



Universidad de Jaén

Facultad de Ciencias
Experimentales

Stocks de carbono orgánico protegido en olivares con prácticas de manejo contrastadas

Autor: María Teresa Heras Linares

Grado: Biología

Fecha: 02/07/2024



CREA



Universidad de Jaén



Trabajo Fin de Grado

Stocks de carbono orgánico protegido en olivares con prácticas de manejo contrastadas

Alumno/a: María Teresa Heras Linares

Jaén, Julio, 2024

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. El carbono orgánico del suelo como estrategia para la mitigación contra el cambio climático.	2
1.2. Estrategias para el secuestro del carbono.	4
1.3. Cambio en las prácticas de manejo del olivar.	4
1.4. La cubierta vegetal en el olivar.	6
1.5. Efecto de la cubierta vegetal en la protección de carbono en el suelo. ...	6
2. HIPÓTESIS	8
3. OBJETIVOS	9
4. MATERIAL Y MÉTODOS	9
4.1. Diseño experimental.....	9
4.2. Selección de las fincas de olivar	10
4.3. Toma de muestra.....	13
4.3.1. Toma de muestra de suelo	13
4.3.2. Preprocesamiento.....	13
4.4. Fraccionamiento físico en húmedo por tamaño de partícula.....	14
4.5. Análisis del contenido en carbono orgánico.....	15
5. RESULTADOS.....	17
5.1. Contenido de carbono orgánico no protegido	17
5.2. Contenido de las fracciones protegidas (físicamente y químicamente)	20
5.2.1. Contenido de las fracciones protegidas físicamente (53-250 μm)	20
5.2.2. Contenido de las fracciones protegidas químicamente (<53 μm).....	22
6. DISCUSIÓN.....	24
6.1. El papel de la cubierta vegetal espontánea en el aporte anual de carbono orgánico en el suelo en olivares.	24
6.2. Los restos de cubierta vegetal aumentaron la cantidad de carbono orgánico en el suelo.....	25
6.3. El papel de la cubierta vegetal en el incremento en los contenidos en carbono orgánico no protegido.	26
6.4. El papel de la cubierta vegetal en el incremento en los contenidos en carbono orgánico protegido.....	27
7. CONCLUSIONES.....	28
8. BIBLIOGRAFÍA.....	29

RESUMEN

El suelo desempeña un papel importante en la mitigación del cambio climático, ya que puede actuar como un gran sumidero de CO₂ atmosférico almacenando éste en forma de carbono orgánico en el suelo (COS). Este estudio se centra en las estrategias de manejo en el olivar destinadas a incrementar las reservas de COS enfatizando la importancia de prácticas como la agricultura de carbono. Se ha analizado el COS y sus fracciones (carbono orgánico no protegido y carbono orgánico física y químicamente protegido) en 13 pares de fincas. En un olivar de cada par, se ha implementado la cubierta vegetal durante al menos 8 años, mientras que el otro olivar no lo hizo. Tanto la densidad de carbono orgánico como el contenido en las fracciones de carbono no protegido, físicamente y químicamente protegidos, fueron significativamente superiores en los suelos con cubierta vegetal. Por lo tanto, este estudio demuestra que la cubierta vegetal es una adecuada estrategia para almacenar carbono orgánico en los suelos del olivar, intensificando su papel en la mitigación del cambio climático.

Palabras Clave: Carbono orgánico del suelo, cubierta vegetal, secuestro de carbono, fracciones de carbono orgánico del suelo.

ABSTRACT

Soil plays an important role in mitigating climate change, as it can act as a major sink for atmospheric CO₂ by storing it as soil organic carbon (SOC). This study focuses on management strategies in olive groves aimed at increasing SOC reserves, emphasizing the importance of practices such as carbon farming. SOC and its fractions (unprotected organic carbon and physically and chemically protected organic carbon) were analyzed in 13 pairs of farms. In one olive grove of each pair, vegetative cover was implemented for at least 8 years, while the other olive grove did not. Both the density of organic carbon and the content in the fractions of unprotected, physically, and chemically protected carbon were significantly higher in soils with vegetative cover. Therefore, this study demonstrates that vegetative cover is an effective strategy for storing organic carbon in olive grove soils, enhancing their role in mitigating climate change.

Keywords: Organic soil carbon, cover crop, carbon sequestration, soil organic carbon fractions.

INTRODUCCIÓN

Los suelos constituyen el mayor reservorio de carbono (C) del total de carbono terrestre (Lal, 2004). Por lo tanto, un aumento o una disminución relativamente pequeña en el contenido de carbono del suelo debido a cambios en el uso del suelo o prácticas de manejo, puede resultar en un intercambio neto significativo de carbono entre el reservorio del suelo y la atmósfera (Houghton, 2003).

Los agroecosistemas tienen un alto potencial para la acumulación de carbono orgánico del suelo (COS). En los ecosistemas naturales, la concentración de COS tiende a alcanzar un estado casi constante a largo plazo, ya que las entradas y salidas de carbono orgánico son similares, lo que resulta en cambios mínimos en la concentración de COS. Sin embargo, esto no ocurre en los agroecosistemas (Dumanski & Lal, 2004), dónde a través de la implementación de prácticas de manejo adecuadas, la reserva de carbono orgánico en el suelo puede aumentar.

1.1. El carbono orgánico del suelo como estrategia para la mitigación contra el cambio climático.

El carbono orgánico del suelo (COS) es el principal elemento de la materia orgánica, siendo fundamental en los procesos que ocurren en el suelo así como de su calidad, ya que mejora su estructura, fertilidad y capacidad de almacenamiento de agua, siendo por ello ampliamente aceptado como un indicador de calidad del suelo (Podmanicky et al., 2011).

El COS presente en los suelos agrícolas representa aproximadamente el 10% del carbono orgánico total almacenado en todos los suelos en la superficie de la tierra (Paustian et al., 1997). En lo que respecta a España, los datos de los que se disponen, indican que en los primeros 30 cm, los suelos agrícolas (cultivos anuales y cultivos leñosos) acumulan el 31,9% del COS total nacional (Rodríguez Martín et al., 2016). Como consecuencia del cambio de ecosistemas naturales a ecosistemas agrarios, el contenido de carbono orgánico ha ido reduciéndose entre un 25% y un 75% por procesos de degradación (Lal, 2011).

El COS actúa como un gran sumidero de CO₂ atmosférico al almacenar carbono de forma prolongada en el suelo, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático al reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera. Este proceso también beneficia los ecosistemas al mejorar la calidad del suelo, aumentando la retención de agua y nutrientes, y promoviendo la biodiversidad. Además, el aumento en el stock de COS se ha asociado con mejoras significativas en el rendimiento de los cultivos, especialmente en suelos con bajos niveles de carbono orgánico, lo que puede ser crucial para la seguridad alimentaria y el bienestar humano a largo plazo (Lal, 2004).

En 2021, la Comisión Europea comenzó a promover la agricultura de carbono en el sector agrícola. La reciente iniciativa de agricultura de carbono se derivó de dos estrategias importantes del Pacto Verde Europeo (COM//640, 2019): la estrategia "de la granja al tenedor" (COM//381, 2020) y el nuevo período de la Política Agrícola Común PAC 2023-2027 (Reglamento (UE) 2021/2115)). La iniciativa tiene como objetivo promover prácticas que almacenen carbono (C) a largo plazo en el suelo y en la biomasa, lo cual tiene varios efectos positivos: 1) la mejora de la salud del suelo, lo que a su vez promueve la productividad de los cultivos; 2) la eliminación neta de CO₂ atmosférico y el almacenamiento posterior del carbono como carbono orgánico en la biomasa sobre o bajo el suelo y en los suelos agrícolas; 3) la evitación de futuras emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, así como su reducción (Torrús-Castillo et al., 2023).

Así, los responsables de políticas se enfrentan al desafío de desarrollar e implementar estrategias efectivas de aumento del carbono orgánico del suelo (COS) para la agricultura, lo cual requiere la identificación de las mejores prácticas de manejo para cada agroecosistema. Se conocen varias estrategias de manejo agrícola que secuestran carbono en el suelo al aumentar las entradas de carbono al suelo y mejorar diversos procesos del suelo que protegen el carbono contra la descomposición microbiana (Six et al., 2002a).

1.2. Estrategias para el secuestro del carbono.

El secuestro de carbono consiste en transferir el CO₂ de la atmósfera a depósitos de larga duración y almacenarlo de forma segura para evitar su reemisión inmediata.

El secuestro de carbono orgánico del suelo (COS) se ha considerado como una posible solución para mitigar el cambio climático, al tomar CO₂ atmosférico y convertirlo en carbono de larga duración. Dado que el suelo almacena de dos a tres veces más carbono que la atmósfera, un aumento relativamente pequeño en las reservas podría desempeñar un papel significativo en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (Batjes, 1996).

Una de las principales estrategias para reducir las emisiones, es la denominada “agricultura de carbono”. Esto se refiere a una serie de prácticas de uso del suelo y manejo de la tierra diseñadas para reducir las emisiones de las actividades agrícolas o secuestrar carbono, en sumideros naturales como el suelo y la vegetación (Smith et al., 2008). Contiene una amplia variedad de soluciones basadas en la naturaleza (NbCS), como cultivos de cobertura, rotaciones mejoradas, incorporación de residuos de poda provenientes de trituradoras, aplicación de estiércol, restauración de turberas y expansión de sistemas agroforestales, entre otros (Mrunalini et al., 2022).

