto de este modo, el uso de coberturas vegetales está orientado a la protección del suelo, preservación de la fertilidad, y resulta una práctica común en zonas

distantes al trópico, donde los efectos del clima son más acentuados.

Precipitación promedio anual

Este parámetro propio del clima fue expuesto en 44.72 % de los ensayos, siendo 200 mm el valor promedio anual más bajo y 1.850 mm el más alto (Figura 1). De forma descriptiva, las pérdidas de carbono en el suelo están asociadas a los valores más altos de precipitación, y es posible que se deba a los efectos erosivos que el impacto

ejercido por las gotas de lluvia, causa la desagregación y dislocación de los materiales orgánicos dando origen a la erosión por salpique (Hilton y West, 2020), asimismo, una vez alcanzada la máxima infiltración de agua en el suelo las partículas disagregadas son transportadas por la lámina de agua superficial (escorrentía), produciendo la erosión por arrastre, como consecuencia se rompe el equilibrio natural del suelo y se pierde la parte superficial del perfil

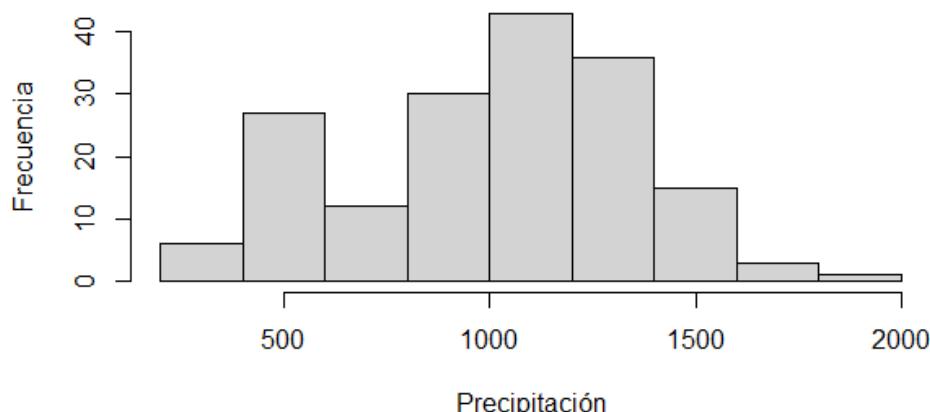


Figura 1. Rangos de precipitación en las zonas evaluadas.

Orden y textura del suelo

La textura del suelo fue una característica física expuesta en 95% de los artículos estudiados, donde la clasificación como suelos franceses se presenta en 94.77% de los casos, predominando los suelos franco-limosos (36.23%). De forma descriptiva no se evidencian grupos texturales específicos relacionados con valores de pérdida o ganancia en el contenido de carbono. Por otra parte, 72% de los artículos indicaron el orden del suelo, siendo el orden Ultisol el más común (35.68%), seguido por el orden Mollisol (29.01%). Al igual que en el caso de la textura, no hay evidencia concreta desde el punto descriptivo para relacionar un orden específico con cambios en el contenido de carbono.

Cultivos de cobertura

Los cultivos de cobertura se clasificaron en tres secciones: representadas porcentualmente en 46%, 22% y 32% para sistemas de monocultivo, sistemas de policultivo y ambos sistemas en

diferentes tratamientos dentro de un mismo experimento, respectivamente (Figura 2). Dentro de los monocultivos las especies con mayor participación pertenecen a la familia Poaceae, seguido por ejemplares de la familia Fabaceae, y Brassicaceae; dentro de los policultivos, las mezclas en orden descendente estuvieron compuestas por las siguientes combinaciones de familias: Poaceae + Fabaceae, Brassicaceae + Fabaceae + Poaceae y Brassicaceae + Fabaceae.

Desde el punto de vista nutricional, las leguminosas se caracterizan por la fijación de nitrógeno al suelo y las gramíneas, por el alto contenido de carbono, atributos esenciales para definir la calidad de la biomasa, y a su vez la velocidad de descomposición de sus residuos Mubvumba *et al.* (2023).

De forma complementaria según Mubvumba *et al.* (2023) las raíces de especies que pertenecen a la familia Brassicaceae, se caracterizan por

penetrar profundamente en el suelo, favoreciendo el movimiento del agua, aire y las lombrices de tierra, además de actuar como

biofumigantes y suprimir las plagas del suelo (Radicetti *et al.*, 2019).

