SUBTEMA 1

Conservación del suelo y almacenamiento de carbono

La región mediterránea es muy vulnerable al cambio climático y una de las muchas consecuencias es la degradación del suelo. La gestión del suelo y el almacenamiento de carbono se convierten, por tanto, en estrategias fundamentales para mitigar los efectos del cambio climático.

Esta revisión interpreta la conservación del suelo en su sentido más amplio para incluir tanto el control de la erosión y la fertilidad, que comprende el mantenimiento de la materia orgánica, las propiedades físicas y los nutrientes del suelo, así como evitar las toxicidades. La calidad del suelo se considera una forma de avanzar hacia una agricultura más sostenible. Un suelo de gran calidad reduce, entre otros, el riesgo de inundaciones en caso de lluvias torrenciales y reabastece las aguas subterráneas.

Como se afirma en la misión «Un pacto sobre el suelo para Europa», puesta en marcha por la Comisión Europea en 2021, unos suelos saludables son la base de nuestra alimentación y proporcionan servicios ecosistémicos vitales. La gestión del suelo reviste una importancia especial en la mitigación del cambio climático, ya que permite optimizar el almacenamiento de carbono, lo que también se conoce como «agricultura del carbono». Para cumplir el objetivo del Acuerdo de París sobre el clima, es necesario actuar de inmediato para reducir el dióxido de carbono atmosférico[1]. Se calcula que la agricultura contribuye en un 30 % a las emisiones antropogénicas totales. Un enfoque viable para intentar compensar estas emisiones consiste en aumentar el contenido de carbono del suelo mediante prácticas que fomenten la absorción de carbono del suelo. La iniciativa «4 por 1000», respaldada por la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) celebrada en París en diciembre de 2015, parte de la base de que el carbono debería absorberse de la atmósfera en los suelos del mundo a un ritmo del 0,4 % para desempeñar un papel en la mitigación climática. El objetivo de esta iniciativa es mejorar el contenido de materia orgánica del suelo y promover la absorción de carbono del suelo mediante la adopción de prácticas agrícolas adaptadas a las situaciones locales y la aplicación de los principios de la agroecología, la agroforestería, la agricultura de conservación, la agricultura climáticamente inteligente y la gestión del paisaje.

Los siguientes capítulos presentan algunas de las prácticas agrícolas del proyecto CLIMED-FRUIT que contribuyen a optimizar el almacenamiento de carbono en los suelos en la producción de cultivos perennes.

1 PRÁCTICAS DE FERTILIZACIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL SUELO Y EL ALMACENAMIENTO DE CARBONO

1.1 Enmiendas ecológicas: algunas buenas prácticas

El principal objetivo de aplicar una enmienda ecológica a los suelos agrícolas es mejorar el contenido de materia orgánica. La adición de materia orgánica persigue varios objetivos, entre

ellos mantener o mejorar las reservas de carbono y las propiedades del suelo y satisfacer parcialmente las necesidades de nutrientes de los cultivos. El efecto de la aplicación de enmiendas ecológicas depende principalmente de las condiciones medioambientales que regulan la actividad microbiana y de las prácticas agrícolas y de gestión, por ejemplo, tipo de enmienda, dosis, frecuencia y forma de aplicación, etc.

1.1.1 Prácticas basadas en el uso de compost

Como enmienda de liberación lenta, el compost puede contribuir a la resiliencia de los ecosistemas mejorando la salud del suelo, la dinámica del carbono y la productividad de la biomasa, así como aumentando la tolerancia a la sequía. El compost se obtiene mediante un proceso aeróbico de degradación de la biomasa por microorganismos. El compostaje se realiza en tres fases: la preparación de la mezcla de materias orgánicas, la fermentación, y la maduración y curado.

- *Agrocompostaje: una forma de mejorar la calidad del suelo y la economía local*

El proyecto AGROCOMPOST ha llevado a cabo investigaciones y experimentos sobre agrocompostaje en la región de Valencia. Además, ha facilitado la formación y la realización de experiencias de colaboración *in situ* con las principales partes interesadas, incluidos agricultores, cooperativas y administraciones rurales. Estas actividades han contribuido al avance de la economía circular y a la consecución de materia orgánica de calidad en las zonas rurales de la región. A lo largo de cinco años, el proyecto se ha llevado a cabo en 195 centros piloto y ha permitido desarrollar más de 420 procesos de compostaje a partir de distintas materias primas, con un resultado de 15 400 toneladas de biomasa compostada. En términos de mitigación del cambio climático, esto representa más de 2500 toneladas de carbono absorbido en los suelos de viñedos y huertos de cítricos y olivares.

- *Compost en la explotación*

El reciclaje de desechos y residuos orgánicos mediante el compostaje en las explotaciones es una forma sostenible de producir abonos para uso agrícola. En este contexto, el grupo operativo OLTREBIO pretendía minimizar los aportes agrícolas, recuperar los residuos de la explotación y transferir conocimientos sobre el proceso de compostaje a otros agricultores. La primera fase del proceso consistió en preparar las pilas tras triturar y mezclar las materias primas (figura 1), es decir, los residuos de cosecha mezclados con hierba cortada. A continuación, se cubrió la pila con una sábana y se garantizó la oxigenación mediante el sistema de aireación, que se activó a intervalos regulares (10 minutos cada 2 horas durante las dos primeras semanas). La temperatura se medía de forma continua con dos sondas conectadas a un registrador de datos, mientras que la humedad se controlaba semanalmente (40-70 %). Para permitir la homogeneización y fermentación de los materiales, la pila se volteó semanalmente dos veces durante las dos primeras semanas y una vez más antes de finalizar el proceso.

Figura 1. Compostaje en la explotación experimental CREA-AA: 1. Recogida de los residuos agrícolas; 2. Trituración y mezcla; 3. Preparación y oxigenación de la pila; 4. Control de la temperatura y la humedad; 5. Almacenamiento del compost maduro; 6. Aplicación en el campo[2]

La tabla 1 muestra las principales características del compost obtenido. Los parámetros se ajustan a la legislación italiana y ponen de manifiesto un buen grado de madurez y calidad del compost. El compost maduro se aplicó durante tres años como abono en viñedos ecológicos de uva de mesa (variedades Sofia y Crimson Seedless) en dosis de 2,1 toneladas/ha. Estas aplicaciones permitieron que la explotación mantuviera la calidad de las uvas de mesa y se redujeran los aportes y el combustible empleados por la explotación en un 70 % y un 10 %, respectivamente.

Tabla 1. Caracterización del compost del *grupo operativo OLTREBIO*:[2]

Parámetros	**Valor**
Materia seca (%)	76,2
pH	8,09
Carbono orgánico total (%)	20,85
Nitrógeno total (%)	2,43
Relación carbono/nitrógeno (C:N)	8,58

- *Té de compost en la explotación*

Para mejorar el rendimiento de la producción ecológica, el grupo operativo OLTREBIO probó el efecto del té de compost (TC) en un huerto de cerezos (variedad Lapins) y dos viñedos (variedades Sofia Seedless y Crimson Seedless). El té de compost se obtuvo mediante la extracción acuosa del compost en la explotación, que se colocó en una bolsa coladora de malla fina, se sumergió

en un bioextractor casero y se incubó durante cinco días (figura 2)[2]. La extracción se realizó con una proporción de 1:5 v/v (20 %) y la oxigenación se obtuvo activando una bomba durante 15 minutos cada 3 horas[3]. La tabla 2 muestra las principales características de los tés de compost obtenidos. Los valores de pH se encuentran en torno al neutro, mientras que la conductividad eléctrica (CE) era superior a 1,5 ms/cm^2, lo que sugería una mayor dilución (1:15 v/v)[2].