En el estudio realizado por Torrús-Castillo et al. (2023) los balances de carbono orgánico del suelo en olivares con NbCS como son uso de cultivos de cobertura espontáneos temporales, la aplicación de residuos de poda de árboles mediante trituración y de orujo de aceituna compostado, fueron todos positivos, mientras que este no fue el caso para los olivares sin NbCS.

1.3. Cambio en las prácticas de manejo del olivar.

Olea europaea L. es el cultivo perenne más importante en la cuenca del Mediterráneo. Ocupa alrededor de 10 millones de hectáreas y da forma a la vida socioeconómica y cultural de muchos pueblos (Loumou & Giourga, 2003). Además, los olivares configuran los paisajes rurales naturales de muchas áreas en España, Italia, Portugal y Grecia. Andalucía, la región más meridional de

España, es el mayor productor de aceite de oliva del mundo, y aproximadamente el 47% de sus tierras cultivables están dedicadas a los olivares (MAPA, 2020). En las últimas décadas, el cultivo de olivos se ha convertido en un ejemplo paradigmático de expansión territorial y concentración, con una clara tendencia hacia el monocultivo (Ortega et al., 2020). Esto ha resultado en paisajes simplificados con una capacidad relativamente baja para proporcionar servicios ecosistémicos, aparte de la producción de aceitunas (Torrús-Castillo et al., 2022)

En un pasado reciente, la mayoría de los olivares mediterráneos se cultivaban en condiciones de secano y con sistemas de manejo de baja densidad (<100 plantas/ha) (Tous et al., 2010), aprovechando principalmente áreas marginales caracterizadas por suelos poco profundos y terrenos escarpados que no podían ser utilizados fácilmente para otros cultivos (Loumou & Giourga, 2003).

No obstante, un reciente aumento en la demanda global de alimentos, la falta de mano de obra y otras limitaciones socioeconómicas, como la necesidad de aumentar la rentabilidad, están promoviendo una transición hacia sistemas de cultivo intensivos (200–500 plantas/ha) o incluso superintensivos (hasta 2500 plantas/ha). Por lo tanto, la rentabilidad del cultivo a través de la reducción de costos por unidad de rendimiento es la principal razón para el cambio en el manejo del cultivo (Fraga et al., 2020).

Como resultado, la erosión ha sido una fuente histórica de degradación ambiental en los olivares, la cual se ha exacerbado por el proceso de intensificación (Vanwalleghe et al., 2011). La erosión del suelo no solo significa la pérdida de la fracción inorgánica del suelo, sino también la pérdida de materia orgánica del suelo, que es un importante reservorio de carbono orgánico, nutrientes y valiosa biota del suelo (Zuazo et al., 2020). Por lo tanto, la erosión del suelo es una gran amenaza para la sostenibilidad económica del olivar, ya que impacta negativamente en la fertilidad del suelo (Liu et al., 2021).

1.4. La cubierta vegetal en el olivar.

La cubierta vegetal en los olivares está compuesta principalmente por vegetación natural que emerge espontáneamente en otoño e invierno a lo largo de las calles del olivar, cubriendo aproximadamente hasta un tercio de la superficie (Vicente-Vicente et al., 2017a). La implementación de vegetación natural espontánea también ofrece otros servicios ecosistémicos con beneficios para los agricultores y la sociedad, ya que puede contribuir significativamente a la retención de nutrientes en los olivares (Torrús-Castillo et al., 2022), aumentar la biodiversidad (López-Vicente et al., 2021) incrementar la fertilidad del suelo y el estado nutricional de las plantas (Scavo et al., 2022), reducir las pérdidas de agua y suelo, y aumentar los niveles de materia orgánica (Cerdà et al., 2021). Además, hace una contribución a la agricultura de carbono aumentando el carbono orgánico del suelo y reduciendo pérdidas de carbono.

Recientemente se encontró que la cubierta vegetal en cultivos leñosos (olivares, almendros y viñedos) contribuyó significativamente a la acumulación de SOC con tasas anuales promedio de 1.1 t C ha^{-1} (Vicente-Vicente et al., 2016).

1.5. Efecto de la cubierta vegetal en la protección de carbono en el suelo.

La materia orgánica del suelo, compuesta mayoritariamente por carbono orgánico, es extremadamente diversa en términos de composición química.

Según la capacidad del carbono orgánico del suelo (COS) de ser retenido a largo plazo mediante mecanismos de estabilización o protección, Six et al. (2002b) clasificaron el COS en protegido y no protegido. El carbono orgánico no protegido está asociado a los residuos vegetales frescos, que se encuentran principalmente en la superficie del suelo, aunque también pueden hallarse en capas más profundas. El COS protegido puede clasificarse en tres tipos según el mecanismo de protección: químicamente, físicamente y bioquímicamente protegido. El COS físicamente protegido se encuentra dentro de los microagregados del suelo, el químicamente protegido está asociado a las

partículas de limo y arcilla mediante enlaces minerales químicos y el bioquímicamente protegido depende de las características bioquímicas del material vegetal original y de las reacciones de complejación y condensación que ocurren durante la descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS). Estas fracciones de COS protegidas, están resguardadas de la acción de los microorganismos del suelo, y su concentración relativa en un suelo específico está estrechamente relacionada con la prevalencia de mecanismos de estabilización/protección.

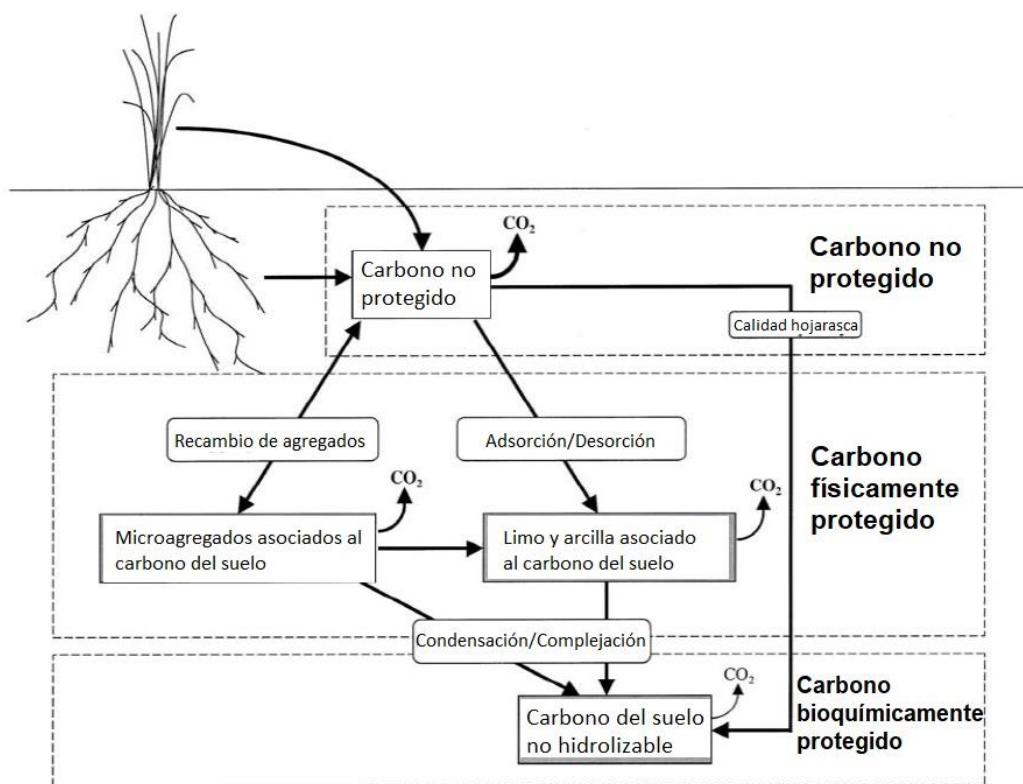


Figura 1. Modelo conceptual de la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOS) con pools medibles. Los procesos del suelo de formación/degradación de agregados, adsorción/desorción de MOS y condensación/complejación de MOS, junto con la calidad de la hojarasca de la MOS, determinan la dinámica de los pools de MOS (Six et al., 2002b).

La cantidad de residuos vegetales y el grado de descomposición del COS, son factores clave en la formación y estabilización de los agregados, los cuales a su vez mejoran la estructura del suelo y promueven el secuestro de COS (Haynes & Beare, 1997). La protección física del carbono orgánico por parte de los

agregados (Denef et al., 2007) y la estabilización fisicoquímica se consideran mecanismos importantes de estabilización del COS (García-Franco et al., 2014). El estudio de diferentes fracciones de COS protegidas es un elemento clave en la evaluación fiable de la dinámica del carbono del suelo y puede utilizarse como indicador temprano de los cambios en el suelo causados por prácticas de manejo (Six et al., 2002b). Investigaciones como la de Vicente-Vicente et al. (2017a), demostraron que las cubiertas vegetales inducen un cambio en el contenido de las diferentes fracciones de COS en el suelo del olivar en Andalucía. En concreto, estos autores observaron que las cubiertas vegetales temporales espontáneas aumentaron el COS, especialmente la fracción gruesa no protegida, y el COS físicamente y químicamente protegido de los primeros 15 cm de suelo.