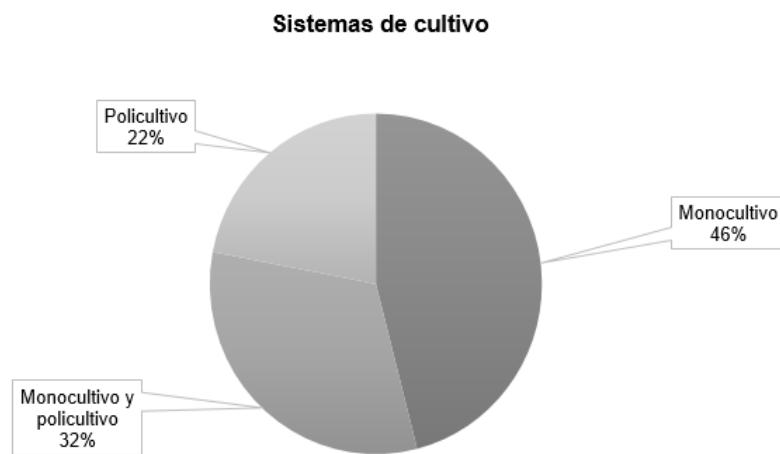


Figura 2. Distribución porcentual de los diferentes sistemas de cultivo.

En esta línea de investigación, De Souza *et al.* (2023) señalan que cada día es más frecuente que los agricultores planten cultivos de cobertura como mezclas de especies diversas, a menudo bajo el supuesto de que las mezclas confieren beneficios mayores o adicionales a la salud del suelo, específicamente en aspectos relacionados a la producción de biomasa y utilización de los recursos, en comparación con la siembra de cultivos de cobertura como monocultivos.

En concordancia con los argumentos descritos anteriormente, la investigación en curso encontró que el uso de mezclas de cultivos de cobertura representa ganancias de COS superiores a las que se dan con el uso de una única especie como cobertura vegetal. Se encontró que se reportan 34 especies utilizadas como cobertura en los ensayos revisados, las que destacan *Secale cereal* L. (20.44%), *Vicia* spp (17.12%), *Raphanus sativus* L. (9.39%), *Avena sativa* L. (6.62%), y *Trifolium incarnatum* L. (5.52%).

Cultivos comerciales

Respecto a este factor, los experimentos se dividieron en dos grupos, el primer grupo comprendió estudios que evaluaron el efecto de cultivos de cobertura sobre la variación de carbono, sin que estos hicieran parte de un

sistema de cultivos intermedios. Es decir, al final de su ciclo se plantaban nuevamente porque el objetivo principal se centraba en estudiar la influencia sobre las propiedades del suelo en un lapso de tiempo determinado, 74% de los casos se clasificó en esta categoría, y estuvo asociado a las pérdidas de COS.

El segundo grupo, con 26% de representación estuvo asociado a las ganancias de COS, en sistemas donde los cultivos cobertura antecedían la siembra de algún cultivo comercial, o bien lo acompañaban durante todo su desarrollo porque además de conocer el impacto sobre la química del suelo, también evaluaban el efecto sobre el rendimiento de las cosechas. Es posible entonces, que las variaciones positivas de COS, estén relacionadas con mayor riqueza de exudados en la rizosfera, considerando que la diversidad de plantas influye en la actividad metabólica de los microbios del suelo y en el almacenamiento de carbono (Eisenhauer *et al.*, 2017, Lange *et al.*, 2015, citados por de Souza *et al.*, 2023).

Tipo de Labranza

La intervención intensiva del suelo es una práctica asociada a las pérdidas de carbono, a largo plazo, la labranza promueve la

compactación del suelo y la formación de una capa de arado que incide en el agotamiento de la materia orgánica del suelo (Fuentes *et al.*, 2009 y Linares *et al.*, 2014, citados por Repullo *et al.*, 2021). Del mismo modo, la labranza rompe los macroagregados por acción física directa y provoca la pérdida de MO a causa de la exposición de las fracciones protegidas dentro de sus estructuras (Culebro-González *et al.*, 2023).

En los ensayos revisados, 32.85% se desarrollaron con prácticas de labranza convencional, y el restante hizo uso de prácticas de labranza cero (44.64%) o conservacionista (22.5%), estos últimos estuvieron relacionados con las ganancias de COS en el suelo; al igual que los resultados encontrados por Centurion *et al.* (2023) donde la labranza reducida aumentó 40% el COS en la capa superior del suelo, en comparación con sistemas que emplearon labranza convencional como práctica agrícola.

Establecimiento del cultivo de cobertura

Las coberturas vegetales que permanecieron en el agro sistema durante todo el ciclo del cultivo comercial representaron 20% del total de los experimentos revisados. Mientras que, el 80% restante de ensayos utilizó los cultivos de cobertura como cultivos intermedios o antecesores cuya interrupción en el crecimiento estuvo sujeta al estado fenológico del mismo, o a la fecha pautada para la siembra del cultivo comercial. Hecho que coincide con lo señalado por Romaniuk *et al.* (2018), quienes señalan que, dado que los suelos desnudos durante el invierno implican una pérdida potencial de recursos que no son aprovechados en la producción, para mitigar estos efectos la introducción de cultivos de cobertura resulta una buena alternativa porque ofrece protección al suelo. De esta manera es más común encontrar que los CC se establecen por períodos de tiempo cortos (estaciones), y no de forma permanente.