Tabla 2. Caracterización del té de compost del grupo operativo OLTREBIO:[2]

Parámetros	pH	CE (ms/cm^2)	Nitrógeno (mg/l)
Agua	7,2	0,45	
Té de compost (1:5 v/v)	7,4	1,72	56,7

El té de compost se aplicó en un huerto ecológico de cerezos como tratamiento de suelo (3 l/árbol) y tratamiento foliar (250 ml/árbol) en las fases de brotación rosada, poscuajado y envero. En los viñedos ecológicos de uva de mesa, solo se aplicó al suelo en la dosis de 1,5 l/vid a una longitud de sarmiento aproximada de 15 cm y en las fases de poscuajado y envero[3].

Figura 2. Producción de té de compost en la explotación experimental CREA-AA: 1. Preparación de la bolsa con el compost que se va a extraer; 2. Extracción acuosa; 3. Comprobación de la conductividad eléctrica y del pH; 4. Diluciones; 5. Aplicación foliar en el cerezo; 6. Aplicación al suelo en el viñedo[2]

La aplicación foliar de té de compost favoreció la actividad fotosintética del cultivo, actuando como bioestimulante más que como enmienda del suelo. Por otra parte, la aplicación de compost y té de compost aumentó de forma significativa el contenido de azúcar de la fruta en

uvas de mesa de la variedad Sophia Seedless (17,40 °Bx), y cerezas de la variedad Lapins (22,81 Bx), en comparación con el control (15,67 y 20,63 °Bx, respectivamente), y contribuyó a mejorar la condición hídrica de las plantas en comparación con el control en condiciones de estrés hídrico severo (< –1,5 MPa). El mismo efecto de la aplicación foliar del té de compost se observó en vides de Egipto, con una mejora en el contenido de azúcar de la fruta y de antocianinas[4].

- *Utilización de compost de residuos verdes*

Se llevó a cabo un experimento de tres años en Francia para evaluar el impacto del compost de residuos verdes (un mes compostado) aplicado a un suelo franco arcilloso y arenoso bajo la hilera de vides. Tras aplicar anualmente unas 126 t ha^{-1} de residuos verdes durante un periodo de tres años, el contenido de materia orgánica mejoró del 1,6 % al 4,3 % en el horizonte de 0 a 20 cm. También mejoraron otros parámetros como la relación C:N, la biomasa microbiana y el pH. Además, el tratamiento con residuos verdes aumentó significativamente el número de lombrices recogidas, con presencia de varias categorías ecológicas de lombrices, en comparación con el control (sin enmienda).

El proyecto OAD MO también demostró que el compost de residuos verdes mejoró de forma significativa el pH del suelo, de 6,3 en el control a 6,6 y 6,9 para el compost de residuos verdes y el compost comercial, respectivamente.

- *Vermicompost: cooperación directa con las lombrices*

El vermicompost son los excrementos de determinadas especies de lombrices que pueden mejorar la salud del suelo y el estado de los nutrientes. Los excrementos de lombriz (*vermicast*) son un abono orgánico nutritivo rico en humus, NPK, micronutrientes y microbios beneficiosos del suelo, así como bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo, actinomicetos y hormonas de crecimiento como auxinas, giberelinas y citoquininas. Tanto el vermicompost como su extracto líquido (*vermiwash*) son promotores del crecimiento y protectores de las plantas de cultivo[5].

El vermicompost mejora el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, además de aumentar la diversidad y la actividad de microbios y nematodos antagonistas, lo que ayuda a suprimir plagas y enfermedades causadas por fitopatógenos transmitidos por el suelo[6].

Solución disponible en el mercado[1]
Veraterra es el bioestimulante de preparación del suelo de VERAGROW. Se trata de una formulación compleja a base de vermicompost, complementada con extractos de algas, que tiene una acción polifacética:

[1] *Veraterra es una de las tecnologías/productos ganadores del Crowd-Writing Contest organizado por Climed-Fruit en 2023, dirigido a empresas privadas, para dar a conocer a los agricultores mayoritarios las innovaciones más recientes que favorecen la resiliencia al cambio climático. Consulte aquí todas las tecnologías ganadoras.*

- ✓ Estimula la flora microbiana, con un aumento de la actividad enzimática en la degradación de la materia orgánica y un incremento significativo de las asociaciones simbióticas que estimulan los cultivos.
- ✓ Mejora la calidad fisicoquímica del suelo, con mayor capacidad de almacenamiento de nutrientes, lo que reduce la pérdida de agua y el riesgo de acidificación o alcalinización del suelo debido a su acción amortiguadora.
- ✓ Mejora la biodisponibilidad de los nutrientes.

Figura 3. Proceso de fabricación del bioestimulante Veraterra (Veragrow): 1. Selección de los principios activos; 2. Producción de un vermicompost rico y estable; 3. Extracción de los principios activos y enriquecimiento de la solución; y 4. Envasado en un tamaño práctico

1.1.2 *Mulching*

El *mulching* se utiliza principalmente para controlar las malas hierbas o mantener la humedad del suelo (para más detalles, véanse los subtemas 2 y 3). Fabricado con distintos tipos de materiales naturales, también tiene el efecto secundario de mejorar la salud del suelo una vez que se ha deteriorado.

Se evaluó el efecto de la siembra directa con *mulching* de paja de arroz sobre los parámetros de salud del suelo, incluido el carbono orgánico del suelo (COS), en dos plantaciones de cítricos de la llanura costera valenciana en España; estas plantaciones son conjuntamente representativas del clima mediterráneo semiárido de verano cálido en tierras llanas [7]. El *mulching* de paja redujo la temperatura del suelo y favoreció por cuatro el crecimiento de las raíces, así como el desarrollo de la macrofauna del suelo. Bajo el *mulching* de paja, la macroporosidad fue entre 2 y 14 veces

mayor, y la fracción de masa de COS aumentó un 10 % más que en el suelo desnudo. Sin embargo, los efectos beneficiosos del *mulching* de paja sobre la salud del suelo son limitados después de tres años de tratamiento. Se recomienda añadir fertilizantes orgánicos o enmiendas junto a una labranza superficial[7].

Se ha demostrado que el uso de *mulching* de paja alrededor de cultivos perennes recién plantados mejora el crecimiento de las plantas, reduce la mortalidad y aumenta la velocidad de recuperación[8]. En 2023, durante un ensayo llevado a cabo en Francia, se plantaron manzanos injertados en secano y se aplicaron dos modalidades: una con *mulching* y la otra labrada y abonada con 60 unidades fertilizantes de nitrógeno al año. En el momento del rebrote, la parcela a la que se había aplicado *mulching* tenía una tasa de mortalidad del 12 %, mientras que la parcela que se había labrado y abonado tenía una tasa de mortalidad del 20 %. El crecimiento del injerto se midió a finales de agosto. La longitud media de los brotes del grupo de control fue de 18 cm, mientras que la del grupo que no recibió abono fue de 27,5 cm. Este aumento del crecimiento se observa a menudo, sobre todo en suelos bien drenados o pobres[8].