Por otro lado, sabemos que existe una capacidad limitada por parte del COS para estabilizarse, lo que se conoce como saturación del carbono del suelo (Stewart et al., 2007). A medida que los niveles de COS se acercan a este punto de saturación, la tasa de aumento de las reservas de COS disminuye incluso con mayores tasas de entrada de carbono. Aunque la saturación de COS ha sido demostrada (Stewart et al., 2007), a menudo no se observa en experimentos de campo agrícola debido a que los niveles de entrada de carbono en estos experimentos es típicamente demasiado estrecho para evidenciar la saturación. Este concepto está respaldado por varios estudios como los de Chung et al. (2008) y Six et al. (2002b).

2. HIPÓTESIS

La principal hipótesis que vertebró las acciones de este trabajo fin de grado fue que *la presencia de cubierta vegetal en los olivares contribuye significativamente al incremento de los contenidos de carbono orgánico en el suelo, tanto en fracciones protegidas como no protegidas*. Con respecto a fracción no protegida se espera que la cubierta vegetal, al proporcionar compuestos orgánicos continuamente, aumente la cantidad de carbono no protegido debido a su descomposición relativamente rápida. Además, se anticipa un aumento en el

carbono físicamente protegido, gracias a la formación de micro y macroagregados que estabilizan el carbono orgánico en el suelo a largo plazo. Igualmente, se espera que la cubierta vegetal mejore la asociación del carbono orgánico con partículas de arcilla y limo, incrementando así el carbono orgánico químicamente protegido. En conjunto, estos procesos sugieren que la implementación de la cubierta vegetal en olivares podría ser una estrategia efectiva para aumentar el secuestro de carbono y mejorar la calidad del suelo, alineándose con principios de agricultura sostenible y mitigación del cambio climático.

3. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo fue evaluar el papel de la cubierta vegetal en el incremento en las reservas de carbono orgánico en el olivar. Para alcanzar este objetivo principal, los objetivos operacionales que se plantearon fueron:

1. Puesta a punto metodológica para analizar los contenidos en carbono orgánico en las fracciones no protegidas y protegidas física y químicamente.
2. Evaluar los contenidos en carbono orgánico total, no protegido, y físicamente y químicamente protegidos en fincas con cubierta vegetal y en fincas de olivar comparables, pero sin cubierta vegetal.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Diseño experimental

Las principales fuentes de variación fueron:

- 1.- Presencia de la cubierta vegetal. Como ya se ha mencionado, la presencia de cubierta vegetal puede jugar un papel importante en la reserva de carbono orgánico total y en las fracciones con distinto grado de protección. En este trabajo de fin de grado, se seleccionaron fincas de olivo con cubierta vegetal (CC a partir de ahora) y fincas de olivar comparables (similar tipo de suelo,

densidad de plantación, orientación, etc.), pero sin cubierta vegetal (fincas SC a partir de ahora).

2.- Localización. En distintas zonas, la producción primaria neta y la disposición de la cubierta vegetal (en toda la superficie de la finca o distribución en bandas en la entrecalle) difiere y, por ende, los efectos de la presencia de la cubierta vegetal en las reservas de carbono orgánico total y de las distintas fracciones de este. Se seleccionaron 13 zonas de las provincias de Jaén, Granada y Sevilla (Fig. 4.1).

El número total de fincas estudiadas fue de 26, 13 de ellas CC y otras 13 SC.

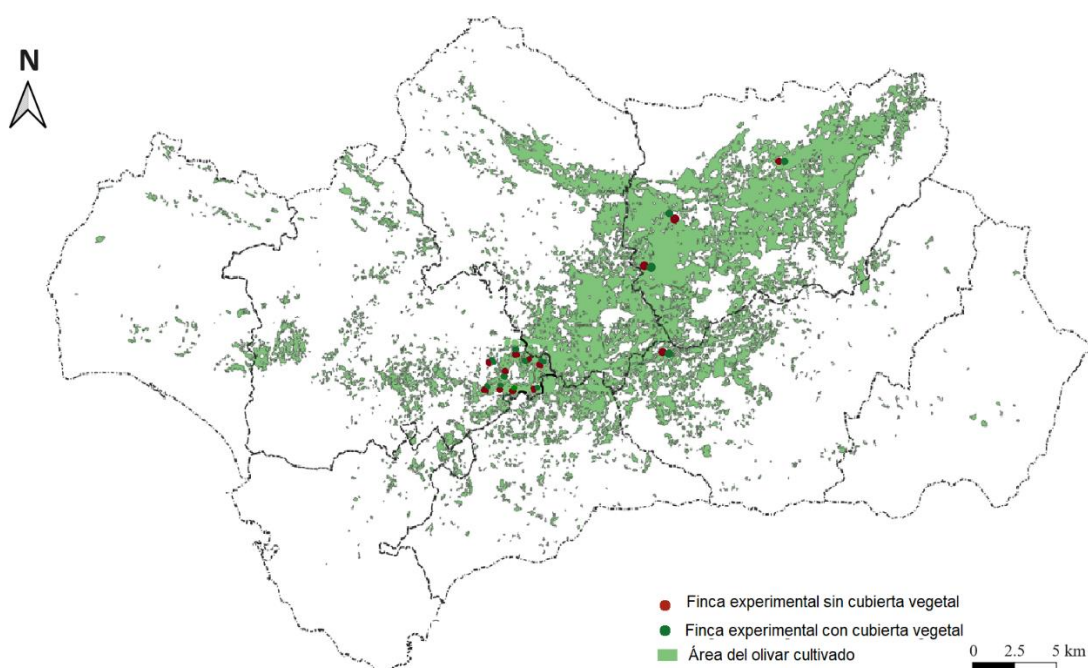


Figura 4.1. Localización de las fincas estudiadas repartidas entre Jaén, Granada y Sevilla.

4.2. Selección de las fincas de olivar

Se seleccionaron fincas de olivar de secano y con irrigación que cubren un amplio espectro de densidades de plantación (desde 85 hasta 254 árboles por hectárea) y de manejo (Tabla 4.1), para asegurar la representatividad de los sistemas agronómicos y las condiciones biofísicas más importantes de los olivares de las áreas objeto de estudio. El conjunto de fincas seleccionadas se

distribuyó en pares de forma que un miembro de cada par tuviese cubierta vegetal al menos durante los últimos 13 años y el otro miembro, comparable en términos de edad, densidad de árboles, clima, tipo y textura del suelo, no tuviese cubierta vegetal.

Tabla 4.1. Localización y características principales de las fincas de olivar.

Finca	Municipio	Pendiente media (%)	Superficie de la finca (ha)	Densidad de plantación (árb ha ⁻¹)	Geología	Tipo de suelo (WRB, 2014)	Textura del suelo
PV1-CC	Villacarrillo	28.9	4.36	83	M-m	Cambisol cálcico	Arcilloso
PV1-SC	Villacarrillo	21.8	3,78	83	M-m	Cambisol cálcico	Arcilloso
JT-CC	Pegalajar	16.8	6,93	150	H-lc	Leptosol calcárico	Arcilloso
JT-SC	Pegalajar	16.7	19,65	83	Cr-cm	Cambisol cálcico	Franco arcilloso
CC-CC	Úbeda	1.8	22,86	70	M-m	Vertisol crómico	Franco arcilloso
CC-SC	Baeza	9.8	37,09	140	M-m	Cambisol cálcico	Arcilloso
DE-CC	Deifontes	10.3	36.97	156	PQ-c	Cambisol cálcico	Arcilloso
DE-SC	Deifontes	14.8	16.1	143	PQ-c	Leptosol calcárico	Arcilloso
GA-CC	Estepa	4,4	15,49	110	T-gm	Cambisol cálcico	Franco arcilloso
GA-SC	Estepa	5,2	5,85	160	T-gm	Cambisol cálcico	Arcilloso
PA-CC	Estepa	1,4	3,17	238	PQ-ccl	Cambisol cálcico	Arcilloso
PA-SC	Estepa	6	7,92	333	PQ-ccl	Cambisol cálcico	Franco arcilloso
MR-CC	Estepa	3,2	26,04	285	PQ-ccl	Cambisol cálcico	Franco arcilloso
MR-SC	Estepa	4,1	0,55	357	PQ-ccl	Cambisol cálcico	Arcilloso
CR-CC	Estepa	5,3	4,68	100	P-cm	Regosol calcárico	Franco arcilloso
CR-SC	Estepa	9,7	3,07	56	P-cm	Regosol calcárico	Arcilloso
CH-CC	Estepa	4,9	11,76	260	PQ-ccl	Regosol calcárico	Arcilloso
CH-SC	Estepa	5,3	2,66	236	PQ-ccl	Regosol calcárico	Arcilloso
IS-CC	Estepa	6,4	14,09	126	T-gm	Regosol calcárico	Franco arcilloso
IS-SC	Estepa	6,7	4,03	100	T-gm	Regosol calcárico	Arcilloso
AL-CC	Estepa	11,9	5,7	145	T-gm	Regosol calcárico	Arcilloso
AL-SC	Estepa	8,9	8,9	206	T-gm	Regosol calcárico	Arcilloso
CHA-CC	Estepa	5,3	7,6	125	PQ-ccl	Regosol calcárico	Arcilloso
CHA-SC	Estepa	4,9	11,4	146	PQ-ccl	Regosol calcárico	Arcilloso
MAR-CC	Estepa	3,8	3,6	236	PQ-ccl	Luvisol calcárico	Arcilloso
MAR-SC	Estepa	3,5	8,1	209	PQ-ccl	Luvisol calcárico	Arcilloso

Las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran algunos ejemplos del aspecto de las fincas C y SC seleccionadas.