Área de evaluación (m^2)

El rango de las parcelas experimentales varió desde $0.9\ m^2$ hasta $6.750\ m^2$ siendo más comunes parcelas pequeñas con dimensiones entre 0 y $500\ m^2$ en 87.5% de los casos, lo cual al ser ensayos experimentales de investigación permiten ser

manejados de manera más eficiente. No se encontró evidencia descriptiva para asociar el tamaño de la parcela con la variación de carbono en el suelo.

Presentación del contenido de carbono

El contenido de carbono orgánico en el suelo fue expresado, como carbono orgánico total (COS) en 74% de los casos, aunque bien comprendió el uso de diferentes unidades, se trató de la misma forma de carbono. De forma particular en este apartado, 4 experimentos evaluaron el contenido de COS en los macroagregados estables (250-2000 μm) a razón del impacto positivo de los CC sobre la estabilidad estructural y contenido de carbono del suelo, específicamente porque conforme la resistencia de los agregados a factores de destrucción externos es mayor, por lo que la tasa de descomposición del carbono disminuye (Topps *et al.*, 2021).

Así mismo, 22% de los ensayos presentaron resultados en unidades de contenido de materia orgánica, hecho justificado dado que este es uno de los indicadores de calidad del suelo más relevantes, según lo descrito por Ramos *et al.* (2020), además la MO. está constituida aproximadamente por 58% de carbono y es sensible a la incorporación de material vegetal al suelo (Ruehlmann, 2020)

Un porcentaje mucho más bajo (2%) mostró resultados en forma de carbono orgánico particulado, basados en que este es un indicador temprano de los efectos de prácticas agrícolas como la labranza y la cobertura vegetal, sobre la fracción lábil del carbono (Martín-Gutiérrez *et al.*, 2023)

Variación del contenido de carbono

La variación de carbono reflejó en 20% de los tratamientos una pérdida de carbono que fluctuó entre -137% y -0.62%, respecto al contenido de COS, antes de la introducción de algún CC. Por otro lado, en 2,23% de los tratamientos no hubo ningún efecto sobre los valores de finales de COS, como resultado el porcentaje de variación fue igual a 0. Respecto al hecho de mayor interés en este caso, es decir, las ganancias de COS después de la incorporación de cobertura

vegetales, los resultados indican que 77.77% de los tratamientos si consiguió mejorar la química del suelo a través de cambios positivos en el contenido final de COS comprendidos en el rango 0.03 % -1.455 %.

Tiempo de evaluación

El tiempo transcurrido para determinar los efectos de CC sobre el contenido, COS tuvo un amplio rango de variación, siendo más frecuente encontrar ensayos cuyo desarrollo tomó entre 3 y 5 años (36.42%) El periodo más corto fue aproximadamente de 45 días, y el más extenso fue equivalente a 13 años. Con relación a este factor, diversos autores consideran que los efectos de los cultivos de cobertura sobre las propiedades del suelo se evidencian después del uso frecuente y permanente en el tiempo.

En ese sentido, Lozano *et al.* (2018) comenta que el uso de cultivos de cobertura produce efectos significativos sobre las propiedades del suelo después de 4 años. Del mismo modo, Sanabria *et al.* (2021), luego de realizar ensayos sobre el tema durante un año, recomiendan para futuras investigaciones precisar el cambio en el contenido de COS, por lo menos después de 3 campañas agrícolas.

Profundidad del suelo a la que se evaluó el contenido de carbono

Los cambios en el contenido de COS tras del uso de coberturas vegetales como práctica agroecológica, son más pronunciados en los primeros centímetros de la superficie del suelo (Blanco *et al.*, 2023). Por lo tanto, no fue extraño encontrar con frecuencia los siguientes rangos en la toma de muestras para pruebas de contenido de carbono: 0 cm – 5 cm, 5 cm - 10 cm, 10 cm – 15 cm y 0 cm – 15 cm.

Información complementaria

Es importante mencionar que además de los efectos ampliamente descritos, respecto al uso de coberturas vegetales sobre las ganancias de carbono en el suelo, los investigadores también estudiaron otros beneficios en su aplicación, como por ejemplo control de plagas y malezas, promoción de suelos supresivos e influencia

directa en la macrofauna del suelo, y regulación positiva del movimiento del agua en el perfil.

Del mismo modo, particularmente un grupo pequeño de ensayos evaluaron la variación de carbono para las fracciones de ácido fúlvico, ácido húmico, masa microbial y asociación a minerales, demostrando que la dinámica del secuestro de carbono guarda relaciones de especificidad para con las diferentes fracciones que componen el suelo, y estas diferencias dan amplitud para reconocer que es un proceso complejo que involucra diferentes componentes del sistema edáfico.