El proyecto VITIMULCH probó diferentes tipos de *mulching* bajo las hileras de vides en el sur de Francia durante tres años, entre 2020 y 2023. Bajo las hileras se utilizaron diferentes materiales: conchas de ostra trituradas, corteza de madera, virutas de madera, residuos verdes compostados, sarmientos de vid, fieltros vegetales, etc., como se muestra en la figura 4. Cada tipo de *mulching* se instaló a una altura de unos 15-20 cm y una anchura de 60 cm.

Figura 4. Diferentes tipos de «mulching» bajo la hilera en el momento de su instalación como parte del proyecto VITIMULCH, Gaillac (Francia)

Los diferentes tipos de *mulching* mejoraron los atributos físicos y químicos del suelo y aumentaron sus niveles de humedad (véase el subtema 3). Por ejemplo, la aplicación durante tres años de virutas de madera bajo la hilera ha mejorado la materia orgánica del suelo del 1,8 %

al 2,5 % y afectado de forma positiva al recuento de lombrices en comparación con las hileras desherbadas químicamente. Los resultados iniciales ilustrados en la figura 5 muestran el impacto de diferentes tipos de *mulching* sobre las lombrices del suelo tras su deterioro.

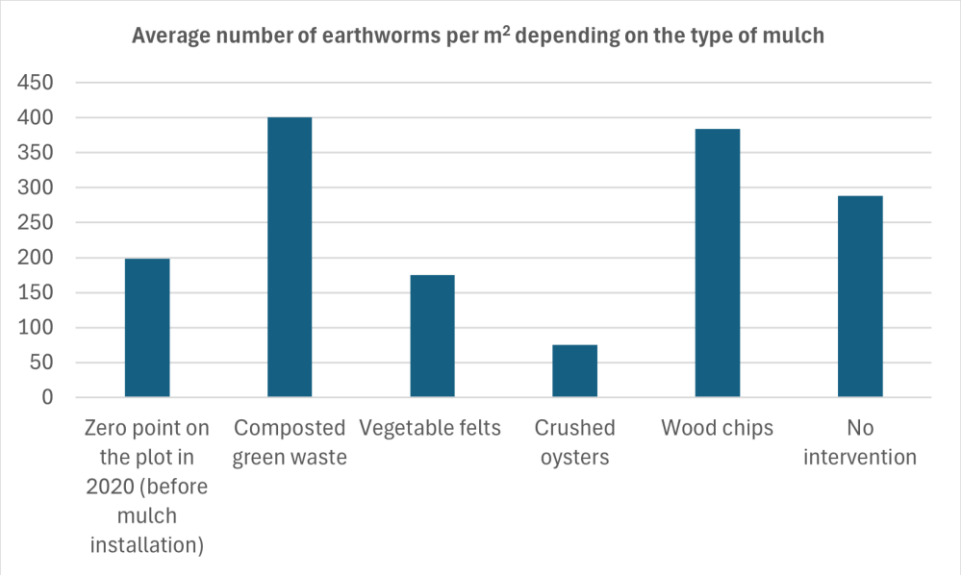

Figura 5. Abundancia de lombrices (número medio por m^2) en función del tipo de «mulching». De izquierda a derecha: Punto cero en la parcela en 2020 (antes de la instalación del «mulching»); residuos verdes compostados; felts vegetales; ostras trituradas; virutas de madera; y sin intervención; proyecto VITIMULCH

1.2 Residuos de cultivos y subproductos

1.2.1 Utilización de los residuos de poda

Los productores de cítricos solían quemar los restos de poda, pero esta práctica está ahora restringida, ya que provoca riesgos medioambientales y posibles riesgos para la salud humana, además de contribuir a las emisiones de CO_2 a la atmósfera. Se recomienda colocar restos de poda de cítricos para cubrir al menos el 30 % (50 % en el caso de frutales como el olivo o el almendro) de la superficie del suelo entre hileras. La colocación de estos restos en la superficie del suelo crea una capa protectora que reduce la erosión y mantiene el suelo húmedo, ya que reduce la evaporación del agua. Además, se produce un aumento de la materia orgánica del suelo y del carbono generado en el suelo. También sirve de refugio a la fauna auxiliar. El proyecto «Mejora del suelo y la planta a partir de restos de poda enriquecidos» ha demostrado correctamente que la aplicación de restos de poda de cítricos triturados, enriquecidos con hierba y leguminosas cultivadas como cubierta vegetal, duplicaba la actividad biológica del suelo en comparación con el control, favorecía el almacenamiento de agua en el suelo y aumentaba el de carbono orgánico. Este experimento ilustra el impacto positivo de reutilizar los restos de poda en el campo en lugar de eliminarlos o quemarlos.

Además, el grupo operativo Carbocert evaluó los beneficios de integrar los restos de poda en viñedos y huertos de cítricos, olivos y almendros, esparciendo estos restos sobre la superficie del suelo en el entresurco. Para hacerlo correctamente, los restos deben picarse o triturarse antes de esparcirlos (figura 6). Los restos picados o triturados deben ser lo suficientemente pequeños

para evitar la formación de terrones donde puedan anidar las plagas, para no entorpecer otras operaciones en el huerto o el viñedo (tratamientos, siembra, etc.) y para facilitar la descomposición de los restos. La descomposición lenta significa que el carbono se introduce gradualmente y durante un largo periodo, lo que puede aumentar el contenido de carbono orgánico en las capas superficiales del suelo en un 60 %. Cuando estas prácticas se combinan con el *mulching*, este aumento alcanza el 73 % (resultados para viticultura). En los huertos frutales, el grupo operativo Carbocert evaluó un potencial de absorción de carbono cercano a 1,5 t ha^{-1} al $año^{-1}$.

Figura 6. Gestión de la cobertura de restos de poda en un cultivo de cítricos (foto: LIFE Low Carbon Feed) y trituración antes de su aplicación en el pasillo

1.2.2 Reciclaje de subproductos agrícolas

- *Reutilización de la cáscara de almendra*

El reciclado de cáscaras y cascarillas de almendra (figura 7) como enmienda ecológica en los huertos mejora la biomasa y la actividad microbiana del suelo, lo que favorece la salud del suelo, el ciclo de nutrientes y el almacenamiento de carbono. Los resultados de un ensayo de campo realizado en California en suelo franco irrigado mostraron que las enmiendas de cáscaras y cascarillas aplicadas en superficie aumentaron significativamente la biomasa microbiana con bacterias y hongos en comparación con los controles[9]. Esta capa orgánica favoreció diversas comunidades microbianas y mejoró la multifuncionalidad del suelo y la actividad microbiana. Las enmiendas se descompusieron en un 45 % en el plazo de un año, lo que redujo la relación C:N de la enmienda de 53:1 a 29:1, sin que eso afectara negativamente al estado del nitrógeno en los árboles o rendimientos. Asimismo, la densidad de la biomasa radicular del almendro se duplicó en los suelos enmendados, lo que destaca el papel de la capa orgánica en el fomento del crecimiento radicular y la mejora de las condiciones del suelo.

