

RETO CO₂ SUELOS RURALES CASTILLA-LA MANCHA

INFORME FINAL



Universidad de
Castilla-La Mancha



RETO CO2 SUELOS RURALES CASTILLA-LA MANCHA

INFORME FINAL



TITULARES/ PROMOTORES del proyecto:

GRUPOS DE DESARROLLO RURAL

1. Grupo de Acción Local de la Sierra de Segura.
2. Asociación para el Desarrollo de La Manchuela (Ceder Manchuela)
3. Asociación Grupo de Desarrollo Rural de la Sierra de Alcaraz y Campo de Montiel (Sacam)
4. Asociación para el Desarrollo Integral de la Mancha del Júcar-Centro.
5. Asociación para el Desarrollo de la Comarca “Monte Ibérico- Corredor de Almansa”
6. Asociación para la Promoción del Desarrollo de la Comarca “Campos de Hellín”
7. Asociación para el Desarrollo Sostenible del Valle de Alcudia (Ads Valle de Alcudia)
8. Asociación para el Desarrollo del Alto Guadiana-Mancha (Agm).
9. Asociación de Desarrollo del Campo de Montiel y Campo de Calatrava “Tierras de Libertad”
10. Asociación para el Desarrollo de la Comarca de Almadén “Montesur”
11. Asociación para el Desarrollo de Campo de Calatrava
12. Asociación de Desarrollo Cabañeros y Montes Norte “Entreparkes”
13. Asociación para el Desarrollo y la Promoción de la Mancha Norte de Ciudad Real (Mancha Norte, desarrollo e innovación)
14. Asociación “Promoción y Desarrollo Serrano” (Prodesa)
15. Asociación para el Desarrollo Integral de la Manchuela Alta (Adiman)
16. Federación para el Desarrollo de la Sierra y Mancha Conquense (Adesiman)
17. Centro de Desarrollo Rural Alcarria Conquense (Ceder Alcarria Conquense)
18. Asociación para el Desarrollo Integral “El Zancara” (Adi El Zancara)”
19. Asociación de Desarrollo Rural “Molina de Aragón-Alto Tajo”
20. Asociación para el Desarrollo Local de la Sierra Norte de Guadalajara (Adel Sierra Norte)
21. Federación de Asociaciones para el Desarrollo Territorial Tajo-Tajuña (Fadeta)
22. Asociación para el Desarrollo de Alcarria y Campiña (Adac)
23. Asociación para el Desarrollo de Alcarria Sur (Adasur)
24. Asociación Comarcal “Don Quijote de la Mancha”
25. Asociación para el Desarrollo de la Comarca de Talavera, Sierra de San Vicente y la Jara (Adc Tierras de Talavera)
26. Grupo de Acción Local “Dulcinea”
27. Asociación Comarcal “Castillos de Medio Tajo”
28. Asociación para el Desarrollo de la Campana de Oropesa (Adecor)
29. Asociación para el Desarrollo Integrado del Territorio “Montes Toledanos” (Adit “Montes Toledanos”)

RED REGIONAL

Red Castellano Manchega de Desarrollo Rural (Recamder)

FINANCIADO

Unión Europea FEADER (LEADER)

Junta de Comunidades de Castilla- La Mancha

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

REALIZADO

Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM).

Equipo investigador: Manuel Esteban Lucas Borja, Rocío Soria Martínez, José Luis González Jiménez, Pedro Antonio Plaza Álvarez y María Dolores Carmona Yáñez.



ÍNDICE

I. ANTECEDENTES E INTRODUCCIÓN	II
2. OBJETIVOS	15
3. ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS	17
3.1. Revisión bibliográfica y normativa a nivel europea, nacional y regional	17
3.1.1. Introducción y objetivos	17
3.1.2. Revisión y análisis de la normativa	17
3.1.3. Síntesis normativo. Identificación de vacíos y necesidades. Sugerencias y aportaciones adicionales.....	46
3.2. Recopilación y revisión informativa de proyectos previos realizados en Castilla-La Mancha	52
3.2.1. Introducción	52
3.2.2. Objetivos	53
3.2.3. Metodología	54
3.2.4. Síntesis y resumen técnico	56
3.2.5. Principales conclusiones	71
3.3. Zonificación agraria (SIG + datos SIGPAC) y visitas de campo para la edición cartografía de estado de situación actual.....	73
3.3.1. Contexto Territorial de Castilla-La Mancha.....	73
3.3.2. Fuentes de Datos y Metodología SIG	76
3.3.3. Cartografía temática de condicionantes agrarios en Castilla-La Mancha	78
3.3.4. Criterios de Zonificación Agraria	83
3.3.5. Resultados de Análisis SIG y Zonificación	84
3.3.6. Visitas de Campo y Validación	90
3.3.7. Conclusiones y Recomendaciones	91
3.4. Diseño metodológico de muestreos de campo para la evaluación de servicios ecosistémicos, con especial énfasis en la estimación de stock y capacidad de secuestro de Carbono.....	92
3.4.1. Introducción y objetivos	92
3.4.2. Diseño del protocolo técnico estandarizado para muestreos de suelos en parcelas tipo de cultivos representativos seleccionados.....	93
3.4.3. Diseño para cuantificación del stock de carbono en biomasa vegetal	98
3.5. Diseño de infraestructura IoT. Diseño metodológico de un sistema de sensores IoT y datos satelitales para el análisis funcional del suelo y cultivos tipo seleccionados....	99
3.5.1. Introducción y Objetivos	99
3.5.2. Metodología para el diseño del IoT aplicado al caso de suelos agrícolas	101
3.5.3. Resultados técnicos esperados	108

3.5.4. Identificación de posibles usuarios, aplicabilidad y transferencia de resultados.....	109
3.5.5. Impacto esperado por la implementación e integración del sistema IoT	110
3.5.6. Propuesta de herramienta web y móvil para la monitorización y verificación del carbono agrícola.	110
3.6. Síntesis, cronograma, presupuesto previsto a futuro y transferencia de conocimiento	112
3.6.1. Introducción y objetivos	112
3.6.2 Propuesta de fases de ejecución y estimación preliminar del tiempo de implantación.....	113
4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y SIGUIENTES PASOS.....	129
5. BIBLIOGRAFÍA.....	131
6. ANEXOS.....	135
Anexo I. Fichas de proyectos desarrollados en Castilla-La Mancha.....	135
Proyecto 1: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de viñedos en Tarancón (D.O. Uclés).....	135
Proyecto 2: Proyecto 2: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de almendros en Villanueva de la Jara (Villanueva de la Jara, Cuenca).....	136
Proyecto 3: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en pastos permanentes en Sierra Molina y Tortuera, Guadalajara	137
Proyecto 4: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de viñedos en Ciudad Real	138
Proyecto 5: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de albaricoques en Hellín (Campos de Hellín, Albacete).....	140
Proyecto 6: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de Toledo	141
Proyecto 7: Desarrollo de aplicación informática para la estimación de stocks de carbono agrícola en CLM	142
Anexo II. Descripción de otros proyectos Fichas de proyectos desarrollados en Castilla-La Mancha	145
1. El Atlas de Suelos Vitícolas de Castilla-La Mancha.	145
2. El informe técnico Producción Ecológica Mediterránea y Cambio Climático: Estado del conocimiento (Ecovalia/UCO, 2019)	146
3. El estudio nacional de Rodríguez Martín et al. (2016), publicado en la revista internacional Geoderma	146
4. El estudio Metales pesados, materia orgánica y otros parámetros de los suelos agrícolas y pastos de España (MARM/INIA, 2009).....	147
5. El proyecto de investigación AGL2012-34199 “Incrementar la sostenibilidad de	

los agroecosistemas: recuperar las funciones ecológicas del suelo para reducir insumos y potenciar la supresividad edáfica” (2013–2015)..... 148

6. El proyecto PID2019-105373RB-Ioo-El carbono orgánico y la biodiversidad del suelo como herramientas mitigadoras del efecto del cambio climático sobre los cultivos (2020-2024) (CLIMBIOSOIL)..... 148

7. “Desarrollo de estrategias para la valoración de la capacidad de resiliencia de cultivos leñosos y variedades frente al cambio climático” (2023–2029)” 149

8. El capítulo “Agricultura y cambio climático en Castilla-La Mancha” (Fabeiro y Brasa, UCLM) 150

9. El Proyecto de identificación y valoración de servicios ecosistémicos en Castilla-La Mancha (JCCM, 2022)..... 150

Anexo III. Estudios en otras comunidades autónomas españolas152

Andalucía (IFAPA / AEAC-SV / sector olivar).....152

Extremadura152

Comunitat Valenciana (IVIA).....152

Cataluña (IRTA / clúster INNOVI / PEPAC).....152

Navarra (INTIA / Gobierno de Navarra).....152

Región de Murcia.....152

Anexo IV. Ficha de visita de campo para validación de parcelas experimentales153



An aerial photograph of a dry, brown landscape. A dirt road runs diagonally from the top right towards the bottom center. Along the right side of the road, there is a line of small, green trees. The rest of the landscape is a vast, flat, brown field with some faint, curved lines suggesting furrows or tracks. A large, semi-transparent number '01' is overlaid on the left side of the image.

01

ANTECEDENTES E INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES E INTRODUCCIÓN

Los suelos son matrices dinámicas y complejas, compuestas de materiales orgánicos e inorgánicos, agua, aire y seres vivos (microorganismos, animales, plantas y hongos), y cada componente contribuye al funcionamiento eficaz del sistema edáfico en su conjunto. Los suelos proporcionan numerosos y valiosos servicios ecosistémicos específicamente, facilitan la provisión de bienes y servicios, como la producción de recursos y alimentos (servicios de aprovisionamiento), la filtración de agua, la mitigación de inundaciones y la regulación climática (servicios de regulación), el secuestro y almacenamiento de carbono (servicios de soporte), y la estética y la recreación (servicios culturales). Debido a diferencias en el clima, la roca madre y las condiciones de formación específicas de cada región, los suelos varían considerablemente a lo largo de la superficie terrestre.

La salud de un suelo se clasifica por su capacidad para sustentar la vida y la medida en que puede mejorar o mantener la provisión de servicios ecosistémicos. Los suelos sanos muestran una mayor resistencia al estrés, lo que proporciona mayor resiliencia a los impactos negativos de la sequía, las inundaciones y la erosión. De importancia primordial para la salud del suelo es el carbono y los servicios ecosistémicos que sustenta. El carbono influye en diversos atributos del suelo, incluyendo propiedades físicas, químicas, hidrológicas y biológicas. Por lo tanto, el carbono es un indicador robusto para evaluar la salud y la calidad del suelo.

El suelo está indisolublemente conectado con el sistema climático y con la regulación de los gases atmosféricos relevantes para el clima. En particular, los suelos desempeñan un papel fundamental en el intercambio bidireccional de carbono, como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el nitrógeno molecular (N_2), el óxido nitroso (N_2O) y el amoníaco (NH_3). El carbono del suelo es fundamental para la configuración de los factores y características edáficas del suelo: facilita la agregación del suelo, el desarrollo de su estructura y, por consiguiente, los flujos físicos de agua y gases. La pérdida de carbono del suelo, por mineralización a CO_2 o erosión, resulta en una reducción de las reservas de carbono del suelo, lo que aumenta las concentraciones atmosféricas de carbono (principalmente CO_2) o debilita la integridad del suelo en sus atributos químicos, biológicos y físicos.

La materia orgánica del suelo (MOS), que comprende formas orgánicas de carbono (C) y otros elementos bioactivos (nitrógeno, fósforo, azufre), se deriva de los restos de material vegetal, animal y microbiano. De todos ellos, el carbono orgánico del suelo (COS) es el más importante, tanto en cantidad como en peso y relevancia. Los suelos secuestran carbono de forma natural mediante la acumulación de materia orgánica muerta y en descomposición,



que se incorpora y almacena lentamente. A nivel mundial, los suelos contienen entre 2000 y 2500 Pg de C; por lo tanto, retienen aproximadamente tres veces más carbono que la atmósfera. Este almacenamiento de carbono en el suelo no es fijo ni permanente; de hecho, se encuentra en equilibrio dinámico con otros sistemas terrestres. Los cambios en el uso del suelo (p. ej., bosque versus pastos versus cultivos) alteran considerablemente el equilibrio del carbono almacenado en el suelo y en la atmósfera. En consecuencia, las acciones que alteran el uso del suelo también alteran las reservas de carbono del suelo, influyen en los niveles de carbono atmosférico y, por consiguiente, en el sistema climático global.

En los últimos 150 años, más de la mitad de los suelos han resultado dañados por diferentes actividades antropogénicas. La degradación del suelo ha ido acompañada de la pérdida de más del 50 % de las reservas de COS en algunos suelos cultivados, con más de 2 000 millones de hectáreas afectadas a nivel mundial. Los suelos degradados se convierten en una importante fuente de emisiones de CO₂ a la atmósfera. Se estima que la degradación del suelo ha liberado unos 176 Gt de carbono del suelo a nivel mundial; una cifra muy significativa si se tiene en cuenta que la atmósfera terrestre contiene unas 800 Gt de C. La agricultura, la silvicultura y el cambio de uso del suelo son directamente responsables de entre el 18 % y el 24 % de las emisiones totales de GEI antropogénicas cada año. Esta conversión de ecosistemas naturales a sistemas gestionados agota las reservas de COS en un promedio del 60 % en las regiones templadas, como es el caso de España y de Castilla-La Mancha.

La degradación del suelo tiene consecuencias de gran alcance para la biodiversidad, la seguridad alimentaria, el suministro de agua dulce y la prestación de servicios ecosistémicos en general. El daño causado al suelo no se limita a él, sino que tiene impactos negativos en todo el sistema planetario. Se necesitan urgentemente estrategias y herramientas para combatir tanto la degradación del suelo como el cambio climático.

Los suelos con alto contenido de COS presentan una estructura más desarrollada, con mayor agregación y cohesión. Estas estructuras son más resistentes a la sequía y la erosión, debido a una mejor porosidad y una menor compactación. Los suelos bien agregados y estructurados se adaptan mejor a la lluvia. Por lo tanto, mejoran la infiltración y el almacenamiento de agua, y la amortiguación del ciclo hidrológico. Además, los agregados de suelo más desarrollados proporcionan una mayor protección física a las reservas de COS. Por contra, la degradación del COS aumenta la vulnerabilidad de los suelos a la erosión y acelera el proceso de desertificación. Es importante tener en cuenta que los recursos del suelo, aunque abundantes y duraderos, no son renovables a escala antropogénica. Cuando las tasas de pérdida/degradación del suelo superan las tasas de reemplazo/recuperación biogénica y geológica, la balanza de la sostenibilidad se ve comprometida. A nivel mundial, la mala gestión del suelo y la pérdida de COS han exacerbado las pérdidas de la capa superficial del suelo hasta un punto en que son entre 10 y 40 veces mayores que las tasas de reemplazo natural. En la Unión Europea, entre el 45 % y el 65 % de los suelos agrícolas se consideran deteriorados o muy deteriorados en contenido de MOS. Las fallas en la gestión del suelo reducen el rendimiento de los cultivos. Se estima que la pérdida de COS contribuye a la disminución en la productividad agrícola del 0,3 % anual. Esta disminución, de no detenerse, podría resultar en una reducción promedio del 10 % en los rendimientos para 2050 (las regiones más afectadas experimentarán reducciones de rendimiento de hasta el 50 %).

El sector agrícola tiene el potencial de pasar de ser una fuente neta significativa de emisiones de GEI a un sumidero neto de carbono, dependiendo del uso y las prácticas de gestión del suelo. Los suelos agrícolas tienen el potencial de contribuir significativamente a la

captura y el almacenamiento de carbono, tanto a largo como a corto plazo. La agricultura de carbono describe el enfoque holístico que utiliza métodos agrícolas para reducir o compensar las emisiones de GEI de la agricultura mediante la captura y el almacenamiento de carbono en el suelo y la vegetación. El aumento de las reservas de carbono del suelo, a escala global, tiene un potencial de secuestro estimado de 3,4 a 5 Gt C año⁻⁴. Los métodos eficaces para aumentar significativamente las reservas de COS en un corto plazo incluyen la labranza de bajo impacto y el uso de enmiendas del suelo, como compost, papel desmenuzado, estiércol y biochar. Además, la sustitución de regímenes de labranza agresiva (que promueven la desagregación del suelo y la oxidación/mineralización del carbono) por alternativas de labranza mínima o cero labranza permite reconstruir las reservas de carbono en tierras agrícolas entre 0,09 y 0,12 Gt de carbono al año en suelos de Europa Occidental.

Por ello, este proyecto pretende realizar una propuesta para cuantificar y monitorear de forma continua la dinámica de secuestro de carbono en función de distintos tipos de manejo en la región de Castilla-La Mancha, con el fin de apoyar recomendaciones que promuevan la sostenibilidad agraria, la adopción de buenas prácticas y el apoyo a los agricultores castellano-manchegos.





OBJETIVOS

Este proyecto plantea un marco basado en muestreos de campo, datos satelitales y modelos para cuantificar los impactos de los cambios en el uso y la gestión del suelo sobre el carbono orgánico del suelo, y sienta las bases para evaluar el cambio de carbono del suelo, con la intención de que Castilla-La Mancha profundice en la necesidad de proporcionar metodologías de MRV (monitoreo, reporte y verificación) creíbles y sólidas para apoyar las crecientes iniciativas y estrategias normativas europeas y nacionales.

Por tanto, el principal objetivo de este proyecto es diseñar y proponer una metodología alineada con las exigencias europeas (y por tanto nacionales) para cuantificar las existencias de carbono orgánico en suelos agrícolas bajo los principales cultivos de la región, sometidos a diferentes ecorregímenes promovidos por la PEPAC, pudiendo así evaluar el potencial de captura de carbono y la salud edáfica en los diferentes sistemas agrícolas de Castilla-La Mancha, así como monitorizar el cambio del contenido de carbono en suelos sujetos a diferentes usos, entre los que se incluyen los ecorregímenes contemplados en la PEPAC (Plan Estratégico de la PAC).





03

**ACTUACIONES,
METODOLOGÍA
Y RESULTADOS**

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

3.1. Revisión bibliográfica y normativa a nivel europea, nacional y regional

3.1.1. Introducción y objetivos

La normativa a nivel europeo y nacional en torno a la salud del suelo en general, y al secuestro de carbono en particular ha estado muy fragmentado hasta fechas muy recientes, con una gran variedad de reglamentos, estrategias normativas y otras figuras de regulación que tocaban distintos aspectos relacionados con el suelo. No ha sido hasta finales de la década de 2010 e inicios de 2020 cuando la Unión Europea ha empezado a posicionarse claramente sobre la necesidad de legislar decididamente para proteger los suelos y preservar todas las funciones y servicios ecosistémicos que un suelo sano ofrece a las sociedades y comunidades que mantienen.

Esta actuación pretende revisar aquella normativa a nivel europeo, nacional y de Castilla-La Mancha para que sirva como marco base para el desarrollo metodológico de este proyecto y de la propuesta que se derive del mismo. Se contextualiza en relación con los objetivos de la Misión Europea de Suelos, el Pacto Verde Europeo, y los compromisos de Castilla-La Mancha con la sostenibilidad agraria, la neutralidad climática y el uso eficiente del suelo. Los objetivos de esta actuación son:

- Recopilar y analizar normativa relevante sobre la calidad y funcionalidad del suelo, principalmente en relación al secuestro y almacenamiento de carbono atmosférico (CO₂) en suelos agrícolas
- Identificar directrices clave sobre indicadores, metodologías y requisitos de control.
- Detectar vacíos normativos y científicos que condicionen la implementación del proyecto.

3.1.2. Revisión y análisis de la normativa

3.1.2.1. A nivel europeo.

La UE concede gran importancia a los servicios ecosistémicos, particularmente los ligados al suelo, reconociendo su papel vital para el bienestar humano y para mantener un medio ambiente sano. Unos suelos sanos son cruciales para la producción sostenible de alimentos, la biodiversidad, la regulación del clima y la calidad del agua, además de contribuir al mantenimiento y preservación del patrimonio cultural. La UE ha desarrollado una serie de estrategias e iniciativas para promover prácticas sostenibles de gestión del suelo y abordar su degradación. A continuación se detallan las principales.

PACTO VERDE EUROPEO (EUROPEAN GREEN DEAL)

El Pacto Verde Europeo (PVE), aprobado en 2020, es un conjunto de iniciativas políticas destinado a transformar la economía de la UE para que sea climáticamente neutra, sostenible y eficiente en el uso de los recursos para el año 2050, promoviendo al mismo tiempo el crecimiento económico y la justicia social. Pretende revisar cada ley existente según sus méritos climáticos y también introducir nueva legislación sobre la economía circular (EC), la renovación de edificios, la biodiversidad, la agricultura y la innovación (Figura 1).

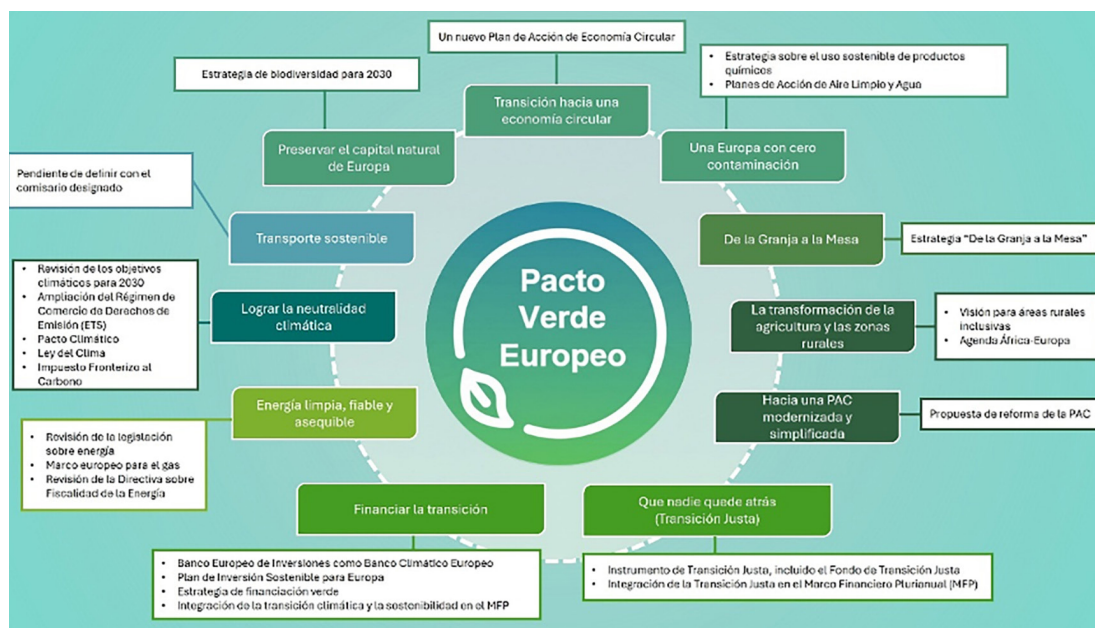


Figura 1. El Pacto Verde Europeo y las políticas y estrategias derivadas
(Fuente: adaptado de The European Green Deal).

El PVE no cuenta con una política única, específica e independiente destinada al secuestro y almacenamiento de carbono en el suelo, aunque sí que contempla a este servicio ecosistémico del suelo de forma transversal en varias de sus políticas derivadas y lo incorpora como un componente clave en sus objetivos más amplios de mitigación del cambio climático, de la reforma agrícola (PAC) y la restauración de la naturaleza. A continuación se exponen resumidamente las principales estrategias y políticas del PVE en esta materia, que serán desarrolladas con más detalle en apartados posteriores:

- **Estrategia “De la Granja a la Mesa”**

Su principal objetivo es transformar el sistema alimentario de la UE para que sea más sostenible, con un enfoque en la agricultura neutra en carbono. Por tanto, esta estrategia fomenta de forma indirecta la agricultura de carbono para secuestrar CO₂ en los suelos agrícolas, promueve prácticas regenerativas como los cultivos de cobertura, la rotación de cultivos, la labranza reducida, la agrosilvicultura y la agricultura ecológica, además de promover incentivos financieros y apoyo en el marco de la Política Agrícola Común (PAC) para la gestión del suelo respetuosa con el clima.

- **Estrategia del Suelo de la UE para 2030**

Su principal objetivo es garantizar que todos los suelos de la UE se encuentren en buen estado para 2050. En cuanto al secuestro de carbono en suelos esta estrategia promueve la restauración del carbono orgánico del suelo mediante una mejor gestión del suelo, fomenta los programas de cultivo de carbono con marcos de monitoreo, reporte y verificación (MRV), además de prever la aprobación de una nueva Ley de Vigilancia del Suelo (prevista para finales de 2025) para establecer normas vinculantes de protección del suelo.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- **Iniciativa de Agricultura de Carbono**

Lanzada para convertir el secuestro de carbono en suelo en un modelo de negocio para agricultores y administradores de tierras, busca establecer certificaciones voluntarias de secuestro de carbono mediante prácticas agrícolas. Apoya el desarrollo de un Reglamento de Eliminación y Agricultura de Carbono (Carbon Removals and Carbon Farming, CRCF)

- **Revisión del Reglamento LULUCF (Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura)**

Con esta revisión, los objetivos de absorción de carbono en diferentes sistemas del suelo son más ambiciosos. Para 2030, la UE aspira a capturar 310 Mt de CO₂-eq/año, principalmente a través de sumideros en suelos y bosques. Cada Estado Miembro debe aumentar las reservas de carbono del suelo en tierras de cultivo y pastizales.

- **Reforma de la PAC (2023-2027) – Ecoesquemas**

Ofrece financiación para: 1) Agricultura de conservación. 2) Restauración y rehumidificación de turberas (clave para el almacenamiento de carbono), 3) Pastos y setos permanentes, que aumentan el carbono orgánico del suelo. Los agricultores pueden recibir pagos de ecoesquemas por resultados verificados de secuestro de carbono.

- **Apoyo a la Monitorización y la Investigación**

A través del programa Horizonte Europa, la UE financia activamente la investigación sobre el secuestro de carbono en suelo mediante el uso de técnicas innovadoras. También enmarcadas dentro del programa Horizonte Europa, las Misiones de la UE establecen objetivos ambiciosos, concretos y cuantificables en un plazo bien definido con el fin de lograr resultados tangibles para todos los europeos. De las 5 Misiones que la UE tiene activas en la actualidad, una de ellas está dedicada exclusivamente al suelo: La misión “*Un pacto por el suelo para Europa*” tiene como objetivo avanzar, mostrar y acelerar la transición hacia suelos saludables para 2030, apoyando los compromisos a largo plazo a nivel europeo y mundial dentro del Pacto Verde Europeo y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. La Misión financia I+D y proyectos piloto centrados en:

- Aumentar las reservas de carbono del suelo
- Probar prácticas de secuestro de carbono en 100 laboratorios vivientes
- Crear modelos y líneas de base para el seguimiento de los cambios en el COS
- Apoyar herramientas de decisión, certificación y sistemas de incentivos para los servicios de carbono del suelo.

Además, el **Observatorio Europeo del Suelo (EUSO)** apoya la recopilación de datos, la modelización y el diseño de políticas. Además, se están desarrollando nuevas herramientas de monitorización satelital y digital en el marco de Copernicus y el monitoreo de la Salud del Suelo.

ESTRATEGIA DE LA UE SOBRE BIODIVERSIDAD 2030 (EU BIODIVERSITY STRATEGY 2030)

La Estrategia de la Unión Europea sobre Biodiversidad para 2030 fue aprobada y publicada en mayo de 2020 como parte del Pacto Verde Europeo. Es el plan de la UE para detener y revertir la pérdida de la diversidad biológica y de la naturaleza para el 2030, y fomentar su recuperación. Combina la protección (más áreas protegidas y mejor gestionadas) con la restauración (recuperar la salud de los ecosistemas degradados), y la respalda con gobernanza, financiación e investigación.

La estrategia se centra en torno a cuatro pilares básicos:

1. Proteger más la naturaleza (construir una red coherente de áreas protegidas). Pretende proteger al menos el 30 % del territorio de la UE y el 30 % de su mar, con un tercio de éste estrictamente protegido (aproximadamente el 10 % del territorio y el mar). Las prioridades incluyen todos los bosques primarios y antiguos restantes, así como otros ecosistemas ricos en carbono (turberas, humedales, praderas marinas). Los Estados miembros designarán lugares y los gestionarán con objetivos de conservación claros.

2. Restaurar ecosistemas degradados (Plan de Restauración de la Naturaleza de la UE). Para 2030, se habrán restaurado áreas significativas de ecosistemas degradados y ricos en carbono; no se habrá deteriorado el estado de los hábitats y las especies; al menos el 30 % de los hábitats/especies protegidos alcanzarán un estado favorable o mostrarán tendencias positivas significativas. Los ríos de curso libre se habrán restaurado en más de 25 000 km mediante la eliminación de barreras y la rehabilitación de llanuras aluviales/humedales. Las ciudades (≥ 20.000 habitantes) adoptarán Planes de Ecologización Urbana; promoverán parques, techos/muros verdes y bosques urbanos. Se desarrollará una hoja de ruta para plantar ≥ 3.000 millones de árboles adicionales (ecológicamente apropiados) para 2030 en ecosistemas forestales y se promoverá una silvicultura más cercana a la naturaleza. Se revertirá el declive de los polinizadores para 2030 y se actualizará la Iniciativa de la UE sobre Polinizadores. También se reducirá en un 50 % el número de especies exóticas invasoras de la Lista Roja. Además, se busca reducir las pérdidas de nutrientes procedentes de fertilizantes en un 50 % (lo que implica una reducción de al menos un 20 % en el uso de fertilizantes). Originalmente, la Estrategia buscaba reducir el uso y el riesgo de plaguicidas químicos en un 50%, y en un 50% los más peligrosos; además de no usar plaguicidas en zonas sensibles. Sin embargo, la propuesta para desarrollar un Reglamento sobre el Uso Sostenible de Plaguicidas (Sustainable Use of Pesticides Regulation, SUPR, por sus siglas en inglés) fue rechazada por el Parlamento Europeo en noviembre de 2023 y se retiró formalmente por la Comisión entre marzo y mayo de 2024. La antigua Directiva sobre el Uso Sostenible de Plaguicidas de 2009 sigue vigente, pero no existe una nueva ley vinculante del 50 % para toda la UE. Finalmente, la Estrategia de Biodiversidad pretende reducir los impactos negativos en especies y hábitats sensibles marinos, además de abordar las capturas incidentales a niveles que permitan la recuperación.

3. Impulsar un cambio transformador (gobernanza, financiación, empresas). La estrategia impulsa la gobernanza y seguimiento: un nuevo marco de gobernanza de la biodiversidad de la UE con indicadores acordados, revisiones periódicas del progreso y el Centro de Conocimiento para la Biodiversidad (Knowledge Centre for Biodiversity) para el seguimiento del progreso y la elaboración de políticas. En cuanto a la financiación, se pretende liberar más de 20 000 millones de euros al año para la naturaleza (combinación de presupuesto de

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

la UE, fondos nacionales y financiación privada), incluyendo vínculos con las normas de financiación sostenible/taxonomía de la UE. A nivel de toda la sociedad, se busca integrar la biodiversidad en todos los sectores (PAC, pesca, ciudades, energía), promover soluciones basadas en la naturaleza y reforzar la aplicación de la legislación vigente (Directiva Aves/Hábitats, Directiva Agua, etc.).