Además de la información de valor científico, un gran número de artículos reseñó la importancia de los componentes social y económico, involucrados con la práctica de cubrir el suelo. En este sentido, se observan grupos de agricultores que se resisten a la adopción de cultivos de cobertura en sus sistemas por el incremento en los costos de producción, otros no muestran interés porque expresan no fiarse de sus beneficios, y a modo un grupo cada vez más creciente obtiene subsidios/recompensas gubernamentales en la medida que logren aumentar el contenido de carbono en el suelo.

Análisis de pruebas no paramétricas

De acuerdo con los resultados, la variación de carbono, la clasificación taxonómica del suelo, y el establecimiento de la cobertura dentro del sistema agrícola, guardan una relación de no independencia, en otras palabras, son dependientes (*p*-value <0.05 $\chi^2 = 24.46$). Lo que plantea que la concentración de carbono en el suelo variara según el origen y contenido de materia orgánica incorporada a lo largo del tiempo, característica propia de la composición específica para cada tipo de suelo (Culebro-González *et al.*, 2023). En este caso es el orden Mollisol, es el más rico en M.O. característico de las praderas y estepas Europa, Asia, Norteamérica y Sudamérica (INTAGRI, 2018).

El establecimiento de la cobertura vegetal dentro del sistema se clasificó en dos categorías permanente y temporal, de modo que esta es una variable relacionada con el tiempo. En este

sentido, es lógico esperar que, para los casos en los que el CC permanece mayor tiempo (años) en el sistema, los efectos sobre la variación de carbono son positivos, comparados con lo que resultan tras cubrir el suelo por 3 ó 4 meses.

Por otro lado, la variación de carbono del suelo muestra ser independiente respecto a textura del suelo, especie vegetal usada como cobertura, y prácticas de labranza (se acepta la hipótesis nula). Los resultados ($p.value < 0.05 \chi^2 > 4$) difieren con lo reseñado en la literatura, pero pueden dar lugar a la siguiente teoría, sin importar las características texturales del suelo, prácticas de labranza o especie vegetal que cubra el suelo.

Los cultivos de cobertura sí tienen un efecto en las ganancias de COS que se basa solo en su práctica ininterrumpida a lo largo del tiempo; así lo describe también Bolinderet *et al.* (2020) citado por Scaglione *et al.* (2023) exponiendo que el incremento en el contenido de COS a razón del uso de coberturas vegetales depende, entre otros factores, del aporte de materiales orgánicos por parte de los mismos y su efecto acumulado a lo largo del tiempo.

Modelo mixto

El análisis del modelo mixto planteado, muestra que la variable explicativa tiempo es la única (para este caso puntual) que impacta en el comportamiento de la variable variación en el contenido de carbono ($p.value < 0.05$), bajo una interacción que no se debe al azar, es decir, es estadísticamente significativa. Los test de Durbin-Watson (0.8) y Jarque-Bera (74676.55) dejan ver que los datos tienen autocorrelación positiva y distribución atípica, respectivamente.

De esta manera, nuevamente los resultados sugieren que es el tiempo la variable con mayor influencia en la variación de carbono, cuando se utilizan coberturas vegetales para reemplazar el barbecho o proteger al suelo desnudo. En este orden de ideas, Chalise *et al.* (2018), indican que en algunas situaciones pasan varios años antes de que los cultivos de cobertura comiencen a mostrar impactos beneficiosos sobre el COS y otras propiedades del suelo, por lo que se

necesita de evaluaciones a largo plazo para cuantificar sus efectos. El mismo autor, pero en un estudio más reciente Blanco-Canqui *et al.* (2023) afirma nuevamente que incluso las propiedades del suelo más sensibles a las prácticas conservacionistas como materia orgánica pueden no cambiar rápidamente después de la adopción de cultivos de cobertura.

CONCLUSIONES

El secuestro de carbono en el suelo, mediante el uso de cultivos de cobertura, es una práctica conservacionista que proporciona diversos beneficios en su práctica, tales como proteger al suelo de efectos erosivos, mejorar las propiedades del suelo, reducir los efectos del cambio climático, y en definitiva aumentar el contenido de carbono orgánico en el suelo. Los artículos científicos revisados así lo demuestran, pues todos presentaron datos e información de este tipo.

La información extraída de cada uno él se compiló de forma tabulada para conseguir tener una ordenación específica que facilitara el tratamiento estadístico. A nivel descriptivo fue común encontrar relaciones de ganancia y perdida de COS, las mismas se establecieron luego de separar los datos revisados en dos categorías variaciones positivas y variaciones negativas, compararlas detalladamente y traducir dichos datos a formas porcentuales. Para este apartado la variación positiva de carbono se relacionó con: del uso de mezclas de cultivos de cobertura, labranza conservacionista o cero, establecimiento permanente del CC y profundidades de 0 y 5 cm.