Figura 7. Fotos de tratamientos de cáscara y cascarilla de una tonelada por acre (arriba) y de cáscara de una tonelada por acre (abajo) en una localidad del condado de Merced en 2017, durante los meses de marzo (izquierda), abril (centro) y julio (derecha). Fuente:[10]

❖ *Recuperación de efluentes: ejemplo en viticultura*

El proyecto WETWINE desarrolló una tecnología de recuperación de residuos vitivinícolas que ofrece una alternativa de tratamiento de lodos con escasa instalación y mínimos requisitos energéticos. Las aguas residuales de la bodega pasan por un digestor hidrolítico anaeróbico, donde tiene lugar la depuración inicial. A continuación, la parte líquida se envía a humedales artificiales de flujo subsuperficial (SSCW, del inglés «subsurface flow constructed wetlands»), donde el agua se trata mediante una combinación de SSCW verticales y horizontales plantados con juncos. La parte sólida se envía a un humedal de tratamiento de lodos para su estabilización anaeróbica, y los lodos pueden reciclarse como enmienda orgánica del suelo para los viñedos como parte de la economía circular. La composición de los lodos producidos es muy variable, dependiendo de las condiciones agroclimáticas locales y del origen de los lodos.

La tecnología ha demostrado que los lodos de viticultura son inocuos y pueden incorporarse a los viñedos de forma fácil, económica y ecológica. Sin embargo, tiene un impacto menos pronunciado sobre la calidad del suelo que las enmiendas comerciales, que contienen más nutrientes. Se necesitan más estudios y una instalación completa antes de poder realizar ensayos a mayor escala.

1.3 Biocarbón

El biocarbón, una sustancia a base de carbono procedente de la pirólisis de residuos orgánicos, resulta prometedor para aumentar el contenido de carbono en las zonas mediterráneas. El biocarbón se incorpora al reglamento de la UE sobre fertilizantes[11] y está autorizado en la producción agrícola ecológica[12]. En España, la aplicación de biocarbón de 100 t ha^{-1} (20 t ha^{-1} al $año^{-1}$) aumentó el carbono orgánico total (COT) en 10-30 g kg^{-1} y, en otro experimento, el COT se duplicó tras aplicar 60 t ha^{-1} de biocarbón durante dos años. En Italia, tras dos años de aplicación

de biocarbón, se produjo un aumento del contenido hídrico disponible en el suelo (3,2 %/45 % para las dosis de aplicación de 16,5/33 t ha^{-1}, respectivamente) y del potencial hídrico foliar (24-37 %) durante las sequías. Además, el rendimiento de uva por planta aumentó significativamente durante cuatro años tras la primera aplicación de biocarbón, oscilando entre el 16 % y el 60 %. El efecto del biocarbón sobre el rendimiento fue mayor en los años con menos precipitaciones, lo que sugiere un efecto protector del biocarbón contra el estrés hídrico de las plantas[13].

1.4 Comparación de diferentes enmiendas en el almacenamiento de carbono en el suelo

El proyecto OAD MO ha llevado a cabo durante ocho años experimentos sobre la aplicación de materia orgánica en suelos vitícolas, incluidos compost de residuos verdes, compost comercial, compost de orujo y cultivos de cobertura. Los resultados ponen de manifiesto que las enmiendas ecológicas mejoran el contenido de carbono y de materia orgánica del suelo, aunque son escasas las diferencias significativas entre los distintos tipos de materia orgánica probados, debido a la lenta evolución de los niveles de carbono del suelo y a la heterogeneidad de la distribución del carbono. Las enmiendas ecológicas también aportan elementos minerales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, que están disponibles para las vides a medio y largo plazo. Los datos se utilizaron para parametrizar y validar el modelo AMG para viticultura, que calcula los cambios en las reservas de carbono orgánico a largo plazo. Se desarrolló un prototipo de herramienta de simulación para proporcionar a los agricultores un instrumento de apoyo a la toma de decisiones. Se realizaron simulaciones de la evolución de las reservas de carbono para diversos escenarios de prácticas de cultivo, partiendo de una situación inicial, en diferentes viñedos y para distintas situaciones de suelo. Se analizaron tres escenarios para el caso de estudio de un viñedo de Languedoc con el suelo aluvial pedregoso típico de Costières de Nîmes:

- Escenario de referencia: desbroce mecánico de todas las hileras intermedias y aportación de compost de residuos verdes (25 toneladas cada cuatro años, 36 % MO, ISMO 60)
- Escenario 1: cultivo de cobertura temporal en todas las hileras intermedias, aplicación de 25 toneladas de compost de residuos verdes cada cuatro años (36 % MO, ISMO 65) y restos de poda sobre el suelo
- Escenario 2: desbroce mecánico y restos de poda
- Escenario 3: residuos de poda y cultivos de cobertura temporales en cada calle.

Esta simulación demostró que el carbono del suelo aportado por la enmienda ecológica (compost de residuos verdes) es muy superior al aportado por la cubierta herbácea (unas cinco veces superior) (figura 8). El modelo AMG predijo un aumento de las reservas de carbono del suelo de 2 t ha^{-1} tras unos 15 años de aplicación de una cubierta herbácea temporal. Además, la aplicación de enmiendas ecológicas podría aumentar significativamente las reservas de carbono del suelo en 10 y 15 t C/ha para 2050.