Figura 4.2. Fincas PV-CC (izquierda) y PV-SC (derecha).



Figura 4.3. Fincas DE-CC (arriba) y DE-SC (abajo).



Figura 4.4. Fincas IS-CC (izquierda) e IS-SC (derecha).

4.3. Toma de muestra

4.3.1. Toma de muestra de suelo

En otoño o en primavera y en las calles de cada una de las fincas de olivar se escogieron al azar tres puntos de muestreo y en cada punto de muestreo se tomaron muestras de suelo en los primeros 30 cm, que representa la capa arable del olivar (Calero et al., 2013). Se profundizó en el suelo con la ayuda de una azada y se cogieron aproximadamente 2,5 kg por punto de muestreo. Las muestras de suelo se guardaron en bolsas de plástico y se transportaron al laboratorio ese mismo día.

4.3.2. Preprocesamiento

Las muestras de suelo se extendieron sobre papel de filtro y se dejó secar al aire a temperatura ambiente durante una semana. Transcurrida la semana se pasó por un tamiz de 2 mm de luz, de manera que se lograron separar los fragmentos

gruesos y la grava (> 2 mm) de la arena fina (< 2 mm). Tanto la fracción de muestra de más de 2 mm de tamaño como la de menos de 2 mm resultantes del tamizado, se volvieron a guardar en bolsas de plástico hasta posteriores análisis.

4.4. Fraccionamiento físico en húmedo por tamaño de partícula

El fraccionamiento de carbono del suelo se realizó en las tres réplicas de muestras de suelo de los 13 pares de olivares (78 en total) de las fincas CC y SC. La separación de las distintas fracciones de carbono del suelo se realizó mediante un fraccionamiento físico en húmedo, basado en el método de Stewart et al. (2007).

Para cada muestra, se tomaron 30 gramos de suelo seco de las distintas bolsas de muestras de entre 0 y 30 cm de profundidad. Se añadió agua destilada (50 ml) a las muestras y se agitaron durante 2 minutos, las suspensiones resultantes se pasaron a través de dos mallas consecutivas con un tamaño de poro de 250 y 53 μm . Las partículas de suelo entre 250-2000 μm , 53-250 μm y < 53 μm se recogieron en bandejas previamente pesadas, que posteriormente se secaron a 105°C en la estufa durante 3-5 días.

Una vez secas, se pesan las bandejas para obtener el peso seco de las distintas fracciones. Para asegurarnos que ni se ha ganado ni se ha perdido muestra, se comparó la suma de los pesos secos de cada fracción con los 30 gr de suelo utilizados. La eficiencia del esquema del fraccionamiento fue del 99,16%.

Las diferentes fracciones de suelo se almacenaron en bolsas de plástico para posteriormente analizar el carbono orgánico en cada una de las fracciones del suelo 250-2000 μm , 53-250 μm y < 53 μm . La fracción 250-2000 μm se consideró la fracción de carbono orgánico no protegido, mientras que la de 53-250 μm el físicamente protegido y la de < 53 μm el carbono orgánico químicamente protegido.

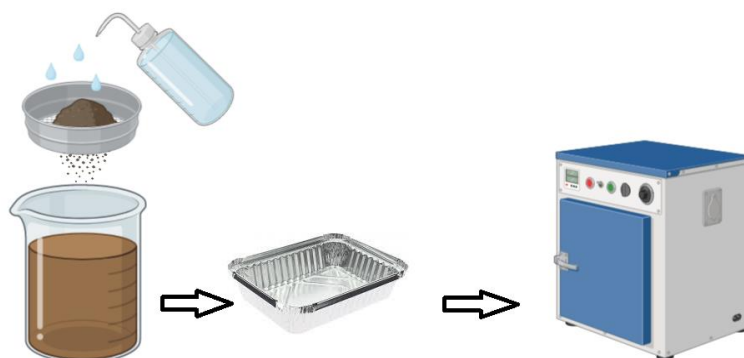


Figura 4.5 Esquema general del procedimiento de fraccionamiento físico.

4.5. Análisis del contenido en carbono orgánico

El método seguido para analizar el carbono orgánico en las distintas fracciones de tamaño de las partículas de suelo fue el de Anderson e Ingram (1993), usando un digestor.

Los reactivos necesarios fueron:

- Dicromato potásico 1N. 49.05 g en 1 litro. El reactivo debe desecarse previamente en la estufa, a 105 °C, una noche.
- Patrón de C. Glucosa ($C_6H_{12}O_6$: reactivo analítico) desecada previamente a 105 °C. A unos 25 ml de agua desionizada en un erlenmeyer pequeño, se añade 1 ml de ácido sulfúrico concentrado. Déjese enfriar. Cuando el líquido esté a temperatura ambiente, disuélvanse exactamente 1500 mg de glucosa. Enrasar a 50 ml. Esta solución patrón contiene 12 mg de C por ml. Guárdese en la nevera. No es aconsejable guardar más allá de un mes.

El procedimiento consistió en:

1. En un tubo de digestor, se añadió aproximadamente 300 mg de muestra de suelo.
2. Se añadieron 5.0 ml de la solución de dicromato y se mezcló bien.
3. Se añadieron 7.5 ml de ácido sulfúrico concentrado y se homogeneizó bien en el tubo de digestión.
4. Los tubos se sometieron a 150 °C durante una hora en un bloque digestor (Fig. 4.5).

5. Transcurrido el tiempo, se dejó enfriar y se añadieron 10 ml de agua desionizada y se homogeneizó con un agitador Vórtex.
6. Posteriormente, se centrifugó y se midió la absorbancia a 600 nm una alícuota del sobrenadante.



Figura 4.6. Ejemplo de color generado por distintas muestras de suelo tras la digestión con dicromato potásico y ácido sulfúrico a 150 °C durante una hora.

La concentración de carbono orgánico (mg C ml^{-1}) se obtuvo al aplicar los parámetros de la recta de calibración obtenida con distintas cantidades de glucosa (Tabla 4.2) sometidas al mismo proceso que las muestras de suelo.

Tabla 4.2. Cálculo de las cantidades de C de la glucosa digeridas para obtener la curva de calibración.

ml del patrón	ml agua a añadir	ml totales	mg C en el tubo
0	1	1	0
0,25	0,75	1	3
0,5	0,5	1	6
0,75	0,25	1	9
1	0	1	12

5. RESULTADOS

5.1. Contenido de carbono orgánico no protegido

La densidad de carbono orgánico (mg C g^{-1} fracción) en la fracción considerada como no protegida ($>250 \mu\text{m}$) osciló entre valores tan bajos como 8.33 (mg C g^{-1} fracción) medidos en la finca sin cubierta de ISA, y tan altos como 48.2 (mg C g^{-1} fracción) obtenidos en la finca con cubierta de CHA (Fig. 5.1).

Para el conjunto de todas las fincas, el valor promedio fue de 22.7 (mg C g^{-1} fracción). Los valores fueron significativamente más altos en las fincas con cubierta vegetal en tan solo 4 de los 13 sitios (mg C g^{-1} fracción). Sin embargo, para el conjunto de las fincas con cubierta vegetal, la densidad de carbono orgánico fue significativamente más alta (ANOVA de una vía, $p < 0.05$) (Fig. 5.2)

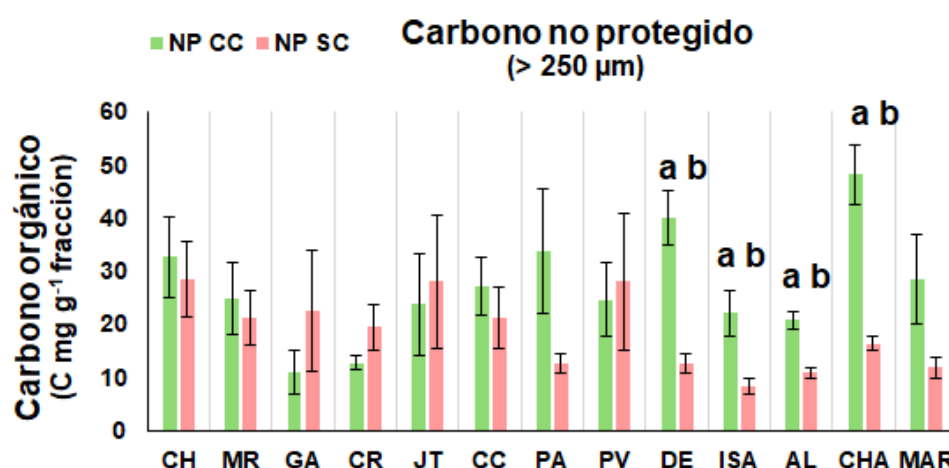


Figura 5.1. Densidad de carbono orgánico (mg C g^{-1} fracción) en la fracción no protegida (NP) ($>250 \mu\text{m}$) en fincas con cubierta vegetal (CC) frente a fincas sin cubierta vegetal (SC). Las barras representan el error estándar, mientras que las distintas letras significan diferencias significativas (ANOVA; $\alpha = 0.05$).