La aplicación de test estadísticos de pruebas, tanto paramétricas como no paramétricos, dio lugar a establecer relaciones de dependencia para las variables de orden del suelo y tiempo. De esta manera se determinó que la variación de carbono, está relacionada con la composición u origen del suelo, es decir, que está influenciada por los valores iniciales o propios de materia orgánica para cada tipo de suelo. Respecto a la variable tiempo, fue el factor que mostró influir de forma más acentuada en las ganancias de

carbono, pues los efectos concretos y significativos del secuestro de carbono tras introducir cultivos de cobertura al suelo, se evidencia y se cuantifican de manera precisa cuando han transcurrido al menos 4 años desde su aplicación; esta además de ser una afirmación propia, coindice con lo expuesto por investigadores expertos en el tema.

REFERENCIAS

- Abad, J., Marín, D., Imbert, B., Virto, I., Garbisu, C. y Santesteban, G. (2023). Under-vine cover crops: Impact on physical and biological soil properties in an irrigated Mediterranean vineyard. *Scientia Horticulturae*, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111797>. 311.
- Abán, C., Larama, G., Ducci, A., Huidobro, J., Abanto, M., Vargas, S. y Pérez, C. (2023). Soil Properties and Bacterial Communities Associated with the Rhizosphere of the Common Bean after Using Brachiaria brizantha as a Service Crop: A 10-Year Field Experiment. *Sustainability* (Switzerland), <https://doi.org/10.3390/su15010488>. 15(1).
- Angeli, A. R., Bert, F. E., Díez-Amigo, S., Soares, Y., Chaij, J. M., Martini, G. D., Montané, F.M., Pardo Vegezzi, A. & Schmidt, F. (2022). Crop Rotation and Climate Change Adaptation in Argentina's Agriculture Sector. In Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.790>
- Blanco-Canqui, H., Ruis, J., Koehler-Cole, K., Elmore, W., Francis, A., Shapiro, A., Proctor, A. y Ferguson, B. (2023). Cover crops and soil health in rainfed and irrigated corn: ¿What did we learn after 8 years? *Soil Science Society of America Journal*, <https://doi.org/10.1002/saj2.20566>. 87(5): 1174-1190.
- Brewer, M., Kanissery, G., Strauss, L. y Kadyampakeni, D. (2023). Impact of Cover Cropping on Temporal Nutrient Distribution and Availability in the Soil. *Horticulturae*, <https://doi.org/10.3390/horticulae9101160> 9(10).
- Büchi, L., Wendling, M., Amossé, C., Necpalova, M. y Charles, R. (2018). Importance of cover crops in alleviating negative effects of reduced soil tillage and promoting soil fertility in a winter wheat cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.005>. 256: 92-104.
- Burbano, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, [https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85.35\(1\):82](https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85.35(1):82)
- Cazorla, C., Cisneros, J., y Moreno, I. (2017) Mejora en el carbono del suelo y estabilidad de agregados por fertilización y cultivos de cobertura. *Ciencia Del Suelo Argentino*, 35(2): 301-313. ISSN 1850-2067
- Centurión, N., Mariscal I., Navas, M., Gabriel, J. L., Ulcuango, K., Ibáñez, M., Moliner, A. y Hontoria, C. (2023). Increasing Legume Input through Interseeding Cover Crops: Soil and Crop Response as Affected by Tillage System. *Agronomy*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy13051388>
- Chalise, K., Singh, S., Wegner, B., Kumar, S., Pérez, J., Osborne, S., Nleya, T., Guzman, J. y Rohila, J. (2019). Cover crops and returning residue impact on soil organic carbon, bulk density, penetration resistance, water retention, infiltration, and soybean yield. *Agronomy Journal*, <https://doi.org/10.2134/agronj2018.03.0213>. 111(1): 99-108.
- Crotty, F. y Stoate, C. (2019). The legacy of cover crops on the soil habitat and ecosystem services in a heavy clay, minimum tillage rotation. *Food and Energy Security*. <https://doi.org/10.1002/fes3.169>. 8(3)
- Culebro-González, S. G., Reyes, A. C., Paradela, T. M. R., Paz-Tenorio, J., & López, L. S. (2023). Análisis espacio-temporal de la vegetación y uso de suelo para la zona sur de la reserva biosfera selva “el ocote” y su área adyacente, en Chiapas, México. *Papeles de Geografía*. <https://doi.org/10.6018/geografia.590711>. (69).
- Decker, L., Gamble, A., Balkcom, K., Johnson, A. y Hull, N. (2022). Cover crop