4. Liderar a nivel mundial. La estrategia contempla la utilización activamente de la diplomacia, la política comercial y los acuerdos internacionales para aumentar la ambición global (p. ej., protección de alta mar, AMP del Océano Antártico), alineando la acción de la UE con los objetivos del CDB de la ONU.

La Estrategia de Biodiversidad de la UE para 2030 no considera el secuestro de carbono en el suelo como un pilar o área central, sino que integra la salud del suelo y el almacenamiento de carbono en objetivos más amplios de uso del suelo y restauración de naturaleza ecosistemas naturales y objetivos climáticos, desarrollados en otras estrategias, políticas y reglamentos



ESTRATEGIA DE LA UE PARA LA PROTECCIÓN DEL SUELO 2030 (EU SOIL STRATEGY FOR 2030)

Aprobada en noviembre de 2021, esta iniciativa se basa en la Estrategia de la UE sobre la biodiversidad 2030 y en la estrategia de adaptación al cambio climático de la UE. Por tanto, la Estrategia de la UE para la Protección del Suelo 2030 se basa en varios de los objetivos del Pacto Verde Europeo (PVE). Su objetivo principal es asegurar que todos los *ecosistemas del suelo* de la UE se encuentran en buen estado (**suelos sanos**) y son, por tanto, más resilientes, entregando servicios ecosistémicos vitales para la producción de alimentos, la naturaleza, el clima y el bienestar de las personas.

La Estrategia del Suelo 2030 de la UE incluye varios elementos centrados en el secuestro de carbono en el suelo, como parte de sus objetivos más amplios para mejorar la salud del suelo, contribuir a la neutralidad climática y restaurar los ecosistemas degradados. Los principales elementos de la directiva relativos al secuestro de carbono en suelo son:

- **El carbono del suelo como herramienta de mitigación del cambio climático**

Los suelos sanos almacenan más carbono y pueden servir como un sumidero estable a largo plazo, mientras que los suelos degradados suelen ser una fuente emisora de carbono. La estrategia vincula directamente el carbono del suelo con los objetivos climáticos de la UE, en particular:

- Lograr la neutralidad climática para 2050
- Apoyar la Ley del Clima de la UE y el Reglamento LULUCF
- Mejorar los sumideros de carbono de los ecosistemas terrestres

- **Monitoreo y reconocimiento legal del carbono del suelo**

La propuesta de Directiva de Monitoreo del Suelo (que se desarrolla en el siguiente apartado) incluye:

- Requisitos vinculantes para que los Estados miembros monitoreen el carbono orgánico del suelo (COS) mediante indicadores armonizados.
- Definiciones de prácticas sostenibles del suelo que mejoran el COS y restricciones a las prácticas que lo reducen.
- Objetivos para detener la pérdida neta de carbono del suelo para 2030.

- **Promoción de prácticas de cultivo de carbono**

La estrategia promueve el cultivo de carbono como una forma de aumentar el COS y, al mismo tiempo, generar beneficios adicionales (p. ej., mejora de la fertilidad, la retención de agua y la biodiversidad). Algunos ejemplos de prácticas son la agrosilvicultura, labranza reducida/siembra directa, cultivos de cobertura y rotación de cultivos, agricultura orgánica y uso de compost, rehumidificación de turberas, entre otras.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Este elemento está vinculado además a la Iniciativa de Cultivo de Carbono (agricultura de carbono), lanzada en 2021, con futura integración en los pagos de la PAC y los mercados voluntarios de carbono.

- **Restauración de ecosistemas ricos en carbono (turberas, humedales)**

La UE estima que los suelos orgánicos, aunque solo representan el 3 % de las tierras agrícolas de la UE, emiten más del 25 % de los gases de efecto invernadero (GEI) agrícolas. Por ello, la estrategia hace hincapié en la restauración de suelos orgánicos (aquellos suelos cuyo contenido en materia orgánica es mayor al 20 %) drenados y degradados. La rehumidificación de las turberas es una prioridad tanto en la Estrategia del Suelo como en la Ley de Restauración de la Naturaleza para frenar la mineralización del carbono orgánico de este tipo de suelos y evitar así emisiones masivas de CO₂.

- **Uso circular de enmiendas orgánicas**

La Estrategia fomenta iniciativas de bioeconomía circular para devolver materia orgánica a los suelos. Por ejemplo, el uso de compost, biochar y digestato, la reutilización de suelos excavados para evitar el sellado de tierras fértiles, y la mejora de la materia orgánica del suelo mediante aportes de biomasa reciclada, entre otros.

- **Establecimiento de la Contabilidad y Certificación del Carbono**

El carbono del suelo será uno de los primeros tipos de eliminación de carbono certificados. En estrecha colaboración con el Reglamento de Eliminación y Agricultura de Carbono (Carbon Removals and Carbon Farming, CRCF) de la UE, el objetivo es crear etiquetas de confianza para la gestión del suelo climáticamente inteligente y garantiza la verificabilidad, la permanencia y la integridad ambiental de las absorciones basadas en el COS.

PROPUESTA DE LA UE DE UNA LEY DE VIGILANCIA DEL SUELO (EU PROPOSAL ON SOIL MONITORING LAW)

Propuesta lanzada en julio de 2023, este reglamento pretende ser la primera norma a nivel europeo dedicada exclusivamente a regular la salud del suelo, desarrollando legalmente y ejecutando la Estrategia del Suelo 2030 de la UE.

Esta propuesta nace con la necesidad de corregir el hecho de que aproximadamente entre el 60 % y el 70 % de los suelos de la UE se consideran insalubres, lo que supone un coste de más de 50 000 millones de euros al año en servicios ecosistémicos perdidos. Por tanto, su principal objetivo es combatir la degradación del suelo, promover la neutralidad climática, restaurar la biodiversidad, garantizar sistemas alimentarios sostenibles y proteger la salud pública, abordando el deterioro del suelo, el sellado, la contaminación, la erosión, la salinización, la pérdida de materia orgánica, la compactación y la disminución de la biodiversidad del suelo.

La propuesta incluye varios elementos importantes que abordan el secuestro de carbono en el suelo, ya que integra el carbono del suelo en el objetivo más amplio de lograr suelos saludables y la neutralidad climática para 2050. Los principales elementos de la directiva relativos al secuestro de carbono en suelo son:

- **Monitorización del Carbono Orgánico del Suelo (COS)**

El COS es el principal indicador de la capacidad de secuestro de carbono en los suelos. El monitoreo regular permite detectar la pérdida o acumulación de carbono a lo largo del tiempo. Por tanto, el COS será uno de los descriptores/indicadores obligatorios del suelo de esta directiva. Los Estados miembros deberán medir y rastrear los niveles de COS en lugares representativos para todos los usos del suelo (agrícola, forestal, urbano, etc.). Además, el COS se evaluará utilizando metodologías armonizadas de la UE (combustión seca o pérdida por ignición, profundidad de muestreo de 0-30 cm, alineado con los protocolos de evaluación de carbono del suelo del IPCC, etc.) y que se publicarán junto con la Ley de Vigilancia.

- **Clasificación del estado de salud vinculado al carbono**

Los suelos se clasificarán en cuatro clases (p. ej., sano, moderado, deficiente, malo) según indicadores como el COS. La degradación del COS (disminución de la materia orgánica) puede provocar el deterioro de la salud del suelo e impulsar medidas de mitigación o restauración. Esto promoverá indirectamente prácticas que mejoran el carbono del suelo, como los cultivos de cobertura, la labranza reducida o las enmiendas orgánicas.

- **Valores Objetivo Sostenibles y Valores Activadores Nacionales**

La Comisión establecerá Objetivos Sostenibles no vinculantes a nivel de la UE para los descriptores del suelo, incluido el COS. Los Estados miembros deberán definir Valores Activadores Operativos (niveles mínimos de COS por tipo de terreno o región) para orientar la restauración y protección del suelo. Los umbrales de COS podrán variar según el tipo de suelo o el clima (p. ej., suelos mediterráneos frente a atlánticos), lo que permitirá a España y a otros países adaptar los objetivos a las necesidades de cada Estado Miembro.

- **Uso del suelo y planificación sensible al carbono**

La directiva promoverá políticas de uso del suelo que prevengan el sellado del suelo (que detiene por completo el secuestro), o la excavación o eliminación de suelos con alto contenido de carbono, como las turberas o los suelos orgánicos.

- **Medidas de apoyo a las prácticas de secuestro de carbono**

Aunque no existen obligaciones directas para los agricultores, los Estados Miembros apoyarán la formación y asistencia técnica en prácticas respetuosas con el suelo. También se usarán fondos agrícolas de la UE para promover la agricultura regenerativa, la agrosilvicultura y los sistemas ecológicos, todos ellos factores que impulsan el COS. España, por ejemplo, ha contemplado esto con su Plan Estratégico de la PAC, centrándose en zonas con alto riesgo de erosión o suelos pobres en carbono.

- **Alineación con las iniciativas de cultivo de carbono**

La directiva complementará (pero no reemplaza) el recientemente aprobado Reglamento de Eliminación y Agricultura de Carbono (Carbon Removals and Carbon Farming, CRCF) de la UE. Los proyectos de cultivo de carbono que aumentan el COS podrán por tanto utilizar el marco de monitoreo de esta directiva para demostrar resultados.

POLÍTICA AGRÍCOLA COMÚN (PAC) 2023-2027 (COMMON AGRICULTURAL POLICY 2023-2027)

La PAC revisada entró en vigor el 1 de enero de 2023 e introduce importantes reformas destinadas a lograr una agricultura de la UE más ecológica, justa, sostenible y resiliente. Refleja una mayor coherencia con el Pacto Verde Europeo, en particular con la Estrategia «De la Granja a la Mesa» y la Estrategia sobre Biodiversidad. Esta revisión incluye varios elementos clave que promueven directa e indirectamente la captura de carbono en el suelo, en consonancia con los objetivos climáticos de la UE. Si bien la captura de carbono en el suelo no es un objetivo específico de la PAC, está integrada en múltiples mecanismos, especialmente a través de ecoesquemas, medidas agroambientales y climáticas (MAAC) y en la condicionalidad reforzada.

1. Ecoesquemas (Pilar I)

Los ecoesquemas son nuevas herramientas de pago que recompensan a los agricultores por prácticas voluntarias que van más allá de los requisitos básicos. Varias de estas se centran en prácticas que aumentan el carbono orgánico del suelo, como:

- Cultivos de cobertura: Previenen la erosión y mejoran las aportaciones de carbono
- Labranza reducida o nula: Mejoran la estructura del suelo y limitan la pérdida de carbono
- Agrosilvicultura: Aumentan la aportación de biomasa y el sombreado del suelo
- Pastos permanentes: Mantienen los depósitos subterráneos de carbono
- Agricultura ecológica: Fomentan las enmiendas orgánicas y la biodiversidad
- Agricultura de carbono (en algunos planes nacionales): Incentiva explícitamente aumentos mensurables del carbono del suelo

Al menos el 25 % de los pagos directos de cada Estado miembro debe destinarse a ecoesquemas, muchos de los cuales implican prácticas que favorecen la captura de carbono.

2. Medidas AgroAmbientales y Climáticas (MAAC, Pilar II)

En el marco de los Programas de Desarrollo Rural (PDRs), las MAACs apoyan compromisos plurianuales con prácticas de mejora del suelo. Algunas MAACs comunes para el carbono del suelo:

- Conservación o extensión de pastizales a largo plazo
- Forestación y reforestación
- Pastoreo rotativo y gestión de pastizales
- Aplicación de materia orgánica (estiércol, compost)
- Conversión de tierras cultivables a pastizales o agrosilvicultura

3. Condicionalidad reforzada

Para recibir los pagos de la PAC, los agricultores deben cumplir ahora unas Buenas Condiciones Agrícolas y Ambientales (BCAA, good Agricultural and Environmental Conditions, GAECs, por sus siglas en inglés) más estrictas. Varias BCAA están directamente relacionadas con el carbono del suelo:

- BCAA 6: Cobertura mínima del suelo (previene la pérdida de carbono)
- BCAA 7: Rotación de cultivos (mejora la estructura del suelo y la biodiversidad)
- BCAA 8: Mantenimiento de las características paisajísticas no productivas (favorece la salud del suelo y la materia orgánica)

4. Herramientas de monitoreo y datos

Entre otros, se promueve el uso de herramientas como la teledetección, el análisis de suelos y los sistemas digitales de gestión agrícola para evaluar el impacto de las diferentes medidas para aumentar la capacidad de almacenamiento de carbono. Otra herramienta es el Sistema de Conocimiento e Innovación en Agricultura (SCIA), AKIS (Agricultural Knowledge and Innovation Systems) por sus siglas en inglés. Consiste en la organización combinada y de flujos de conocimientos entre personas, organizaciones e instituciones que usan y generan conocimientos para utilizarlos en la agricultura y los ámbitos relacionados.

Cada país de la UE debe diseñar un Plan Estratégico nacional de la PAC, que combina financiación para el apoyo a la renta, el desarrollo rural y medidas de mercado. España tiene en vigor su plan aprobado por la UE, PEPAC (Plan Estratégico de la PAC), del cual hablaremos más adelante.



REGLAMENTO LULUCF (USO DE LA TIERRA, CAMBIO DE USO DE LA TIERRA Y SILVICULTURA)

El Reglamento (UE) 2018/841, también conocido como Reglamento sobre el uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura (Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF por sus siglas en inglés), es un instrumento legislativo clave de la UE que incorpora las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero derivadas del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura en el marco climático y energético de la UE para 2030. Establece normas contables para garantizar que la UE cumpla sus objetivos climáticos mediante la contabilización de las emisiones y absorciones de estos sectores. La norma original establece que los Estados miembros deben garantizar que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) contabilizadas procedentes del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura no superen las absorciones (la denominada «regla de no débito»), que abarca las emisiones y absorciones de CO₂, CH₄ y N₂O. La norma original se la denomina Fase I y abarca los años 2021-2025; su objetivo es continuar con la regla de no débito a nivel nacional, con cambios limitados en las normas contables.

En julio de 2021, el paquete *Fit for 55* propuso una revisión para alinear el LULUCF más estrechamente con los objetivos de la UE: reducción neta del 55 % de GEI para 2030, neutralidad climática para 2050 y neutralidad del sector terrestre para 2035. A esta revisión también se la denomina Fase 2 (Reglamento UE 2023/839) y abarca los años 2026-2030 y su marco de objetivos es más ambicioso a nivel nacional y de la UE, pasando de la «regla de no débito» a objetivos cuantificados de eliminación neta.

El Reglamento revisado LULUCF hace mayor hincapié en el secuestro de carbono en el suelo, especialmente en el sector agrícola. Los suelos orgánicos (por ejemplo, las turberas) se identifican como áreas prioritarias debido a su alto contenido de carbono y su vulnerabilidad a las emisiones cuando se alteran. A continuación, se presentan los principales elementos de la política que abordan directamente el secuestro de carbono en el suelo.



1. Normas de contabilidad del carbono del suelo

Los Estados miembros deben informar sobre las emisiones y absorciones de los suelos minerales y orgánicos en diversas categorías de uso del suelo. Las emisiones derivadas del cambio de uso del suelo que impliquen perturbaciones del suelo (por ejemplo, la conversión de pastizales en tierras de cultivo) deben cuantificarse y contabilizarse. La dinámica del carbono del suelo debe estimarse utilizando las metodologías de niveles 1 a 3 del IPCC, según la capacidad nacional, con incentivos para métodos más precisos (niveles 2 y 3).

2. Apoyo a ecosistemas ricos en carbono y prácticas de uso del suelo

La política promueve prácticas que aumentan o preservan el carbono orgánico del suelo, como la rehumidificación de turberas drenadas (una fuente importante de GEI cuando están secas), la agrosilvicultura y cultivos perennes que aumentan las aportaciones de carbono subterráneo, cultivos de cobertura, labranza reducida y enmiendas orgánicas para mejorar el carbono mineral del suelo, evitar la conversión de tierras con altas reservas de carbono (p. ej., pastizales permanentes y humedales). Se espera que estas prácticas se detallen en los planes climáticos y de uso del suelo de los Estados miembros.

3. Inclusión en el Marco de Certificación de Absorción de Carbono

La UE ha aprobado el Reglamento de Eliminación y Agricultura de Carbono (Carbon Removals and Carbon Farming, CRCF por sus siglas en inglés) para estandarizar e incentivar el secuestro de carbono en el suelo (desarrollado en un apartado posterior). El secuestro de carbono en el suelo es una de las actividades elegibles en este marco emergente. Los criterios de certificación incluirán la adicionalidad, la permanencia y un monitoreo riguroso, que son cruciales para los suelos debido a los riesgos de reversión (por ejemplo, arado o sequía).

4. Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV)

El Reglamento LULUCF revisado exige sistemas de MRV mejorados, que incluyen: 1) Uso de teledetección y datos de Copernicus para la cobertura terrestre; 2) Integración de bases de datos nacionales sobre suelos, modelado y mediciones de campo.

El objetivo es permitir un seguimiento más preciso de los cambios en el carbono del suelo, en particular a medida que los Estados miembros mejoran la presentación de informes, pasando del método de Nivel 1 (predeterminado) al de Nivel 2/3 (específico de cada país).

5. Abordar las incertidumbres relacionadas con el suelo y las perturbaciones naturales

El reglamento prevé correcciones o mecanismos de flexibilidad en casos de: 1) Perturbaciones naturales (p. ej., sequías, incendios); 2) Efectos heredados en las emisiones al suelo (p. ej., suelos orgánicos drenados). Estos no constituyen exenciones, pero deben notificarse y justificarse de forma transparente.

6. Camino hacia la Integración de las Emisiones Agrícolas

Después de 2030, el marco LULUCF integrará las emisiones derivadas de la agricultura distintas al CO₂ (CH₄ y N₂O), creando un objetivo unificado para el sector del suelo. Esta

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

integración refuerza el incentivo para secuestrar el carbono del suelo en la agricultura para compensar las emisiones inevitables de la ganadería y el uso de fertilizantes.

REGLAMENTO DE RESTAURACIÓN DE LA NATURALEZA

El Reglamento (UE) 2024/1991, relativo a la restauración de la naturaleza, entró en vigor en agosto de 2024. Es un reglamento, lo que significa que es totalmente vinculante y directamente aplicable en todos los Estados miembros de la UE sin transposición nacional. No obstante, cada país miembro tiene que desarrollar y aprobar un Plan Nacional de Restauración (PNR) antes del 1 de septiembre de 2026, supervisando la implementación, e informar a la Agencia Europea de Medio Ambiente y a la Comisión de los avances.

Su principal objetivo es restaurar los ecosistemas degradados en toda la UE para promover la biodiversidad, la resiliencia, la mitigación y adaptación al cambio climático, y la seguridad alimentaria. Es un componente fundamental del Pacto Verde Europeo y la Estrategia de la UE sobre Biodiversidad para 2030.

A nivel de toda la Unión, los objetivos del reglamento buscan restaurar al menos el 20 % de la superficie terrestre y marina de la Unión para 2030. Para aquellos ecosistemas en mal estado, los Estados miembros deben restaurar:

- ≥ 30 % para 2030
- ≥ 60 % para 2040
- ≥ 90 % para 2050

Se dará prioridad a las labores de restauración hasta 2030 en las zonas de la Red Natura 2000 de cada Estado miembro.

Este reglamento Incluye disposiciones específicas sobre el secuestro de carbono en el suelo, en particular en el contexto de la restauración de ecosistemas agrícolas (artículo 11) y forestales (artículo 12). A continuación, se presentan los principales elementos relacionados con el carbono en el suelo de estos dos artículos:

I. Ecosistemas Agrícolas (Artículo 11)

Este artículo aborda directamente la salud del suelo y el almacenamiento de carbono en las tierras agrícolas y tiene como objetivo mejorar la capacidad de los suelos agrícolas para almacenar carbono como medida de mitigación del cambio climático, impulsando al mismo tiempo la biodiversidad y la resiliencia frente a éste. Exige a los Estados Miembros:

- Aumentar las reservas de carbono orgánico del suelo en tierras de cultivo y pastizales.
- Promover la captura de carbono mediante soluciones basadas en la naturaleza y prácticas agroecológicas.
- Utilizar indicadores como: 1) contenido de carbono orgánico del suelo (principal indicador cuantitativo); 2) cobertura de pastizales permanentes; 3) tierras bajo prácticas agroforestales, de cultivos de cobertura o de labranza mínima.

Como parte de este artículo, se contempla la rehumidificación de turberas como medida obligatoria que complemente las actuaciones de restauración de estos ecosistemas agrícolas. Las turberas se encuentran entre los ecosistemas con mayor contenido de carbono. El Reglamento incluye objetivos de rehumidificación para las turberas drenadas utilizadas en la agricultura (aunque se han reducido con respecto a propuestas anteriores debido a la oposición). Los Estados miembros podrán determinar el grado de rehumidificación a implementar en función de la capacidad nacional y la participación de los propietarios de las tierras.

2. Ecosistemas Forestales (Artículo 12)

Los suelos forestales son otro sumidero clave de carbono. El Reglamento fomenta la restauración de bosques degradados de manera que aumenten la retención de carbono en el suelo y eviten prácticas que agoten la materia orgánica (por ejemplo, la tala rasa o la compactación del suelo)

3. Seguimiento e indicadores (Artículo 14)

Los Estados miembros deberán supervisar la salud del suelo como parte de sus informes sobre el progreso de la restauración. Los indicadores de carbono del suelo deberán ser: científicamente sólidos, compatibles con los marcos de información LULUCF y armonizados entre los Estados miembros para realizar un seguimiento del progreso en toda la UE.

REGLAMENTO CRCF (CARBON REMOVAL AND CERTIFICATION FARMING REGULATION)

El reglamento (UE) 2024/3012, por el que se establece un marco de certificación de absorción de carbono de la Unión, entró en vigor en diciembre de 2024, y tiene como alcance establecer un marco de certificación voluntario a nivel de la UE para:

- Absorción permanente de carbono (p. ej., captura directa de aire con almacenamiento geológico, biochar, BECCS),
- **Agricultura de carbono (restauración de suelos y ecosistemas que mejora el sequestro o reduce las emisiones),**
- Almacenamiento de carbono en productos (almacenamiento a largo plazo en bienes duraderos: más de 35 años)

Las actividades que pueden optar a la certificación deben cumplir cuatro criterios fundamentales por separado. Estos criterios se refieren como Q.U.A.L.I.T.Y (Q.Uantification, A.dditionality, L.iability & permanence, sustainabiliTY):

1. Cuantificación (Q.Uantification)

Se deben demostrar la eliminación neta de carbono o la reducción de las emisiones del suelo. Los operadores comparan referencias estandarizadas de la UE o calculan referencias específicas para cada actividad siguiendo unas normas definidas. Deben restar las emisiones de GEI derivadas de la propia actividad (p. ej., aumento en el uso de fertilizantes o maquinaria, consumo de energía). Se deberá realizar un monitoreo a lo largo del tiempo mediante metodologías estandarizadas (p. ej., muestreo de suelo, modelado, teledetección, etc.)

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

2. Adicionalidad (Additionality)

Las actividades deben ir más allá de lo legalmente requerido o de lo financieramente viable sin certificación. Solo los esfuerzos verdaderamente adicionales son elegibles.

3. Responsabilidad y Permanencia (Liability & Permanence)

Los operadores deben supervisar el almacenamiento durante el período de seguimiento definido y ser responsables de cualquier reversión de carbono. Las extracciones temporales (p. ej., la mayoría de las actividades de cultivo de carbono, el almacenamiento en productos) caducan después del período de seguimiento, a menos que se extiendan o se conviertan en almacenamiento permanente. Las extracciones permanentes (p. ej., el almacenamiento geológico) están respaldadas por mecanismos de responsabilidad en virtud de los marcos vigentes de la UE, como la Directiva CAC (Directiva 2009/31/CE).

4. Sostenibilidad (Sustainability)

Las actividades no deben causar daños ambientales y, idealmente, generar beneficios colaterales (p. ej., restauración de la biodiversidad, resiliencia adaptativa, economía circular, protección del agua). La agricultura de carbono debe generar al menos un beneficio para la biodiversidad o el ecosistema. Las extracciones basadas en biomasa deben cumplir con los estándares de sostenibilidad de la biomasa de la UE según la Directiva 2018/2001. Su objetivo es apoyar el objetivo de neutralidad climática de la UE para 2050 y su Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN) para 2030 en el marco del Acuerdo de París.

La implementación de esta regulación se basa en un robusto sistema de monitoreo y certificación. Los operadores deben desarrollar:

- Un plan de monitoreo (que especifique indicadores, fuentes de datos, herramientas e intervalos de tiempo),
- Un plan de actividades de eliminación de carbono (que detalle la práctica agrícola, el alcance y la ubicación).
- Los métodos de monitoreo pueden incluir: muestreo de campo, modelado o enfoques híbridos.

Los organismos de certificación (terceros independientes) verificarán los resultados. Solo después de la verificación por terceros se pueden emitir unidades certificadas de eliminación de carbono.

En cuanto a la metodología, la UE adoptará metodologías específicas para el carbono del suelo mediante actos delegados a partir del período 2025-2026. Estas metodologías definirán:

- Prácticas agrícolas aceptadas (p. ej., agricultura regenerativa, labranza reducida, pastoreo rotacional)
- Protocolos de muestreo
- Duración de los períodos de seguimiento

3.1.2.2. A nivel nacional

La normativa española actual sobre servicios ecosistémicos del suelo se centra en la protección y restauración de la biodiversidad y los ecosistemas degradados como forma de asegurar la provisión de servicios ecosistémicos a largo plazo, reconociendo la importancia de estos para el bienestar humano y el desarrollo sostenible, y promoviendo la participación ciudadana y la responsabilidad en su conservación.



ESTRATEGIA A LARGO PLAZO PARA UNA ECONOMÍA ESPAÑOLA MODERNA, COMPETITIVA Y CLIMÁTICAMENTE NEUTRA EN 2050

La Estrategia a Largo Plazo para una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra en 2050” (ELP 2050) fue aprobada el 3 de noviembre de 2020 por el Consejo de ministros. Su objetivo es impulsar, dentro del Marco estratégico de Energía y Clima donde también se encuentra la Ley de Cambio Climático y Transición Energética, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para 2050 en un 90 % respecto a 1990.

Los sumideros naturales de carbono (incluidos suelos agrícolas, bosques y humedales) juegan un papel central en esta estrategia. La estrategia reconoce que la restauración, conservación y mejora del suelo es clave para lograr esa neutralidad climática. En 2050, se espera que los sumideros naturales (suelo, bosques, humedales, etc.) absorban unas 37 MtCO₂eq anuales, compensando las emisiones residuales de sectores difíciles de eliminar por completo (agricultura, industria pesada, etc.). La estrategia contempla medidas concretas para incrementar el contenido de carbono en el suelo agrícola, tales como:

- Rotaciones de cultivos y diversificación: incrementan la materia orgánica y favorecen el secuestro de carbono.
- Labranza reducida o nula (siembra directa): minimiza la pérdida de carbono almacenado en el suelo.
- Cubiertas vegetales: mantienen una actividad biológica constante y mejoran la estructura del suelo.
- Compostaje y enmiendas orgánicas: aumentan el carbono orgánico del suelo y su fertilidad.
- Reducción del uso de fertilizantes químicos: favorece la biodiversidad microbiana del suelo, clave en el ciclo del carbono.

Otros aspectos clave de la estrategia son las acciones de Reforestación, Agrosilvicultura y Restauración:

- Reforestación de 20.000 hectáreas/año hasta 2050, con especies adaptadas y resilientes al cambio climático.
- Fomento de la agrosilvicultura: sistemas combinados de cultivos, pastos y árboles que aumentan el secuestro de carbono en suelo y biomasa.
- Restauración de 50.000 ha de humedales, que también actúan como potentes sumideros de carbono orgánico en suelos saturados.

La ELP 2050 también promueve el uso de biorresiduos urbanos y agroganaderos para compost o digestión anaerobia (biogás), evitando emisiones y devolviendo carbono estable a los suelos. Estas prácticas están alineadas con la Estrategia de Economía Circular y el Plan Nacional de Residuos, que también apuntan a mejorar la salud del suelo. También se

propone mejorar los sistemas de monitoreo del contenido de carbono en suelos agrícolas, forestales y pastizales mediante el uso de herramientas satelitales, inventarios y modelización para evaluar la evolución del secuestro de carbono.

LEY DE CAMBIO CLIMÁTICO Y TRANSICIÓN ENERGÉTICA

La ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética en España tiene como objetivo principal establecer el marco legal para avanzar hacia la neutralidad climática antes de 2050, con un sistema eléctrico basado exclusivamente en energías renovables. Como objetivos parciales para 2030, la ley pretende:

- reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 23 % respecto a 1990.
- alcanzar al menos un 42 % de energías renovables en el consumo final.
- lograr un sistema eléctrico con al menos 74 % de generación renovable.
- reducir el consumo de energía primaria en al menos un 39,5 %

La ley reconoce explícitamente el papel del suelo como sumidero de carbono y promueve su uso estratégico para el secuestro y almacenamiento de carbono:

1. Reconocimiento del papel de los sumideros naturales: El artículo 20 establece que el Gobierno fomentará el uso del suelo como sumidero natural de carbono. Se incluyen como sumideros: 1) suelos agrícolas y forestales; 2) sistemas forestales, praderas, humedales; y 3) ecosistemas marinos (como praderas de posidonia).

2. Estrategia de absorciones de carbono: Se prevé la elaboración de una Estrategia de absorciones de carbono dentro de los tres años posteriores a la entrada en vigor de la ley (es decir, antes de mayo de 2024, aunque hasta donde sabemos, a fecha de septiembre de 2025, el gobierno español no ha publicado dicha estrategia). Esta estrategia debe: 1) cuantificar la capacidad de los sumideros naturales; 2) proponer medidas para su protección, gestión y mejora; y 3) integrar la agroecología, silvicultura sostenible y restauración ecológica como prácticas clave.

3. Fomento de buenas prácticas agrarias: La ley fomenta el uso de prácticas agrícolas sostenibles que: 1) aumenten la materia orgánica en el suelo; 2) mejoren la estructura del suelo y su capacidad de retención de carbono; y 3) reduzcan el uso de insumos químicos que puedan degradarlo.

4. Pagos por servicios ecosistémicos: Se abre la puerta a mecanismos de incentivos económicos (como pagos por servicios ecosistémicos) a quienes gestionen el suelo de manera que favorezca la absorción de CO₂.

5. Compatibilidad con la PAC y fondos europeos: Se alinea con los objetivos de la PAC (Política Agraria Común) y el Pacto Verde Europeo, lo que permite financiar actuaciones de secuestro de carbono en suelos mediante fondos europeos.

PLAN ESTRATÉGICO ESTATAL DE PATRIMONIO NATURAL Y BIODIVERSIDAD 2030

El Plan Estratégico Estatal del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad a 2030 fue aprobado por el Consejo de ministros el 27 de diciembre de 2022, mediante el Real Decreto 1057/2022. Se enmarca en la Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y la Biodiversidad, como herramienta clave para conservar, usar de forma sostenible y restaurar el patrimonio natural —terrestre y marino—, la biodiversidad y la geodiversidad del país.