La densidad de carbono orgánico (mg C g^{-1} fracción) para el conjunto de las fincas CC fue en promedio un 44 % superior que el medido para el conjunto de las fincas SC (Fig. 5.2).

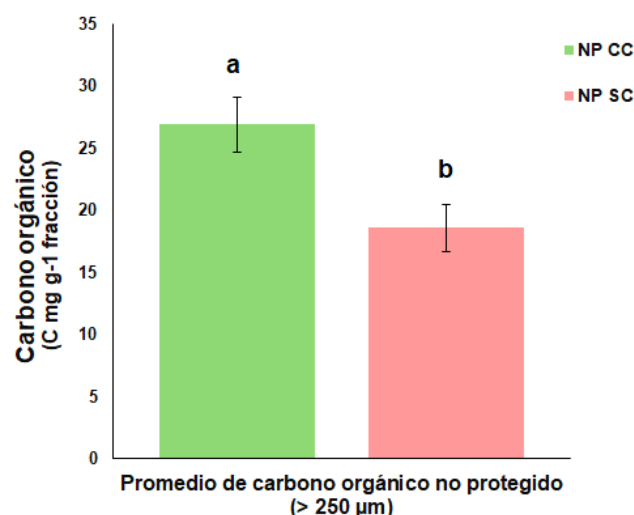


Fig. 5.2. Promedio de la densidad de carbono orgánico (mg C g⁻¹ fracción) en la fracción no protegida (NP) (>250 μm) en fincas con cubierta vegetal (CC) frente a fincas sin cubierta vegetal (SC). Las barras representan el error estándar, mientras que las distintas letras significan diferencias significativas (ANOVA; $\alpha = 0.05$)

La concentración de carbono orgánico (mg C g⁻¹ suelo) en cada gramo de suelo en la fracción considerada como no protegida (>250 μm), osciló entre valores tan bajos como 0.72 (mg C g⁻¹ suelo) medidos en la finca con cubierta vegetal CR y tan altos como 7.89 (mg C g⁻¹ suelo) obtenidos en la finca con cubierta vegetal de CHA (Fig. 5.3).

Para el conjunto de todas las fincas, el valor promedio fue de 2.5 (mg C g⁻¹ suelo). Los valores fueron significativamente más altos en las fincas con cubierta vegetal en 4 de los 13 sitios (mg C g⁻¹ suelo). Sin embargo, para el conjunto de las fincas con cubierta vegetal, la densidad de carbono orgánico en esta fracción de tamaño fue significativamente más alta (ANOVA de una vía, $p < 0.05$) (Fig. 5.4).

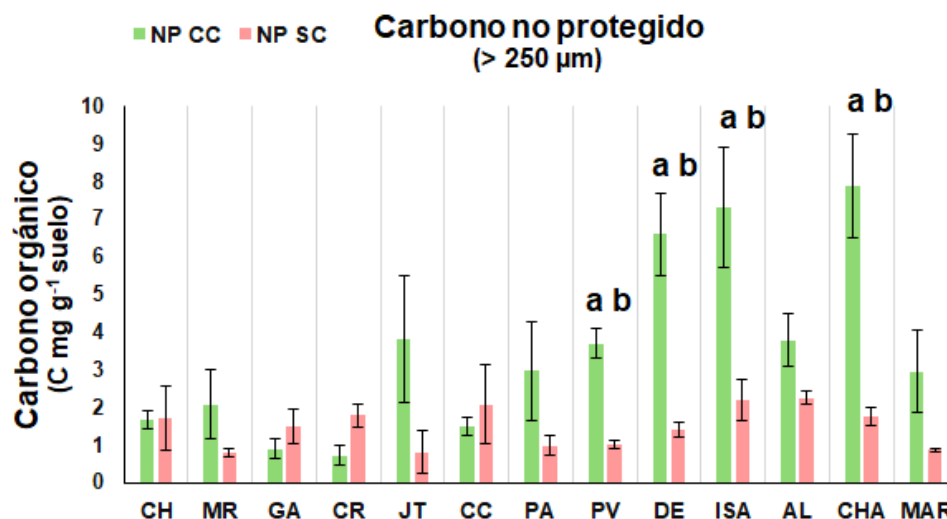


Figura 5.3. Concentración de carbono orgánico en cada gramo de suelo (mg C g^{-1} suelo) en la fracción no protegida (NP) ($> 250 \mu\text{m}$) en fincas con cubierta vegetal (CC) frente a fincas sin cubierta vegetal (SC). Las barras representan el error estándar, mientras que las distintas letras significan diferencias significativas (ANOVA; $\alpha = 0.05$).

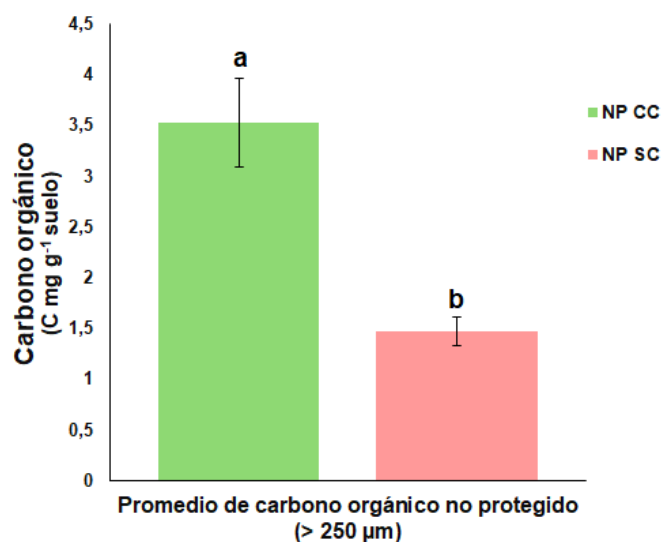


Figura 5.4. Promedio de la concentración de carbono orgánico en cada gramo de suelo (mg C g^{-1} suelo) en la fracción no protegida (NP) ($> 250 \mu\text{m}$) en fincas con cubierta vegetal (CC) frente a fincas sin cubierta vegetal (SC). Las barras representan el error estándar, mientras que las distintas letras significan diferencias significativas (ANOVA; $\alpha = 0.05$).

5.2. Contenido de las fracciones protegidas (físicamente y químicamente)

5.2.1. Contenido de las fracciones protegidas físicamente (53-250 μm)

La concentración de carbono orgánico (mg C g^{-1} fracción) en la fracción considerada como físicamente protegida (53-250 μm), osciló entre valores tan bajos como 3.1 (mg C g^{-1} fracción), medidos en la finca sin cubierta de CC y tan altos como 41.4 (mg C g^{-1} fracción) obtenidos en la finca con cubierta de JT (Fig. 5.5).

Para el conjunto de todas las fincas, el valor promedio fue de 13.61 (mg C g^{-1} fracción). Los valores fueron significativamente más altos en las fincas con cubierta vegetal en 6 de los 13 sitios (Figura 5.5). Sin embargo, para el conjunto de las fincas con cubierta vegetal, la densidad de carbono orgánico fue significativamente más alta (ANOVA de una vía, $p < 0.05$) (Fig. 5.6).

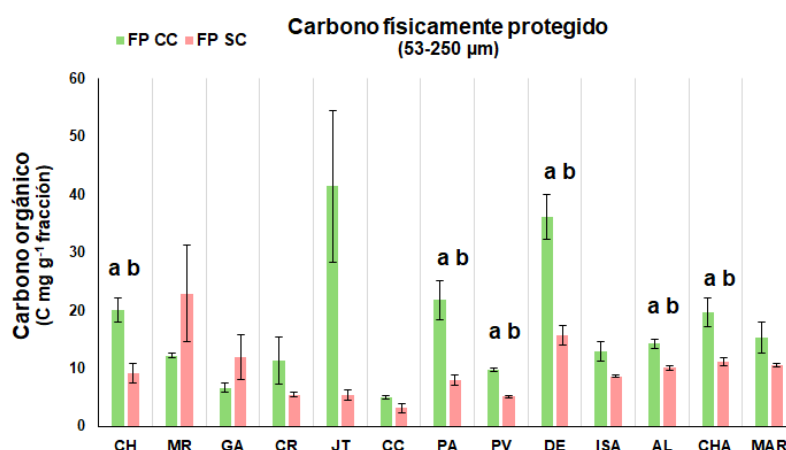


Figura 5.5. Densidad de carbono orgánico (mg C g^{-1} fracción) en la fracción físicamente protegida (FP) (53-250 μm) en fincas con cubierta vegetal (CC) frente a fincas sin cubierta vegetal (SC). Las barras representan el error estándar, mientras que las distintas letras significan diferencias significativas (ANOVA; $\alpha = 0.05$).