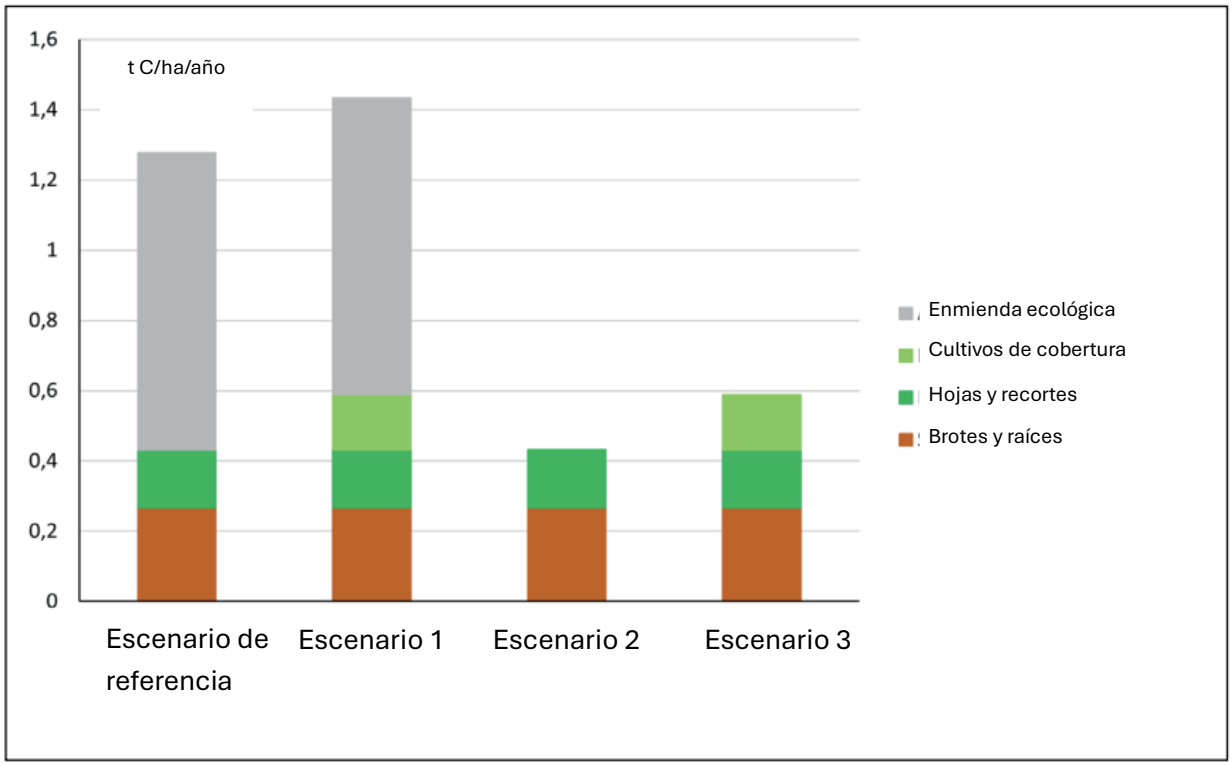

Figura 8. Resultados de la simulación mediante el OAD MO en el caso de estudio del viñedo de Languedoc[14]

2 CULTIVOS DE COBERTURA Y LABRANZA REDUCIDA EN CULTIVOS PERENNES PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL SUELO

Para aumentar la absorción de carbono orgánico del suelo (COS) en el Mediterráneo, la selección y gestión de cultivos de cobertura en cultivos perennes debe tener en cuenta factores como la fertilidad del suelo, la composición de la comunidad vegetal, el método de terminación, la gestión de los restos y el régimen de perturbación del suelo. Además, el potencial de los cultivos de cobertura depende del clima, la gestión y los cambios en la comunidad microbiana.

2.1 Cubierta de hierba

2.1.1 Gestión de la cubierta permanente espontánea en los huertos de almendros

El objetivo de la cubierta herbácea permanente consiste en mantener y nutrir la cubierta vegetal entre las hileras, ya sea espontánea o sembrada. El grupo operativo CARBOCERT examinó la aplicación de esta práctica en huertos de almendros (España), para evaluar su impacto en el suelo y proporcionar asesoramiento técnico. La práctica más eficaz para absorber carbono en el suelo es un cultivo de cobertura espontáneo, con la recomendación de utilizar principalmente herramientas de corte (segadoras, desbrozadoras, desmalezadoras, etc.) o una labranza muy superficial para mantenerlo y dejar siempre los residuos vegetales en la superficie. Estos mismos tipos de gestión se recomiendan para el control de las malas hierbas en la hilera y podrían combinarse, para una mayor eficacia, con el *mulching*, obtenido bien a partir de la siega de la

propia cubierta (figura 9), bien a partir de aportes externos (priorizando el *mulching* natural y local). Las ovejas o las cabras también pueden utilizarse para el control de la cubierta en todos los cultivos perennes (incluidos los olivares, como se muestra en la figura 9), con la ventaja de que también aportan materia orgánica adicional al suelo. El pastoreo solo es aconsejable durante el letargo invernal, ya que los animales también pastan las ramas inferiores.

Figura 9. Cubierta vegetal espontánea mantenida mediante siega en huertos de almendros (izquierda) y ovejas utilizadas para el control de la cubierta en un olivar (grupo operativo CARBOCERT)

Para limitar la competencia por el agua y los nutrientes, las cubiertas más eficaces son las que tienen un ciclo vegetativo opuesto al del almendro. Dicha cubierta debe mantenerse entre la fase de senescencia de la almendra y hasta la iniciación floral, y debe marchitarse de forma natural a partir de la diferenciación floral y hasta después de la cosecha, si es posible. Para contribuir a garantizar la composición más favorable de la cubierta espontánea, puede planificarse la siega para favorecer la resiembra natural de las especies deseadas e impedir la floración de las especies no deseadas.

2.1.2 Cubierta de hierba bajo la hilera

La aplicación de una cubierta herbácea natural o espontánea es un proceso sencillo, mientras que el uso de una cubierta herbácea sembrada, o cubierta de césped, puede controlar más eficazmente la competencia por el agua y los nutrientes mediante la selección de especies, variedades o mezclas adecuadas. Un experimento realizado en vides por el IFV ha demostrado que, en los primeros años, las mezclas a base de *Koeleria* tuvieron un impacto muy reducido sobre el vigor de las vides. En cuanto a la cubierta herbácea natural, su impacto sobre las vides ha tendido a aumentar a lo largo de los años, paralelamente a su tasa de cobertura bajo la hilera. La introducción de leguminosas es una de las soluciones que se están probando en la actualidad para gestionar la competencia por el nitrógeno.

El grupo operativo IOCONCIV estudió el uso de un cultivo de cobertura de autorresiembra bajo una hilera de vides en Toscana (Italia). La cubierta permanente sembrada bajo la hilera fue de *Trifolium subterraneum* ssp. *brachycalicinum* por su capacidad de autosiembra, lo que permite diferentes ciclos durante 3-4 años. La subespecie *brachycalicinum* ha evolucionado para tolerar los suelos secos y se adapta mejor a los suelos francos arcillosos y limosos subalcalinos. La biomasa de trébol sirve de *mulching* vivo en otoño, invierno y primavera, pasando a *mulching* inerte en verano, con el efecto de minimizar la competencia con las vides por el agua y los

nutrientes, y reducir el estrés por sequía debido a la cobertura del suelo durante el verano. Al final del verano, la germinación espontánea de las semillas de trébol inicia un nuevo ciclo biológico bajo las hileras, lo que ofrece beneficios como la supresión de la aparición de malas hierbas y la mejora de la fertilidad del suelo.

2.2 Abonos verdes y cultivos intercalados

El abono verde es un cultivo de cobertura vegetal que produce biomasa y se devuelve al suelo para mejorar su fertilidad y estructura si se mantiene bajo control la competencia por el agua y los nutrientes. Esto supone un desafío, pero puede ser de verdadero interés en el contexto de los suelos pobres de la cuenca mediterránea. La fecha, el tipo de destrucción y la elección de las especies son factores importantes para la correcta aplicación de esta práctica. El abono verde puede influir en el suministro de nitrógeno al cultivo, lo que limita consecuentemente el uso de aportes[15].

El cultivo intercalado consiste en sembrar dos o más cultivos próximos entre sí. El objetivo final de los cultivos intercalados es aumentar el rendimiento por hectárea y unidad, y esto es posible gracias a un mejor aprovechamiento de los recursos del suelo que, de otro modo, solo los utilizaría un único cultivo. El agricultor puede elegir qué cultivos cosechar, si todos, algunos o ninguno.