El Plan incluye varios aspectos directamente relacionados con el secuestro y almacenamiento de carbono en el suelo, enmarcados dentro de su enfoque de restauración ecológica, infraestructura verde y capital natural:

1. Restauración de ecosistemas como sumideros de carbono. Su objetivo clave es restaurar al menos el 15 % de los ecosistemas degradados para 2030. Esto incluye humedales, bosques, suelos agrícolas, pastizales y sistemas costeros que, bien gestionados, son importantes sumideros de carbono. Se promueve la restauración ecológica basada en soluciones naturales, como la revegetación y recuperación de funciones ecológicas que aumentan el carbono orgánico del suelo (COS).

2. Contabilidad del capital natural y servicios ecosistémicos. El plan contempla el desarrollo de un sistema de contabilidad del capital natural, en colaboración con el INE, para cuantificar los servicios de regulación climática, entre ellos el almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa. Se busca integrar estos valores en la planificación pública y privada, especialmente en los sectores agrícola, forestal y urbano.

3. Suelos como activos naturales estratégicos. Se reconoce que los suelos saludables son esenciales para la resiliencia ecológica y el almacenamiento de carbono. Se promueve el uso sostenible del suelo, la lucha contra la erosión, la salinización, la contaminación y la compactación —todos factores que afectan la capacidad de los suelos para capturar carbono.

4. Incentivos agroambientales y gestión sostenible. El plan propone vincular ayudas y subvenciones a prácticas que fomenten el secuestro de carbono en suelos agrícolas (agricultura regenerativa, rotación de cultivos y cubiertas vegetales, no labranza o labranza mínima, incorporación de materia orgánica tal como compost, estiércol, restos de poda, etc.). Apoya iniciativas como la agroecología y la ganadería extensiva bien gestionada, que pueden contribuir al aumento del carbono edáfico.

5. Infraestructura verde y conectividad ecológica. Las actuaciones sobre corredores ecológicos y zonas verdes incluyen también funciones de captura de carbono a través de los suelos y la vegetación. La conectividad ecológica facilita la resiliencia de los ecosistemas frente al cambio climático y mejora su función como sumideros de carbono.

6. Seguimiento y evaluación. El plan propone indicadores para monitorizar el carbono orgánico del suelo, siguiendo estándares internacionales como los de la FAO, IPCC y la Estrategia Europea del Suelo. Está previsto reforzar los sistemas de información ambiental para mejorar el conocimiento sobre el estado del carbono en los suelos a nivel nacional.

ESTRATEGIA NACIONAL DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN

La Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación (ENLD) de España fue aprobada por el Consejo de ministros el 21 de junio de 2022, como actualización del Programa Nacional original de 2008, en línea con los compromisos adquiridos por España bajo la Convención de Naciones Unidas para combatir la desertificación (firmada en 1994). En 2025 se emitió una Orden Ministerial que define el primer Plan de Implementación (2025-2027) de la Estrategia. Además, el Real Decreto 105/2025 reformó la gobernanza para reforzar y adaptar los órganos institucionales implicados.

Su objetivo general es conseguir la neutralidad en la degradación de tierras, promoviendo la conservación y mejora del capital natural, especialmente en zonas vulnerables. La ENLD incorpora el secuestro y almacenamiento de carbono en el suelo como una línea estratégica prioritaria dentro del objetivo más amplio de lograr la neutralidad en la degradación de tierras. Los aspectos más relevantes de esta estrategia son:

1. El suelo como sumidero de carbono. Reconocimiento explícito del papel de los suelos en la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono orgánico. El mantenimiento y aumento del contenido de materia orgánica del suelo es considerado un indicador clave de su salud y de su capacidad de almacenamiento de carbono.

2. Prácticas agrícolas y forestales regenerativas. La estrategia fomenta técnicas que promueven el secuestro de carbono:

- Agrosilvicultura y pastoreo rotacional, que combinan árboles, cultivos y ganadería para mejorar el balance de carbono.
- Cubiertas vegetales permanentes, para proteger el suelo frente a la erosión y aumentar el carbono orgánico.
- Labranza reducida o cero labranza (siembra directa) para minimizar la pérdida de carbono del suelo.
- Compostaje y uso de enmiendas orgánicas, especialmente en tierras agrícolas degradadas.
- Reforestación y restauración ecológica en terrenos marginales, priorizando especies autóctonas.

3. Monitoreo y verificación del carbono del suelo. Se promueve el desarrollo del Atlas Nacional de la Desertificación, que incluirá datos sobre contenido de carbono orgánico en el suelo y su evolución temporal. Se plantea avanzar en la digitalización de indicadores, incluyendo sensores y herramientas de teledetección para cuantificar carbono en suelos a nivel de parcela. También se promueve el establecimiento de protocolos de seguimiento armonizados para reportar avances hacia la neutralidad climática del suelo

La ENLD se alinea con la Estrategia Europea del Suelo (2021) y la iniciativa internacional 4 per 1000 lanzada por la FAO y Francia, que promueve aumentar el carbono orgánico del suelo un 0,4 % anual como estrategia global contra el cambio climático. Esta conexión per-

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

mite el acceso a fondos europeos como el Horizonte Europa, LIFE y el Fondo de Transición Justa, para proyectos de captura de carbono en suelos degradados.

En el marco de la ENLD, el Gobierno prevé aprobar una **Ley Nacional del Suelo** antes de 2030, que incluiría:

- La obligación de mantener ciertos niveles mínimos de materia orgánica.
- La posibilidad de mercados de carbono voluntarios basados en suelo, con certificación de prácticas sostenibles (CRCR).

PLAN ESTRATÉGICO PAC (PEPAC)

El Plan Estratégico de la PAC 2023-2027 (PEPAC) en España fue aprobado por la Comisión Europea el 31 de agosto de 2022 (con modificaciones vigentes desde el 30 de agosto de 2024). Su principal objetivo busca enfocarse en resultados concretos vinculados a tres grandes ejes:

1. Sector agrícola inteligente, competitivo y resiliente, con seguridad alimentaria a largo plazo.
2. Protección del medio ambiente y lucha contra el cambio climático.
3. Reforzar la economía y estructura socioeconómica de las zonas rurales

Estas tres líneas de actuación se desglosan en 9 objetivos específicos y un objetivo transversal de modernización, innovación y digitalización en zonas rurales.

Respecto a la segunda línea de resultados (“protección del medio ambiente y lucha contra el cambio climático”), la PEPAC introduce por primera vez la figura de ecorregímenes. Se trata de pagos voluntarios que los agricultores y ganaderos pueden recibir si aplican prácticas agrícolas beneficiosas para el medio ambiente, el clima y la biodiversidad. Por tanto, es un instrumento que busca remunerar aquellas prácticas que:

- reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero,
- mejoren la biodiversidad,
- protejan los suelos y el agua,
- promuevan el bienestar animal y la resiliencia climática.

Se destinan al menos el 25 % de todo el presupuesto anual de la PEPAC en ayudas directas al año (aproximadamente unos 1.100 millones de euros anuales en España). Como ya se ha indicado, son de adhesión voluntaria, pero atractivos económicamente para fomentar su adopción. El importe depende de la práctica elegida y las hectáreas o cabezas de ganado afectadas.

La PEPAC ha definido 7 prácticas agrícolas beneficiosas agrupadas en 3 grandes tipos:

Agrosistemas de pastos

1. Pastoreo extensivo
2. Siega sostenible
3. Biodiversidad en pastos mediante espacios de refugio

Agrosistemas de tierras de cultivo

4. Rotación de cultivos con especies mejorantes
5. Siembra directa (agricultura de conservación)

Agrosistemas de cultivos permanentes

6. Cubierta vegetal espontánea o sembrada
7. Cubierta inerte (residuos vegetales, acolchado, etc.)

El secuestro y almacenamiento de carbono en el suelo es una prioridad ambiental transversal que se articula principalmente a través de los **ecorregímenes, medidas de desarrollo rural y condicionalidad reforzada**.

1. Ecorregímenes vinculados al carbono

Varios ecorregímenes del PEPAC promueven prácticas agrícolas que incrementan el contenido de materia orgánica en el suelo, favoreciendo el secuestro de CO₂:

- Siembra directa (agricultura de conservación). Evita el laboreo del suelo, reduciendo la oxidación de la materia orgánica. Favorece la acumulación de carbono en el horizonte superficial del suelo y reduce las emisiones directas del uso de maquinaria.
- Rotaciones con especies mejorantes (leguminosas, crucíferas). Incrementan la biodiversidad del suelo y su capacidad de fijación de carbono. Las leguminosas además fijan nitrógeno atmosférico, reduciendo fertilizantes.
- Cubiertas vegetales vivas o inertes en cultivos leñosos. Mantienen actividad fotosintética y aportan biomasa al suelo. Favorecen el almacenamiento de carbono orgánico y reducen la erosión.
- Pastoreo extensivo. Si se gestiona correctamente, contribuye al secuestro de carbono en pastizales permanentes gracias a la regeneración del pasto y la fertilización natural.

2. Ayudas agroambientales del desarrollo rural (FEADER)

El segundo pilar de la PAC contempla medidas agroambientales voluntarias que contribuyen indirectamente al secuestro de carbono mediante el apoyo a sistemas extensivos de

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

cultivo y ganadería el fomento de la agricultura ecológica, con prácticas de menor laboreo y compostaje y la conservación de cubiertas vegetales permanentes.

3. Condicionalidad reforzada

Para poder recibir cualquier ayuda de la PAC, se deben cumplir ciertos requisitos mínimos obligatorios, conocidos como Buenas Condiciones Agrícolas y Ambientales (BCAA, Good Agricultural and Environmental Conditions, GAECs, por sus siglas en inglés) que también favorecen el secuestro de carbono:

- BCAA 6: cobertura mínima del suelo para evitar suelos desnudos en períodos sensibles.
- BCAA 7: rotación de cultivos en tierras de cultivo.
- BCAA 8: superficie mínima de elementos no productivos (setos, lindes, barbechos...) que también retienen carbono.

La monitorización del carbono orgánico en suelos cultivables dentro del marco del PE-PAC 2023-2027 se realiza mediante un sistema de seguimiento y evaluación que combina:

- **Indicadores del marco de rendimiento de la PAC.** La Comisión Europea exige que cada Estado miembro informe regularmente sobre indicadores de resultado e impacto, incluyendo. Estos indicadores se basan en datos nacionales, estudios científico y redes de observación del suelo.
- **Red de seguimiento de suelos agrícolas.** España cuenta con sistemas nacionales como:
 - RECSO: Red de Estaciones de Control de Suelo (En Castilla-La Mancha no hay ninguna). Por ejemplo, Cataluña cuenta con la Red de estaciones de Medida de parámetros físicos de los Suelos de Cataluña (XMS-Cat)
 - ESYRCE. La Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos se realiza con periodicidad anual desde el año 1990 en colaboración con los Servicios Estadísticos de las Comunidades Autónomas. Se basa en una investigación en campo, en la que se toma información directamente a pie de parcela en una muestra georeferenciada del territorio nacional, realizada en los meses de mayo a agosto. Los resultados obtenidos constituyen una fuente de datos objetiva que complementa otras informaciones estadísticas del Ministerio para la obtención de los datos oficiales, que se publican posteriormente en el Anuario de Estadística del Ministerio de Agricultura correspondiente.
- **Teledetección y SIGPAC.** El uso de imágenes satelitales (Sentinel-2, Copernicus) permite verificar prácticas de manejo del suelo (laboreo, cubiertas, rotación) e inferir modelos de evolución del carbono en base a cambios de uso y gestión. Además, el SIGPAC (Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas) está integrado con estos datos para supervisar el cumplimiento de los ecorregímenes.
- **Modelos y simulaciones biofísicas.** España usa modelos como CENTURY o RothC

para estimar el potencial de secuestro de carbono en diferentes condiciones climáticas y tipos de suelo, y el efecto proyectado de ciertas prácticas (rotación, siembra directa...) a medio y largo plazo. Estos modelos se calibran con los datos recogidos en campo. Hasta donde sabemos, el uso de estos modelos, de forma individual o en combinación con trabajos de campo y datos de teledetección y SIG, se han usado principalmente para estudios científicos en áreas de estudio concretas, sin que hasta la fecha hayan formado parte de ninguna política de monitorización y verificación del contenido de COS a nivel nacional.

INICIATIVA 4 POR 1000

La “iniciativa 4 por 1000: Suelos para la seguridad alimentaria y el clima” (abreviado 4p1000) es una iniciativa internacional impulsada por el Gobierno de Francia en la Conferencia de París sobre el Clima (COP21) en 2015. Su objetivo global es aumentar un 4 por 1000 (0,4%) al año el COS en suelos agrícolas, demostrando que incluso un pequeño incremento en el almacenamiento de carbono en los suelos es crucial para mejorar la fertilidad de los mismos y la producción agrícola, y contribuir así a conseguir el objetivo a largo plazo marcado en el Acuerdo de París. Esta iniciativa promueve federar a todos los actores voluntarios de los sectores público y privado (Estados, autoridades locales, empresas, organizaciones profesionales, ONG, centros de investigación, etc.) en el marco del Plan de Acción Lima-París. Basado en una sólida documentación científica, invita a todos los socios a promover/implementar acciones concretas para el almacenamiento de carbono en el suelo.



NUTRICIÓN SOSTENIBLE DE LOS SUELOS AGRARIOS

El Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, que establece normas para la nutrición sostenible de los suelos agrarios en España, fijando normas básicas para asegurar un aporte sostenible de nutrientes en suelos agrarios con objetivo de:

- Mantener o incrementar la productividad.
- Reducir el impacto ambiental y climático (menos emisiones de GEI y amoníaco).
- Proteger la fertilidad del suelo y su biodiversidad edáfica, sin acumular metales pesados ni contaminantes.

Aunque su foco principal es la nutrición sostenible del suelo agrario, el Real Decreto también incorpora explícitamente aspectos relevantes relacionados con el secuestro y almacenamiento de carbono en el suelo como estrategia para mitigar el cambio climático. El decreto se enmarca dentro de los objetivos del Pacto Verde Europeo, y menciona expresamente que “el uso eficiente de los nutrientes debe contribuir también a aumentar la capacidad de captura de carbono de los suelos agrícolas y a mejorar su resiliencia frente al cambio climático”. (Artículo 1 y exposición de motivos). El secuestro de carbono es por tanto un objetivo ambiental transversal al plan de nutrición sostenible. Aplica a todas las actividades agrícolas y forestales de crecimiento rápido que aporten nutrientes o modifiquen el suelo.

El RD impulsa prácticas agronómicas que favorecen la acumulación de carbono orgánico en el suelo, tales como:

- Aplicación de enmiendas orgánicas (estiércoles, compost, purines tratados, bioestimulantes de origen vegetal o animal), siempre bajo criterios de sostenibilidad.
- Manejo de restos de cosecha: se promueve su incorporación al suelo en lugar de su eliminación.
- Mantenimiento de cubiertas vegetales y rotaciones con cultivos de cobertura, especialmente en cultivos leñosos, que reducen la erosión y aumentan el contenido de materia orgánica.
- Laboreo reducido o siembra directa, prácticas recomendadas como parte de las “buenas prácticas agrarias” para evitar la mineralización del carbono del suelo.

Estas prácticas no solo reducen emisiones de GEI, sino que además aumentan la resiliencia del suelo ante sequías y lluvias intensas.

El Real Decreto obliga a realizar análisis periódicos de suelos para medir parámetros clave como la materia orgánica, que es un indicador directo de carbono en el suelo.

- Se exige un análisis mínimo cada 5 años.
- Es obligatorio incluir la estimación del contenido de carbono orgánico en las recomendaciones del plan de abonado.

- Esta información debe reflejarse en el cuaderno de explotación.

Esto permite monitorizar la evolución del carbono edáfico y evaluar la eficacia de las prácticas de secuestro. Los asesores técnicos en fertilización, tal como los define el anexo XI, deben tener conocimientos sobre mejoras de la fertilidad del suelo que incluyan la conservación del carbono orgánico. Esto garantiza que las decisiones sobre fertilización tengan en cuenta no solo la productividad, sino también el balance de carbono del suelo.

REAL DECRETO SOBRE REGISTRO DE HUELLA DE CARBONO, COMPENSACIÓN Y PROYECTOS DE ABSORCIÓN DE CO₂

El Real Decreto 214/2025, de 18 de marzo, crea y regula el *Registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de CO₂* y fija obligaciones de cálculo, planificación y publicación para determinadas organizaciones.

El registro se estructura en tres secciones:

- Sección a): huellas de carbono de organización y compromisos/planes de reducción (también huellas de eventos).
- Sección b): proyectos de absorción de CO₂ (uso de la tierra, forestales, “carbono azul”, etc.).
- Sección c): compensaciones de huella (transacciones/uso de absorciones o reducciones).

El RD dedica varios artículos y disposiciones a los proyectos de absorción de CO₂ que incluyen explícitamente el secuestro y almacenamiento de carbono en suelos (forestales, agrícolas o costeros). La sección b) del registro incluye proyectos de absorción terrestres y marinos: forestales, de uso de la tierra y “carbono azul” (ej. marismas, praderas marinas). Se reconoce el almacenamiento en suelos como vía de absorción, siempre que se ajuste a metodologías IPCC y criterios del Ministerio.

Para que los proyectos de absorción de carbono puedan ser inscritos, deben cumplir una serie de condiciones técnicas y ambientales:

- Beneficio neto en absorción de carbono: el aumento de carbono en suelo debe ser adicional al escenario de referencia (no basta mantener lo ya existente).
- Adicionalidad: las prácticas (ej. cambio de manejo agrícola, forestación, agroforestería) deben generar absorciones que no ocurrirían sin el proyecto.
- Permanencia: el carbono fijado debe mantenerse al menos durante el período comprometido. El RD prevé mecanismos de gestión de riesgos (plagas, incendios, cambios de uso del suelo, degradación del suelo, etc.).
- No causar perjuicio significativo: deben evitar impactos negativos en biodiversidad, agua, erosión, contaminación del suelo o pérdida de hábitats.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La metodología y cálculos deben basarse en guías del IPCC, en el Inventario nacional de gases de efecto invernadero, y en criterios/técnicas publicados por la Oficina Española de Cambio Climático (OECC). Se exige trazabilidad completa: cuantificación, almacenamiento de datos, actualizaciones periódicas según avance la ciencia. La OECC puede publicar herramientas y factores de emisión específicos para proyectos de suelo.

Antes de inscribir, debe haber comprobación técnica independiente. Se prevén inspecciones periódicas, in situ o telemáticas, para asegurar que el carbono sigue almacenado. Si se detectan liberaciones de carbono (p. ej., por laboreo intensivo, incendios o abandono de prácticas), el titular debe notificarlo a la OECC.

Para cubrir riesgos de pérdida de carbono (ej. erosión, incendios forestales, degradación del suelo), se establece una bolsa de garantía que compensa absorciones inscritas que ya no se mantienen. Esto busca evitar dobles contabilidades o créditos ficticios en caso de liberación de carbono.

Los proyectos de absorción que recaen sobre fincas (ej. suelos agrícolas o forestales) pueden anotarse con nota marginal en el Registro de la Propiedad, para dar seguridad jurídica y trazabilidad. Esta nota caduca a los 5 años salvo renovación o baja en el registro.

Los proyectos que aporten beneficios adicionales (mejora de fertilidad del suelo, biodiversidad, control de erosión, servicios ecosistémicos) pueden recibir una valoración destacada en el sello oficial del Ministerio. Esto da mayor visibilidad y reconocimiento a proyectos de almacenamiento de carbono en suelo con co-beneficios claros.

3.1.2.3. A nivel Castilla-La Mancha

ESTRATEGIA DE CAMBIO CLIMÁTICO DE CASTILLA-LA MANCHA 2020-2030

El origen de esta estrategia regional comienza en 2011, cuando se aprobó la primera Estrategia Regional de Mitigación y Adaptación frente al Cambio Climático (ERMACC), y en 2019 se aprobó la actual Estrategia mediante la Orden 4/2019 del 18 de enero. La estrategia contempla la mitigación, adaptación y sumideros de CO₂ como ejes principales para luchar contra el cambio climático, integrando los principios de transparencia y participación. Además, Castilla-La Mancha participa en la Misión de Adaptación al Cambio Climático de la UE para desarrollar soluciones innovadoras y resilientes para el cambio climático. A raíz de esta estrategia, existen una serie de actuaciones enfocadas específicamente en el secuestro y almacenamiento de carbono en el suelo:

1. Proyectos piloto de sumideros de carbono en suelos agrarios: Se han iniciado siete proyectos piloto en colaboración con Grupos de Desarrollo Rural (GDR) para analizar la capacidad de absorción de CO₂ en diferentes cultivos locales (almendros, olivos, albaricoques, viñedos, pastos, etc.). Los objetivos incluyen valorar esa capacidad de absorción de carbono de suelos agrícolas como herramienta sostenible, así como ofrecer una compensación económica a productores a través de mercados de carbono. Además, se busca fomentar prácticas agrícolas sostenibles que mejoren la salud del suelo y su productividad y por tanto posicionar al sector agrario regional como referente en innovación sostenible. La financiación proviene de los programas LEADER (pilar II del PEPAC), con una inversión aproximada de 17.000 € por proyecto. En diciembre de 2024, se retomaron estas iniciativas y se incluyó

el desarrollo de eco-regímenes. Entre las prácticas destacadas están el pastoreo extensivo, siembra directa y cubiertas vegetales, todas ellas orientadas a aumentar el contenido de carbono en el suelo y reducir emisiones agrícolas.

2. Creación de un mercado interno para gestionar sumideros de carbono: La Junta está preparando un mercado regional de sumideros de carbono para gestionar de forma interna las reservas naturales o artificiales que absorben más CO₂ del que emiten. Se prevé finalizar los estudios necesarios antes de finales de 2025 y comenzar la implementación de estas medidas incluso antes de la aprobación de la futura Ley regional de Cambio Climático.

3. Aplicación de buenas prácticas en ganadería para mejorar secuestro de carbono: La Estrategia contempla optimizar las prácticas de secuestro de carbono en suelos vinculados a explotaciones ganaderas, especialmente en el sector del vacuno de carne. Esto incluye analizar la situación actual, identificar buenas prácticas y desarrollar herramientas de apoyo específicas para el sector.

4. Papel del sector forestal como sumidero de carbono: CastillaLa Mancha cuenta con 3,8 millones de hectáreas forestales, que actualmente capturan aproximadamente 3 800 kilotoneladas de CO₂ al año, desempeñando un rol esencial como sumideros de carbono naturales.

5. Investigación, formación y transferencia de conocimiento a través de la Cátedra UCLM: En octubre de 2024, se ha impulsado una Cátedra Participativa de Cambio Climático y Sostenibilidad del Sector Primario, en colaboración con la UCLM, enfocada en estudiar huella de carbono e hídrica, formación, investigación y pilotaje, así como ofrecer soluciones, con una financiación regional de 50 000 €/año por tres años. La creación de la Cátedra refuerza la Estrategia en materia de mitigación, adaptación y sumideros de CO₂. Sus funciones incluyen: 1) estudios piloto sobre huella de carbono; 2) propuestas para un sistema regional voluntario de créditos de carbono y mecanismos de carbon insetting; y 3) apoyo en investigación, divulgación, formación y transferencia hacia el sector agrario, ganadero y forestal.

DECRETO POR EL QUE SE CREA LA ALIANZA POR LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE CASTILLA-LA MANCHA

El Decreto 31/2023, de 28 de marzo, por el que se crea la Alianza por los Servicios de los Ecosistemas de CastillaLa Mancha establece las bases para que la Alianza actúe como un instrumento de diálogo y cooperación públicoprivada. Su propósito es integrar el valor de los servicios ecosistémicos en políticas sobre cambio climático, biodiversidad y responsabilidad ambiental y social del sector privado, en beneficio de la gestión sostenible del patrimonio natural y de la población de la región.

Las estrategias y proyectos de la Alianza se orientan a la conservación, restauración, mejora, promoción, gestión y puesta en valor del medio natural y sus servicios ecosistémicos. Las áreas temáticas principales incluyen:

- a) Conservación y mejora de la biodiversidad.
- b) Gestión de la Red Natura 2000.
- c) Gestión forestal sostenible.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- d) Gestión cinegética para restauración y biodiversidad.
- e) Gestión del patrimonio público forestal y pecuario.
- f) Conservación de suelos y regulación hídrica.
- g) Almacenamiento y captura de carbono.
- h) Gestión de espacios naturales protegidos y su uso público

Por tanto, el secuestro y almacenamiento de carbono en el suelo está considerado en la Alianza como uno de los ejes estratégicos clave para la mitigación del cambio climático, junto con la conservación de la biodiversidad y el uso sostenible de los recursos naturales. Dentro de las líneas de actuación prioritaria, el almacenamiento de carbono se aborda mediante:

- Prácticas de gestión que aumentan el carbono edáfico (reforestación y restauración ecológica de suelos degradados, silvopastoreo y sistemas agroforestales que aumentan la biomasa y la materia orgánica del suelo, manejo forestal sostenible con regeneración natural asistida, reducción del laboreo en zonas agrícolas que colindan con espacios naturales, cubiertas vegetales en cultivos leñosos para mantener y aumentar la materia orgánica, entre otros)

- Desarrollo de proyectos de compensación de emisiones. La Alianza permite que entidades públicas y privadas participen a través de pagos voluntarios por servicios ecosistémicos (PVSE) ligados a proyectos que incluyen la captura de carbono en suelo. Se busca establecer metodologías de medición y verificación del carbono secuestrado, siguiendo estándares internacionales (como Verified Carbon Standard, Plan Vivo, etc.).

En cuanto a la participación y financiación, las entidades públicas (salvo el sector académico que está exento de contribución económica) o privadas pueden solicitar incorporarse vía convenio o acuerdo con la Consejería de Desarrollo Sostenible del gobierno regional. Se promueve la inversión privada en proyectos de secuestro de carbono en suelo, como parte de sus políticas de responsabilidad ambiental y social, mecanismo conocido como Pago Voluntario por Servicios de los Ecosistemas (PVSE). Esto incluye:

- Financiación de actuaciones sobre montes públicos o privados.
- Implicación de empresas en proyectos piloto de compensación de huella de carbono mediante prácticas agrícolas y forestales sostenibles.
- Conservación de carbono “in situ”, es decir, evitando emisiones por degradación.

LEY DE CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

La Ley 9/1999 de, 26 de mayo, de Conservación de la Naturaleza establece normas para la protección, conservación, restauración, gestión y mejora de los recursos naturales y procesos ecológicos esenciales en Castilla-La Mancha, incluyendo espacios naturales, especies silvestres, hábitats, elementos geomorfológicos y el paisaje. La ley no regula directamente el secuestro de carbono en suelos, pero sí que establece un marco propicio para prácticas que lo favorecen desde una perspectiva de conservación ecológica, restauración de ecosistemas y gestión sostenible de los recursos naturales.

Concretamente, los Títulos II y III tratan sobre la conservación y restauración de ecosistemas naturales. El Título III define distintas categorías de Espacios Naturales Protegidos (ENP): parques naturales, reservas naturales, microrreservas, reservas fluviales, monumentos naturales, paisajes protegidos y parajes naturales. También se Introduce la figura de “zonas sensibles”, que los propietarios pueden solicitar al reconocer valores naturales especiales y comprometerse con prácticas de conservación. Se establece el desarrollo de Planes de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN) y los planes de gestión de espacios protegidos, con el objetivo de fomentar la preservación y mejora de hábitats, vegetación natural y suelos. Estas actuaciones, fomentan la cobertura vegetal, la reforestación, y la no degradación del suelo, todos ellos elementos que favorecen el secuestro de carbono orgánico.

PLAN DIRECTOR DE LA RED NATURA 2000 EN CASTILLA-LA MANCHA

El Plan Director de la Red Natura 2000 en Castilla-La Mancha es el instrumento marco de planificación que orienta la implantación, gestión y conservación de los espacios incluidos en la Red Natura 2000 en la región —esto incluye Zonas de Especial Conservación (ZEC / LIC) y Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA). Su objetivo es integrar la conservación de hábitats y especies de interés comunitario en las políticas sectoriales y dotar de criterios técnicos y administrativos homogéneos para la gestión de la Red en Castilla-La Mancha. Se apoya en la normativa europea (Directivas Hábitats y Aves), la normativa estatal (gestión y protección de la Red Natura 2000) y en otras normas/reglamentos autonómicos para su ejecución.

La Red Natura 2000 se centran en la vegetación y gestión forestal sostenible y no contemplan el secuestro de carbono de suelos agrícolas de forma directa. No obstante, la Red Natura afecta directamente a aquellos zonas agrícolas que tradicionalmente estaban en los alrededores de humedales y turberas, y que junto con el futuro Plan Nacional de Restauración de la Naturaleza, se tendrán que tener en cuenta par desarrollar plantas para restaurar, entre otros, el contenido de COS en suelo de estas zonas.

3.1.3. Síntesis normativo. Identificación de vacíos y necesidades. Sugerencias y aportaciones adicionales

A nivel europeo

Los suelos agrícolas y forestales de la Unión Europea tienen el potencial de capturar y almacenar cantidades significativas de dióxido de carbono de la atmósfera. Aún así, el suelo es uno de los factores menos estudiados en cuanto a su potencial para absorber, secuestrar y almacenar carbono atmosférico. Reconociendo esto, la UE está integrando cada vez más el secuestro de carbono en el suelo en sus políticas climáticas, agrícolas y ambientales.

Hasta el año 2006 la Unión Europea no tenía ninguna política a nivel comunitario centrada específicamente en la salud y protección del suelo. Es a partir de este año cuando se adopta la Estrategia Temática “Suelo”, que consistía en una Comunicación de la Comisión, una propuesta para una directiva marco (es decir, una ley europea), y una evaluación de impacto. La propuesta para desarrollar la directiva marco fue finalmente bloqueada en 2014 por oposición de 5 Estados Miembro.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Tuvieron que pasar casi diez años hasta que la Comisión Europea (CE) adoptó, como parte del Pacto Verde Europeo y de la Estrategia de la UE sobre Biodiversidad 2030, la nueva Estrategia de la UE sobre el Suelo 2030, con el objetivo de mejorar la calidad de todos los *ecosistemas del suelo* a nivel europeo para el año 2050. La salud de un suelo se evalúa según su capacidad para sustentar la vida y la medida en que puede mantener o mejorar la provisión de servicios ecosistémicos. Los suelos sanos muestran una mayor resistencia al estrés, lo que proporciona mayor resiliencia a los impactos negativos de la sequía, las inundaciones y la erosión. De importancia primordial para la salud del suelo es el carbono y los servicios ecosistémicos que sustenta. El carbono influye en diversos atributos del suelo, incluyendo propiedades físicas, químicas, hidrológicas y biológicas. Por lo tanto, el carbono es un indicador robusto para evaluar la salud y la calidad del suelo. Para instrumentalizar la Estrategia, la UE está actualmente tramitando la aprobación de una nueva Ley de Vigilancia (Monitorización) del Suelo para garantizar un buen nivel y calidad de protección ambiental y de salud de los suelos de la UE.