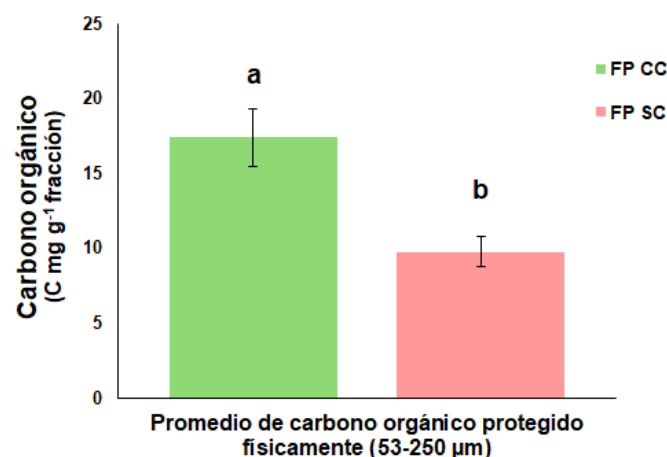


Figura 5.6. Promedio de la densidad de carbono orgánico (mg C g⁻¹ fracción) en la fracción protegida físicamente (FP) (53-250 µm) en fincas con cubierta vegetal (CC) frente a fincas sin cubierta vegetal (SC). Las barras representan el error estándar, mientras que las distintas letras significan diferencias significativas (ANOVA; $\alpha = 0.05$).

Por gramo de suelo (mg C g⁻¹ suelo) en la fracción considerada como físicamente protegida (53-250 µm), los valores oscilaron entre 0.46 (mg C g⁻¹ suelo), medidos en la finca sin cubierta de JT y 7.91 (mg C g⁻¹ suelo) obtenidos en la finca con cubierta de CHA (Fig. 5.7)

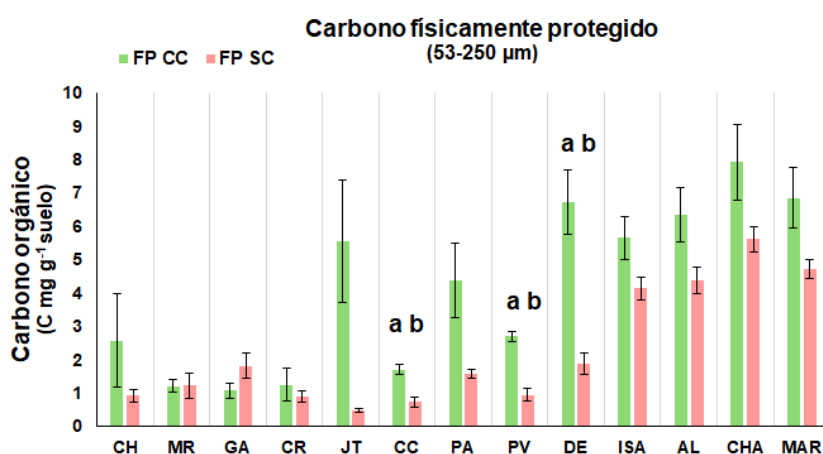


Figura 5.7. Concentración de carbono orgánico por gramo de suelo (mg C g⁻¹ suelo) en la fracción físicamente protegida (FP) (53-250 µm) en fincas con cubierta vegetal (CC) frente a fincas sin cubierta vegetal (SC). Las barras representan el error estándar, mientras que las distintas letras significan diferencias significativas (ANOVA; $\alpha = 0.05$)

Para el conjunto de todas las fincas, el valor promedio fue de 3.19 (mg C g⁻¹ suelo). Los valores fueron significativamente más altos en las fincas con cubierta vegetal en 3 de los 13 sitios (mg C g⁻¹ suelo). Sin embargo, para el conjunto de

las fincas con cubierta vegetal, la concentración de carbono orgánico en un gramo de suelo y para esta fracción de tamaño fue significativamente más alta (ANOVA de una vía, $p < 0.05$) (Fig. 5.8)

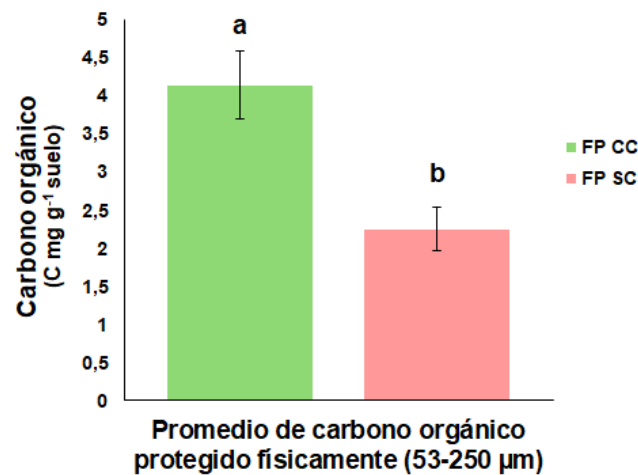


Figura 5.8. Promedio de la concentración de carbono orgánico por gramo de suelo (mg C g^{-1} suelo) en la fracción protegida físicamente (FP) (53-250 μm) en fincas con cubierta vegetal (CC) frente a fincas sin cubierta vegetal (SC). Las barras representan el error estándar, mientras que las distintas letras significan diferencias significativas (ANOVA; $\alpha = 0.05$)

5.2.2. Contenido de las fracciones protegidas químicamente (<53 μm)

La densidad de carbono orgánico (mg C g^{-1} fracción) en la fracción considerada como químicamente protegida (<53 μm), osciló entre valores tan bajos como 3.93 (mg C g^{-1} fracción), medidos en la finca sin cubierta de JT y tan altos como 26.02 (mg C g^{-1} fracción) obtenidos en la finca con cubierta de JT (Fig. 5.9)

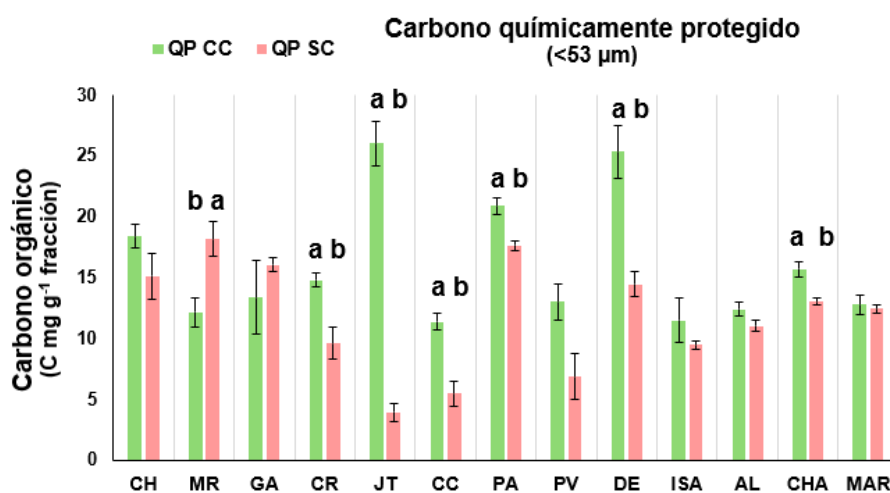


Figura 5.9. Densidad de carbono orgánico (mg C g⁻¹ fracción) en la fracción químicamente protegida (QP) (<53 μm) en fincas con cubierta vegetal (CC) frente a fincas sin cubierta vegetal (SC). Las barras representan el error estándar, mientras que las distintas letras significan diferencias significativas (ANOVA; α = 0.05)

Para el conjunto de todas las fincas, el valor promedio fue de 13.88 (mg C g⁻¹ fracción). Los valores fueron significativamente más altos en las fincas con cubierta vegetal en 6 de los 13 sitios (mg C g⁻¹ fracción) excepto en MR en la que los valores fueron significativamente más altos en la finca sin cubierta vegetal. Sin embargo, para el conjunto de las fincas con cubierta vegetal, la densidad de carbono orgánico fue significativamente más alta (ANOVA de una vía, p< 0.05) (Figura 5.10).

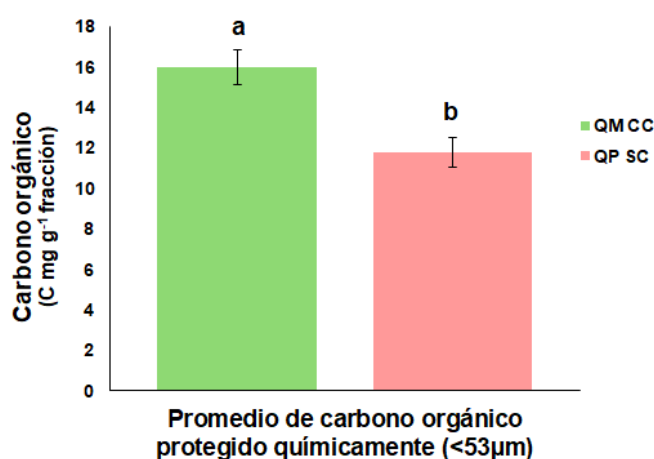


Figura 5.10. Promedio de la densidad de carbono orgánico (mg C g⁻¹ fracción) en la fracción protegida químicamente (QP) (<53 μm) en fincas con cubierta vegetal (CC) frente a fincas sin cubierta vegetal (SC). Las barras representan el error estándar, mientras que las distintas letras significan diferencias significativas (ANOVA; α = 0.05).