- monocultures and mixtures affect soil health indicators and crop yield in the southeast United States. *Soil Science Society of America Journal*, <https://doi.org/10.1002/saj2.20454>. 86(5):1312-1326.
- De Mello Frasca, L., Rezende, C., Silva, A., Lanna, A. y Nascente, A. (2023). Effect of bioagents and cover crops on soil attributes and common bean plant development. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 53. <https://doi.org/10.1590/1983-40632023v537 6044>
- De Souza, I., Daly, B., Schnecker, J., Warren, D., Lobo, A., Smith, G., Brito, F. y Grandy, A. (2023). Short-term responses of soil carbon, nitrogen, and microbial biomass to cover crop mixtures and monocultures. *Agrosystems, Geosciences and Environment*. <https://doi.org/10.1002/agg2.20395>. 6(3).
- Fernández, R., Alvarez, C., Eggmann, O., y Quiroga, A. (2020). Effect of cover crop use on a continuous soybean sequence in the pampean semiarid region. *Semiárida Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam*, [https://doi.org/10.19137/semiarida.2020\(02\).37-49](https://doi.org/10.19137/semiarida.2020(02).37-49). 30(2): 37-49.
- Gattullo, C. E., Mezzapesa, G. N., Stellacci, A. M., Ferrara, G., Occhiogrosso, G., Petrelli, G., Castellini, M. y Spagnuolo, M. (2020). Cover crop for a sustainable viticulture: Effects on soil properties and table grape production. *Agronomy*, <https://doi.org/10.3390/agronomy10091334>. 10(9).
- Ghimire, R., Ghimire, B., Mesbah, O., Sainju, U. M. y Idowu, J. (2019). Soil health response of cover crops in winter wheat-fallow system. *Agronomy Journal*, 111(4): 2108-2115. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.08.0492>
- González, H. M., Restovich, S. B., y Portela, S. I. (2017). Utilización de cultivos de cobertura invernales como alternativa para mejorar la estabilidad estructural del suelo. *Ciencia del suelo*, 35(1): 1-10. ISSN 0326-3169
- Hilton, R. G., & West, A. J. (2020). Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nature Reviews Earth & Environment*, <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0058-6>. 1(6): 284-299.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2021). La agricultura tropical de América Latina y el Caribe en la cumbre de los sistemas alimentarios de las Naciones Unidas. <http://www.iica.int>.
- INTAGRI. (2018). Clasificación del Suelo: WRB y Soil Taxonomy <https://www.intagri.com/articulos/suelos/clasificacion-del-suelo-WRB-y-soil-taxonomy>
- Johnson, A. M., Gamble, A. V., Balkcom, S. y Hull, N. (2021). Influence of cover crop mixtures on soil health in southeastern crop production systems. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, [https://doi.org/10.1002/agg2.20202.4\(3\)](https://doi.org/10.1002/agg2.20202.4(3)).
- Khan, R., Farooque, A., Brown, P., Zaman, U., Acharya, B., Abbas, F. y McKenzie-Gopsill, A. (2021). The role of cover crop types and residue incorporation in improving soil chemical properties. *Agronomy*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy1102091>
- Kuneski, C., Loss, A., Ventura, S., Santos, S., Giumbelli, D., Lima, P., Piccolo, M., Torres, R., Brunetto, G., Kurtz, C., Lourenzi, R. y Comin, J. J. (2023). Effects of Tillage and Cover Crops on Total Carbon and Nitrogen Stocks and Particle-Size Fractions of Soil Organic Matter under Onion Crop. *Horticulturae*, <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070822>. 9(7).
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2004.01.032>. 123(1-2): 1-22.
- Landriscini, R., Duval, E., Galantini, A., Iglesias, O., y Cazorla, R. (2020). Changes in soil organic carbon fractions in a sequence with cover crops. *Spanish Journal of Soil Science*, [https://doi.org/10.3232/SJSS.2020.V10.N2.03.10\(2\)137-153](https://doi.org/10.3232/SJSS.2020.V10.N2.03.10(2)137-153).
- LaCanne, E. & Lundgren, G. (2018). Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ*, 6, e4428. <https://doi.org/10.7717/peerj.4428>.
- Lozano, Z., Bravo, C., Rivero, C., Hernández, R., Mora, R. y Aular, L. (2018). Efecto de los