El sector agrícola es especialmente relevante para reducir las emisiones de CO₂ y aumentar las reservas de C en el suelo para alcanzar la neutralidad climática para 2050, como se establece en la Ley Europea del Clima. Además, se ha establecido un objetivo específico para la eliminación de carbono en el sector del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura (Reglamento LULUCF revisado) de aproximadamente 310 Mt CO₂ eq para 2030. Este objetivo se alinea con las previsiones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), que destaca que solo si se incluyera la acumulación y secuestro de CO₂ en suelos en los escenarios, se podría limitar el calentamiento global a 1,5 °C respecto a los tiempos preindustriales, tal y como marca el Acuerdo de París.

Para contribuir a este fin desde los suelos agrícolas, la reforma de la Política Agraria Común (PAC) para el período 2023-2027 introduce una nueva *arquitectura verde* que busca mejorar el desempeño climático y ambiental de la política respecto al secuestro de carbono en los suelos. En este sentido, se refuerzan las *normas de condicionalidad* y se añade un nuevo instrumento, denominado *ecoesquemas* (o *ecorregímenes*), para proporcionar a los agricultores un pago anual por la implementación de planes de gestión de riesgos específicos. De forma adicional, la CE ha aprobado recientemente un reglamento para establecer un marco de certificación de la UE para la absorción de carbono (Reglamento CRCF) con el fin de compensar las emisiones inevitables o difíciles de reducir mediante el almacenamiento permanente de carbono (p. ej., bioenergía con captura y almacenamiento de carbono y captura y almacenamiento directo de carbono en el aire), la agricultura de carbono, y almacenamiento de carbono en productos (carbono almacenado en productos o materiales de larga duración, como muebles de madera).

La variación de las reservas de carbono orgánico en suelo a lo largo del tiempo se evaluará mediante metodologías contables armonizadas (todavía por publicar) alineadas con las directrices del Reglamento CRCF y con la futura ley de Vigilancia del Suelo, y será verificada por organismos de certificación autorizados, lo que dará lugar a la creación de certificados y créditos de eliminación de carbono. Estos créditos podrán adquirirse posteriormente en el mercado voluntario de carbono, establecido y regulado a nivel europeo. Este mercado voluntario de carbono es independiente del mercado regulado europeo de carbono, también conocido como Sistema de Comercio de Emisiones (SCI), que establece objetivos de reducción de emisiones en sectores con un uso intensivo de energía (generación de energía, industria manufacturera, aviación) y la cantidad de créditos que pueden intercambiarse entre los sectores del SCI para compensar las emisiones difíciles de reducir.

Además de los suelos agrícolas, la UE también ha aprobado otras normas, tales como la Ley de Restauración de la Naturaleza, que establece objetivos para suelos orgánicos (como por ejemplo la restauración de turberas, humedales y promover la biodiversidad), favoreciendo indirectamente el secuestro, mantenimiento y aumento de carbono en este tipo de suelos.

El recién creado Observatorio del Suelo de la UE (EUSO) (Figura 2) juega un papel central en la implementación de la Estrategia sobre Suelo y de la futura Ley de Vigilancia ya que sirve de punto de partida y base para proporcionar los datos e indicadores necesarios para la evaluación periódica de la salud del suelo en la UE. Además, la UE se ha dotado con las Misiones, una nueva figura de investigación enmarcada dentro del programa Horizonte Europa. La misión “*Un pacto por el suelo para Europa*” tiene como objetivo avanzar, mostrar y acelerar la transición hacia suelos saludables para 2030, apoyando los compromisos a largo plazo a nivel europeo y mundial dentro del Pacto Verde Europeo y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

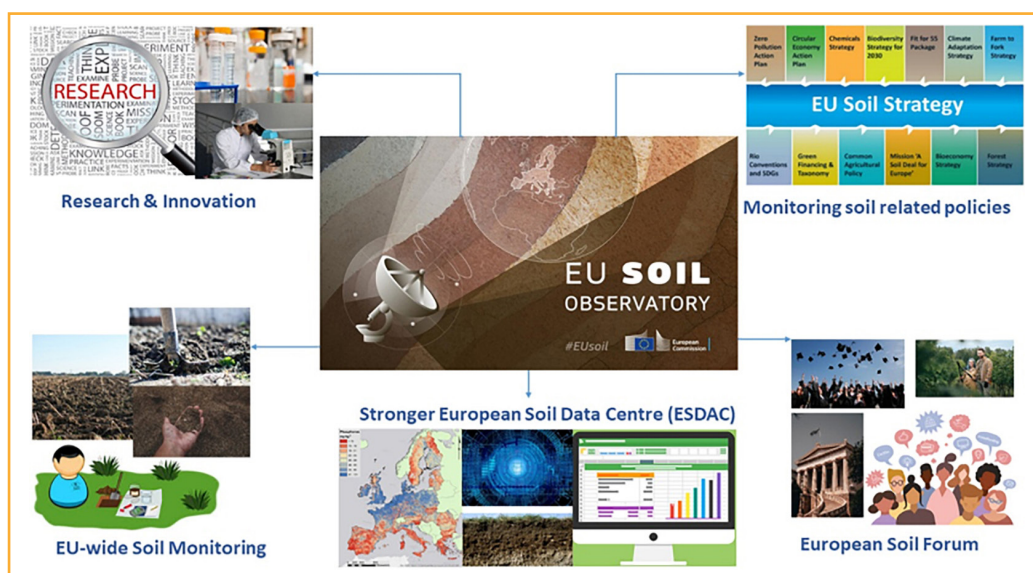


Figura 2.

Los cinco objetivos principales del observatorio europeo del suelo. Fuente: Paganos et al., 2022.

Identificación de vacíos y soluciones propuestas

Aunque el marco normativo de la UE es ambicioso respecto al secuestro y almacenamiento de carbono en suelos, en la práctica aún hay vacíos y limitaciones que dificultan que el suelo se consolide como un verdadero sumidero de carbono.

Como se ha comentado anteriormente, todavía no existe una metodología uniforme de la UE para medir y verificar el carbono en suelos agrícolas y naturales. Los métodos actuales varían entre países y proyectos, lo que complica la certificación y comparabilidad. Los modelos y protocolos de monitoreo aún no capturan bien la dinámica del carbono del suelo (ej. variaciones por clima, manejo, tipo de suelo). Las soluciones propuestas por la UE y expertos pasan por desplegar sistemas de monitoreo, reporte y verificación (MRV), desarrollando, según los criterios del Reglamento CRCF y de la Ley de Vigilancia del Suelo,

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

una metodología de certificación con criterios QU.A.L.ITY (Cuantificación, Adicionalidad, Almacenamiento a largo plazo y Sostenibilidad) y verificación independiente. La Comisión desarrollará y publicará metodologías técnicas por actos delegados (p. ej., suelos minerales, rehumectación de turberas, agroforestería, biochar).

Por otro lado, el carbono almacenado en suelos puede liberarse fácilmente si cambian las prácticas agrícolas (ej. volver al laboreo intensivo o drenar turberas). Los marcos actuales (como el CRCF) proponen periodos mínimos de 5–10 años, pero todavía no existe consenso, por lo que no se garantiza permanencia frente a décadas o siglos que se requieren para compensar emisiones. Es decir, existe una temporalidad y permanencia del secuestro de carbono en suelo que es difícil de evaluar. Las soluciones propuestas pasan por diseñar planes de gestión del riesgo y criterios de almacenamiento a largo plazo, y la preparación de metodologías específicas para turberas (rehumidificación) y prácticas que reduzcan emisiones del suelo en este tipo de suelos

Además, existen problemas con los incentivos económicos insuficientes o inciertos de la PAC, ya que en muchos casos no compensan los costes o riesgos de prácticas regenerativas (ej. cultivos de cobertura, silvicultura, restauración de turberas). La falta de un mercado de carbono agrícola estable y con precios atractivos retrasa la adopción de estas prácticas e inversiones. Los agricultores temen costes de cumplimiento y falta de rentabilidad frente a las exigencias ambientales. Por ello, la aceptación social y conflictos de uso de la tierra es limitada, ya que existe resistencia de parte de agricultores y asociaciones que perciben estas medidas como restricciones a la productividad. Muchos agricultores consideran también que existe una tendencia y un riesgo de “acaparamiento de tierras” por grandes compañías e inversores para proyectos de captura de carbono. Las soluciones propuestas pasan por dotar de una mayor financiación para pequeños agricultores que implementen aquellas prácticas (cubiertas, pastos permanentes, régimen extensivo, ecológico, etc.) que se han demostrado efectivas en aumentar el SOC en suelo.

A nivel nacional

En España se empezó a legislar sobre el suelo como recurso natural en la década de los 90 en temas de fertilización y favoreciendo el incremento de COS, pero no fue hasta la década del 2000 cuando se sentaron las bases que contemplan al suelo como sumidero de carbono atmosférico. En el año 2006 se aprobó la primera Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación (revisada en 2008 y actualizada en 2022), marcando las primeras políticas de conservación y restauración de suelos degradados e indirectamente fomentando el incremento de carbono orgánico en el suelo. En la siguiente década se siguen aprobando Reales Decretos sobre una fertilización más sostenible del suelo, favoreciendo indirectamente la acumulación de materia orgánica.

No es hasta la década de 2020 cuando se empieza a considerar el suelo como un recurso valioso y herramienta para luchar contra el cambio climático, reconociendo el papel de éste para absorber y almacenar carbono atmosférico: La Ley 7/2021, de Cambio Climático y Transición Energética incorpora los sumideros naturales (suelos y bosques) como parte de los objetivos de mitigación. También en 2021 se aprueba el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) 2021-2030, que refuerza la protección del suelo y la lucha contra la degradación y desertificación, y la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050 (ELP2050) reconoce explícitamente el papel de los suelos como sumideros.

En 2022 se aprueba la Estrategia Forestal Española 2050, que promueve gestión forestal sostenible y restauración para mejorar sumideros de carbono, incluidos los suelos (forestales), y el RD 1051/2022, de nutrición sostenible en los suelos agrarios, que establece planes de abonado, registros y obligaciones de buenas prácticas agrícolas. En el 2023 se aprueba la PEPAC 2023-2027, que introduce la herramienta de los “eco-regímenes” (cubiertas vegetales, siembra directa, pastoreo extensivo, etc.) que incentivan la acumulación de carbono en suelos, y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023-2030, que integra metas de absorción del Reglamento europeo LULUCF y medidas agrícolas.

Siguiendo la normativa europea (futura Ley de la UE de Vigilancia del Suelo), los siguientes pasos para España son, a través del MITECO, transponer, desarrollar y aprobar una Ley nacional de Conservación y Uso Sostenible de los Suelos donde España deberá establecer sistemas de control que facilitarán políticas de agricultura de carbono, y de certificación de carbono en suelos. Además, España debe cumplir y adoptar el Reglamento de Restauración de la Naturaleza de la UE, aprobado en junio del 2024. Como reglamento, sus disposiciones son directamente aplicables en todos los Estados miembros sin necesidad de ser transpuestas a través de leyes nacionales. El reglamento obliga a elaborar un Plan Nacional de Restauración antes de 2026. Presumiblemente, en materia de conservación y secuestro de carbono de suelos, este Plan obligará a la restauración de turberas y humedales y a la recuperación y mejor gestión de bosques.

Identificación de vacíos y soluciones propuestas

En línea con los vacíos detectados en la normativa europea, La Ley de Cambio Climático (2021) y el PNIEC no especifican objetivos cuantitativos ni obligatorios para aumentar el carbono orgánico del suelo agrícola o forestal. Esto genera falta de prioridad política y hace difícil orientar financiación y seguimiento. Las soluciones propuestas pasan por incluir metas cuantificables en la Ley de Cambio Climático o en el PNIEC (ej. aumentar un X% el carbono orgánico del suelo agrícola entre 2030 y 2050), vincular los objetivos con la Estrategia Nacional de Suelos (cuando se implemente la futura Ley Europea de Vigilancia de Suelos y su transposición a la normativa nacional) y desarrollar un marco específico de agricultura de carbono, idealmente en la siguiente modificación del actual PEPAC 2023-2027, o ya para el siguiente PEPAC que previsiblemente tendrá que ser aprobado por la comisión europea a partir del 2027.

Otro vacío detectado es que tampoco existe un inventario nacional consolidado del carbono orgánico en suelos con actualización periódica, metodologías armonizadas y cobertura sistemática, limitando la certificación de proyectos de agricultura y su acceso a mercados o esquemas de compensación. Las soluciones propuestas giran en torno a integrar, en una sola plataforma (análoga al proyecto LUCDEME sobre desertificación o similares), una Red de Carbono de Suelos de España, donde se integren datos del PEPAC, SIGPAC, Inventario Forestal Nacional y redes autonómicas, con muestreos regulares y modelos predictivos, y por supuesto adaptar a las características de los suelos nacionales las metodologías de los estándares europeos de certificación (CRCF 2024) para dar credibilidad a créditos de carbono en suelos.

Finalmente, los eco-regímenes del PEPAC, aunque promueven prácticas beneficiosas para la captura y almacenaje de carbono en suelo (cubiertas, siembra directa, rotaciones), tiene problemas de aplicación ya que la cuantía de ayudas es modesta frente al coste y riesgo para agricultores, aparte de que estas ayudas son anuales, lo que desincentiva compromisos

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

de largo plazo (el carbono en suelos se acumula lentamente, a 10–20 años). Tampoco existe un marco nacional estable de pagos por resultados de carbono en suelos (más allá de proyectos voluntarios en el Registro de huella de carbono). Las soluciones propuestas se centran en pasar de pagos anuales (eco-regímenes PAC) a contratos plurianuales de resultados climáticos (10–20 años), diseñar pagos por resultados (ej. euros/tonelada de CO₂ fijado en el suelo) que complementen las ayudas PAC, y activar mecanismos de financiación mixta público-privada, en los que empresas compensen huella a través de proyectos de carbono en suelos validados por el Estado.

A nivel Castilla-La Mancha

Hasta la década de 2010, el gobierno de Castilla-La Mancha carecía de políticas regionales que ayudasen directamente a la captura y secuestro de carbono en suelos. Con la entrada en vigor del PDR 2014-2020 se activan medidas agroambientales y climáticas (cubiertas vegetales, rotaciones de cultivos, reducción del laboreo, pastoreo extensivo). En esta década también se iniciaron medidas con fondos LEADER gestionadas por los Grupos de Desarrollo Rural (GDR), que financian proyectos locales de sostenibilidad y conservación de suelos donde se fomentaban prácticas que contribuyen al aumento de carbono orgánico en suelos agrícolas y pastos.

Con la Orden 4/2019, de 18 de enero se aprobó la Estrategia de Cambio Climático de Castilla-La Mancha: “Horizontes 2020 y 2030”. Esta estrategia contiene un Programa de Sumideros de CO₂, que reconoce el papel de los suelos y masas forestales en la retención de carbono. También establece líneas de actuación para fomentar prácticas que aumenten la captura y almacenamiento de carbono en la región.

En 2023 se renueva el PDR 2014-2020, alineándose con la PEPAC 2023-2027 nacional: se incorporan los eco-regímenes, que fomentan prácticas como la siembra directa, la rotación de cultivos y la agrosilvicultura, que incrementan el carbono en el suelo. El gobierno de Castilla-La Mancha adapta sus convocatorias de ayudas para facilitar la implantación de estas medidas en fincas agrícolas y ganaderas.

En 2024 la Junta de Castilla-La Mancha y los Grupos de Desarrollo Rural lanzan proyectos para evaluar la capacidad de absorción de CO₂ en terrenos agrícolas y ganaderos de la región con el objetivo de medir de forma precisa el carbono retenido en suelos y masas vegetales, con vistas a crear herramientas de seguimiento e incentivos.

Castilla-La Mancha aprobará una Ley autonómica de Cambio Climático, que entre otras cosas podría incorporar un marco específico para mercados voluntarios de carbono y sumideros regionales. Así mismo, el futuro Plan Nacional de Restauración que el gobierno español tiene que aprobar antes de 2026 en cumplimiento con la Directiva de la UE de Restauración de la Naturaleza, obligará a las comunidades autónomas a desarrollar Planes regionales de protección. Presumiblemente, el gobierno regional tendrá que desarrollar un Plan Regional de Restauración para 2026 donde se regulen, entre otros, planes de restauración de turberas y humedales y de recuperación y mejora de la gestión de bosques.

En Castilla-La Mancha, la gran mayoría de suelos son suelos minerales, caracterizados por un contenido de carbono muy inferior al 20 % (entre el 1 y el 5 %). La región en la antigüedad contaba con un mosaico de humedales, cuyos suelos asociados contenían un porcentaje elevado de carbono (Histosoles, con un porcentaje superior al 20 % en peso).

Desafortunadamente, la mayoría de estos ecosistemas se han desecado y degradado durante décadas de actividad agrícola intensiva. Por ejemplo, las Tablas de Daimiel llegó a tener una extensión de más de 50.000 ha de humedal, aunque hoy en día apenas cubre unas 3.000 ha. Se puede prever por tanto que tanto el Plan Nacional como el Plan Regional contemplen la posibilidad de restaurar aquellos ecosistemas del suelo (humedales, turberas, etc.) que históricamente tenían un contenido en carbono elevado. En este sentido, existen una serie de ENP que por su naturaleza de suelos ricos en materia y carbono orgánico les hace especialmente relevantes para esta futura norma. Los principales son: 1) Parque Nacional Tablas de Daimiel; 2) Parque Natural Lagunas de Ruidera; 3) Microreserva Turbera de Valdeyernos, y otros hábitats relacionados incluidos en la Red Natura 2000.

Como se ha comentado anteriormente, Castilla-La Mancha participa, como parte de su Estrategia de Cambio Climático, en la Misión *Adaptación al Cambio Climático de la UE* para desarrollar soluciones innovadoras y resilientes para el cambio climático. De forma similar, el gobierno de Castilla-La Mancha puede contribuir y participar en otra Misión de la UE llamada *Un Pacto por el Suelo para Europa* que tiene como objetivo avanzar, mostrar y acelerar la transición hacia suelos saludables para 2030, lo que incluye la gestión del carbono en suelos, tanto agrícolas como forestales. Firmando el **Manifiesto** de la misión, el gobierno regional mostraría su compromiso institucional en este tema y se uniría a una comunidad dedicada a mejorar aspectos de la salud del suelo, pudiendo unirse a discusiones con otras instituciones nacionales y europeas y otras partes interesadas, llevando las particularidades de los suelos de Castilla-La Mancha a Europa a nivel político y científico. Ese compromiso puede incluso ser más profundo ya que el gobierno regional podría participar directamente mediante las conserjerías correspondiente o a través de la UCLM en proyectos de investigación, Living Labs y otras iniciativas que se llevan a cabo dentro de la misión.

Así mismo, el gobierno regional podría adherirse a la iniciativa **4 por 1000**, centrada en apoyar y participar en acciones voluntarias encaminadas a aumentar en un 4 por mil (0.4%) anualmente la materia orgánica del suelo para almacenar más carbono y mitigar el cambio climático, al mismo tiempo que se aumenta la fertilidad del suelo para mejorar la producción agrícola y la seguridad alimentaria. Firmando la Declaración de Intención, la Junta de Castilla-La Mancha puede adherirse a esta iniciativa, mostrar oficialmente sus compromisos a través de la plataforma y comunicar cualquiera de las acciones que el gobierno regional fomenta y financia para contribuir a este fin.

3.2. Recopilación y revisión informativa de proyectos previos realizados en Castilla-La Mancha

3.2.1. Introducción

El suelo constituye un recurso natural estratégico, imprescindible para sostener la producción agrícola, garantizar la provisión de servicios ecosistémicos y contribuir a la mitigación del cambio climático mediante su capacidad de secuestro de carbono. En Castilla-La Mancha, una región con una extensa superficie dedicada a la agricultura y una notable diversidad de cultivos, el estudio de la calidad y funcionalidad del suelo resulta especialmente relevante tanto desde la perspectiva de la sostenibilidad ambiental como de la competitividad del sector agrario.

Sin embargo, hasta la fecha se han desarrollado relativamente pocos proyectos específicos en la región centrados en la evaluación integral de estos aspectos, y los que están en

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

curso aún representan un campo incipiente de investigación aplicada. Esta falta de estudios sistemáticos refuerza la necesidad de avanzar en la recopilación y análisis de la información disponible, con el fin de establecer una base sólida para la toma de decisiones.

En este contexto, la estimación del potencial de secuestro de carbono en los suelos agrícolas adquiere un papel prioritario, no solo como indicador clave de resiliencia y sostenibilidad, sino también como criterio fundamental en el marco de la Política Agraria Común (PAC). En particular, los eco-regímenes de la PAC promueven la adopción de prácticas sostenibles que favorezcan la conservación del suelo, la mejora de su fertilidad y el aumento de su capacidad de almacenamiento de carbono, lo que convierte la evaluación rigurosa de este proceso en un objetivo central para garantizar tanto el cumplimiento de los compromisos climáticos europeos como el acceso a los incentivos económicos destinados al sector agrícola.

Tal como se ha detectado en la Actuación I de la presente memoria, en lo que respecta a la legislación autonómica, no existe en Castilla-La Mancha una norma específica sobre el secuestro de carbono en suelos agrícolas. No obstante, sí se aplican políticas y marcos normativos relacionados con los cultivos, que tienen implicaciones directas en la gestión del suelo y la sostenibilidad agraria. Entre ellos destacan las normas de protección de suelos agrarios sensibles (como los vinculados a humedales o turberas agrícolas, donde se restringen cambios de uso y prácticas intensivas), los procedimientos de evaluación ambiental que afectan a explotaciones y proyectos agrarios (clave para introducir innovaciones metodológicas o cambios en el manejo del suelo, o los programas de ayudas rurales y ecológicas (especialmente los vinculados al Programa de Desarrollo Rural y a la PAC) que financian prácticas agrícolas sostenibles y de conservación del suelo, favoreciendo indirectamente el secuestro de carbono.

Este marco, aunque transversal, constituye un soporte normativo y financiero relevante que debe ser considerado en cualquier estrategia regional orientada a mejorar la calidad y funcionalidad de los suelos agrícolas y a potenciar su contribución a los objetivos climáticos europeos.

3.2.2. Objetivos

El propósito de esta Actuación es ofrecer una visión clara y bien fundamentada sobre el estado del arte en la evaluación de la calidad y funcionalidad del suelo agrícola en Castilla-La Mancha. Se presta especial atención al papel del suelo como sumidero de carbono y a su relación con los marcos normativos y estratégicos vigentes, en particular la Política Agraria Común (PAC) y los eco-regímenes. Con ello, se busca aportar una base sólida que oriente la metodología del proyecto actual, asegurando su relevancia científica y su utilidad práctica para la sostenibilidad y competitividad del sector agrario regional.

Para conseguir el objetivo principal perseguido se han desarrollado los siguientes objetivos parciales:

- Identificación y recopilación de los proyectos y estudios desarrollados en Castilla-La Mancha en los últimos 5 años que abordan la calidad del suelo agrícola, los procesos de degradación, el secuestro de carbono y la provisión de servicios ecosistémicos.

- Análisis crítico de las metodologías, indicadores y resultados empleados en dichos trabajos, destacando las buenas prácticas y enfoques innovadores, así como las limitaciones y retos que aún persisten.
- Valoración del nivel de coherencia y grado de alineación de los enfoques revisados con los marcos normativos y estratégicos vigentes, en especial la Política Agraria Común (PAC), los eco-regímenes y las políticas de desarrollo rural orientadas a la sostenibilidad y la captura de carbono en suelos agrícolas.
- Detección de lagunas de información y necesidades para el establecimiento de metodologías adecuadas que puedan orientar futuras investigaciones y contribuir a mejorar la evaluación integral de los suelos agrícolas de la región, de forma que los recursos agrarios estén preparados para que los recursos agrarios estén preparados y puedan adaptarse eficazmente a la integración de las nuevas políticas territoriales que deben implementarse.
- Síntesis de la información procedente de proyectos y estudios previos, destacando las variables e indicadores más utilizados, así como las directrices metodológicas más recurrentes, de manera que sirvan como referencia para el proyecto actual y sienten las bases para actuaciones metodológicas posteriores, en el caso de que sean adecuadas a las normativas vigentes actuales y previstas.

3.2.3. Metodología

3.2.3.1. Búsqueda y recopilación de proyectos

Para el desarrollo de esta actuación se ha llevado a cabo un proceso sistemático de localización y recopilación de información sobre proyectos relacionados con el estudio del suelo en referencia al secuestro de carbono en el sector agrícola de Castilla-La Mancha.

Las fuentes consultadas incluyeron bases de datos públicas y repositorios institucionales, entre ellos los de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, el Ministerio de Agricultura, el CSIC y diversas universidades regionales. Asimismo, se recurrió a repositorios científicos internacionales de referencia, como Scopus y Web of Science, y se revisó la existencia de informes técnicos y memorias de proyectos financiados con fondos europeos y nacionales.

De forma complementaria, se estableció contacto directo con técnicos, investigadores y responsables de proyectos, lo que permitió acceder a documentación adicional y en algunos casos a información no publicada en repositorios oficiales.

La selección de proyectos se realizó siguiendo criterios específicos: se priorizaron los desarrollados en los últimos 5 años y aquellos con un enfoque claro en suelos agrícolas de la región. También se dio relevancia a los estudios que incorporaban indicadores de calidad del suelo, funcionalidad, procesos de degradación, secuestro de carbono o servicios ecosistémicos. Finalmente, se han valorado aspectos como la diversidad metodológica aplicada, las escalas espaciales de análisis y la tipología de cultivos abordados.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

3.3.3.2. Análisis documental

La información recopilada ha sido sometida a una revisión crítica. En esta etapa se describieron y evaluaron las metodologías aplicadas en el análisis de suelos y de las funciones asociadas, prestando atención a los enfoques más utilizados y a su aplicabilidad en el contexto regional.

Se han identificado los indicadores clave empleados en los proyectos revisados, tanto de carácter físico, químico y biológico como ecosistémico, y se han sintetizado los resultados y conclusiones más relevantes, con especial énfasis en la eficacia de prácticas sostenibles en relación con el secuestro de carbono.

Asimismo, se han documentado las principales limitaciones, los retos metodológicos y los vacíos de conocimiento detectados en los distintos estudios, con el fin de disponer de una visión clara de las fortalezas y debilidades de los enfoques previos.

Por último, los resultados de esta revisión se han contextualizado en relación con marcos normativos y estratégicos como las directrices del IPCC, proyecto LUCAS, la EU Soil Mission y la Política Agraria Común (PAC), lo que ha permitido valorar el grado de alineación de los proyectos analizados con los requerimientos legales y las orientaciones estratégicas vigentes en materia de sostenibilidad agraria y captura de carbono.

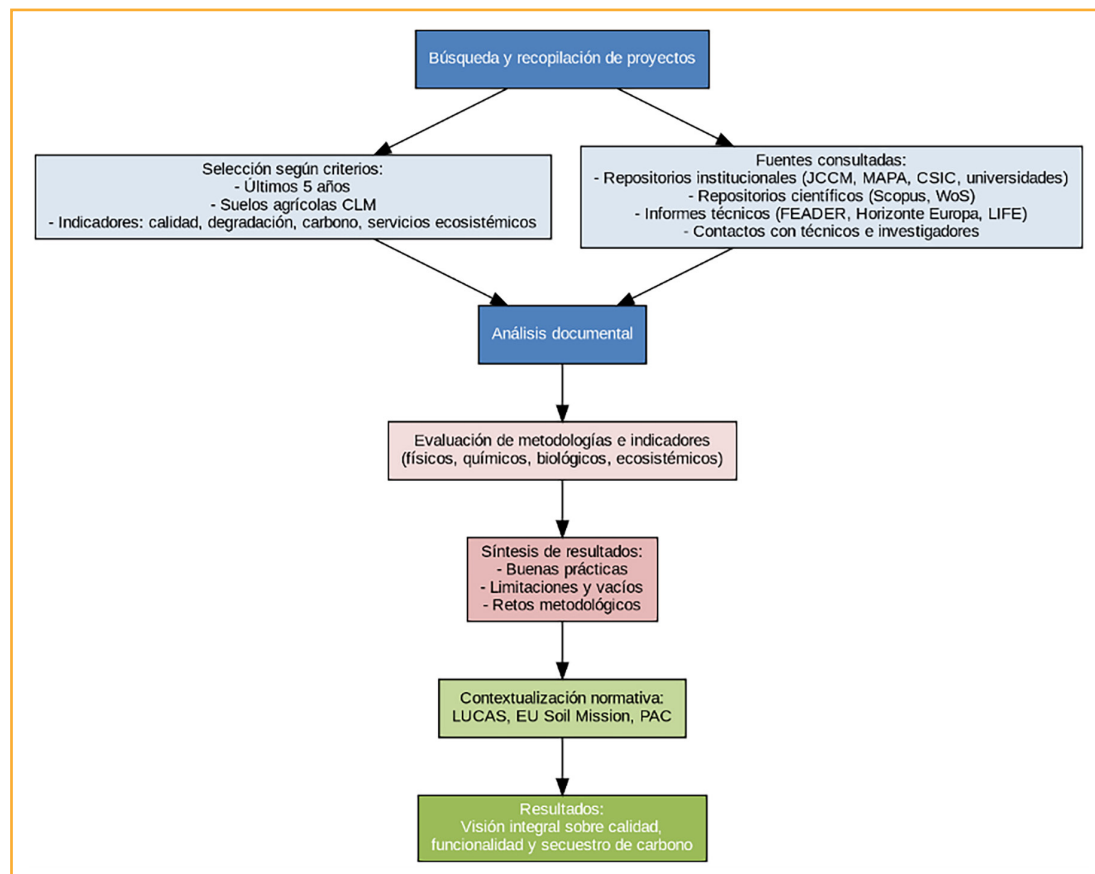


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología aplicada en la recopilación y análisis de proyectos sobre suelos agrícolas en Castilla-La Mancha (últimos 5 años).

3.2.4. Síntesis y resumen técnico

Tras la recopilación y el análisis de los proyectos desarrollados en Castilla-La Mancha durante los últimos cinco años, se ha elaborado un resumen técnico que permite integrar de manera estructurada la información más relevante en torno a la calidad y funcionalidad de los suelos agrícolas y su papel como sumideros de carbono.

Es importante destacar que en Castilla-La Mancha los proyectos recopilados y analizados tienen un origen común, ya que todos los existentes y que se ajustan al objetivo perseguido han sido impulsados fundamentalmente por los Grupos de Desarrollo Rural (GDR) en el marco de los programas LEADER (Pilar II del PEPAC 2023-2027), contando con la participación de asociaciones locales, centros técnicos y el apoyo de la administración regional. Este enfoque ha permitido el desarrollo de experiencias piloto innovadoras, aplicadas en viñedos, almendros, albaricoqueros y pastos, así como la creación de un prototipo de aplicación informática para el cálculo de stocks de carbono.

Sin embargo, resulta relevante señalar que no se han identificado otros proyectos de mayor alcance en la región específicamente orientados a la estimación sistemática del stock de carbono en la agricultura. La mayor parte de las iniciativas detectadas se centran en acciones piloto locales con metodologías en fase de validación, lo que refleja tanto el carácter pionero de estos trabajos como la ausencia de una estrategia regional consolidada en este ámbito.

Esta situación refuerza la importancia del presente proyecto, en tanto que ofrece la oportunidad de avanzar hacia una aproximación metodológica integral y alineada con las políticas europeas (PAC, eco-regímenes, EU Soil Mission), a partir de los aprendizajes extraídos de las experiencias piloto desarrolladas por los GDR.