6. DISCUSIÓN

6.1. El papel de la cubierta vegetal espontánea en el aporte anual de carbono orgánico en el suelo en olivares.

Aunque no se ha medido la cantidad de biomasa en la cubierta vegetal, ni su contenido en carbono orgánico de las fincas de olivar, en este estudio se ha demostrado que el aporte de carbono orgánico de la cubierta vegetal espontánea puede llegar a ser significativo. Otros estudios han demostrado que la cubierta vegetal puede aportar al suelo cantidades significativas de biomasa. Por ejemplo, Torrús-Castillo et al. (2022) encontraron un promedio de producción primaria neta anual de la parte aérea de la cubierta vegetal espontánea en 46 olivares, algunos de los cuales cercanos a las fincas de este estudio, de 200 g de biomasa seca por metro cuadrado, que fueron cercanos a los encontrados por Repullo-Ruibérriz De Torres et al. (2021). Estos valores tan relativamente bajos en comparación con otros cultivos (por ejemplo, cereales) no es sorprendente, ya que el área entre las líneas de olivos dónde se desarrolla principalmente la cubierta vegetal no se fertiliza, ni se riega. A pesar de que la biomasa producida es relativamente escasa, el aporte de carbono orgánico puede ser significativo. Por ejemplo, Torrús-Castillo et al. (2023) mostraron que en promedio, los restos de cubierta vegetal pueden aportar 420 kg C por cada hectárea y año. Este valor se acerca a los 560 kg C que se aportó al suelo con la cubierta vegetal en un estudio que examinó 10 olivares con cubierta vegetal (Vicente-Vicente et al., 2017). Sin embargo, el grado en que el aporte de carbono orgánico derivado de los restos de cubierta vegetal aumenta la reserva de carbono en el suelo de los olivares, dependerá en última instancia de la tasa de descomposición de ese carbono orgánico. La tasa de descomposición depende de muchos factores, incluyendo la calidad de la biomasa vegetal (por ejemplo, la relación C/N y los contenidos de lignina y polifenoles); las condiciones edáficas y ambientales y el manejo de los restos de cubierta vegetal. En el caso de los restos de cubierta

vegetal, se podría esperar una tasa de descomposición relativamente alta porque los restos de cubierta vegetal suelen mostrar una relación C/N relativamente baja, que en el estudio de Vicente-Vicente et al. (2017) promedió de 17.1. Por otro lado, cabe señalar que se espera que la descomposición de los residuos vegetales se ralentice cuando se dejan en la superficie del suelo (Cooper et al., 2006), como suele ser el caso en los olivares. Por ejemplo, Gómez-Muñoz et al. (2014) encontraron que alrededor del 20% de los residuos de la cobertura vegetal añadidos en un olivar permanecieron en bolsas de hojarasca después de 343 días, lo que indica que el otro 80% se descompuso o entró en el suelo como fragmentos de partículas de menos de 1 mm (tamaño de malla).

6.2. Los restos de cubierta vegetal aumentaron la cantidad de carbono orgánico en el suelo.

En este estudio el contenido en carbono orgánico (como suma de las fracciones no protegidas y protegidas) fue significativamente superior en los suelos del conjunto de fincas con cubierta vegetal, demostrando, sin duda, el papel que juega la cubierta vegetal en aumentar los niveles de carbono orgánico en el suelo y, por lo tanto, su potencial papel en el secuestro de carbono. No obstante, los contenidos más altos de carbono orgánico en los suelos con cubierta vegetal podrían deberse no solo al aporte anual de carbono orgánico de los residuos vegetales, sino parcialmente también a una disminución de las pérdidas de carbono orgánico por erosión del suelo debido a la presencia de la cubierta vegetal (Gómez et al., 2009). Por lo tanto, la implementación de la cubierta vegetal espontánea se perfila como una de las estrategias alineadas con el concepto de *carbon farming* o agricultura del carbono y puede jugar un papel importante en incrementar los créditos de CO₂ en los proyectos de créditos de CO₂ asociados al mercado voluntario de créditos de CO₂.

No obstante, no en todas las comparaciones entre pares de olivares con o sin cubierta vegetal las diferencias fueron significativas. Posiblemente, la baja cantidad de biomasa de la cubierta vegetal en algunas de las fincas con cubierta

vegetal, junto con los elevados niveles de carbono orgánico en el suelo, la profundidad de la toma de las muestras de suelo (30 cm) y las posibles variaciones pedoclimáticas entre pares de fincas que afectan a la tasa de descomposición del carbono orgánico procedente de los restos de cubierta vegetal, pueden explicar la ausencia de diferencias significativas en los contenidos en carbono orgánico total en algunos pares de fincas.

6.3. El papel de la cubierta vegetal en el incremento en los contenidos en carbono orgánico no protegido.

En este estudio la concentración de carbono orgánico (expresado por gramo de partículas de suelo entre 0.25 y 2.0 mm) y la cantidad de carbono orgánico (expresado por gramo de suelo en esa fracción) fueron significativamente más elevados en el conjunto de las fincas con cubierta vegetal. Similares resultados fueron encontrados por Vicente-Vicente et al. (2017b) cuando compararon este tipo de carbono orgánico en 5 pares de olivares, en cada par uno con cubierta y el otro sin cubierta vegetal.

Si bien la cantidad de carbono orgánico por gramo de fracción fue en promedio 1.44 veces superior en el suelo de las fincas con cubierta vegetal, la cantidad en esa fracción, pero por gramo de suelo fue 2.44 veces superior, lo que significa que en los suelos con cubierta vegetal hubo mucha más cantidad de fracción no protegida que en los suelos sin cubierta vegetal. Por lo tanto, este estudio demuestra que la cantidad de pequeños restos de cubierta vegetal, generalmente ya procesados por la micro y mesofauna, que anualmente entran en el suelo tras ser desbrozada es suficiente para aumentar de forma significativa la cantidad de carbono no protegido. Este carbono no protegido incluye pequeños restos de la cubierta vegetal, ya parcialmente descompuestos, junto con semillas y restos microbianos como hifas fúngicas y esporas que no están estrechamente asociadas con minerales del suelo (Six et al., 1999, 2002). Dado que esta fracción de carbono orgánico es sensible a las prácticas de manejo y, por lo tanto, altamente influenciado por el manejo futuro del suelo, no debería

considerarse como un almacén de carbono orgánico secuestrado a largo plazo. De hecho, muchos estudios iniciales han encontrado que una parte importante el carbono orgánico no protegido es relativamente fácilmente descomponible y se reducen considerablemente tras el arado del suelo (Solomon et al., 2000), lo que indica su estado relativamente no protegido.

6.4. El papel de la cubierta vegetal en el incremento en los contenidos en carbono orgánico protegido.

En este estudio, tanto la concentración (por gramo de fracción) como la cantidad en esa fracción por gramo de suelo, tanto del carbono orgánico protegido físicamente (53-250 μm) como el protegido químicamente ($< 53 \mu\text{m}$) fueron significativamente superior en los suelos de los olivares con cubierta vegetal respecto a aquellos sin cubierta.

Por gramo de fracción o por gramo de suelo en esta fracción, el carbono físicamente protegido fue entre 1.77 y 1.84 veces superior en los primeros 30 cm de suelo de las fincas con cubierta vegetal. La protección física ejercida por los macro y/o microagregados de suelo sobre el carbono orgánico se atribuye a la compartimentalización del sustrato (carbono orgánico) y la biomasa microbiana (Killham et al., 1993) y a la posible reducción de la difusión de oxígeno en los macro y, especialmente, microagregados, lo que resulta en una menor actividad microbiana dentro de los agregados (Sollins et al., 1996). Aunque la cantidad de agregados del suelo o la estabilidad de los agregados del suelo no se midió en nuestro estudio, está relativamente bien documentado que los residuos vegetales, después del proceso de descomposición, actúan como agente de unión para mantener unidas las partículas del suelo formando agregados (Jastrow et al., 1998). Garcia-Franco et al. (2015) mostraron después de 4 años de aplicación de abono verde en almendros, que se promovió la formación de micro y macroagregados. Por lo tanto, la presencia de cubierta vegetal y el aporte de los residuos de ésta aumentaron la cantidad de carbono orgánico físicamente

protegido, que es de suma importancia para el secuestro de carbono orgánico a largo plazo.

Por gramo de fracción o por gramo de suelo de la fracción de carbono químicamente protegido, los valores en los suelos de las fincas con cubierta vegetal fueron entre un 28 y un 35 % superiores a los de las fincas sin cubierta vegetal comparables. Por lo tanto, este estudio demuestra que la presencia de la cubierta vegetal y/o la aplicación de sus residuos potencia la formación de asociaciones de carbono orgánico con partículas de arcilla y limo. Este resultado está bien alineado con otros. Por ejemplo, Stewart et al. (2009) encontraron que el carbono orgánico químicamente protegido comprendía en promedio el 27% del carbono protegido procedente de residuos de trigo durante 2.5 años en un experimento controlado de laboratorio. Las superficies de las partículas de arcilla suelen estar fuertemente cargadas negativamente, especialmente cuando el pH del suelo es básico, como fue el caso en nuestros suelos estudiados. A medida que la comunidad microbiana procesa las moléculas de materia orgánica, algunos de los subproductos que producen tienen fuertes cargas positivas. Cuando estas moléculas entran en contacto con las partículas de arcilla, pueden formar enlaces fuertes, protegiendo efectivamente las moléculas del ataque microbiano. Esta forma de protección química es altamente efectiva y ayuda a explicar por qué los contenidos en carbono orgánico del suelo y de arcilla están correlacionados a nivel mundial (Six et al., 2002b).