- cultivos de cobertura sobre la materia orgánica y la estabilidad estructural de un suelo de sabana bajo sistemas de manejo conservacionista. -ISSN 1856-5573
- Martín-Gutiérrez, G., Pablos-Reyes, P., Cobo-Vidal, Y., Villazón-Gómez, J. A., & Serrano-Gutiérrez, A. (2023). Efecto de diferentes tipos de uso de la tierra en las fracciones del carbono orgánico del suelo. *Pastos y Forrajes*, 46. ISSN 2078-8452
- Martínez, E., Fuentes, J. P. y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo soil organic carbon and soil properties. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>.
- Mubvumba, P., DeLaune, P. B. y Hons, F. M. (2023). Grazing summer cover crops mix impact on carbon[nitrogen] cycling, soil water, and wheat yields. *Soil Security*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100107>
- Muchanga, R. A., Hirata, T., Uchida, Y., Hatano, R. y Araki, H. (2020). Soil carbon and nitrogen and tomato yield response to cover crop management. *Agronomy Journal*, <https://doi.org/10.1002/agj2.20098>. 12(3): 1636-1648.
- Nascente, A. y Stone, L. (2018). Cover Crops as Affecting Soil Chemical and Physical Properties and Development of Upland Rice and Soybean Cultivated in Rotation. *Rice Science*, <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.10.004>. 25(6): 340-349.
- Novara, A., Catania, V., Tolone, M., Gristina, L., Laudicina, V. A. y Quatrini, P. (2020). Cover crop impact on soil organic carbon, nitrogen dynamics and microbial diversity in a mediterranean semiarid vineyard. *Sustainability* (Switzerland), 12(8). <https://doi.org/10.3390/SU12083256>
- Peregrina, F. (2019). Soil carbon content and its stratification at the medium-term (5 and 8 years) in a semiarid vineyard with cover crops. *Spanish Journal of Soil Science*, [https://doi.org/10.3232/SJSS.2019.V9.N2.01.9\(2\)63-70](https://doi.org/10.3232/SJSS.2019.V9.N2.01.9(2)63-70).
- Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Regenerative agriculture—A literature review on the practices and mechanisms used to improve soil health. *Sustainability*, <https://doi.org/10.3390/su15032338>. 15(3), 2338.
- Pokhrel, S., Kingery, W. L., Cox, M. S., Shankle, M. W. y Shanmugam, S. G. (2021). Impact of cover crops and poultry litter on selected soil properties and yield in dryland soybean production. *Agronomy*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy11010119>
- Qi, G., Chen, S., Ke, L., Ma, G. y Zhao, X. (2020). Cover crops restore declining soil properties and suppress bacterial wilt by regulating rhizosphere bacterial communities and improving soil nutrient contents. *Microbiological Research*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126505>.
- Radicetti, E., Osipitan, A., Langeroodi, R., Marinari, S. y Mancinelli, R. (2019). Co₂ flux and c balance due to the replacement of bare soil with agro-ecological service crops in mediterranean environment. *Agriculture (Switzerland)*, <https://doi.org/10.3390/agriculture9040071>. 9(4).
- Ramos, M., da Silva, G., de Carvalho. M., Malaquias, V., de Oliveira, D., de Sousa, R. y Silva, B. (2020). Carbon fractions in soil under no-tillage corn and cover crops in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.PAB2020.V55.01743>. 55: 1-9.
- Repullo-Ruibérriz de Torres, M.A., Moreno-García, M., Ordóñez-Fernández, R., Rodríguez-Lizana, A., Cárcelos Rodríguez, B., García-Tejero, I.F., Durán Zuazo, V.H. y Carbonell-Bojollo, R.M. (2021) Cover Crop Contributions to Improve the Soil Nitrogen and Carbon Sequestration in Almond Orchards (SW Spain). *Agronomy*. 2021; <https://doi.org/10.3390/agronomy11020387>. 11(2):387.
- Rigon, J. P. G., Franzluebbers, A. J. y Calonego, J. C. (2020). Soil aggregation and potential carbon and nitrogen mineralization with cover crops under tropical no-till. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(5), 601-609. <https://doi.org/10.2489/jswc.2020.00188>
- Rittl, T. F., Grønmyr, F., Bakken, I. y Løes, A. K. (2023). Effects of organic amendments and cover crops on soil characteristics and