En primer lugar, se ha realizado una descripción detallada de cada proyecto mediante fichas resumen (Anexo I), considerando sus objetivos, metodologías empleadas, indicadores aplicados, así como principales resultados y conclusiones. Los estudios recopilados abarcaron distintos sistemas agrarios de la región (viñedos, almendros, olivos, albaricoqueros y pastos permanentes) e incluyeron también un desarrollo de carácter transversal basado en la creación de una aplicación informática para la estimación de stocks de carbono. En este sentido, la aplicación podría constituir un avance relevante en la digitalización de la gestión agrícola sostenible, al integrar en una herramienta informática los aprendizajes y la metodología desarrollada en los proyectos piloto realizados. Su diseño parte de la recopilación de datos de campo en distintos sistemas agrarios (pastos permanentes, viñedos, almendros, olivos y albaricoqueros), combinados con factores de conversión y referencias internacionales (IPCC, 2019; INIA-CSIC; SoilGrids). El sistema que referencian permitiría que, a partir de información básica introducida por el usuario (como cultivo, superficie, edad de la plantación, marco de plantación y prácticas de gestión), la aplicación realice cálculos automáticos para estimar los stocks de carbono en biomasa aérea, radicular y en suelo, expresados en toneladas de CO₂ equivalente por hectárea. Además, incorporaría un módulo para la conversión de estos resultados en potenciales créditos de carbono, aplicando un “buffer” de seguridad del 20%, de acuerdo con los estándares metodológicos más extendidos en mercados voluntarios de carbono, y generaría informes estandarizados para facilitar la trazabilidad y la comunicación con plataformas de compensación. Cabe señalar, no obstante, que aunque exponen que la aplicación ha sido diseñada tomando como base los datos y aprendizajes de los proyectos piloto y se presenta como un desarrollo transversal de carácter innovador, no se tiene constancia de que exista ya una versión funcional plenamente operativa ni de que esté disponible como platafor-

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

ma pública de uso general. Todo indica que, por el momento, se trata de un desarrollo piloto interno, concebido como prueba de concepto y en fase de consolidación, cuyo despliegue a mayor escala quedaría pendiente de futuras decisiones institucionales.

Para el análisis y fácil observación de los proyectos piloto desarrollados por los GDRs, se han elaborado tablas comparativas que permiten sistematizar las metodologías utilizadas y las variables medidas en cada caso. Este ejercicio ha puesto de manifiesto la diversidad de enfoques aplicados, desde técnicas avanzadas como el uso de LiDAR terrestre y la teledetección satelital, hasta metodologías más tradicionales basadas en muestreos de suelo y ecuaciones alométricas (Tabla 1). En todos los proyectos se aplicaron factores de conversión basados en protocolos IPCC, lo que garantiza cierta coherencia metodológica y facilita la comparabilidad. Sin embargo, también se constató la dependencia recurrente de repositorios globales como *SoilGrids*, que aportan estimaciones de carbono en suelo, pero que no siempre reflejan la realidad local de manera precisa.

El análisis también ha permitido identificar vacíos de conocimiento relevantes. Entre ellos, la falta de estudios que profundicen en horizontes de suelo más allá de los 10 cm, ya que solo en algunos casos profundizaron hasta los 30 cm, y posiblemente se necesaria una mayor profundidad en algunos tipos de cultivo. Otra limitación es la escasa consideración de escenarios de gestión agrícola diferenciados (ej. manejo de residuos, cubiertas vegetales, prácticas regenerativas). Estos aspectos constituyen áreas de mejora y de investigación futura para fortalecer la base científica y técnica en la región.

Tabla 1. Tabla comparativa de los diferentes proyectos desarrollados por los GDR de Castilla La-Mancha.

Proyecto / Estudio	Año	Cultivos / Sistemas	Resultados principales	Limitaciones identificadas
Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de olivares en Toledo (Montes de Toledo, Toledo)	2024	Olivar	13,72 t CO ₂ eq/ha en biomasa; 99,76 t CO ₂ eq/ha en biomasa + suelo; potencial de comercialización 10,97 tokens/ha	Carbono en suelo estimado a partir de SoilGrids (sin muestreo directo); estudio piloto con necesidad de validación adicional; faltan escenarios diferenciados de manejo agrícola
Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en pastos permanentes en Sierra Molina y Tortuera, (Guadalajara)	2024	Pastos permanentes	67,97 t CO ₂ eq/ha; potencial de comercialización 18,61 tokens/ha	Muestreo solo hasta 10 cm de suelo; no se incluye biomasa leñosa; falta de escenarios de gestión ganadera diferenciados
Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de viñedos en Tarancón (D.O. Uclés) (Cuenca)	2024	Viñedos (Tempranillo, Macabeo, Airén, Graciano)	100,45 t CO ₂ eq/ha; 3,39 tokens/ha	Uso de SoilGrids en lugar de muestreos de suelo locales; no se analizan prácticas de manejo diferenciadas
Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de almendros en Villanueva de la Jara (Cuenca)	2024	Almendros	96,73 t CO ₂ eq/ha; 14,61 tokens/ha	Estimación de suelo con SoilGrids; sin evaluación de aprovechamiento de residuos (cáscara, poda)
Evaluación de carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de viñedos en Ciudad Real (Argamasilla, Carrizosa, Membrilla, Ciudad Real)	2024	Viñedos (Airén, Tempranillo, Macabeo)	94,97 t CO ₂ eq/ha; 5,19 tokens/ha	Limitación en la profundidad de análisis del suelo; falta de escenarios de gestión agrícola alternativos
Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de albaricoques en Hellín (Campos de Hellín, Albacete)	2024	Albaricoqueros (Murciana, Flopria, Bulida)	92,9–101,8 t CO ₂ eq/ha; 7,15 tokens/ha	Resultados dependientes de coeficientes genéricos; falta de estudio detallado de gestión de residuos (poda, biomasa de hueso)
Aplicación informática para estimación de stocks de carbono	2024	Herramienta transversal (para diversos cultivos)	Integra metodologías de los pilotos; permite estimar CO ₂ eq y tokens con buffer del 20%	Desarrollo piloto interno; no se tiene constancia de que esté disponible como plataforma pública

Con el análisis conjunto de los proyectos piloto desarrollados en Castilla-La Mancha, fue posible identificar una serie de patrones comunes que aportan coherencia y muestran las bases metodológicas compartidas (como la importancia de considerar de forma conjunta la biomasa aérea, radicular y el carbono del suelo, así como la aplicación de un buffer de seguridad del 20% en la estimación de créditos de carbono), así como divergencias que reflejan las particularidades de cada iniciativa y las limitaciones aún existentes (especialmente en relación con la falta de ecuaciones alométricas calibradas para especies y condiciones locales, lo que genera incertidumbres en los cálculos de biomasa y carbono). La siguiente tabla (Tabla 2) resume de forma comparativa los principales puntos coincidentes y las diferencias detectadas, ofreciendo una visión integrada del estado actual del conocimiento y las prácticas aplicadas en la región en materia de estimación de stocks de carbono en suelos agrícolas.

Tabla 2. *Patrones comunes y divergencias en los proyectos analizados*

Patrones comunes	Divergencias
Uso de LiDAR terrestre en viñedos, almendros, olivar, albaricoques y pastos	Escala: proyectos locales (ej. viñedos en Tarancón, Hellín) vs. proyectos más transversales (Sumidero CO ₂ , aplicación informática)
Aplicación de ecuaciones alométricas (literatura científica/IPCC)	Precisión variable: ecuaciones específicas en algunos casos, extrapoladas en otros
Uso de SoilGrids para estimar carbono orgánico del suelo	Profundidad del muestreo: 0–10 cm en pastos vs. 0–30 cm en otros cultivos
Aplicación de protocolos IPCC para factores de conversión	Grado de innovación: desde mediciones tradicionales hasta análisis biológicos avanzados
Inclusión del buffer del 20% en créditos de carbono	Orientación a mercados: algunos centrados en stocks biofísicos, otros en generación de tokens
Indicadores comunes: biomasa aérea, radicular, carbono en suelo, CO ₂ eq/ha, tokens	Distinto grado de madurez tecnológica: prototipo informático en desarrollo vs. pilotos de campo

Del análisis de los proyectos revisados se desprende, en primer lugar, la existencia de una serie de patrones comunes que aportan coherencia al conjunto de iniciativas desarrolladas en Castilla-La Mancha. En todos los casos se emplearon metodologías basadas en referencias internacionales consolidadas, como los protocolos del IPCC para los factores de conversión y la estandarización de resultados. Asimismo, se repite el uso del LiDAR terrestre como herramienta principal para el inventario y la cuantificación de biomasa en cultivos leñosos (viñedo, almendro, olivar y albaricoque) y en pastos, lo que muestra una apuesta clara por la innovación tecnológica. A ello se suma la aplicación de ecuaciones alométricas que permiten traducir las mediciones de campo en estimaciones de biomasa, si bien no siempre calibradas localmente. También se observa de forma reiterada el empleo de repositorios globales como SoilGrids para estimar el carbono orgánico en el suelo, lo que aporta una base de datos homogénea, pero con limitaciones respecto a la representatividad local. Un último elemento común es la inclusión de un buffer de seguridad del 20% en la estimación de créditos de carbono, práctica habitual en los mercados voluntarios que aporta credibilidad a los resultados.

En relación con los indicadores empleados, se repite de manera sistemática la medición de la biomasa aérea y radicular, así como la estimación del carbono orgánico del suelo en los primeros horizontes del perfil edáfico (de 0–10 cm para pastos, y entre los 0–30 cm para cultivos leñosos), que posteriormente se convierte a equivalentes de CO₂ por hectárea (tCO₂eq/ha). En algunos proyectos también se midieron indicadores biológicos del suelo tales como respiración y actividad enzimática. Casi todos los proyectos incluyen también la estimación de créditos o tokens, lo que refleja una clara orientación a la posible aplicación de estos resultados en mercados de carbono.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Los resultados coinciden en señalar que todos los sistemas evaluados presentan una capacidad significativa de secuestro de carbono, con un patrón constante: el mayor peso lo aporta el carbono almacenado en el suelo frente al fijado en la biomasa aérea. Asimismo, existe un interés común en vincular estos resultados con los mercados de carbono, de manera que los agricultores y ganaderos puedan disponer de una fuente complementaria de ingresos asociada a prácticas sostenibles.

Junto a estos elementos comunes, el análisis permitió identificar también divergencias relevantes entre proyectos. Una de ellas tiene que ver con la escala y alcance de los estudios: mientras que algunos se centraron en parcelas o zonas concretas (como los viñedos de Tarancón o Ciudad Real, los almendros en Cuenca o los albaricoqueros en Hellín), otros adoptaron una visión más amplia y transversal, ya sea a escala territorial (como el olivar en los Montes de Toledo) o a través de iniciativas de ámbito regional y herramientas transversales (como el proyecto Sumidero CO₂ de ámbito regional o el desarrollo de la aplicación informática).

Otra diferencia significativa se refiere a la precisión metodológica. Mientras algunos proyectos recurrieron a modelos específicos de la literatura científica española (como los desarrollados por Miranda et al. 2014 o el INIA-CSIC), otros aplicaron ecuaciones extrapoladas de variedades distintas o recurrieron a ratios genéricos del IPCC. En este contexto, el proyecto de olivar en los Montes de Toledo se sitúa en una posición intermedia, combinando ecuaciones procedentes de la literatura con factores de conversión estandarizados. Algo similar ocurre con el muestreo de suelo: en el caso de los pastos el análisis se limitó a los 0–10 cm de profundidad, mientras que en otros cultivos se consideró hasta los 30 cm.

En el plano de la innovación tecnológica también se evidencian diferencias. Algunos proyectos combinaron las mediciones LiDAR con métodos tradicionales en campo para mejorar la calibración, mientras que otros avanzaron hacia la inclusión de análisis físico, químicos y biológicos del suelo (como en los casos de pastos y almendros). Por su parte, la aplicación informática desarrollada constituye un aporte transversal, aunque todavía se encuentra en fase de desarrollo y con un grado de madurez menor respecto a los pilotos de campo.

Por último, se aprecian diferencias en el grado de orientación hacia los mercados de carbono. En todos los proyectos piloto de campo se realizó la conversión de los stocks de carbono en créditos o tokens, aplicando un buffer de seguridad del 20%. Sin embargo, no todos les otorgaron el mismo peso en la interpretación de resultados: mientras que en algunos casos (como los proyectos de almendros, olivar, albaricoqueros y pastos) se presentó de forma explícita la vinculación con posibles esquemas de compensación y la generación de ingresos adicionales, en otros (como los viñedos) el cálculo de tokens se incluyó principalmente como un complemento técnico al análisis biofísico. Esta diferencia refleja matices en el enfoque, más o menos orientado a la aplicabilidad práctica en los mercados voluntarios de carbono.

En conclusión, el análisis comparativo de los proyectos desarrollados en Castilla-La Mancha permite reconocer que, aunque existe ya una base metodológica común y un conjunto de experiencias piloto que aportan información valiosa, aún persisten diferencias notables en cuanto a la escala de aplicación, la precisión de los datos y el grado de consolidación tecnológica. Estos hallazgos ponen de manifiesto la necesidad de avanzar hacia un enfoque más homogéneo y robusto, basado en datos locales y en metodologías validadas,

que permita superar las limitaciones actuales. El presente proyecto se plantea, precisamente, como la oportunidad de integrar y armonizar estos aprendizajes, ofreciendo un marco metodológico integral que favorezca tanto la generación de conocimiento científico como su aplicación práctica en la certificación y comercialización de créditos de carbono en la agricultura regional.

3.2.4.1. Compilación de buenas prácticas y enfoques innovadores en Castilla-La Mancha

El análisis de los proyectos piloto desarrollados en Castilla-La Mancha ha permitido identificar una serie de buenas prácticas y enfoques innovadores con gran potencial para orientar el diseño metodológico futuro. Entre ellas destaca el uso del LiDAR terrestre para la cuantificación de biomasa en cultivos leñosos y pastos, que ha demostrado ser una herramienta precisa y replicable. También es reseñable la integración de indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo (como la respiración microbiana o la actividad enzimática), que aportan información valiosa sobre la funcionalidad del suelo y su capacidad de secuestro de carbono. La aplicación sistemática de protocolos internacionales, principalmente los derivados del IPCC, garantiza la comparabilidad de resultados, mientras que la inclusión de un buffer de seguridad del 20% en la estimación de créditos de carbono refuerza la credibilidad de las evaluaciones y alinea a los proyectos con las prácticas de los mercados voluntarios. Finalmente, el desarrollo de una aplicación informática específica para el cálculo de stocks de carbono constituye un enfoque innovador que, aunque todavía en fase de consolidación, representa una apuesta clara por la digitalización y la transferencia de conocimiento hacia el sector agrícola.

Todas estas prácticas y experiencias formarán parte de la propuesta aplicable al proyecto actual, que se desarrollará en la sección 4.4. del presente proyecto.

3.2.4.2. Otros estudios relevantes para el contexto regional

Además de los proyectos piloto desarrollados en Castilla-La Mancha por los Grupos de Desarrollo Rural, se tiene constancia de otros estudios y publicaciones de carácter científico y técnico que, si bien no se ajustan de manera tan directa al objetivo específico de estimar los stocks de carbono en la agricultura regional, sí podrían aportar información complementaria de interés. Sin embargo, la información disponible de muchos de ellos es limitada, ya sea por tratarse de proyectos cuyos resultados no han sido publicados y no se encuentran disponibles, o por encontrarse únicamente en informes internos de difícil acceso o porque la documentación no está sistematizada en bases de datos públicas. Esta circunstancia refleja una de las principales dificultades de la materia: la dispersión y falta de disponibilidad de información homogénea y actualizada sobre stocks de carbono en la agricultura regional de Castilla La-Mancha. Estos trabajos, aunque en ocasiones son de una antigüedad superior a los 5 años podrían permitir la ampliación de la perspectiva metodológica y comparativa, y ofrecer referencias útiles sobre indicadores de calidad del suelo, servicios ecosistémicos y prácticas de manejo sostenible que, aunque no centrados directamente en la cuantificación de carbono agrícola, resultan relevantes para contextualizar los resultados y enriquecer el diseño metodológico del proyecto actual.

Por este motivo, el presente proyecto no solo resulta relevante en términos de generación de datos y metodologías, sino también como oportunidad para centralizar, sistematizar y poner a disposición del sector agrario y de las administraciones información contrastada, superando la actual fragmentación del conocimiento.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

A continuación, se referencian en la **Tabla 3** los diferentes proyectos encontrados que tiene datos relacionados con suelos que podrían ser potencialmente interesantes pero cuyos estudios fueron realizados hace más de cinco años o que actualmente se encuentran en desarrollo. Los detalles de estos proyectos se encuentran en el Anexo II

Tabla 3. Otros proyectos relevantes.

Ref.	Publicación/estudio/proyecto	Fecha de edición/ publicación/ realización del estudio
1.	Atlas de suelos vitícolas de Castilla-La Mancha	Editado y publicado en 2015
2.	Informe técnico: Producción Ecológica Mediterránea y Cambio Climático: Estado del conocimiento	Asociación Valor Ecológico CAAE (ECOVALIA 2019)
3.	Assessment of the soil organic carbon stock in Spain	Rodríguez Martín et al. (2016) Revista Geoderma
4.	Metales pesados, materia orgánica y otros parámetros de los suelos agrícolas y pastos de España	Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, y Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (MARM/INIA, 2009)
5.	Proyecto Plan Nacional de Investigación: AGL 2012-34199 - Incrementar la sostenibilidad de los agroecosistemas: recuperar las funciones ecológicas del suelo para reducir insumos y potenciar la supresividad edáfica. (2013-2015).	Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Responsable: Dra. Sara Sánchez-Moreno.
6.	PID2019-105373RB-I00. CLIMBIOSOIL- El carbono orgánico y la biodiversidad del suelo como herramientas mitigadoras del efecto del cambio climático sobre los cultivos (2020-2024).	Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-CSIC) Universidad Complutense de Madrid (UCM). Centro de Investigación Apícola y Agroambiental del Instituto Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario y Forestal de Castilla-La Mancha (CIAPA-IRIAF) – subproyecto en Marchamalo (Guadalajara). Responsable: Dra. Sara Sánchez-Moreno.
7.	Desarrollo de estrategias para la valoración de la capacidad de resiliencia de cultivos leñosos y variedades frente al cambio climático (2023-2029)	Instituto de la Vid y el Vino de Castilla-La Mancha (IVICAM) Centro de Investigación Agroambiental “El Chaparrillo” (CIAG-IRIAF) Instituto Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario y Forestal de Castilla-La Mancha (IRIAF). Responsable (IRIAF): José Antonio López Pérez.
8.	Agricultura y cambio climático en Castilla-La Mancha (2008-2009)	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete. Universidad de Castilla-La Mancha. Autores: Concha Fabeiro Cortés y Antonio Brasa Ramos.
9.	Identificación y valoración de servicios ecosistémicos en Castilla-La Mancha (2022)	Consejería de Desarrollo Sostenible en el marco de la Estrategia Regional de Infraestructura Verde (JJCM)

3.2.4.3 Estudios en otras comunidades autónomas españolas

Existen varias iniciativas autonómicas con foco (directo o indirecto) en secuestro de carbono agrícola y, en bastantes casos, enlazadas con la PAC (eco-regímenes, Plan Estratégico, Grupos Operativos, etc.), que se pueden consultar en el Anexo III.

3.2.4.4. Estudios a nivel Nacional: Estudios científicos, mapa del carbono orgánico del suelo y Proyecto MAPA-PEPAC.

La información disponible sobre el carbono orgánico del suelo en España ha seguido una clara evolución metodológica y de alcance, que resulta especialmente relevante para el caso de Castilla-La Mancha, donde los suelos agrícolas presentan valores muy bajos y un alto potencial de mejora. El principal estudio científico en fechas recientes que abarca a nivel nacional la medición del carbono orgánico del suelo (COS) es el estudio de Rodríguez Martín et al. publicado en 2016. Este estudio constituyó el primer inventario sistemático del stock de carbono en suelos españoles, a partir de ≈ 4.400 localizaciones muestreadas en mallas regulares, con resultados que situaban a CLM entre las regiones con menores niveles ($\approx 20\text{--}40$ t/ha en 0–30 cm).

Posteriormente, el Ministerio de Transición Ecológica (MITECO) publicó en 2022 el *Mapa del carbono orgánico del suelo en España* (MITECO, 2022). Esta publicación actualizó y amplió los datos de Rodríguez Martín et al. (2016) mediante la red del Inventario Nacional de Erosión de Suelos (≈ 22.500 parcelas) y una campaña adicional de 800 calicatas a 30 cm, lo que permitió generar la cartografía nacional más robusta hasta la fecha, alineada con las directrices internacionales del IPCC (2006), la CMNUCC y la CNUCLD. Constituye la referencia más reciente y completa sobre la distribución del carbono orgánico en los suelos españoles. Se basa en los datos del Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES), que dispone de más de 22.500 parcelas muestreadas en malla de 5×5 km, y en una campaña específica de 800 parcelas adicionales (COS1030) en las que se recogieron muestras diferenciadas a 0–10 cm y 10–30 cm de profundidad. A partir de esta información se realizaron análisis de laboratorio (carbono, densidad aparente, pedregosidad) y ejercicios de interpolación estadística y geoestadística (regresión múltiple, kriging) para estimar el contenido de carbono en los primeros 30 cm del suelo (COS30).

Los resultados nacionales muestran un valor medio de 2,71 % de carbono orgánico y un stock medio de 47,3 t C/ha en los primeros 30 cm. La distribución confirma el patrón ya observado en estudios previos: valores más altos en regiones húmedas del norte (Atlántico y Montano, >80 t/ha) y más bajos en las zonas áridas y mediterráneas del centro y sur, incluida Castilla-La Mancha, donde los stocks medios se sitúan muy por debajo de la media nacional ($\approx 20\text{--}30$ t C/ha en muchos casos). Los análisis confirman que el uso del suelo y la vegetación son los factores principales que explican la variabilidad espacial del carbono, con contenidos más altos en bosques y pastizales y más bajos en tierras de cultivo.

Además, el estudio analiza la distribución vertical del carbono entre los horizontes 0–10 cm y 10–30 cm, concluyendo que en promedio los primeros 10 cm acumulan el 44 % del COS30. Este patrón es más marcado en pastizales que en matorrales, mientras que en cultivos la pérdida de carbono en el horizonte superficial es mayor.

Este trabajo constituye un hito en la cartografía de carbono en suelos en España, ya que combina una densidad de muestreo sin precedentes, metodología estandarizada y genera-

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

ción de cartografía nacional, coherente con los requerimientos del IPCC y la UNFCCC. En el caso de Castilla-La Mancha, aporta una referencia cuantitativa clave sobre el bajo nivel de carbono de sus suelos agrícolas y su alto potencial de mejora, siendo un complemento indispensable para la planificación de políticas de mitigación del cambio climático, conservación del suelo y agricultura de carbono.

Más recientemente, a finales de 2023, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) puso en marcha un ambicioso programa de carácter nacional destinado a analizar el contenido en carbono de los suelos agrícolas españoles, en el marco de la aplicación de la nueva Política Agraria Común (PEPAC 2023-2027). Este proyecto, coordinado con la Encuesta de Superficies y Rendimientos de Cultivo de España (ESYRCE), supone una ampliación sin precedentes de la información recopilada en esta encuesta, ya que a los tradicionales datos de superficies y rendimientos se incorporan ahora indicadores de calidad del suelo, incluyendo su contenido en carbono. El operativo contempla la recogida sistemática de muestras en 16.000 parcelas agrícolas distribuidas por todo el territorio nacional cada dos años, lo que garantiza un tamaño muestral suficientemente amplio para obtener resultados robustos y representativos en todas las comunidades autónomas, incluida Castilla-La Mancha.

El objetivo central del proyecto es evaluar hasta qué punto las nuevas prácticas agrícolas y ganaderas fomentadas por la PAC (como la agricultura de conservación, las cubiertas vegetales, las rotaciones con especies mejorantes o el pastoreo extensivo) son capaces de incrementar el carbono orgánico del suelo, reducir la erosión y mejorar la fertilidad. Además, los datos permitirán caracterizar con precisión la situación actual de los suelos españoles, cuyo contenido medio en carbono es de los más bajos de Europa, y servirán como base para el diseño de un futuro sistema de certificación de créditos de carbono en el ámbito agrario, en consonancia con la nueva legislación europea.



El proyecto se encuentra actualmente en fase de ejecución, con un amplio despliegue de más de 200 agentes de campo especializados que realizan las tomas de muestras sin interferir en la actividad de los agricultores. Los resultados individuales de cada parcela se remitirán de forma gratuita a sus titulares, mientras que los datos agregados serán procesados y analizados por el MAPA. No obstante, los resultados consolidados no estarán disponibles, como mínimo, hasta 2026, fecha en la que se prevé la finalización de la primera fase de análisis y validación de la información. A partir de ese momento, los datos pasarán a ser propiedad del Ministerio, pero se espera que puedan solicitarse formalmente y que se publiquen resultados agregados en distintos medios.

Este esfuerzo constituye un hito en la generación de información sobre el carbono orgánico del suelo en España, pues proporcionará una base metodológica sólida y homogénea que permitirá evaluar la evolución del stock de carbono en el tiempo, diferenciar resultados según sistemas de manejo y cultivos, y afinar las estimaciones regionales, incluyendo las de Castilla-La Mancha. En consecuencia, este proyecto complementará y actualizará de forma decisiva los inventarios edafológicos previos y se convertirá en una referencia indispensable para la planificación de políticas agrarias y ambientales vinculadas a la mitigación del cambio climático y la sostenibilidad de los suelos agrícolas.

El objetivo principal de la encuesta anual ESYRCE es proporcionar información precisa sobre la ocupación del suelo agrícola y el rendimiento medio de los cultivos, datos que resultan fundamentales para la estimación de los balances de carbono y la evaluación de los servicios ecosistémicos en el marco de la Política Agraria Común (PAC). La encuesta tiene un alcance nacional, abarcando la totalidad del territorio de las comunidades autónomas excepto Ceuta y Melilla, con una densidad mínima de muestreo del 3% del territorio y refuerzos adicionales en zonas de agricultura intensiva que pueden llegar al 15%. Esta cobertura permite disponer de resultados comparables entre comunidades autónomas y a escala provincial, lo que resulta esencial para los mecanismos de pagos por prácticas beneficiosas para el clima y el medio ambiente en la PAC. Además de la información de superficies y rendimientos, el estudio recoge variables de interés para la evaluación del secuestro de carbono en suelos agrícolas, como el estado de producción en cultivos leñosos, el manejo de barbechos y cubiertas vegetales y la tipificación de regadíos, fuentes de agua y caracterización de invernaderos. Esta información basal permitirá vincular el uso del suelo y las técnicas de cultivo con el potencial de secuestro de carbono y mitigación climática.

En 2024, el trabajo de campo ha superado los 13.700 segmentos de superficie y más de 68.000 parcelas aforadas en rendimiento, incorporando además la recopilación sistemática de trayectos mediante GPS con más de tres millones de puntos, inspecciones de calidad y la actualización de ortofotografías (PNOA). Esto garantiza un alto nivel de fiabilidad en los datos, al tiempo que posibilita el seguimiento interanual de cambios en los usos del suelo y prácticas de manejo agrícola. La metodología se basa en un muestreo estratificado por áreas, apoyado en el parcelario del SIGPAC y en la cartografía CORINE Land Cover, diferenciando cuatro estratos según la intensidad de uso agrícola: sin cultivo, cultivos permanentes en secano, agricultura extensiva y agricultura intensiva. El procedimiento incluye la determinación de superficies mediante investigación en campo de parcelas dentro de segmentos de 49 ha, digitalización de parcelarios y clasificación de cultivos; la estimación de rendimientos mediante aforos de campo con métodos directos como cosechadora, conteos o pesadas, así como estimaciones de experto ponderadas por superficie en cada nivel geográfico; y un sistema de control de calidad que contempla inspecciones independientes, repeticiones de cálculo de coeficientes de variación con 1.000 iteraciones y validación por comunidades au-

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

tónomas. Lamentablemente, hasta donde conocemos, el MAPA no ha publicado los detalles de la metodología utilizada, los indicadores de suelo que va a medir (más allá del COS y de la densidad aparente) y qué protocolos analíticos de laboratorio va a usar para cuantificar los indicadores seleccionados.

Para Castilla-La Mancha, la encuesta ESYRCE en 2024 incluyó 3.146 segmentos investigados, de los cuales 1.242 corresponden a la muestra general del 3% y 1.136 a refuerzos en zonas de cultivo intensivo, además de la consideración de datos procedentes de campañas anteriores y fotointerpretación. En el ámbito de los rendimientos se aforaron 953 segmentos que abarcan cultivos herbáceos, leñosos y superficies de barbecho, lo que permite evaluar tanto la productividad como las implicaciones de estas prácticas en el balance de carbono. El trabajo de campo se desarrolló entre marzo y febrero del año siguiente, conforme al calendario nacional, y se centró en los cultivos característicos de la región: cereales de grano, con una superficie de 1,21 millones de hectáreas en 2024 que muestran una ligera tendencia decreciente respecto a 2023; viñedo y olivar, que en conjunto suman cerca de 900.000 hectáreas y constituyen los principales cultivos leñosos de referencia para los balances de carbono; y barbechos, con más de 850.000 hectáreas, que representan un componente esencial para la estimación del secuestro de carbono en suelos en reposo. La metodología aplicada responde al diseño nacional de muestreo estratificado por áreas, con segmentos territoriales de 49 hectáreas, reducidos en casos de elevada fragmentación parcelaria, y con la clasificación de estratos según la intensidad agrícola a partir de información del SIGPAC y CORINE Land Cover. Los rendimientos se obtuvieron mediante aforos de campo con métodos directos, como conteos, pesadas o información aportada por agricultores, y mediante estimaciones de experto, todo ello ponderado por superficies de referencia en cada nivel geográfico. El control de calidad incluyó inspecciones provinciales aleatorias para validar la identificación de cultivos y evitar errores en la clasificación de superficies. Los resultados obtenidos en Castilla-La Mancha pretenden caracterizar de forma precisa la estructura agraria y la evolución interanual de los cultivos, y aportar una base sólida para estimar el papel de la región en el secuestro de carbono y en la provisión de servicios ecosistémicos agrícolas, información fundamental para orientar y justificar los pagos climáticos y ambientales de la PAC en el ámbito autonómico.