2.2.1 Ejemplo de aplicación de abonos verdes en un viñedo mediterráneo

Durante un experimento llevado a cabo en un viñedo en Francia, se midió que aproximadamente el 62 % del carbono en biomasa de abono verde terminada se mineralizó, mientras que el resto se clasificó como carbono «estable», según lo indicado por el índice de estabilidad de materia orgánica (ISMO) [16]. El ISMO es una medida del potencial del producto para almacenar carbono en el suelo, expresado como porcentaje de la materia orgánica del producto. Cuanto más se acerque el valor de ISMO al 100 %, más tiempo permanecerá en el suelo el carbono aportado por el abono verde. Se han realizado cálculos para determinar la capacidad teórica de almacenamiento de carbono de los abonos verdes. Por ejemplo, un abono verde de 4 t ha^{-1} de materia seca (sembrado en todas las hileras intermedias), representa 1600 kg C ha^{-1}, es decir, 608 kg de carbono estable por ha (ISMO 38 %). En el caso del abono verde sembrado en hileras alternas, el potencial de almacenamiento de carbono es de 200 kg/ha, es decir, 50 kg C/t de materia seca. Este almacenamiento de carbono varía poco en función de la especie de abono verde utilizada, ya que todas tienen el mismo índice de estabilidad de materia orgánica[16].

En el contexto mediterráneo, la siembra del abono verde lo antes posible (finales de agosto/principios de septiembre) garantizará que las plántulas estén bien desarrolladas durante las fuertes lluvias del otoño para reducir la erosión, además de evitar que las hojas de la vid se vuelen (son una fuente de nutrición para el suelo). La sobredosificación de plántulas (para todas las especies) también es aconsejable en condiciones mediterráneas, así como la elección de una mezcla bien diversificada (leguminosas, gramíneas, brásicas) para garantizar la sostenibilidad de la cobertura con rotación de la especie dominante.

La elección del método de terminación depende de los objetivos que se persigan. La trituración o siega en primavera destruye las partes aéreas y permite su secado. La siega o la rodadura del suelo pueden ser útiles para cubrir con *mulching* y mantener el suelo sin necesidad de desbrozamiento o labrado con productos químicos. En un contexto mediterráneo, es aconsejable terminar el cultivo de cobertura a principios de la primavera para evitar demasiada competencia hídrica, que también repercutiría en la mineralización del cultivo de cobertura una vez terminado.

2.2.2 Cumplimiento de los objetivos de la iniciativa 4 ‰ en el olivar mediante cultivos intercalados

El proyecto DIVERFARMING llevó a cabo un estudio de tres años en un huerto de olivos tradicional de secano del sur de España, con cultivo en pasillos con labranza mínima en comparación con la labranza convencional, centrándose en el carbono orgánico y la calidad del suelo. Se probaron tres estrategias de cultivo intercalado (*Crocus sativus* [D-S], *Vicia sativa* y *Avena sativa* en rotación [D-O], y *Lavandula x intermedia* [D-L]) en comparación con el control con labranza convencional. El cultivo intercalado aumentó el contenido orgánico del suelo en la capa superficial (0-10 cm) en un 41,1 % (D-S), 28,5 % (D-O) y 30,5 % (D-L). No se observaron diferencias significativas en los índices de calidad del suelo, pero los cultivos intercalados cumplieron los objetivos de la iniciativa 4 ‰, con un aumento anual del carbono del suelo por hectárea y año del 80 % (D-S), 87,4 % (D-O) y 86,4 % (D-L). Esto pone de manifiesto el potencial de los cultivos intercalados para aumentar el almacenamiento de carbono y mejorar la sostenibilidad del suelo a corto plazo[17].

2.2.3 Comparación de los cultivos de cobertura y sus efectos sobre el suelo en huertos de cerezos y almendros

Durante dos años, se investigaron los efectos de diferentes cultivos de cobertura, cultivo mecánico y tratamientos herbicidas sobre el contenido de materia orgánica del suelo y las propiedades físicas del suelo en un huerto de cerezos con suelo arcilloso situado en la región septentrional de Turquía[18].

Como cultivos de cobertura se utilizaron *Trifolium repens L.* (TR), *Festuca rubra* ssp. *rubra* (FRR), *Festuca arundinacea* (FA), mezcla de *T. repens* (40 %) + *F. rubra rubra* (30 %) + *F. arundinacea* (30 %) (TFF), *Vicia villosa* (VV) y *Trifolium meneghinianum* (TM). Los cultivos de cobertura se segaron en el periodo de floración. Transcurridos 90 días desde la cosecha de las semillas, se recogieron muestras de suelo a dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) en cada parcela. Los tratamientos TR y VV aumentaron el contenido de materia orgánica del suelo a 0-20 cm de profundidad en comparación con las parcelas de control no tratadas (figura 10)[18].

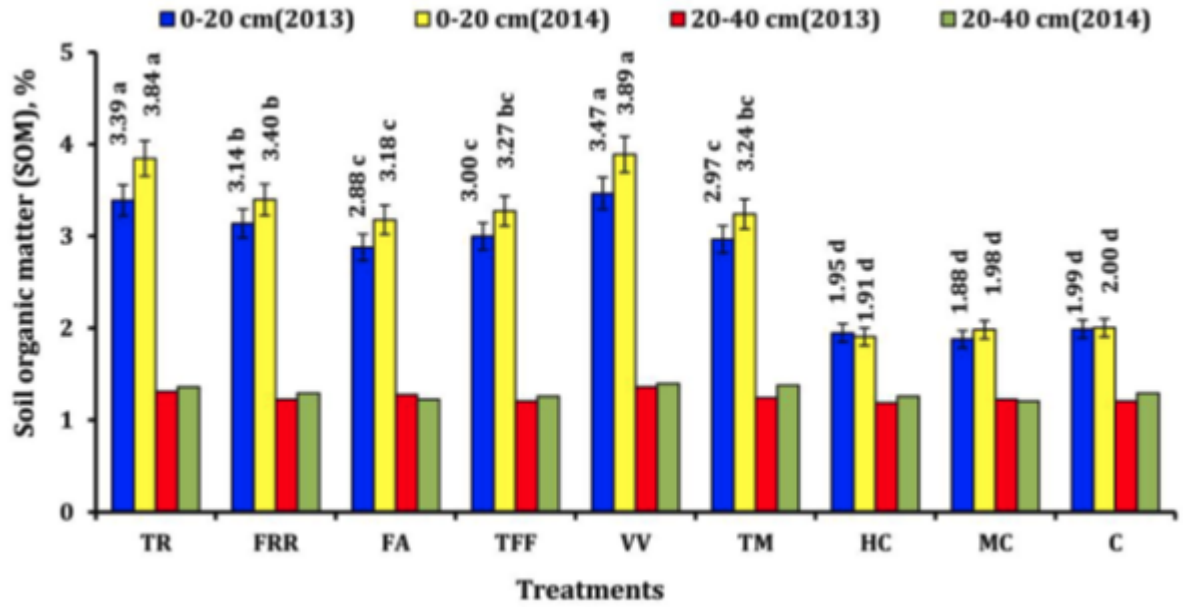

Figura 10. Efectos de los cultivos de cobertura y otros tratamientos sobre la materia orgánica del suelo (MOS) a 0-20 cm y 20-40 cm de profundidad en un huerto de cerezos con suelo arcilloso. Trifolium repens L. (TR), Festuca rubra rubra L. (FRR), Festuca arundinacea (FA), T. repens (40 %) + F. rubra rubra (30 %) + F. Arundinacea (30 %) (TFF), Vicia villosa (VV), Trifolium meneghinianum (TM), una parcela cultivada mecánicamente (MC), un tratamiento herbicida (HC) y una parcela de control (C)[18]

También se realizó un experimento de campo en Córdoba (España), en almendros de 10 años de la variedad Guara regados por goteo durante dos campañas, para examinar el potencial de absorción de nitrógeno y carbono del suelo de tres cultivos de cobertura sembrados (cebada, veza vellosa y una mezcla de 65 % de cebada y 35 % de veza) y el control de la flora espontánea. En cuanto a la fertilidad del suelo en términos de nitrato, los mejores resultados se observaron en la veza (figura 11), con una mejora del contenido de nitrato del suelo de más del 35 %, mientras que la mezcla y la cebada como cultivos de cobertura tuvieron un mayor potencial para la absorción de carbono, aumentando el carbono orgánico del suelo en más de 1,0 Mg ha^{-1} durante el periodo de estudio (figura 12)[19].