- potato yields. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, <https://doi.org/10.1080/09064710.2023.2165963>. 73(1): 13-26.
- Romaniuk R, N. R., Beltran M, Eiza M, Castiglioni M y Mousegne F. (2018). Efecto a corto plazo de la inclusión de vicia y trigo como cultivos de cobertura sobre el C, N y P en distintas fracciones de la materia orgánica, y la disponibilidad de macro y micronutrientes. *Revista de investigaciones agropecuarias*, 2: 48-60. ISSN 0325-8718
- Rorick, J. D. y Kladivko, E. J. (2017). Cereal rye cover crop effects on soil carbon and physical properties in southeastern Indiana. *Journal of Soil and Water Conservation*, <https://doi.org/10.2489/jswc.72.3.260>. 72(3):260-265.
- Ruehlmann, J. (2020). Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 1. Partitioning of SOM in conceptional fractions and derivation of a variable SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114542>. 375: 114542.
- Sainju, U. M., Singh, H. P., Singh, B. P., Chiluwal, A. y Paudel, R. (2018). Soil Carbon and Nitrogen under Bioenergy Forage Sorghum Influenced by Cover Crop and Nitrogen Fertilization. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, (en línea) <https://doi.org/10.2134/age2018.03.0004>. 1(1): 1-10.
- Salcedo S., Canihua, J., Samaniego, T., Cruz-Luis J., Pérez, W. y Cosme, R. (2022). Cover crops associated with quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) in the Peruvian Altiplano: Erosion reduction, improved soil health and agricultural yield. *Scientia Agropecuaria*, <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.024>. 13(3):265-274.
- Sanabria Q., Mendoza D., Sangay-Tucto, S. y de la Cruz C. (2021). Use of cover crops for sustainable soil management associated with corn (*Zea mays* L.) cultivation. *Scientia Agropecuaria*, <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.036>. 12(3): 329-336.
- Sánchez, I., Fultz, L. M., Lofton, J. y Haggard, B. (2019). Cover Crops Impacts on Louisiana Corn Production and Soil Properties. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, <https://doi.org/10.2134/age2019.03.0012>. 2(1):1-8.
- Saynes, V., Etchevers, B., Paz., F. y Alvarado, L. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México Greenhouse Gas Emissions in Agricultural Systems in México. ISSN 2395-8030.
- Scaglione, J., Montico, S. y Montero, G. (2023). Efectos a corto plazo de los cultivos de cobertura sobre propiedades y macrofauna del suelo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3645>. 10(2).
- Scavo, A., Restuccia, A., Abbate, C., Lombardo, S., Fontanazza, S., Pandino, G., Anastasi, U. y Mauromicale, G. (2021). *Trifolium subterraneum* cover cropping enhances soil fertility and weed seedbank dynamics in a Mediterranean apricot orchard. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(6). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00721-z>
- Schaefer, M. V., Bogie, N. A., Rath, D., Marklein, A. R., Garniwan, A., Haensel, T., Lin, Y., Avila, C. C., Nico, P. S., Scow, K. M., Brodie, E. L., Riley, W. J., Fogel, M. L., Berhe, A. A., Ghezzehei, T. A., Parikh, S., Keiluweit, M. y Ying, S. C. (2020). Effect of cover crop on carbon distribution in size and density separated soil aggregates. *Soil Systems*, <https://doi.org/10.3390/soilsystems4010006>. 4(1): 1-18.
- Sharifi, M., y Hajiaghaei-Kamrani, M. (2023Ra). Biochar-compost mixture and cover crop effects on soil carbon and nitrogen dynamics, yield, and fruit quality in an irrigated vineyard. *Canadian Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1139/cjss-2021-0147>. 103(1): 200-212. 103(1): 200-212.
- Struik, P. C. y Kuyper, T. W. (2017). Sustainable intensification in agriculture: the richer shade of green. A review. En *Agronomy for Sustainable Development* Springer-Verlag France. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0445-7>. 37(5).
- Thapa, V. R., Ghimire, R. y Marsalis, M. A. (2021). Cover crops for resilience of a limited-irrigation winter wheat-sorghum-

- fallow rotation: Soil carbon, nitrogen, and sorghum yield responses. *Agronomy*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy11040762>
- Topps, D., Khabir, M. I. U., Abdelmagid, H., Jackson, T., Iqbal, J., Robertson, B. K., Pervaiz, Z. H. y Saleem, M. (2021). Impact of cover crop monocultures and mixtures on organic carbon contents of soil aggregates. *Soil Systems*, <https://doi.org/10.3390/soilsystems5030043>. 5(3).
- Tyler, H. L. (2021). Single-versus double-species cover crop effects on soil health and yield in Mississippi soybean fields. *Agronomy*, <https://doi.org/10.3390/agronomy11112334>. 11(11): 2334.
- Villarreal, A., Lozano, M., Polich, N., Paz, M., Bellora, G. y Soracco, C. (2021) Short-term effects of cover crop inclusion under no-tillage management on soil physical quality cobertura bajo siembra directa sobre la calidad física del suelo. *Ciencia del suelo Argentina* 39(2). ISSN 0326-3169.
- Wang, F., Li, W., Chen, H., Weil, R. R., Zhu, L. y Nan, X. (2023). Forage Radish Cover Crops Improve Soil Quality and Fruit Yield of *Lycium barbarum* L. in an Arid Area of Northwest China. *Agronomy*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy13061634>
- Wratten, S. D., Shields, M. W. y González-Chang, M. (2019). Prospects for regenerative agriculture in Chile. *Agro Sur*, <https://doi.org/10.4206/agrosur.2019.v47n2-01>. 47(2): 1-6.
- Zhang, Z., Kaye, J. P., Bradley, B. A., Amsili, J. P. y Suseela, V. (2022). Cover crop functional types differentially alter the content and composition of soil organic carbon in particulate and mineral-associated fractions. *Global Change Biology*, <https://doi.org/10.1111/gcb.16296>. 28(19):5831-5848.