3.2.4.5 Metodología a nivel europeo

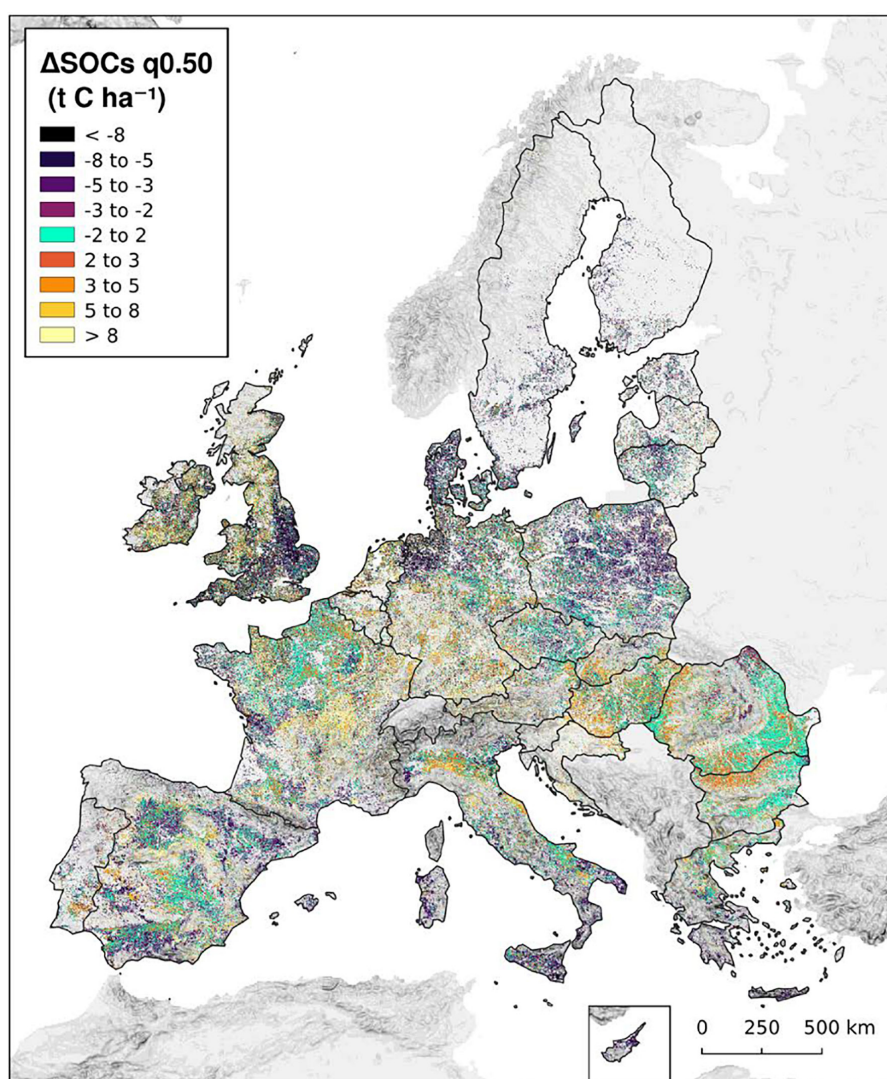
Europa presenta una considerable variabilidad espacial en cuanto a tipos de suelo, climas y usos del suelo, lo que genera patrones diversos en el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en las distintas regiones. Como dato, las reservas totales de carbono por hectárea en la UE oscilaban entre 0-11 y 60-116 toneladas en 2000. En general, los suelos europeos están perdiendo carbono en forma de CO_2 , lo que dificulta el logro de los objetivos climáticos de la UE. La pérdida total de COS de las tierras de cultivo de toda la UE es moderada, representando el 0,75 % de sus reservas iniciales y ascendiendo a 70 Mt de carbono de las 9,3 Gt iniciales de carbono presentes en los primeros 20 cm de suelo. El contenido inicial (en 2009) de COS en los países de la cuenca mediterránea, como es el caso de España, es el más bajo ($<40 \text{ t C ha}^{-1}$) a nivel europeo. La variación media entre 2009 y 2018 de COS fue de $-0,46 \text{ t C ha}^{-1}$ para España. Esta pérdida de COS está asociada a prácticas como el monocultivo y la labranza. En la **figura 4** podemos observar a nivel europeo los diferentes cambios en el COS a lo largo del continente para el período 2009-2018.

Hasta la aprobación de la Ley de Vigilancia del suelo de la UE, la oficina estadística de la Unión Europea (Eurostat) ha estado llevando a cabo un seguimiento, a nivel europeo, una

encuesta periódica para supervisar la situación del uso del suelo, la cobertura del suelo y los cambios a lo largo del tiempo en toda la UE. Esta encuesta se conoce como Encuesta Marco del Área de Cobertura y Uso del Suelo (Land Use/Cover Area Frame Statistical Survey, LUCAS). El muestreo se basa en una cuadrícula regular en toda la UE definida como los puntos de intersección de una cuadrícula de 2 × 2 km que cubre el territorio de la UE, lo que resulta en alrededor de 1 000 000 de puntos georreferenciados. Cada punto se ha clasificado de acuerdo con siete clases de cobertura del suelo utilizando ortofotos o imágenes de satélite. De estos puntos, aproximadamente 270 000 son visitados cada tres años desde 2009 sobre el terreno por topógrafos para evaluar la validez de las observaciones de teledetección y recopilar información adicional que no se puede evaluar de forma remota.

El año 2009 fue la primera campaña de muestreos y análisis, seguidas del 2015, 2018 y el último ha sido en el 2022. Los análisis de las muestras de suelo recogidas se clasifican en módulos. En las dos primeras campañas (2009 y 2015) solamente se analizaron parámetros físicos, químicos y físico-químicos (módulo 1), tales como textura, COS, contenido de nutrientes, etc. (figura 5).

Figura 4. Distribución espacial de la variación mediana de COS (Δ SOCs q0.50) a 0–20 cm de profundidad del suelo para el período 2009–2018. Fuente: Arias-Navarro et al., 2024.



ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Figura 5. Estructura de las campañas LUCAS durante las diferentes años de muestreo. Fuente: Orgiazzi et al., 2017.

MODULE	Type of analysis	Year of survey				
		2009–2012	2015	2018	2021	→
MODULE 1 Physico-chemical properties	Coarse fragments (>2 mm)/%					
	PSD ¹ : clay, silt, sand/%					
	pH (CaCl ₂ , H ₂ O)					
	Organic carbon/g kg ⁻¹					
	Carbonate content/g kg ⁻¹					
	Total nitrogen content/g kg ⁻¹					
	Extractable potassium content/mg kg ⁻¹					
	Phosphorous content/mg kg ⁻¹					
	Cation exchange capacity/cmol(+) kg ⁻¹					
	Electrical conductivity/mS m ⁻¹					
	Metals					
	Multispectral properties					
	Mineralogy					
MODULE 2 Soil biodiversity	Bacteria and Archaea (16S rDNA)					
	Fungi (ITS)					
	Eukaryotes (18S rDNA)					
	Microfauna (nematodes)					
	Mesofauna (arthropods)					
	Macrofauna (earthworms)					
	Metagenomics					
MODULE 3 Bulk density	Bulk density					
	Soil moisture					
MODULE 4 Field measurements	Soil erosion by water and wind					
	Thickness of organic layer in Histosols					
	Soil structure					
MODULE 5 Pollution	Organic pollutants					
	Pesticides residues					

En la campaña de 2018 se incluyeron tres nuevos módulos, que también se analizaron en la última campaña realizada hasta la fecha, en el 2022 (Figura 5):

- Módulo 2: Parámetros de biodiversidad del suelo, tales como presencia y cuantificación de microorganismos, nematodos, artrópodos, etc.
- Módulo 3: Densidad aparente
- Módulo 4: Medidas de campo, tales como una evaluación visual de la erosión del suelo por agua y viento, grosor de la capa orgánica en turberas, etc.

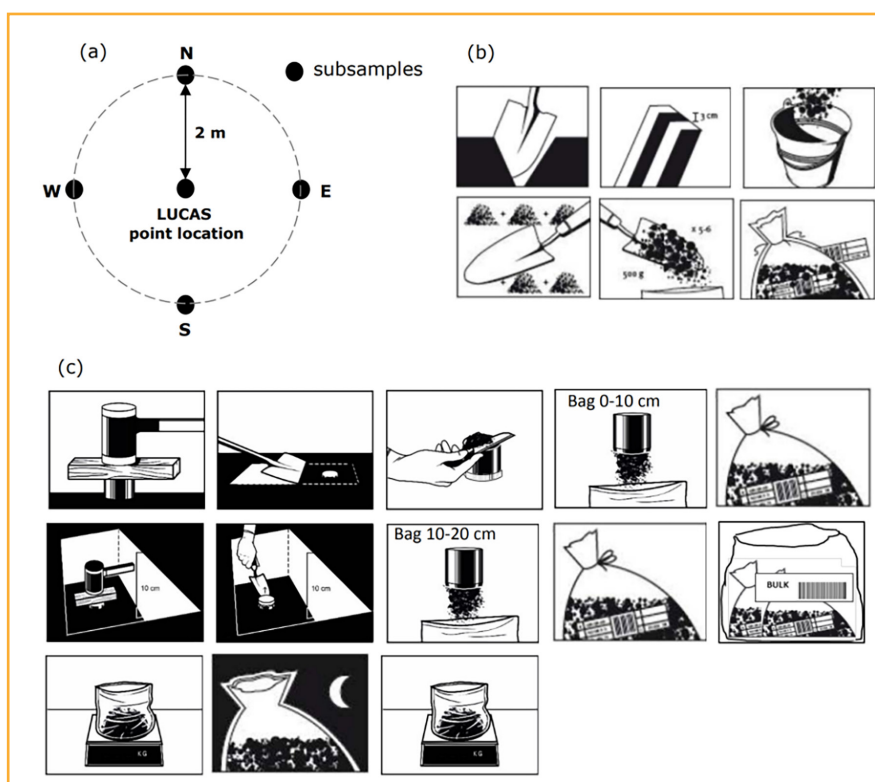
La metodología de análisis en laboratorio de cada una de estas propiedades del suelo está basada en protocolos estandarizados y pueden consultarse en Orgiazzi et al., 2017., y que a continuación un resumen de los diferentes tipos de muestreo implementados en la última campaña de 2022

El *procedimiento de muestreo habitual* (Módulo 1) consiste en tomar una muestra compuesta de aproximadamente 500 g en cada punto seleccionado previamente por imágenes satelitales. Esta muestra compuesta consiste en cinco submuestras tomadas con una pala. La primera submuestra se toma en la ubicación del punto georreferenciado; las otras cuatro se recolectan a una distancia de 2 m siguiendo los puntos cardinales (norte, este, sur y oeste) (Figura 6a). Antes de tomar las submuestras, se retiran de la superficie del suelo las piedras mayores de 6 cm, cualquier resto de plantas, hierba y hojarasca mediante rastrillaje con la pala. Como se muestra en la Figura 6b, se excava con una pala un hoyo en forma de V a una profundidad de 20 cm y se toma una porción de tierra (de aproximadamente 3 cm de grosor) del lateral del hoyo con la pala. La porción se recorta por los lados para obtener una submuestra de 3 cm de ancho. La submuestra se coloca en un cubo. El procedimiento se repite en los otros cuatro

sitios de submuestra. Finalmente, se mezclan las cinco submuestras del cubo con una pala. Se eliminan los restos de vegetación y piedras. Aproximadamente 500 g de la mezcla.

El *muestreo para la evaluación de la biodiversidad del suelo* (Módulo 2) se realizó en un subconjunto de las mismas ubicaciones donde se realizaron los muestreos para determinar la densidad aparente (Módulo 3). Se toman muestras de humedad de campo a una profundidad de 20 cm utilizando el método estándar. Se toma una muestra compuesta de aproximadamente 500 g en cada punto. La muestra compuesta consiste en cinco submuestras tomadas con una pala. La primera submuestra se tomó en la ubicación del punto georreferenciado; las otras cuatro submuestras se recolectaron a una distancia de 2 m siguiendo los puntos cardinales (norte, este, sur y oeste) (Figura 6a). La muestra final se coloca en un frasco etiquetado y se almacena en una caja de poliestireno refrigerada con bolsas de congelación. Las muestras se envían por mensajería urgente para preservar sus características biológicas. Posteriormente, se congelan y almacenan a -20 °C hasta su envío al laboratorio para su análisis.

Figura 6. (a) Esquema de muestreo LUCAS, (b) resumen del procedimiento de muestreo común, y (c) resumen de muestreo de densidad aparente. Fuente: Jones et al., , E. 2024.



El *muestreo de densidad aparente* (Módulo 3) consiste en recoger núcleos de suelo de 0 a 10 y de 10 a 20 cm de profundidad. Antes de tomar los núcleos de suelo, se retiran las piedras mayores de 6 cm), restos vegetales, hierba y hojarasca de la superficie del suelo rastrillando con la pala, como en el procedimiento habitual de muestreo. Tras la limpieza de la superficie del suelo, se toman cinco núcleos de suelo de 0 a 10 cm de profundidad con un anillo metálico de 100 cm³ en cada punto. El primer núcleo de suelo se tomó en la ubicación del punto georreferenciado; los otros cuatro núcleos de suelo se tomaron a una distancia de 2 m siguiendo los puntos cardinales (norte, este, sur y oeste) (Figura 6a). Como se muestra en la Figura 6c, se introduce suavemente un anillo metálico en el suelo utilizando un bloque de madera para

empujarlo con un mazo. Esto evita la compactación del suelo. El anillo se retira del suelo con una pala colocada debajo. El exceso de tierra alrededor del anillo se retira con un cuchillo y el núcleo de suelo se introduce en una bolsa de plástico etiquetada. El procedimiento se repite en los cuatro puntos cardinales y los núcleos de suelo recolectados se colocan en la misma bolsa de plástico etiquetada. Finalmente, se tomaron cinco núcleos de suelo de volumen conocido a una profundidad de 0 a 10 cm. Tras completar el muestreo a una profundidad de 0 a 10 cm, se realizó el muestreo de núcleos de suelo a una profundidad de 10 a 20 cm siguiendo el mismo procedimiento (Figura 6a y 6c). Los núcleos de suelo se dejaron secar al aire y se registra su peso. Las bolsas de plástico se sellan para su transporte al laboratorio.

3.2.4.5. Principales diferencias y análisis comparativo entre los proyectos a nivel nacional y europeo

Las metodologías de los estudios referentes de stock de carbono en suelo (Rodríguez Martín et al. (2016) y MITECO 2022 “Mapa del Carbono”) y la metodología LUCAS europea coinciden en varios aspectos esenciales, pero también presentan diferencias importantes (Tabla 4) que pueden afectar la comparabilidad y precisión de las estimaciones regionales, como las de Castilla-La Mancha. Ambos trabajos utilizan mediciones de contenido de carbono, densidad aparente y porcentaje de elementos gruesos, con muestreos georreferenciados y análisis de laboratorio homogéneos para transformar concentraciones en valores de stock (t C/ha).

Sin embargo, mientras Rodríguez Martín et al. (2016) mide directamente hasta 0–30 cm en todas sus parcelas, el Mapa del Carbono parte de muestras de 0–10 cm para la mayoría de las parcelas, complementadas con un muestreo adicional de 10–30 cm para extrapolar al horizonte de 30 cm, lo que introduce incertidumbre en la estimación para las capas inferiores. También existen diferencias en el diseño del muestreo y en el número de parcelas: Rodríguez Martín et al. (2016) trabajó con unas 4.400 parcelas en mallas regulares, mientras que el Mapa del Carbono utiliza más de 22.000 parcelas del INES más 800 adicionales, lo que mejora la resolución espacial y permite cartografía más detallada.

Otra diferencia está en los modelos espaciales y en las variables ambientales utilizadas para generar los mapas: el Mapa del Carbono incorpora información climática, de uso del suelo y de litología para ajustar los modelos de distribución, lo que aporta mayor precisión regional, aunque exige contar con esas variables también a escala local para asegurar la comparabilidad.

Otra diferencia fundamental es que la metodología LUCAS determina diversidad microbiana de las muestras de suelo y utiliza ese indicador como parte de una evaluación global de la salud de los suelos, mientras que las metodologías nacionales se centran únicamente en el COS y la densidad aparente, no analizando hasta la fecha la biodiversidad del suelo.

Estas diferencias metodológicas implican que, para aprovechar los resultados de futuros proyectos como el MAPA-PAC (encuesta ESYRCE) y la metodología adoptada por la futura Ley de Vigilancia europea que España tendrá que adoptar, será fundamental garantizar que el diseño de futuros muestreos a nivel de Castilla-La Mancha incluya, además de variables ambientales relevantes (uso del suelo, clima, textura y litología), muestreos de 30 cm de profundidad o parcelas dobles que permitan extrapolaciones fiables, parámetros básicos como densidad aparente y pedregosidad con métodos de laboratorio estandarizados, y previsiblemente análisis de la biodiversidad microbiana (en línea con la metodología europea). Solo así los datos nuevos podrán compararse con los inventarios previos y generar estimaciones robustas de stock de carbono y salud del suelo en Castilla-La Mancha.

Tabla 4. Comparativa de las metodologías en los documentos analizados disponibles a nivel nacional y europeo

Característica metodológica	Rodríguez Martín et al. (2016)	Mapa del Carbono Orgánico del Suelo (MITECO, 2022)	Proyecto MAPA-PAC 2023	LUCAS
Profundidad de muestreo	0-30 cm en todas las parcelas muestreadas	Se toma muestra de 0-10 cm en INES, y en una campaña complementaria se muestrea también 10-30 cm (horizonte inferior) para extrapolar a COS30.	Aún no publicado, pero se espera muestreo compatible con profundidades agrícolas estándar, aunque se desconocen los detalles exactos.	0-20 cm en todas las parcelas
Densidad aparente y elementos gruesos (pedregosidad)	Incluidos. Usan densidad aparente para convertir concentraciones en contenido de carbono (Mg C/ha). También se consideran fragmentos gruesos que no participan del carbono fino.	Incluidos. Densidad aparente y elementos gruesos (pedregosidad)	Incluidos. Usan densidad aparente para convertir concentraciones en contenido de carbono (Mg C/ha). También se consideran fragmentos gruesos que no participan del carbono fino	Incluidos. Densidad aparente y elementos gruesos (pedregosidad)
Diseño del muestreo / número de parcelas	≈ 4.401 parcelas, muestreo regular georeferenciado, tanto agrícola como forestal/pastos.	Diseño del muestreo / número de parcelas	≈ 4.401 parcelas, muestreo regular georeferenciado, tanto agrícola como forestal/pastos.	≈ 270 000 puntos de muestreo cada tres años
Extrapolación a 30 cm	No hace con muestras inferiores; ya analiza directamente 0-30 cm.	Necesita extrapolar desde muestras de 0-10 cm para estimar carbono en 0-30 cm (COS30) para muchas parcelas, usando las parcelas complementarias de muestreo doble.	Extrapolación a 30 cm	Necesita extrapolar desde muestras de 0-20 cm para estimar carbono en 0-30 cm
Interpolación / cartografía / análisis espacial	Uso de geoestadística para interpolar los valores de carbono, densidad aparente, etc., generar mapas nacionales.	Interpolación / cartografía / análisis espacial	Uso de geoestadística para interpolar los valores de carbono, densidad aparente, etc., generar mapas nacionales.	Datos de muestras de suelo georeferenciados para generar mapas continuos de propiedades del suelo para Europa ambientales y modelos espaciales avanzados
Homogeneidad de protocolos	Altamente homogéneo: mismo protocolo de muestreo, laboratorio, análisis para todas las parcelas, concentrando esfuerzo en uniformidad.	Usa los protocolos de INES para muestras 0-10 cm; para los 10-30 cm, las campañas adicionales replican los mismos métodos de laboratorio y análisis para homogeneizar.	Homogeneidad de protocolos	Altamente homogéneo: mismo protocolo de muestreo, laboratorio, análisis para todas las parcelas, concentrando esfuerzo en uniformidad.
Otras variables/ indicadores	No	No	Desconocido	Si. Biodiversidad microbiana (bacterias, arqueas, hongos microscópicos, eukariotas)

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

3.2.5. Principales conclusiones

3.2.5.1. Situación de partida de Castilla-La Mancha en relación con el stock de carbono en sus suelos

El análisis de los proyectos y estudios disponibles en Castilla-La Mancha permite trazar una situación de partida que evidencia tanto las fortalezas como las carencias de la región frente a los retos de la monitorización del carbono edáfico (Figura 7). Entre los trabajos de referencia se encuentra el Atlas de Suelos Vitícolas (1997), que aunque desfasado y únicamente disponible en formato físico, constituye la primera recopilación sistemática de datos edafológicos en los viñedos regionales. A nivel conceptual, el capítulo *Agricultura y cambio climático en CLM*, incluido en el libro *Impactos del cambio climático en Castilla-La Mancha* subrayó ya en 2009 la vulnerabilidad de la región (90 % de superficie cultivada en secano) y el papel del carbono del suelo como herramienta de mitigación, aunque sin aportar protocolos de medida propios. Más recientemente, se han identificado proyectos de investigación en la región (ej. IRIAF–IVICAM sobre resiliencia de cultivos leñosos, 2023–2029), que aportan información agronómica y genética sobre viñedo y pistacho en condiciones de sequía, así como iniciativas nacionales con participación regional (CLIMBIOSOIL, 2020–2024), centradas en biodiversidad del suelo y carbono como mitigadores del cambio climático. Sin embargo, en ambos casos la aportación de datos edafológicos directos sobre stock de carbono es inexistente o muy limitada.

En conjunto, la situación de partida de Castilla-La Mancha se caracteriza por:

- Disponibilidad de datos antiguos y parciales (ej. Atlas Vitícola).
- Escasez de datos edafológicos actualizados y sistemáticos sobre carbono en suelos agrícolas.
- Presencia de proyectos en curso con relevancia indirecta (resiliencia varietal, biodiversidad edáfica, prácticas agronómicas), pero sin generar aún inventarios de carbono explotables.
- Dependencia de los inventarios y cartografía nacionales (Rodríguez Martín et. (2016), MITECO 2022, MAPA–PAC 2023) para contar con estimaciones comparables y actualizadas.

Esta situación refuerza la necesidad de que Castilla-La Mancha desarrolle una estrategia propia para complementar los inventarios nacionales con muestreos regionales específicos, especialmente en sus cultivos clave (viñedo, olivar, pistacho, cereal de secano, etc.), y que prepare la capacidad técnica para integrar los datos que estarán disponibles a partir de 2026 en el marco del proyecto MAPA–PAC, y la futura Ley europea de Vigilancia del Suelo que España tendrá que transponer.

3.2.5.2. Implicaciones de los inventarios nacionales para Castilla-La Mancha

La revisión de los principales estudios e iniciativas nacionales (apartado 4.2.4.4) y europeas (apartado 4.2.4.5) ofrece un marco de referencia claro sobre cómo se está evaluando el carbono orgánico en los suelos agrícolas españoles y europeos. Estas experiencias ponen de relieve una serie de retos y oportunidades que Castilla-La Mancha debe considerar para poder integrarse de forma efectiva en este esfuerzo nacional y aprovechar al máximo los datos y directrices que se están generando.

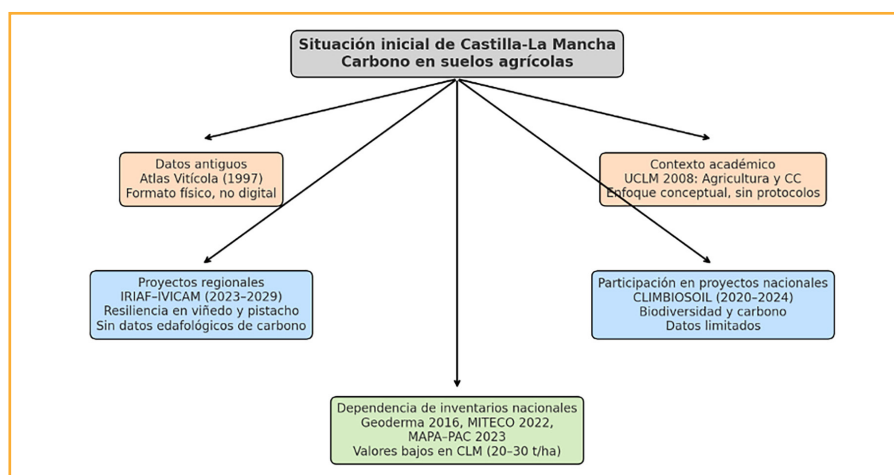


Figura 7. Situación inicial de Castilla-La Mancha respecto al carbono en suelos agrícolas, mostrando las fuentes de información disponibles.

En primer lugar, es imprescindible armonizar la escala regional con las metodologías nacionales y prever qué metodología será adoptada por la UE que será obligatoria para todos los Estados Miembros cuando se apruebe la Ley de Vigilancia de Suelo. Tanto Rodríguez Martín et al. (2016) como MITECO insisten en la necesidad de contar con muestreos hasta 30 cm de profundidad, con determinación de densidad aparente y pedregosidad, lo que garantiza la comparabilidad de los resultados. Además, desde Europa se pone el foco en analizar la biodiversidad microbiana en las mismas muestras que se recogen para el COS y la densidad aparente. Castilla-La Mancha debería asegurar que sus futuros inventarios o proyectos regionales adopten esta misma metodología, evitando así discrepancias que limiten la integración de datos.

En segundo lugar, los resultados nacionales muestran la alta variabilidad espacial del carbono en función del uso del suelo, la textura y el clima, y sitúan a Castilla-La Mancha en la franja más baja de stocks de COS. Esto implica que la región debería priorizar un muestreo más intensivo y representativo de sus suelos agrícolas y leñosos, incorporando estratificación por cultivos (viñedo, olivar, pistacho, cereales de secano) y condiciones edafoclimáticas. Así, se podrán generar diagnósticos más precisos y planes de manejo adaptados a cada zona.

En tercer lugar, los proyectos actuales señalan la importancia de relacionar el contenido en carbono con las prácticas de manejo (cubiertas vegetales, laboreo reducido, rotaciones, enmiendas orgánicas, pastoreo extensivo). Castilla-La Mancha debería preparar sus programas de seguimiento para capturar esta información agronómica junto a los datos de suelo, lo que permitirá no solo cuantificar los stocks, sino también evaluar qué prácticas son más efectivas en el contexto regional.

Finalmente, la integración en el proyecto MAPA-PAC 2023, que publicará resultados a partir de 2026, requerirá que Castilla-La Mancha cuente con capacidad técnica y administrativa para solicitar, procesar y explotar esos datos. Además, será estratégico establecer colaboraciones entre centros de investigación regionales (como IVICAM, IRIAF y UCLM) y los organismos estatales para acceder a microdatos, generar análisis regionalizados y transferir conocimiento a agricultores y gestores.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

En conjunto, Castilla-La Mancha debe prepararse con tres líneas prioritarias:

1. Alinear metodologías con los inventarios nacionales y europeos (muestreo hasta 30 cm, densidad aparente, pedregosidad, biodiversidad).
2. Diseñar un muestreo regional complementario más detallado para sus cultivos clave y condiciones semiáridas.
3. Integrar datos de manejo agrícola y de prácticas de la PAC para vincular el stock de carbono con la mitigación climática y la sostenibilidad agraria.

De esta manera, la región podrá posicionarse como referente en la gestión del carbono en suelos agrícolas, garantizando que los resultados nacionales se traduzcan en diagnósticos y políticas útiles para su propio territorio.

3.3. Zonificación agraria (SIG + datos SIGPAC) y visitas de campo para la edición cartografía de estado de situación actual

3.3.1. Contexto Territorial de Castilla-La Mancha

Castilla-La Mancha constituye una de las principales regiones agrícolas de España, tanto por la magnitud de su superficie cultivada como por la diversidad de sus sistemas productivos. El territorio configura un mosaico agrario en el que destacan, por un lado, los extensos cultivos herbáceos de secano junto a cultivos leñosos tradicionales mediterráneos, como el olivar la viña y el almendro junto con nuevas plantaciones de pistacho en expansión. El análisis provincial, que se describe a continuación, de los principales cultivos permite apreciar cómo se distribuyen los herbáceos y leñosos en la comunidad, poniendo de relieve las particularidades de cada provincia y las diferencias en su contribución potencial al secuestro de carbono en los suelos y a los servicios ecosistémicos asociados.



- Albacete (**Figura 8**) muestra un mosaico agrícola diverso donde conviven los usos tradicionales de secano con alternativas más intensivas y leñosas de alto valor añadido. Dominan principalmente los cultivos herbáceos, entre los que destacan el barbecho, la cebada, el trigo y la avena, junto con otros como el maíz, el ajo y el guisante que aportan diversidad y un componente hortícola e intensivo en algunas zonas. Entre los leñosos, el almendro sobresale como cultivo de referencia con más de 115.000 hectáreas, seguido de la viña y el olivo. El pistacho aparece como cultivo emergente en expansión que, junto con el almendro, se adapta muy bien a las condiciones semiáridas del sureste de la provincia.

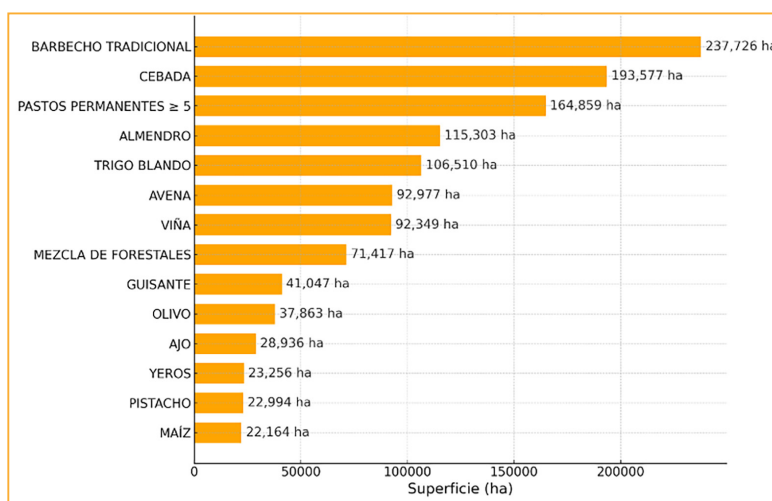


Figura 8. Principales cultivos de Albacete que alcanzan aproximadamente del 90% de la superficie total.

- En Ciudad Real (**Figura 9**) predominan los herbáceos extensivos, con una enorme superficie de barbecho y pastos permanentes, además de cebada, avena, trigo y leguminosas como el guisante. Junto a ellos, los leñosos tienen un papel protagonista, liderados por el olivo y la viña, seguidos de un almendro en crecimiento y un pistacho que comienza a consolidarse. Esta combinación mantiene un equilibrio característico entre cultivos extensivos y leñosos, a la vez que combina agricultura y ganadería en un paisaje de gran valor agroecológico.

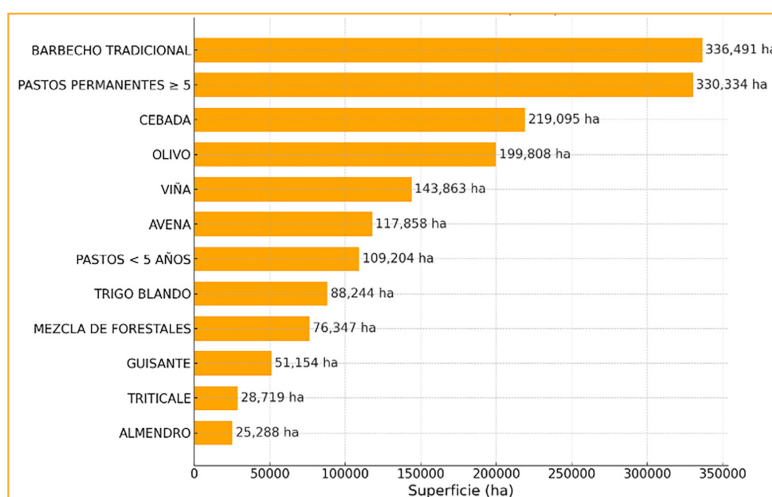


Figura 9. Cultivos que representan aproximadamente el 90% de la superficie agrícola en Ciudad Real.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- En Cuenca (Figura 10) el peso de los herbáceos es elevado, suponiendo la cebada la mayor extensión, alcanzando las 490.000 hectáreas y el girasol aproximadamente 300.000, seguidos por barbechos, pastos y trigo. Estos cultivos marcan la vocación cerealista y oleaginosa de la provincia. Entre los leñosos destaca el viñedo, seguido por el olivo y el almendro, mientras que el pistacho se encuentra en expansión como alternativa adaptada a las condiciones de secano. La provincia constituye además una de las zonas de mayor implantación vitícola de España, con especial concentración en la comarca de La Manchuela, lo que la convierte en referente vitivinícola dentro de Castilla-La Mancha.