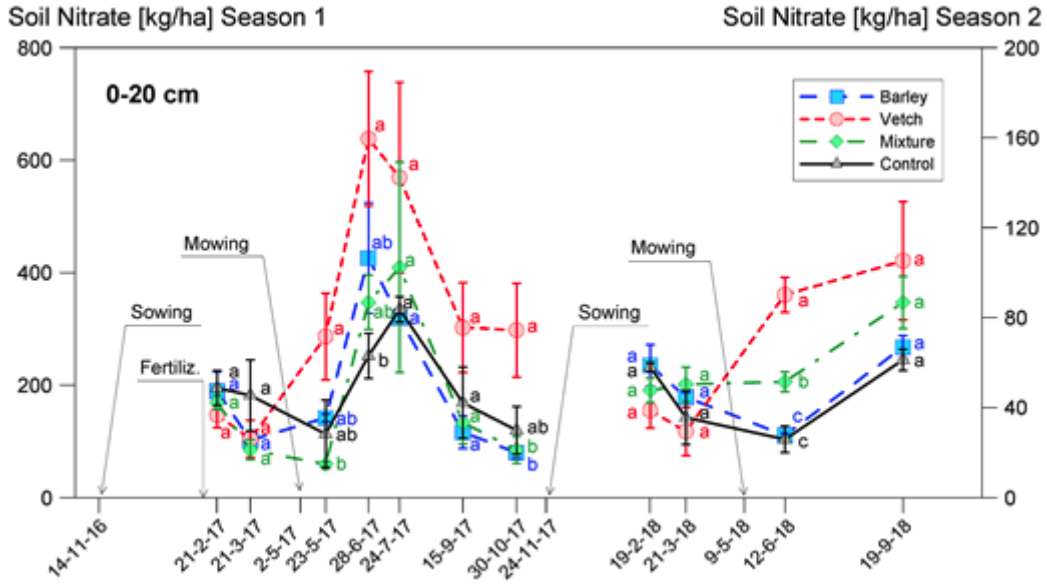

Figura 11. Contenido de nitrato del suelo a 0-20 cm de profundidad durante las dos campañas de seguimiento.
Cebada (cuadrado azul), veza (círculo rojo), mezcla (rombo verde), control (triángulo negro)[19]

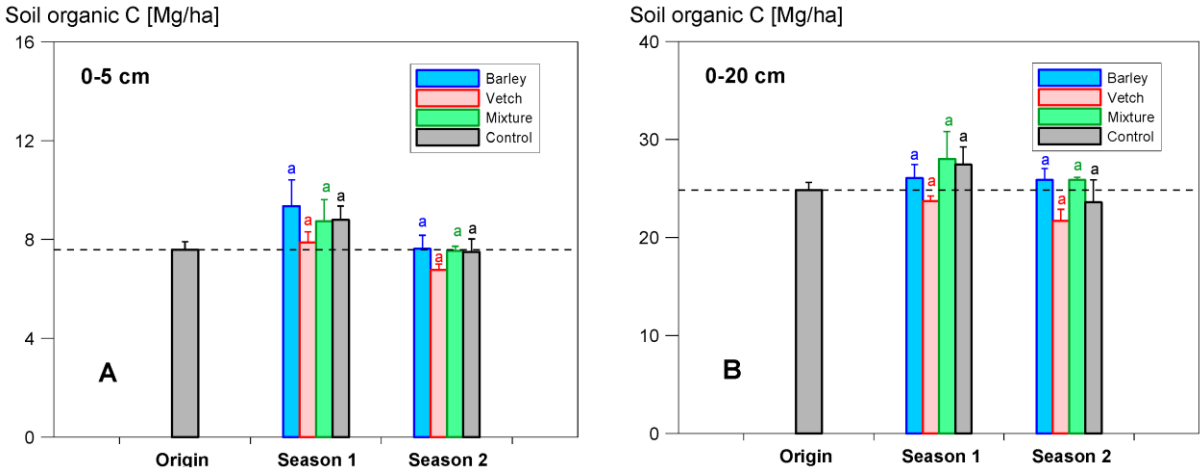

Figura 12. Carbono orgánico del suelo al principio y al final del experimento durante el periodo de estudio a 0-5 cm (A) y 0-20 cm (B) de profundidad del suelo[19]

2.3 Labranza de conservación

La labranza de conservación hace referencia a un conjunto de prácticas de gestión del suelo destinadas a reducir su alteración, mantener la materia orgánica y minimizar la erosión, mejorando al mismo tiempo la infiltración y retención del agua. La labranza de conservación va de la mano de las prácticas de cobertura del suelo mencionadas anteriormente. Puede resumirse en tres principios clave:

1) Mínima perturbación del suelo: limita la frecuencia y la profundidad de la labranza para evitar la alteración de la estructura del suelo y la actividad microbiana.

2) Cobertura del suelo: mantiene el suelo cubierto con residuos de cultivos, cultivos de cobertura o vegetación natural para evitar la erosión y retener la humedad.

3) Rotación de cultivos o cultivos de cobertura: aumenta la biodiversidad, mejora el ciclo de nutrientes y reduce la presión de plagas y enfermedades.

La labranza afecta a las comunidades bacterianas del suelo al reducir la materia orgánica de este como fuente de carbono y nutrientes, al cambiar la humedad y la temperatura del suelo y al disminuir la proporción de macroagregados estables, que proporcionan un microhábitat favorable para las bacterias[20]. Estudios previos han demostrado que la labranza reducida aumenta de forma significativa el contenido orgánico del suelo en la profundidad de 0-10/30 cm en comparación con la labranza convencional, con independencia de las condiciones climáticas, el tipo de suelo y el sistema de cultivo[21].

Cuanto más intensivo sea el arado, más pobre será el suelo. El proyecto GASCOGN'INNOV ha demostrado que la reducción de la intensidad de la labranza y el aumento de la duración de la cubierta vegetal pueden mejorar la abundancia de todos los organismos estudiados (lombrices, nematodos, bacterias y hongos), aunque no necesariamente su diversidad.