7. CONCLUSIONES

- El fraccionamiento físico en húmedo de muestras de suelo, se perfila como una adecuada herramienta para analizar la cantidad de carbono orgánico secuestrado a largo plazo.
- La cantidad de carbono orgánico no protegido, físicamente y químicamente protegidos, y por lo tanto el carbono orgánico total, en el conjunto del suelo de las fincas con cubierta vegetal fue significativamente superior al del conjunto de las fincas sin cubierta vegetal. Por lo tanto, la

presencia de cubierta vegetal es una adecuada estrategia compatible con la agricultura del carbono para intensificar la contribución del olivar en la mitigación del cambio climático.

- La formación de asociaciones de carbono orgánico con partículas de arcilla y limo, además de la formación de microagregados que ejercen protección física al carbono orgánico, se potencian con la implementación de cubierta vegetal.

8. BIBLIOGRAFÍA

Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47(2), 151-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>

Cerdà, A., Terol, E., & Daliakopoulos, I. N. (2021). Weed cover controls soil and water losses in rainfed olive groves in Sierra de Enguera, eastern Iberian Peninsula. *Journal of Environmental Management*, 290, 112516. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112516>

Chung, H., Grove, J. H., & Six, J. (2008). Indications for Soil Carbon Saturation in a Temperate Agroecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 72(4), 1132-1139. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0265>

Cooper, D. J., Sanderson, J. S., Stannard, D. I., & Groeneveld, D. P. (2006). Effects of long-term water table drawdown on evapotranspiration and vegetation in an arid region phreatophyte community. *Journal of Hydrology*, 325(1-4), 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.035>

Denef, K., Zotarelli, L., Boddey, R. M., & Six, J. (2007). Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(5), 1165-1172. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.12.024>

Dumanski, J., & Lal, R. (2004). Soil Conservation and Carbon Sequestration (Guest Editorial). *Climatic Change*, 65(3), 253-254. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000038371.89508.90>

Fraga, H., Moriondo, M., Leolini, L., & Santos, J. A. (2020). Mediterranean Olive Orchards under Climate Change: A Review of Future Impacts and Adaptation Strategies. *Agronomy*, 11(1), 56. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010056>

Garcia-Franco, N., Albaladejo, J., Almagro, M., & Martínez-Mena, M. (2015). Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem. *Soil and Tillage Research*, 153, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.05.010>

Garcia-Franco, N., Wiesmeier, M., Goberna, M., Martínez-Mena, M., & Albaladejo, J. (2014). Carbon dynamics after afforestation of semiarid shrublands: Implications of site preparation techniques. *Forest Ecology and Management*, 319, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.01.043>

Gómez, J. A., Guzmán, M. G., Giráldez, J. V., & Fereres, E. (2009). The influence of cover crops and tillage on water and sediment yield, and on nutrient, and organic matter losses in an olive orchard on a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 106(1), 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.04.008>

Gómez-Muñoz, B., Hatch, D. J., Bol, R., & García-Ruiz, R. (2014). Nutrient dynamics during decomposition of the residues from a sown legume or ruderal plant cover in an olive oil orchard. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 184, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.020>

Haynes, R. J., & Beare, M. H. (1997). Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(11-12), 1647-1653. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00078-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00078-3)

Houghton, R. A. (2003). Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 55(2), 378. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16764>

Jastrow, J. D., Miller, R. M., & Lussenhop, J. (1998). Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie1The submitted manuscript has been created by the University of Chicago as operator of Argonne National Laboratory under Contract No. W-31-109-ENG-38 with the U.S. Department of Energy.1. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(7), 905-916. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00207-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00207-1)

Killham, K., Amato, M., & Ladd, J. N. (1993). Effect of substrate location in soil and soil pore-water regime on carbon turnover. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(1), 57-62. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90241-3](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90241-3)

Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304(5677), 1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

Lal, R. (2011). Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *Food Policy*, 36, S33-S39. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.12.001>

Liu, R., Thomas, B. W., Shi, X., Zhang, X., Wang, Z., & Zhang, Y. (2021). Effects of ground cover management on improving water and soil conservation in tree crop systems: A meta-analysis. *CATENA*, 199, 105085. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105085>

López-Vicente, M., Gómez, J. A., Guzmán, G., Calero, J., & García-Ruiz, R. (2021). The role of cover crops in the loss of protected and non-protected soil organic carbon fractions due to water erosion in a Mediterranean olive grove. *Soil and Tillage Research*, 213, 105119. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105119>

Loumou, A., & Giourga, C. (2003). Olive groves: ``The life and identity of the Mediterranean'. *Agriculture and Human Values*, 20(1), 87-95. <https://doi.org/10.1023/A:1022444005336>

Mrunalini, K., Behera, B., Jayaraman, S., Abhilash, P. C., Dubey, P. K., Swamy, G. N., Prasad, J. V. N. S., Rao, K. V., Krishnan, P., Pratibha, G., & Srinivasa Rao, C. (2022). Nature-based solutions in soil restoration for improving agricultural productivity. *Land Degradation & Development*, 33(8), 1269-1289. <https://doi.org/10.1002/ldr.4207>

Ortega, M., Pascual, S., Elena-Rosselló, R., & Rescia, A. J. (2020). Land-use and spatial resilience changes in the Spanish olive socio-ecological landscape. *Applied Geography*, 117, 102171. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102171>

Paustian, K., Andrén, O., Janzen, H. H., Lal, R., Smith, P., Tian, G., Tiessen, H., Van Noordwijk, M., & Woomer, P. L. (1997). Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use and Management*, 13(s4), 230-244. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1997.tb00594.x>

Podmanicky, L., Balázs, K., Belényesi, M., Centeri, Cs., Kristóf, D., & Kohlheb, N. (2011). Modelling soil quality changes in Europe. An impact assessment of

land use change on soil quality in Europe. *Ecological Indicators*, 11(1), 4-15.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.08.002>

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., & Carbonell-Bojollo, R. M. (2021). Cover Crop Contributions to Improve the Soil Nitrogen and Carbon Sequestration in Almond Orchards (SW Spain). *Agronomy*, 11(2), 387. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020387>

Rodríguez Martín, J. A., Álvaro-Fuentes, J., Gonzalo, J., Gil, C., Ramos-Miras, J. J., Grau Corbí, J. M., & Boluda, R. (2016). Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma*, 264, 117-125.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.10.010>

Scavo, A., Fontanazza, S., Restuccia, A., Pesce, G. R., Abbate, C., & Mauromicale, G. (2022). The role of cover crops in improving soil fertility and plant nutritional status in temperate climates. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(5), 93. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00825-0>

Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002a). Stabilization Mechanisms of Soil Organic Matter: Implications for C-Saturation of Soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>

Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002b). Stabilization Mechanisms of Soil Organic Matter: Implications for C-Saturation of Soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>

Six, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (1999). Aggregate and Soil Organic Matter Dynamics under Conventional and No-Tillage Systems. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5), 1350-1358. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351350x>

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., & Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 789-813.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>

Sollins, P., Homann, P., & Caldwell, B. A. (1996). Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. *Geoderma*, 74(1-2), 65-105.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5)

Solomon, D., Lehmann, J., & Zech, W. (2000). Land use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semi-arid northern Tanzania: Carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 78(3), 203-213. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00126-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00126-7)

Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F., & Six, J. (2007). Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 86(1), 19-31. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9140-0>

Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F., & Six, J. (2009). Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(2), 357-366. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.11.011>

Torrús-Castillo, M., Calero, J., & García-Ruiz, R. (2023). Does olive cultivation sequester carbon?: Carbon balance along a C input gradient. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 358, 108707. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108707>

Torrús-Castillo, M., Domouso, P., Herrera-Rodríguez, J. M., Calero, J., & García-Ruiz, R. (2022). Aboveground Carbon Fixation and Nutrient Retention in Temporary Spontaneous Cover Crops in Olive Groves of Andalusia. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 868410. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.868410>

Tous, J.; Romero, A.; Hermoso, J.F. New trends in olive orchard design for continuous mechanical harvesting. *Adv. Hortic. Sci.* 2010, 24, 43–52.

Vanwalleghem, T., Amate, J. I., De Molina, M. G., Fernández, D. S., & Gómez, J. A. (2011). Quantifying the effect of historical soil management on soil erosion rates in Mediterranean olive orchards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142(3-4), 341-351. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.06.003>

Vicente-Vicente, J. L., García-Ruiz, R., Francaviglia, R., Aguilera, E., & Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration rates under Mediterranean woody crops using recommended management practices: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 235, 204-214. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.024>

Vicente-Vicente, J. L., Gómez-Muñoz, B., Hinojosa-Centeno, M. B., Smith, P., & Garcia-Ruiz, R. (2017a). Carbon saturation and assessment of soil organic carbon fractions in Mediterranean rainfed olive orchards under plant cover management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 245, 135-146. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.020>

- Vicente-Vicente, J. L., Gómez-Muñoz, B., Hinojosa-Centeno, M. B., Smith, P., & Garcia-Ruiz, R. (2017b). Carbon saturation and assessment of soil organic carbon fractions in Mediterranean rainfed olive orchards under plant cover management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 245, 135-146. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.020>
- Haynes, R.J., Beare, M.H., 1996. Aggregation and organic matter storage in mesothermal, humic soils. In: Carter, M.R., Stewart, B.A. (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. CRC Press, Boca Raton, pp. 213–262.
- Zuazo, V. H. D., Rodríguez, B. C., García-Tejero, I. F., Ruiz, B. G., & Tavira, S. C. (2020). Benefits of organic olive rainfed systems to control soil erosion and runoff and improve soil health restoration. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6), 41. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00644-1>