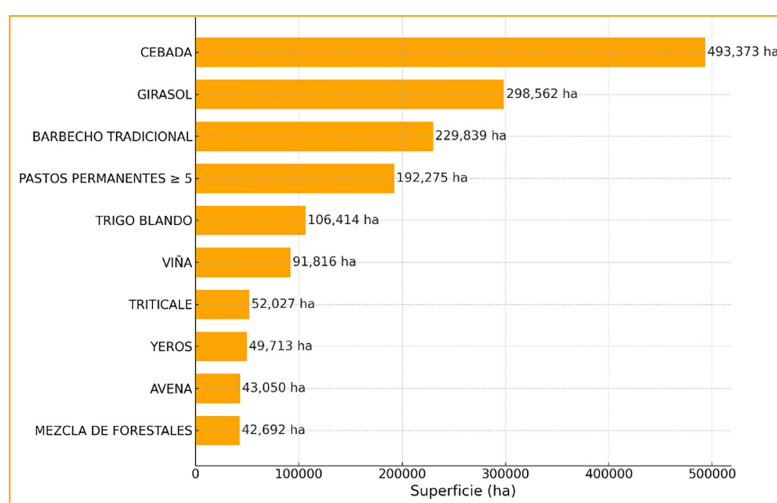


Figura 10. Distribución de los cultivos en Cuenca que concentran alrededor del 90% de la superficie total.

- Toledo (Figura 11) presenta una clara dominancia de cultivos herbáceos, encabezados por el barbecho y los cereales de invierno (cebada, trigo y avena), junto a superficies menores de pastos temporales y leguminosas. En cuanto a los leñosos, la provincia muestra un reparto equilibrado entre el olivo y la viña, a los que se suman el almendro y el pistacho, en plena expansión como alternativas de secano. El resultado es un modelo que combina tradición cerealista con una diversificación creciente hacia frutales leñosos.

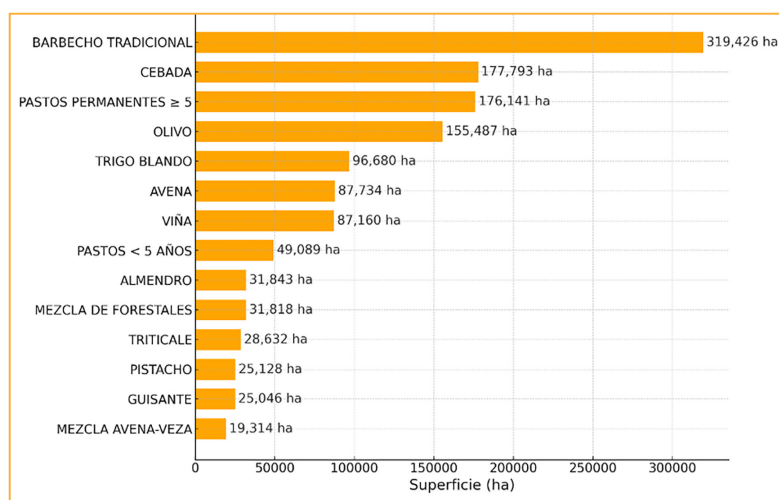


Figura 11. Distribución de los principales cultivos de Toledo que en conjunto suman aproximadamente el 90% de la superficie cultivada.

• Guadalajara (Figura 12) está dominada principalmente por cultivos herbáceos, con los pastos permanentes a la cabeza, seguidos por la cebada, el trigo, el barbecho, el girasol y otros como avena, yeros y triticale. Esta estructura refleja un sistema más extensivo y pastoril, ligado estrechamente a la ganadería. Entre los leñosos, el olivo aparece en segundo plano, mientras que la viña, el almendro y el pistacho tienen una presencia muy reducida. La provincia de Guadalajara mantiene un carácter agrícola de secano, con escasa implantación de frutales leñosos frente al resto de provincias manchegas.

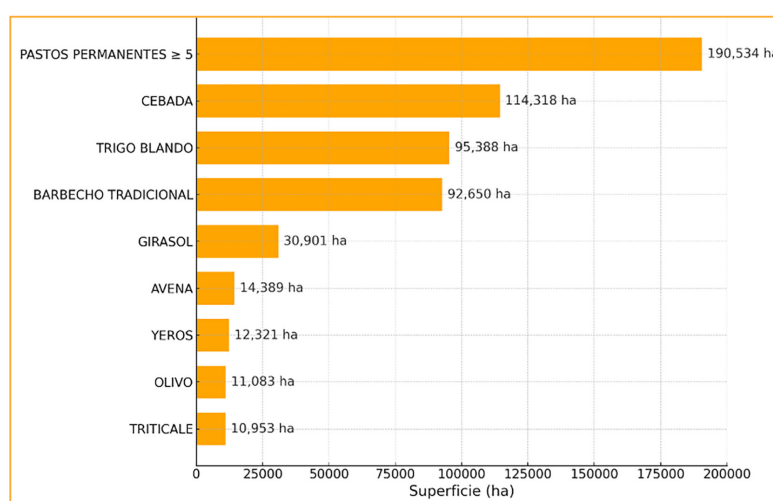


Figura 12. Cultivos que conforman aproximadamente del 90% de la superficie agrícola en Guadalajara.

En la Tabla 5 se recoge el porcentaje de la superficie total por provincia que se dedica a los dos grandes grupos de cultivos agrícolas (herbáceos y leñosos) de la región.

Provincia	Herbáceas (%)	Leñosos (%)	Nota destacada
Toledo	82.4%	17.6%	Dominio claro de herbáceas; olivo y viña equilibrados, almendro y pistacho en expansión.
Albacete	77.3%	22.7%	Herbáceas mayoritarias, pero fuerte peso del almendro; presencia de viña, olivo y pistacho emergente.
Ciudad Real	77.5%	22.5%	Barbecho y pastos muy extensos; olivo y viña con fuerte presencia, almendro y pistacho en crecimiento.
Cuenca	90.0%	10.0%	Provincia más cerealista; cebada y girasol dominan. Viña principal leñoso, olivo y almendro más reducidos.
Guadalajara	94.6%	5.4%	Predominio absoluto de herbáceas (pastos y cereales); olivo único leñoso relevante, resto muy minoritario.

Tabla 5. Distribución porcentual de la superficie de cultivos herbáceos y leñosos por provincia.

3.3.2. Fuentes de Datos y Metodología SIG

El análisis territorial se ha apoyado en la integración de distintas fuentes de información cartográfica y bases de datos oficiales. Entre ellas destacan el parcelario de SIGPAC, que proporcionan la delimitación georreferenciada de las parcelas agrícolas y permiten identificar cultivos, usos y superficies declaradas por los agricultores. Esta información constituye la base para la caracterización de los sistemas productivos en cada provincia y para la vincu-

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

lación posterior con los eco-regímenes de la PAC.

De forma complementaria, se incorporaron diversas fuentes edafológicas, geológicas y ambientales. Entre ellas destacan:

- Cartografía edafológica europea (European Soil Database v2, SoilGrids de ISRIC y el inventario LUCAS Soil Survey), que aportan información sobre pH, textura, materia orgánica y capacidad de retención de agua.
- Mapa de Suelos de España (IGN/CSIC) a escala 1:1.000.000, empleado para afinar la clasificación edafológica nacional y regional.
- Mapas geológicos del IGME (MAGNA 1:50.000 y 1:200.000), utilizados para diferenciar litologías carbonatadas (calizas, dolomías) de silíceas, determinantes del pH y de la dinámica del carbono.
- Mapa climático de AEMET (1981–2010) y del Atlas Climático Digital, integradas para obtener series de precipitación, temperatura y aridez.

La metodología SIG aplicada (Figura 12) se ha desarrollado en la plataforma QGIS y ha consistido en una secuencia de operaciones que incluyen:

La geología, utilizando los mapas del IGME como base de referencia para diferenciar entre materiales carbonatados y silíceos. Esta primera aproximación permitió establecer los condicionantes litológicos que influyen directamente en la formación y propiedades de los suelos.

A continuación, se incorporó la información edafológica procedente de bases europeas y nacionales (European Soil Database, SoilGrids, IGN/CSIC). Esta clasificación permitió diferenciar suelos con propiedades contrastadas: desde materiales carbonatados (cálculos, eútricos), de pH básico y mayor estabilidad de carbono, hasta materiales silíceos o dístricos, de carácter más ácido y menor contenido de nutrientes. De esta forma, la información edafológica se incorporó como capa fundamental para estratificar la zonificación agraria en función del tipo de suelo y su potencial agronómico y su mayor o menor capacidad de fijación de carbono en el suelo.

El tercer paso integró las variables climáticas, en particular la precipitación y la temperatura, obtenidas de AEMET y del Atlas Climático Digital. Estos gradientes hídricos y térmicos situaron a los sistemas productivos dentro de su marco climático, identificando tanto zonas semiáridas como entornos más húmedos.

Sobre esta base se incorporó la orografía, a partir de los modelos digitales de elevaciones del IGN. La altitud y la pendiente resultaron determinantes para reconocer las diferencias entre las áreas llanas, más ligadas al cereal extensivo, y los relieves montañosos, donde predominan pastos y sistemas ganaderos.

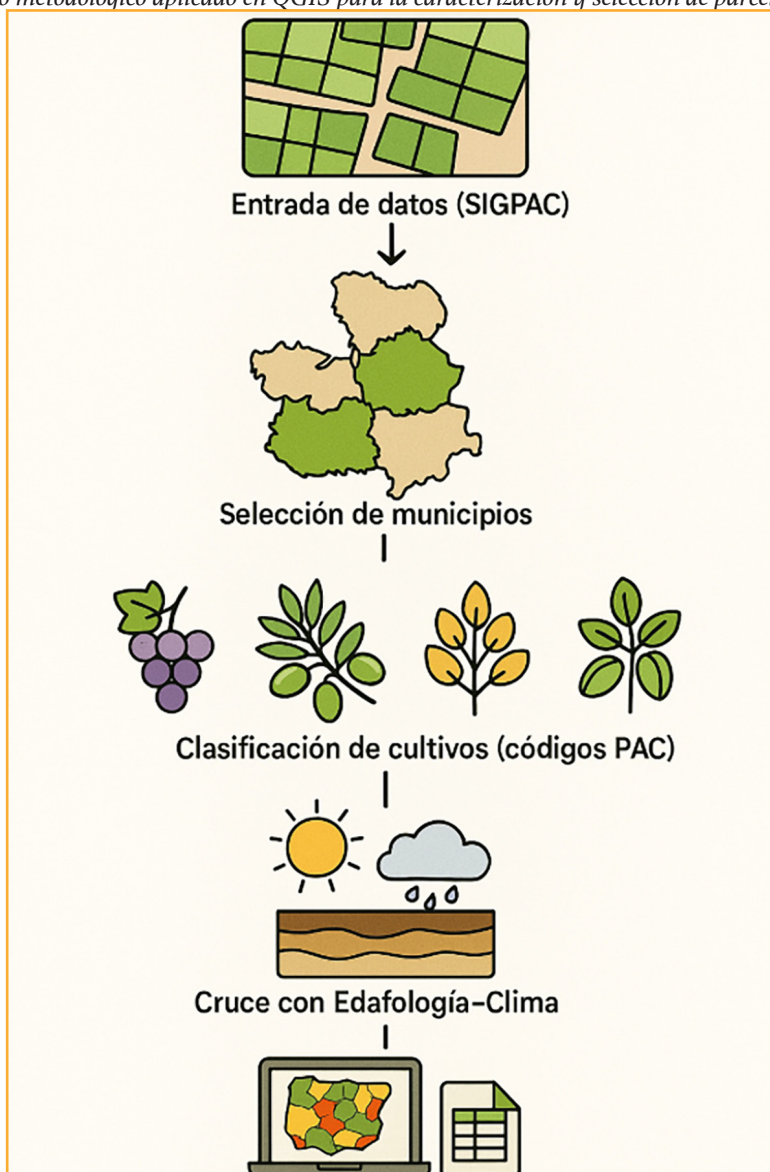
Una vez contextualizado el territorio en sus condicionantes físicos y ambientales, se cruzaron con los datos de cultivos procedentes de la SIGPAC.

Con la superposición de todas estas capas se procedió a la selección de municipios re-

presentativos de la productividad biofísica de los cultivos del territorio castellanomanchego.

La elección final de las parcelas se desarrollará tras las visitas de campo y entrevistas con las oficinas comarcales de cada territorio para explorar la trazabilidad y facilidades para desarrollar la investigación.

Figura 13. Flujo metodológico aplicado en QGIS para la caracterización y selección de parcelas agrícolas en



Castilla-La Mancha, integrando información de SIGPAC, cartografía edafológica y variables climáticas.

3.3.3. Cartografía temática de condicionantes agrarios en Castilla-La Mancha

Como se ha descrito en el punto anterior, la cartografía temática elaborada constituye un instrumento para interpretar conjuntamente los factores que condicionan la agricultura regional. Más que describir cada variable por separado, los mapas permiten visualizar las interacciones espaciales entre uso del suelo, propiedades edáficas y disponibilidad hídrica.

Estos mapas permiten visualizar la distribución espacial de los usos del suelo, el pH de

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

los suelos agrícolas y la pluviometría media anual, constituyendo una base de referencia fundamental para la zonificación agraria. Su análisis conjunto proporciona una visión integrada de la diversidad territorial de la región y de los factores que condicionan la productividad, la gestión de cultivos y el potencial de servicios ecosistémicos. A continuación se presentan los siguientes mapas elaborados a partir de los datos que se pudieron obtener de SIGPAC y Cartografía temática de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.

El mapa presentado en la **Figura 14** representa la distribución de los principales usos del suelo en Castilla-La Mancha a partir de datos SIGPAC. Se observa un claro predominio de los cultivos herbáceos (amarillo), especialmente en las provincias de Guadalajara, Cuenca y gran parte de Toledo, lo que pone de relieve la vocación cerealista de estas zonas. El viñedo (morado) aparece muy concentrado en el centro y sureste de la región, con especial relevancia en Ciudad Real y Cuenca (La Mancha y La Manchuela). El olivar (verde) domina en el suroeste de Ciudad Real y en áreas del sur de Toledo y Albacete, mientras que los frutales secos (azul, principalmente almendro y pistacho) se concentran en Albacete y Cuenca, donde su expansión reciente es significativa. Finalmente, las superficies forestales (marrón) ocupan las sierras del norte de Guadalajara, la Serranía de Cuenca y el sureste de Albacete, configurando un mosaico agroforestal característico de la región.

Este mapa aporta una primera lectura del mosaico agrario de Castilla-La Mancha configuran el territorio.

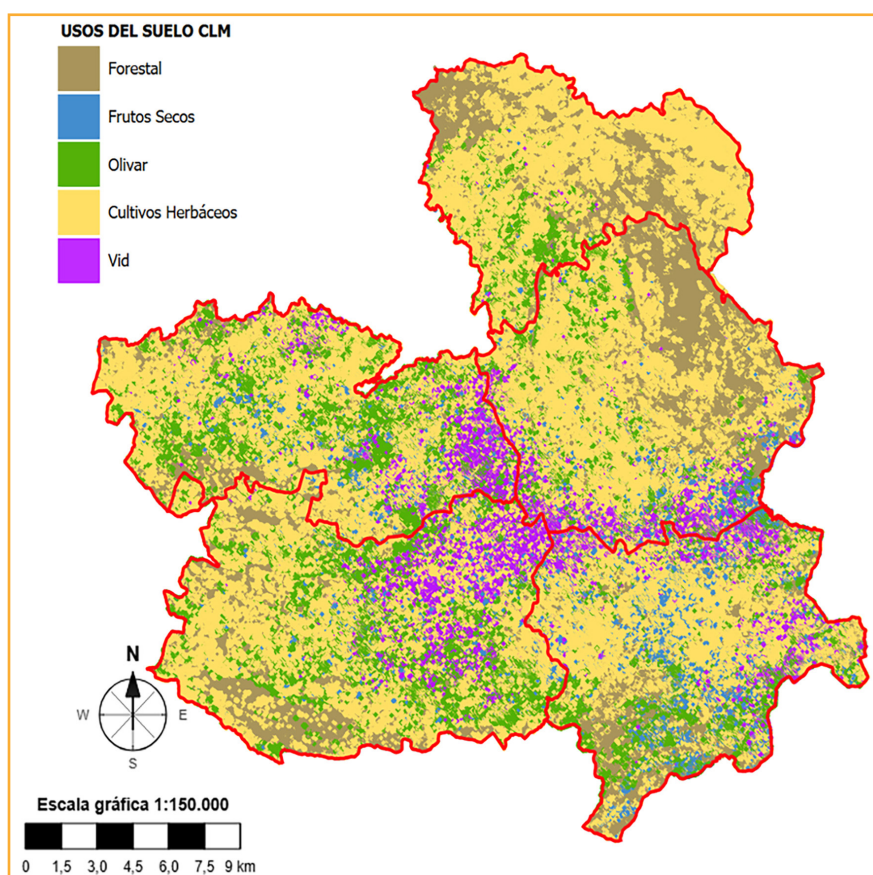


Figura 14. Distribución de los principales usos del suelo agrícola en Castilla-La Mancha (SIGPAC)
El mapa edafológico de Castilla-La Mancha (**Figura 15**) caracteriza el suelo ya que este

constituye uno de los principales factores que determinan la dinámica del carbono orgánico y, en consecuencia, la capacidad de secuestro en cada territorio siendo clave para fundamentar la zonificación agraria y el diseño de la red de parcelas piloto, garantizando que la evaluación del carbono en el suelo se realice sobre una base territorial robusta y representativa de la heterogeneidad agroambiental de Castilla-La Mancha.

La cartografía de suelos ofrece información estructural y relativamente estable en el tiempo, basada en la clasificación WRB (World Reference Base for Soil Resources). Esta clasificación permite diferenciar entre suelos calizos/básicos, suelos ácidos o limitantes y suelos aluviales.

En gran parte de la región predominan Cambisoles cálcicos y mólicos y Luvisoles cálcicos, crómicos y háplicos, asociados a materiales carbonatados y con pH básico. Estos suelos presentan buena aptitud agraria y alta estabilidad edáfica, lo que los hace especialmente relevantes para cultivos de secano y leñosos mediterráneos (cereal, viñedo, olivar, frutos secos).

En contraste, se identifican enclaves de suelos ácidos y limitantes (Acrisoles gléyicos, Cambisoles ácidos, Leptosoles dístricos y úmbricos, Regosoles dístricos, Luvisoles gléyicos y dístricos), localizados en áreas serranas más húmedas (Sierra de Alcaraz, Serranía de Cuenca, Sierra Norte de Guadalajara, Sierra Morena). Estos suelos, con menor fertilidad y en ocasiones hidromorfos, se destinan principalmente a pastos y sistemas forestales, y aportan un contraste necesario para la evaluación de carbono en condiciones menos estables.

El uso de este mapa es fundamental porque:

- Aporta la base para la estratificación edáfica del muestreo, asegurando que las parcelas seleccionadas representen la diversidad de condiciones de suelo presentes en la región.
- Permite vincular propiedades edáficas con la dinámica del carbono, distinguiendo áreas con alta estabilidad de carbono (suelos carbonatados y fértiles) de zonas con menor potencial o mayor vulnerabilidad (suelos ácidos, hidromorfos o poco profundos).
- Integra el análisis espacial de usos y clima: al combinarlo con la cartografía de cultivos (Figura 13) y la pluviometría (Figura 15), se obtiene una visión completa de los factores que condicionan la productividad y la acumulación de carbono.

El mapa de la **Figura 16** representa la pluviometría media anual en Castilla-La Mancha (periodo de referencia 1981–2010). Se observa un claro predominio de valores comprendidos entre 300 y 600 mm anuales (tonos azul claro) en gran parte de la región, lo que refleja el carácter semiárido del territorio. Las precipitaciones más bajas, inferiores a 300 mm (tonos amarillos), se concentran en sectores del sureste de Albacete, el centro de Ciudad Real y algunas zonas interiores de Cuenca y Toledo, vinculadas a las llanuras de La Mancha. En contraste, las precipitaciones más elevadas (>800 mm, azul más intenso) se localizan en las sierras y sistemas montañosos periféricos: Sierra de Alcaraz y Segura en Albacete, Montes de Toledo, Sierra Morena en Ciudad Real, y el Sistema Ibérico en Cuenca y Guadalajara. Esta distribución condiciona la disponibilidad hídrica para los cultivos, marcando una fuerte dependencia del regadío en las áreas más secas y una mayor adaptabilidad de sistemas extensivos en zonas serranas.

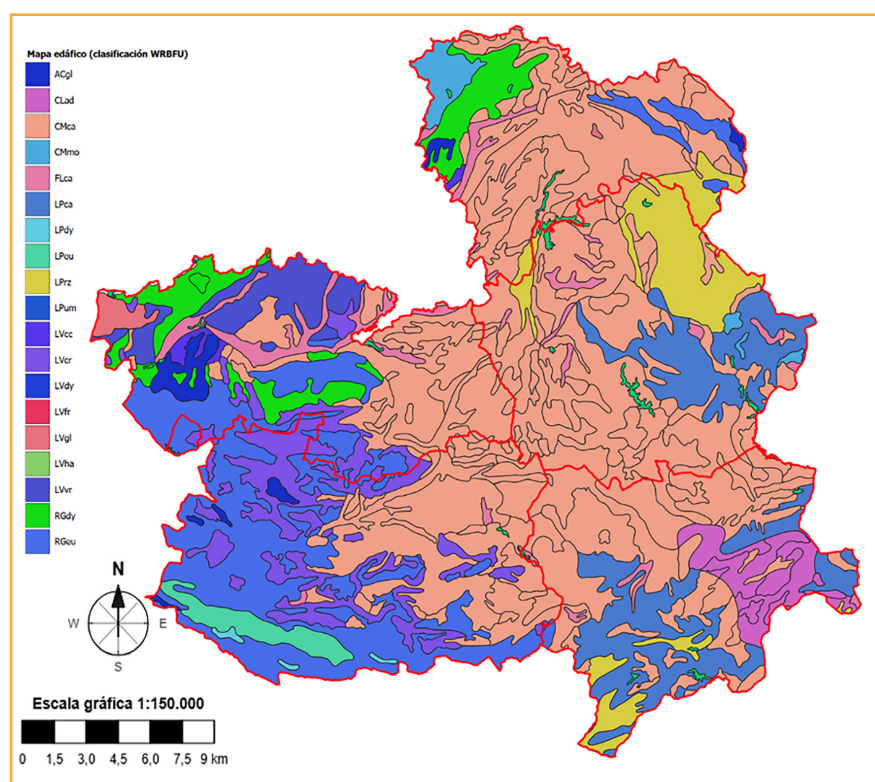


Figura 15. Mapa edafológico de Castilla-La Mancha según la clasificación WRB. La leyenda recoge las principales unidades de suelo presentes en la región: ACgl (Acrisol gléyico), CLad (Cambisol ádico), CMca (Cambisol cálcico), CMmo (Cambisol mólico), FLca (Fluvisol cálcico), LPca (Leptosol cálcico), LPdy (Leptosol distríco), LPeu (Leptosol eútrico), LPrz (Leptosol réndzico), LPum (Leptosol úmbrico), LVcc (Luvisol crómico cálcico), LVcr (Luvisol crómico), LVdy (Luvisol distríco), LVfr (Luvisol férrico), LVgl (Luvisol gléyico), LVha (Luvisol háplico), LVvr (Luvisol vértico), RGdy (Regosol distríco) y RGeu (Regosol eútrico).

La integración de los mapas temáticos de usos del suelo, características edáficas y gradiente climático permite construir un marco de análisis territorial coherente y robusto para Castilla-La Mancha. Este enfoque responde a la necesidad de disponer de una cartografía funcional que no solo describa variables aisladas, sino que revele las interacciones entre factores biofísicos y productivos que determinan el potencial agronómico y ambiental de la región.

En primer lugar, el uso del suelo constituye el punto de partida para entender la estructura productiva regional. El predominio de los cultivos herbáceos de secano refleja la vocación cerealista tradicional limitada por la climatología predominante en la región, mientras que los sistemas leñosos (vid, olivo, almendro y pistacho) introducen contrastes tanto en la ocupación territorial como en los servicios ecosistémicos asociados. Estos cultivos leñosos aportan mayor estabilidad de carbono en biomasa y suelo, además de diversificar los paisajes agrícolas. La representación conjunta de ambos sistemas en el diseño del muestreo es esencial para capturar la dualidad entre la agricultura extensiva dominante y las nuevas dinámicas de intensificación y diversificación productiva.

El gradiente edáfico marca un condicionante estructural. La presencia mayoritaria de suelos carbonatados de pH básico aporta un entorno favorable para la estabilidad de la materia orgánica y la fijación de carbono, lo que refuerza su relevancia para los cultivos de

secano mediterráneos. En contraste, los suelos ácidos y limitantes, localizados en enclaves serranos, presentan menor fertilidad y mayor vulnerabilidad a la pérdida de carbono, aunque resultan cruciales para completar el espectro regional, dado que representan condiciones marginales donde la gestión agraria y forestal adquiere un papel estratégico en la conservación de servicios ecosistémicos. Esta dualidad edáfica introduce una dimensión crítica en la estratificación del muestreo: solo contemplando ambos extremos es posible generar estimaciones de carbono representativas de la diversidad territorial.

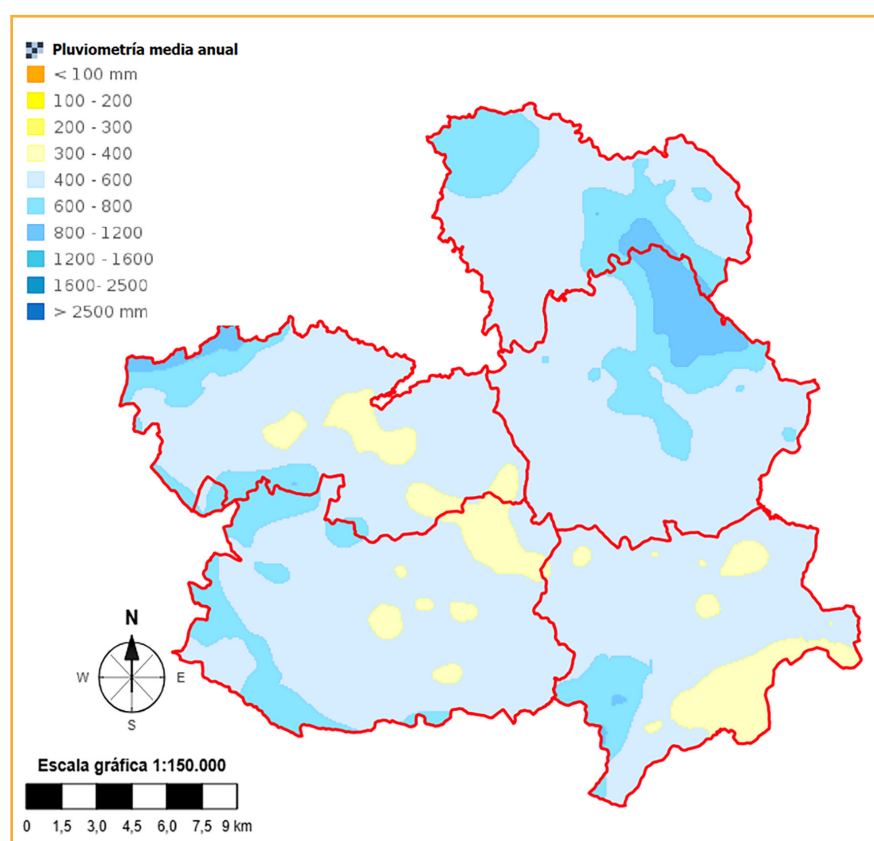


Figura 16. Distribución de la pluviosidad media anual (Aemet, periodo 1981-2010) en el territorio de Castilla-La Mancha

En tercer lugar, la climatología condiciona directamente la productividad agraria y la dinámica de la materia orgánica en el suelo. El carácter semiárido generalizado, con precipitaciones anuales de 300–600 mm, impone restricciones hídricas que hacen del regadío un factor decisivo en las áreas más secas. Al mismo tiempo, los contrastes pluviométricos entre las llanuras áridas del sureste de Albacete y La Mancha central (<300 mm) y las sierras periféricas húmedas (>800 mm) permiten establecer escenarios diferenciados para el análisis: desde sistemas con alta dependencia del riego hasta agroecosistemas extensivos adaptados a mayores disponibilidades de agua. Esta diversidad climática, al cruzarse con las variables edáficas y de uso, amplía la capacidad de la zonificación para capturar gradientes de productividad y resiliencia.

La combinación de estos tres ejes –uso del suelo, edafología y clima– ofrece una visión sistémica del territorio. En lugar de aproximarse de forma fragmentada, la metodología aplicada integra los factores en un marco espacial coherente que permite:

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- Identificar tipologías agrarias contrastadas (ej. cereal extensivo en llanuras semiáridas, viñedos en suelos básicos, olivar en pendientes medias, frutos secos en suelos marginales).
- Definir estratos edafo-climáticos con relevancia directa para la dinámica del carbono (suelos fértiles vs. marginales; ambientes áridos vs. húmedos).
- Asegurar la representatividad provincial, incluyendo la diversidad productiva característica de cada territorio.
- Generar una red de parcelas piloto estratificada, diseñada para maximizar la información obtenida y garantizar que los resultados del muestreo sean extrapolables a escala regional.

En síntesis, el cruce de cartografía temática con datos de SIGPAC no solo permite seleccionar municipios y parcelas representativas, sino que sienta las bases para una evaluación integral del carbono en suelos agrícolas. Este enfoque garantiza que las estimaciones obtenidas reflejen con rigor la heterogeneidad agroambiental de Castilla-La Mancha y, al mismo tiempo, proporciona un referente metodológico sólido para evaluar la eficacia de los eco-regímenes de la PAC vinculados al secuestro de carbono, la resiliencia de los sistemas productivos y la provisión de servicios ecosistémicos.

3.3.4. Criterios de Zonificación Agraria

Como se ha visto en el punto anterior la definición de zonas agrícolas representativas en Castilla-La Mancha se ha realizado a partir de un conjunto de criterios que integran la dimensión productiva, los condicionantes ambientales y los aspectos de gestión agraria. El objetivo principal es que la zonificación refleje de manera fiel la heterogeneidad real de los sistemas agrarios de la región y, al mismo tiempo, proporcione una base metodológica sólida para la evaluación del secuestro de carbono en suelos en el marco de la PAC.