3 AGROFORESTERÍA Y SETOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE CARBONO Y LA CONSERVACIÓN DEL SUELO

Los árboles y los setos desempeñan un papel crucial en la formación de la fertilidad del suelo y el almacenamiento de carbono, ya que actúan como sumideros de carbono al absorber el CO_2 atmosférico mediante la fotosíntesis y almacenarlo en su biomasa (madera, raíces, hojas, etc.) y en el suelo a través de los sistemas radiculares y la materia orgánica.

3.1 Agroforestería

Los cultivos perennes y las prácticas de gestión como la no labranza, el *mulching* de residuos, la rotación prolongada de cultivos y los cultivos de cobertura son estrategias que pueden contribuir a aumentar las reservas de carbono del suelo en las zonas mediterráneas, lo que contribuye a reducir las emisiones agrícolas de GEI. Al combinar algunas de estas características, los sistemas agroforestales tienen un gran potencial de mitigación a través de la absorción de carbono. De los sistemas agroforestales de la península ibérica, en el sur de Europa tienen gran importancia el *montado* en Portugal y la *dehesa* en España. Se componen principalmente de árboles polivalentes como castaños (ssp. *Castanea*), robles (ssp. *Quercus*) y olivos (ssp. *Olea*

europa L.) con vegetación de sotobosque como pastos en régimen de pastoreo extensivo por el ganado (ovejas, cerdos negros y ganado vacuno), normalmente en un esquema de rotación[22].

Los sistemas agroforestales mediterráneos suelen tener una baja fertilidad del suelo y se ven limitados por su escasa profundidad y su baja disponibilidad hídrica y de nutrientes, lo que da lugar a pastos naturales con poca productividad y calidad. Tras percatarse de la baja productividad de los pastos, los agricultores de la península ibérica empezaron a sembrar pastos de mezcla ricos en leguminosas (figura 13), lo que contribuyó a aumentar simultáneamente la productividad de estos pastos y la concentración de carbono orgánico en el suelo, además de evitar la degradación del suelo[22].

Figura 13. Vista parcial de un sistema agroforestal portugués con ssp. Quercus y un pasto biodiverso[22]

Junto con los árboles, los pastos permanentes (naturales o mejorados) también proporcionan una forma rápida de acumular carbono en el suelo, generando una cantidad significativamente mayor de carbono orgánico en la capa de suelo de 0-10 cm bajo la copa de los árboles tanto en los pastos españoles no gestionados (2,4 kg C m^{-2}) como en los mejorados (3,1 kg C m^{-2}), en comparación con el campo abierto (1,8 y 2,1 kg C m^{-2} en pastos naturales y mejorados, respectivamente)[23].

3.2 Setos

Los setos suelen encontrarse en lugares donde confluyen distintos ecosistemas, como el límite entre bosques y regiones agrícolas. Estas zonas suelen caracterizarse por una mayor biodiversidad y una mayor tasa de intercambio de nutrientes. En el Mediterráneo, los setos entre bosques, matorrales y campos agrícolas pueden actuar como zonas dinámicas para el ciclo de nutrientes, la retención de agua, la acumulación de materia orgánica y el control del viento. Por lo tanto, tienen efectos similares sobre la conservación del suelo a los mencionados

anteriormente para la agroforestería. Los setos también pueden reducir la escorrentía y, por tanto, la pérdida de materia orgánica a causa de la erosión del suelo. Según una revisión bibliográfica[24], los setos contribuyen a un almacenamiento adicional de carbono de 750 kg C/ha^{-1} por seto al año^{-1}. Sin embargo, una vez que el viñedo o el huerto están instalados, suele resultar difícil crear un seto debido a la falta de espacio. En tales casos, es aconsejable crear setos de arbustos más pequeños a lo largo de los límites de la parcela.

3.2.1 Simulación del almacenamiento de carbono con setos en viticultura

El almacenamiento de carbono asociado a la plantación de setos alrededor de las parcelas de vides puede estimarse utilizando una calculadora de la huella de carbono.

Por ejemplo, a escala agrícola, cada viñedo puede enmarcarse con setos mixtos y dividirse añadiendo setos de arbustos intraparcelarios. Los setos mixtos son más grandes que los setos de arbustos. Contienen árboles grandes y arbustos altos y bajos que forman un estrato alto y otro intermedio. El tipo de suelo y las condiciones climáticas determinarán la elección de las especies. En este ejemplo, se ha considerado una gran parcela de 30 hectáreas, con 2600 metros lineales de seto mixto plantado, lo que corresponde a 90 metros lineales por hectárea. Además, se han plantado setos de arbustos cada 60 metros entre las hileras de vides, lo que corresponde a 150 metros lineales de setos intraparcelarios por hectárea. Así, tenemos setos altos y voluminosos alrededor de la parcela y setos más pequeños intercalados con las hileras de vides dentro de la parcela.

- Almacenamiento de carbono de un seto mixto situado alrededor de la parcela, a razón de 90 metros lineales por hectárea: 280 kg eqCO_2/ha/año (calculado con la **herramienta GES&VIT desarrollada por el IFV)**.
- Almacenamiento de carbono en setos de arbustos alternados con hileras de vides, para dividir la parcela, a razón de 150 metros lineales por hectárea: 330 kg eqCO_2/ha/año.

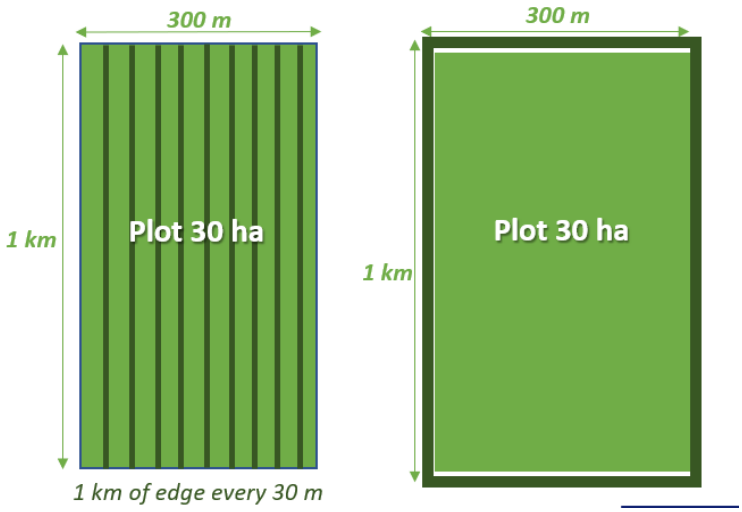

Figura 14. Izquierda. Setos intraparcelarios: para 30 ha, hay un seto cada 30 m, es decir, 150 metros lineales/ha de setos intraparcelarios
Derecha. Setos alrededor de la parcela: para 30 ha, hay 2600 metros lineales de perímetro, es decir, 90 metros lineales/ha de seto alrededor del perímetro (fuente interna)

Estos valores de almacenamiento se calculan a partir de las cifras del método de setos con la etiqueta «Bas Carbone» (norma de bajas emisiones de carbono) y del proyecto Carbocage de la ADEME[25].

Importante:

- ✓ *Favorecer las orientaciones norte-sur para limitar y equilibrar la sombra de los árboles y arbustos sobre las vides.*
- ✓ *Mantener una distancia mínima de 3 a 4 metros entre el seto y la hilera de vides.*