La integración de estas variables permite estratificar el territorio en función de su potencial edafo-climático, asegurando que los resultados del muestreo sean extrapolables a escala regional y no queden sesgados hacia condiciones particulares.

Finalmente, se contempla que en fases posteriores del proyecto la zonificación se refine mediante la inclusión de variables relacionadas con el tipo de manejo agrario, principalmente en lo que al suelo se refiere y que es objeto principal de esta investigación (cubiertas vegetales o inerte, siembra directa, rotaciones con leguminosas, modificación de los periodos de tratamientos y/o recolección). Este refinamiento se apoyará en visitas de campo y entrevistas con oficinas comarcales agrarias, orientadas a identificar parcelas piloto representativas que permitan:

- Desarrollar investigaciones comparativas.
- Capturar diferencias en secuestro de carbono derivadas de prácticas de manejo.
- Generar resultados con un alto grado de transferibilidad hacia la gestión agraria y la política agrícola regional.

En conjunto, la aplicación de estos criterios asegura que la zonificación agraria no sea una mera representación cartográfica, sino un instrumento científico-operativo que permita diseñar una red de muestreo robusta, representativa y alineada con los objetivos de sostenibilidad, mitigación climática y servicios ecosistémicos promovidos en la PAC.

3.3.5. Resultados de Análisis SIG y Zonificación

El análisis SIG realizado constituye la primera aproximación metodológica a la zonificación agraria de Castilla-La Mancha orientada a la instalación de parcelas iniciales para la evaluación del carbono en suelos. A partir de la integración de la información provincial de cultivos (Tabla 6) y los diferentes mapas temáticos, se ha logrado definir un marco de referencia que permite identificar con solidez los principales estratos agroambientales de la región.

Sin embargo, esta zonificación debe entenderse como preliminar. La ausencia de determinados insumos de información, junto con la necesidad de contrastar sobre el terreno las condiciones reales de manejo y viabilidad logística de las parcelas, impide por el momento establecer una selección definitiva de las unidades de muestreo.

Las principales limitaciones que han condicionado la elaboración de esta primera propuesta son las siguientes:

1. Insuficiencia de información sobre manejos agrarios diferenciados. Aunque se dispone de una buena base cartográfica para cultivos, suelos y clima, no existen bases de datos homogéneas y actualizadas que detallen las prácticas de manejo agrícola en cada parcela. Elementos clave como la aplicación de cubiertas vegetales, la adopción de siembra directa, el uso de rotaciones con leguminosas o la intensidad en labores agrícolas no están sistemáticamente registrados a escala parcelaria. Estas circunstancias impiden discriminar entre sistemas convencionales y ecológicos, o entre manejos intensivos y extensivos, salvo en casos aislados. Por lo tanto, la ausencia de esta información compromete la posibilidad de establecer comparaciones rigurosas entre manejos dentro de un mismo cultivo, condición necesaria para que los resultados sobre carbono tengan validez científica y aplicabilidad práctica.
2. Falta de integración de datos sobre eco-regímenes de la PAC. Pese a la relevancia que los eco-regímenes tienen en la definición de prácticas de conservación y secuestro de carbono, no se dispone aún de cartografía detallada sobre la distribución real de estos regímenes en la región. Esta carencia limita la capacidad de relacionar directamente las parcelas propuestas con compromisos de la PAC en vigor.
3. Necesidad de validación mediante visitas de campo. La zonificación cartográfica, aunque robusta, no es suficiente para seleccionar parcelas definitivas. Será necesario realizar visitas presenciales y entrevistas con las Oficinas Comarcales Agrarias y propietarios de las fincas, que permitan lo siguiente:
 - Conocer de primera mano las condiciones físicas de cada parcela (accesibilidad, uniformidad, infraestructuras).
 - Verificar las condiciones administrativas y burocráticas, asegurando que se pueda trabajar con la documentación necesaria y con el consentimiento y compromiso de los agricultores que avale una investigación a medio plazo.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- Confirmar que las parcelas seleccionadas ofrecen la trazabilidad mínima exigida para la investigación, de modo que los datos de carbono obtenidos puedan compararse entre cultivos, manejos y provincias con garantías científicas.

De esta manera, la propuesta no pretende definir todavía un listado cerrado de parcelas, sino proporcionar la arquitectura metodológica para avanzar hacia una selección final en la que se pueda garantizar lo siguiente:

- Los cultivos estén representados proporcionalmente.
- Los manejos agrarios se discriminen de manera comparativa.
- Las condiciones ambientales sean lo suficientemente contrastadas.
- La investigación alcance un nivel de calidad científica y de transferibilidad a medio plazo, alineado con los objetivos de la PAC y la evaluación de servicios ecosistémicos.

Zonificación provincial

A pesar de las limitaciones señaladas, el análisis SIG permite definir una zonificación agraria coherente que integra cultivos, condiciones edáficas, gradientes climáticos y regímenes hídricos. Los resultados por provincias son los siguientes:

- **Albacete.** Provincia caracterizada por un mosaico diverso donde, junto a los herbáceos de secano, destacan almendro y pistacho, con fuerte expansión reciente de este último. Condiciones semiáridas, con suelos básicos y enclaves ácidos en la Sierra de Alcaraz. Clave para muestrear leñosos emergentes bajo estrés hídrico y contrastar secano con regadío.
- **Ciudad Real.** Equilibrio entre herbáceos, olivar y viñedo, con expansión de frutos secos. Predominan zonas semiáridas (<300 mm) en La Mancha, junto con sierras más húmedas. Relevante para muestrear olivar y viñedo en clima seco, e incorporar barbechos y pastos permanentes como referencia extensiva.
- **Cuenca.** El viñedo se combina con un contexto cerealista (cebada y girasol). Suelos básicos predominantes, con enclaves ácidos en la Serranía, donde las precipitaciones son más elevadas. Permite contrastar viñedo en suelos fértiles con cereal de secano, e incluir muestreos en enclaves húmedos serranos.
- **Toledo.** Dominio de herbáceos (cereales y barbecho) acompañado de olivo y viñedo, con creciente expansión de almendro y pistacho. Clima semiárido, suelos básicos y regadíos en vegas. Estrategia: representar contraste secano/regadío y combinar leñosos tradicionales y emergentes.
- **Guadalajara.** Predominio de pastos y herbáceos (trigo, cebada, girasol), con olivar residual. Suelos básicos, con enclaves ácidos en el norte, y pluviometría más elevada en el Sistema Ibérico. Recomendable priorizar parcelas pastoriles y cerealistas en secano, incluyendo zonas de suelos ácidos-húmedos frente a básicos-secos.

A continuación, la **Tabla 6** sintetiza esta zonificación provincial preliminar.

Tabla 6. Zonificación agraria preliminar por provincias de Castilla-La Mancha. Se incluyen los cultivos representativos, las principales condiciones ambientales y los enfoques de muestreo propuestos para garantizar la representatividad territorial en la evaluación del carbono en suelos agrícolas.

Provincia	Cultivos representativos	Condiciones ambientales	Enfoque de muestreo
Albacete	Almendo y pistacho; herbáceos de secano; viñedo y olivo secundarios	Clima semiárido; suelos básicos y enclaves ácidos (sierra de Alcaraz); baja pluviometría	Leñosos emergentes en condiciones semiáridas; contraste secano-regadío
Ciudad Real	Olivar y viñedo predominantes; cultivos herbáceos y pastos; almendo y pistacho en expansión	Áreas semiáridas (<300 mm) en La Mancha; suelos básicos; sierras más húmedas	Olivar y viñedo en clima seco; incluir pastos y barbechos extensivos
Cuenca	Viñedo principal leñoso; cebada y girasol; cereal de secano; olivo y almendo	Suelos mayoritariamente básicos; enclaves ácidos y húmedos en Serranía; pluviometría intermedia	Viñedo sobre suelos básicos; contrastar con cereal de secano y enclaves serranos húmedos
Toledo	Cereales de invierno y barbecho; olivo y viñedo equilibrados; almendo y pistacho en crecimiento	Clima semiárido; suelos básicos; regadío en vegas; pluviometría media	Contraste secano vs. regadío; leñosos tradicionales y emergentes
Guadalajara	Pastos permanentes y cereal de secano (cebada, trigo, girasol); olivo minoritario	Predominio de suelos básicos; enclaves ácidos en el norte; mayor pluviometría en Sistema Ibérico	Sistemas pastoriles y cerealistas; suelos ácidos-húmedos vs. básicos-secos

A partir de la zonificación provincial y de los criterios definidos (cultivo predominante, condicionantes edáficos y climáticos, régimen hídrico y potencial de manejo agrario), se ha procedido a la selección de municipios concretos en los que se considera adecuada la instalación de parcelas piloto para la investigación. La selección busca representar tanto la diversidad de cultivos como la heterogeneidad ambiental de Castilla-La Mancha, asegurando la cobertura de los principales sistemas productivos y contextos biofísicos de la región.

A continuación, se presenta la selección de términos municipales donde podrían ser potencialmente instaladas las parcelas iniciales para el desarrollo del proyecto:

- **Albacete:** Tobarra, Hellín, Fuente Álamo, Albacete, La Gineta, Barrax, Chinchilla de Monte Aragón, Villamalea, Cenizate, Alcaraz, Peñascosa, Vianos, Bienservida, Villapalacios.
- **Ciudad Real:** Ciudad Real, Tomelloso, Almuradiel, Viso del Marqués, Torre de Juan Abad, Villanueva de San Carlos, Puertollano, Castellar de Santiago, Almodóvar del Campo, Abenójar, Almadén, Saceruela.
- **Toledo:** Ajofrín, Mazarambroz, Nambroca, Orgaz, Sonseca, Mascaraque, Almonacid de Toledo, Argés, Burguillos de Toledo, Layos, Cobisa, Villaminaya.
- **Cuenca:** Iniesta, Ledaña, El Herrumblar, Cañada del Hoyo, Reíllo, Pajarón, Carboneras de Guadazaón, Fuentes, Arcas, Cuenca.
- **Guadalajara:** Villanueva de Alcorón, Peralejos de las Truchas, Checa.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La distribución espacial de estos municipios puede observarse en la siguiente cartografía (Figura 17), donde se representan las áreas seleccionadas para la investigación:

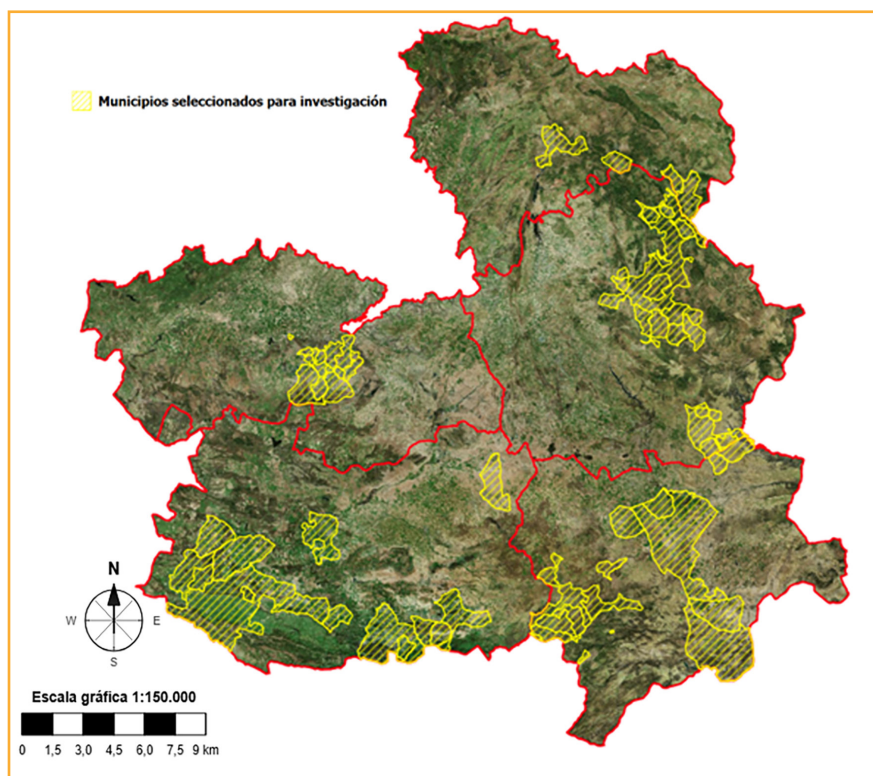


Figura 17. Municipios seleccionados para la instalación de parcelas iniciales de investigación en Castilla-La Mancha.

La zonificación agraria descrita anteriormente permitió definir un marco general de cultivos y condiciones ambientales a escala provincial. Como paso siguiente, se concretó la selección de municipios en los que instalar potenciales parcelas iniciales, con el fin de representar de forma equilibrada la diversidad de sistemas productivos y ambientales de Castilla-La Mancha. La caracterización de cada municipio se ha realizado en función de sus cultivos dominantes, las condiciones edáficas (pH del suelo), climáticas (pluviometría) y su potencial de muestreo en relación con la representatividad territorial.

A continuación se presentan una serie de tablas (**Tablas 7-II**) que incluyen los términos municipales seleccionados por provincias de Castilla-La Mancha para la instalación de parcelas iniciales referenciadas anteriormente, con indicación de cultivos dominantes, condiciones edáficas, climáticas y potencial de muestreo.

Tabla 7. Municipios seleccionados en la provincia de Albacete.

Municipio	Cultivos dominantes	Condiciones edáficas (pH)	Condiciones climáticas (pluviometría)	Potencial de muestreo
Tobarra	Almendro y pistacho; cereal de secano	Alcalino	300–400 mm (semiárido)	Leñosos emergentes en secano semiárido
Hellín	Almendro, olivo, herbáceos de secano	Ácido en zonas serranas; básico en llanuras	300–400 mm (semiárido)	Contraste suelos ácidos vs. básicos en leñosos
Fuente Álamo	Cereal de secano; viñedo	Alcalino	300–400 mm (semiárido)	Cereal y viñedo en suelos básicos
Albacete	Cereal, viñedo y almendro en expansión	Alcalino	300–400 mm (semiárido)	Cultivos mixtos en capital provincial representativa
La Gineta	Cereal de secano; viñedo	Alcalino	300–400 mm	Secano cerealista con viñedo asociado
Barrax	Cereal de secano; viñedo	Alcalino	300–400 mm	Agricultura extensiva cerealista representativa
Chinchilla de Monte Aragón	Cereal, almendro y olivo	Alcalino	300–400 mm	Cultivos mixtos en secano
Villamalea	Viñedo	Alcalino	400–500 mm	Viñedo de referencia en La Manchuela
Cenizate	Viñedo	Alcalino	400–500 mm	Viñedo representativo de La Manchuela
Alcaraz	Pastos y cereal de montaña	Ácido	600–800 mm (más húmedo)	Pastos y herbáceos en suelos ácidos de sierra
Peñascosa	Pastos y cereal	Ácido	600–800 mm	Sistema pastoril en sierra húmeda
Vianos	Pastos	Ácido	600–800 mm	Pastos permanentes en condiciones húmedas
Bienservida	Pastos y cereal de secano	Ácido	600–800 mm	Sistemas mixtos pastoriles en suelos ácidos
Villapalacios	Pastos y herbáceos	Ácido	600–800 mm	Sistemas extensivos de montaña representativos

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Tabla 8. Municipios seleccionados en la provincia de Ciudad Real.

Municipio	Cultivos dominantes	Condiciones edáficas (pH)	Condiciones climáticas (pluviometría)	Potencial de muestreo
Ciudad Real	Cereal, olivo y viñedo	Alcalino	300–400 mm	Cultivos mixtos en entorno semiárido
Tomelloso	Viñedo	Alcalino	300–400 mm	Viñedo en secano de La Mancha
Almuradiel	Pastos y cereal	Ácido	600–800 mm	Sistema extensivo en Sierra Morena
Viso del Marqués	Olivo y pastos	Ácido	600–800 mm	Olivares en Sierra Morena
Torre de Juan Abad	Olivo y cereal	Ácido/ Alcalino	600–800 mm	Olivares y cereal en piedemonte
Villanueva de San Carlos	Olivo y pastos	Ácido	600–800 mm	Olivo en sierra húmeda
Puertollano	Olivar, pastos	Ácido	600–800 mm	Olivo en zona minera y serrana
Castellar de Santiago	Olivo, cereal	Ácido/ Alcalino	600–800 mm	Olivares de montaña
Almodóvar del Campo	Olivar, cereal, pastos	Ácido	600–800 mm	Agricultura mixta en sierra
Abenójar	Pastos, cereal	Ácido	600–800 mm	Sistemas pastoriles
Almadén	Pastos y cereal	Ácido	600–800 mm	Extensivos en zona minera
Saceruela	Pastos y cereal	Ácido	600–800 mm	Sistemas mixtos pastoriles

Tabla 9. Municipios seleccionados en la provincia de Toledo.

Municipio	Cultivos dominantes	Condiciones edáficas (pH)	Condiciones climáticas (pluviometría)	Potencial de muestreo
Ajofrín	Olivar y cereal	Alcalino	300–400 mm	Olivares en campiña
Mazarambroz	Olivar, cereal	Alcalino	400–500 mm	Olivares en piedemonte de Montes de Toledo
Nambroca	Cereal y olivar	Alcalino	300–400 mm	Secano cerealista con olivar
Orgaz	Olivar y cereal	Alcalino	400–500 mm	Olivares y cereal representativos
Sonseca	Olivar	Alcalino	400–500 mm	Olivares tradicionales
Mascaraque	Cereal, olivar	Alcalino	300–400 mm	Secano cerealista
Almonacid de Toledo	Viñedo y cereal	Alcalino	300–400 mm	Viñedo en secano
Argés	Cereal, olivar	Alcalino	300–400 mm	Agricultura extensiva
Burguillos de Toledo	Cereal, olivar	Alcalino	300–400 mm	Secano cerealista
Layos	Cereal y pastos	Alcalino	300–400 mm	Sistemas mixtos de secano
Cobisa	Cereal y olivar	Alcalino	300–400 mm	Secano cerealista
Villaminaya	Cereal y olivar	Alcalino	300–400 mm	Secano extensivo

Tabla 10. Municipios seleccionados en la provincia de Cuenca.

Municipio	Cultivos dominantes	Condiciones edáficas (pH)	Condiciones climáticas (pluviometría)	Potencial de muestreo
Iniesta	Viñedo, cereal	Alcalino	400–500 mm	Viñedo y cereal en La Manchuela
Ledaña	Viñedo	Alcalino	400–500 mm	Viñedo representativo
El Herrumblar	Viñedo	Alcalino	400–500 mm	Viñedo tradicional
Cañada del Hoyo	Cereal, pastos	Ácido	600–800 mm	Extensivo en serranía húmeda
Reillo	Cereal, pastos	Ácido	600–800 mm	Agricultura extensiva en sierra
Pajarón	Pastos y cereal	Ácido	600–800 mm	Sistema pastoril
Carboneras de Guadazaón	Pastos, cereal	Ácido	600–800 mm	Sistemas mixtos
Fuentes	Cereal y viñedo	Alcalino	400–500 mm	Cereal y viñedo en secano
Arcas	Cereal, viñedo	Alcalino	400–500 mm	Agricultura extensiva
Cuenca	Cereal, viñedo	Alcalino /Ácido	400–600 mm	Mixto en entorno urbano y serrano

Tabla 11. Municipios seleccionados en la provincia de Guadalajara.

Municipio	Cultivos dominantes	Condiciones edáficas (pH)	Condiciones climáticas (pluviometría)	Potencial de muestreo
Villanueva de Alcorón	Pastos permanentes	Ácido	600–800 mm	Sistemas pastoriles en Sistema Ibérico
Peralejos de las Truchas	Pastos, cereal	Ácido	800–1000 mm	Sistemas húmedos de montaña
Checa	Pastos permanentes	Ácido	800–1000 mm	Pastos húmedos de alta montaña

3.3.6. Visitas de Campo y Validación

Las visitas de campo constituyen un componente esencial para garantizar la validez, representatividad y trazabilidad de la zonificación agraria elaborada mediante SIG. Su finalidad es contrastar la información cartográfica con la realidad productiva y ambiental observada en el territorio, de modo que las parcelas finalmente seleccionadas respondan no solo a criterios espaciales, sino también a condiciones agronómicas, logísticas y de gestión verificadas in situ.

Estas campañas de validación permitirán superar las limitaciones inherentes al análisis cartográfico y asegurar que la red de parcelas piloto cumpla los estándares de calidad científica y comparabilidad exigidos para un seguimiento a medio y largo plazo.

Durante las campañas de validación se llevarán a cabo las siguientes actividades principales:

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- Cobertura vegetal observada. Se verificará la correspondencia entre el uso del suelo indicado en el SIGPAC y la cobertura vegetal real de cada parcela (cereal, viñedo, olivar, frutos secos, pastos, etc.), registrando además posibles cultivos secundarios o transitorios.
- Registro de prácticas de manejo agrícola. Se documentarán las prácticas aplicadas en cada explotación con el fin de disponer de información precisa para el análisis de carbono en suelo y su relación con los eco-regímenes de la PAC.
- Evaluación de accesibilidad y restricciones. Se valorará la facilidad de acceso a las parcelas seleccionadas, así como la existencia de limitaciones de uso (propiedad, infraestructuras, relieve, conservación ambiental), determinando su idoneidad para la instalación de parcelas piloto y el seguimiento a largo plazo.
- Documentación fotográfica y fichas normalizadas. Se realizará un registro visual estandarizado de cada parcela, acompañado de fichas de campo que recojan datos agronómicos, ambientales y de gestión. Esta información será integrada en la base de datos general del proyecto para su análisis conjunto.

En definitiva, estas visitas no solo validarán la zonificación previa, sino que ayudarán a obtener una imagen mucho más ajustada de los sistemas agrícolas de Castilla-La Mancha, facilitando la elección de parcelas realmente representativas para el estudio del carbono en los suelos. Para el adecuado registro de las parcelas se ha diseñado una ficha de recogida de información que se presenta en el Anexo IV. Esta ficha de recogida de información pretende garantizar un registro homogéneo durante las visitas de campo. Incluye datos de identificación de la parcela (localización, accesibilidad), cobertura y uso del suelo, prácticas de manejo agrario (secano/regadío, convencional/ecológico, uso de cubiertas, siembra directa, rotaciones), así como observaciones ambientales y documentación fotográfica. Este formato facilita la comparación entre parcelas y la posterior integración de los datos en la base común del proyecto.

3.3.7. Conclusiones y Recomendaciones

El proceso de zonificación agraria realizado ha permitido identificar de forma representativa los principales sistemas productivos de Castilla-La Mancha, asociándolos a municipios concretos y considerando tanto los cultivos dominantes como los condicionantes edafoclimáticos. Esta aproximación constituye una base sólida sobre la que planificar la instalación de parcelas preliminares y avanzar hacia una evaluación más detallada del carbono en suelos agrícolas de la región.

La zonificación ofrece, además, un marco de referencia útil para distintas líneas de trabajo futuro, como la evaluación de servicios ecosistémicos, el análisis de la biodiversidad asociada a los agroecosistemas, la cuantificación del carbono y la fertilidad de los suelos o la realización de ensayos comparativos entre diferentes sistemas de manejo (convencional vs. ecológico, secano vs. regadío).

De cara a los siguientes pasos, se recomienda completar la validación mediante visitas de campo, que permitan contrastar la información derivada del SIG con observaciones directas sobre la cobertura real de cultivos, las prácticas de manejo y las condiciones de accesibilidad de las parcelas seleccionadas. Asimismo, resulta conveniente reforzar el análisis con

la incorporación de datos procedentes de teledetección (índices NDVI, series temporales satelitales) y con variables climáticas de mayor resolución espacial, de manera que se pueda realizar un seguimiento más preciso de la evolución de los cultivos y su impacto en el secuestro de carbono.

Conviene subrayar, sin embargo, que la zonificación actual tiene un carácter preliminar y que, para ganar precisión, será necesario complementar la información disponible con las siguientes necesidades y acciones:

- Datos de manejo agrícola reales, obtenidos directamente de los agricultores, que permitan diferenciar entre sistemas de cultivo en función de las prácticas aplicadas.
- Muestreos de suelo más detallados y profundos, que vayan más allá del horizonte superficial (0–10 cm) y alcancen hasta 30 cm, donde se acumula una fracción significativa del carbono.
- Variables climáticas y de productividad de alta resolución, que ayuden a discriminar zonas de estrés hídrico o mayor potencial de biomasa.
- Series de teledetección (NDVI, Sentinel-2, Landsat), que aporten información dinámica sobre la cobertura vegetal y su evolución temporal.
- Factores socioeconómicos y de accesibilidad, que garanticen la viabilidad práctica de las parcelas a la hora de realizar el seguimiento.

La integración de estas fuentes de información permitirá afinar la representatividad de la zonificación y dotar al proyecto de una red de parcelas piloto robusta, sobre la cual fundamentar evaluaciones sólidas del secuestro de carbono en suelos agrícolas y su potencial vinculación con los eco-regímenes de la PAC y con mercados de servicios ecosistémicos. No obstante, es importante señalar que la zonificación presentada tiene un carácter preliminar. Para alcanzar un mayor nivel de precisión será necesario complementar la información disponible con datos de manejo agrícola reales, obtenidos directamente de los agricultores, y con muestreos de suelo más detallados

3.4. Diseño metodológico de muestreos de campo para la evaluación de servicios ecosistémicos, con especial énfasis en la estimación de stock y capacidad de secuestro de Carbono.

3.4.1. Introducción y objetivos

Una vez recopilada la información normativa analizada en la Actuación 1, las experiencias de proyectos previos, tanto a nivel de Castilla-La Mancha como nacionales y europeas (Actuación 2), y de la zonificación y cartografía realizada en la Actuación , el siguiente paso es formular propuestas concretas para que Castilla-La Mancha pueda desarrollar metodologías científicamente sólidas y alineadas con las principales directrices europeas y nacionales en cuanto a la caracterización, evaluación, monitorización, validación y certificación de la capacidad de los suelos castellano-manchegos de absorber y almacenar carbono atmosférico.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

3.4.2. Diseño del protocolo técnico estandarizado para muestreos de suelos en parcelas tipo de cultivos representativos seleccionados.

El monitoreo del suelo se define como una determinación sistemática de las variables del suelo que se utilizan para registrar sus cambios temporales y espaciales, y es esencial para la evaluación de la salud del suelo y la implementación de una política de gestión eficaz y sostenible del suelo. Como se ha comentado a lo largo de este proyecto, la futura Ley de Vigilancia del suelo de la UE (EU Soil Monitoring Law) solicitará a los Estados miembros que monitoreen e informen sobre el estado de sus suelos, proporcionando un marco legal para establecer un sistema de monitoreo de suelos a nivel europeo. Además, junto con la publicación de la Ley se aprobará el protocolo oficial y obligatorio para evaluar el COS utilizando metodologías armonizadas de muestreo y análisis, alineado con los protocolos de evaluación de carbono del suelo del IPCC, LUCAS, etc.

Recientemente (finales de mayo de 2025) se han publicado tres protocolos integrales de muestreo de suelos, desarrollados en el marco del proyecto Soil Health BENCHMARKS, financiado por la UE a través del programa Horizon Europe. Estos protocolos tienen como objetivo la estandarización del monitoreo de la salud del suelo en Europa. Los tres protocolos, adaptados a los usos del suelo urbano, agrícola y forestal, buscan armonizar la evaluación de la salud del suelo en diferentes entornos.

El proyecto BENCHMARKS está validando un marco de monitoreo de la salud del suelo en 28 sitios de muestreo de suelos en toda Europa, abordando la necesidad urgente de armonizar métodos consistentes y con base científica para monitorear los cambios en la salud del suelo. Estos protocolos proporcionan una guía práctica para el muestreo de campo, el procesamiento y el análisis de indicadores de la salud del suelo, como la biodiversidad, el contenido de nutrientes, la estructura y los niveles de contaminación.

Creemos que estos protocolos serán adoptados, total o parcialmente, por la futura Ley Europea de Vigilancia del Suelo y que España tendrá que transponer y adoptar a la normativa nacional, y por tanto cualquier iniciativa a nivel regional para monitorizar la salud y los servicios ecosistémicos del suelo que se lleve a cabo antes de la transposición a la normativa nacional de la futura Ley europea debe estar alineada con estos protocolos y contemplar los indicadores recogidos en estos protocolos.

Para la caracterización básica se seleccionarán un conjunto de indicadores (físicos, químicos y biológicos) de la salud del suelo para su análisis. De esta forma, toda la información obtenida servirá para complementar las bases de datos a nivel nacional, en línea con las directrices de monitorización que se exigirán desde Europa a través de la entrada en vigor de la futura Ley de Vigilancia del Suelo y para estudios de modelizado a nivel regional de las dinámicas de cambio del carbono en suelo. Además, la selección de estos indicadores no se limita únicamente a la estimación de carbono, sino que ofrece una base sólida para evaluar de manera integrada otros servicios ecosistémicos asociados al suelo y a la actividad agrícola, aprovechando de esta forma el trabajo que se realice para el futuro próximo. Por ejemplo, los agregados y la textura, además de estar implicados en la capacidad de secuestro de COS, están estrechamente relacionados con la regulación hídrica y la prevención de la erosión. De igual modo, otros indicadores ya seleccionados, como la materia orgánica, la respiración microbiana o la actividad enzimática, aportan información que resulta clave para la fertilidad, la biodiversidad edáfica y la resiliencia frente al cambio climático. Por lo tanto, los mismos parámetros que se van a emplear en la estimación de carbono podrán servir como

base para la evaluación de un conjunto más amplio de servicios ecosistémicos, facilitando su futura integración en esquemas de pago por servicios ecosistémicos vinculados a la agricultura. En este sentido, la utilización de indicadores multifuncionales permitirá que los agricultores puedan beneficiarse no solo de la valorización del carbono, sino también de la compensación por la provisión de otros servicios ambientales reconocidos en el marco de la PAC y de los mercados voluntarios emergentes.

Tabla 12. Relación de indicadores físicos, químicos y biológicos considerados en el proyecto, junto con los métodos empleados para su análisis.

Tipo de indicador	Método
Indicadores químicos	
Carbono orgánico del suelo (COS)	Combustión seca a 900-1500 ° C
Capacidad de intercambio catiónico	Extracción en 0.1 mol/l BaCl ₂ , seguido de espectroscopía
Conductividad eléctrica	Electrodo metálico
pH	Electrodo de vidrio
Nutrientes (N total, P y K)	Diferentes técnicas de extracción
Carbono activo	Termogravimetría
Indicadores físicos	
Textura (incl. Pedregosidad)	Masa-volumen de cilindros de suelo
Agregados (fracciones)	Tamizado en húmedo
Densidad aparente	Gravimetría (cilindro)
Punto de marchitamiento y capacidad de campo	HYPROP2
Potencial hídrico del suelo	Infiltrómetro
Indicadores biológicos	
Biomasa microbiana de CNP	Incubación anaeróbica
Abundancia de bacterias	qPCR de marcadores 16S
Abundancia de hongos	qPCR de marcadores 18S
Actividad enzimática extracelular	Diferentes técnicas de determinación
Respiración suelo	IRGA

A continuación, se detallan los pasos para la recogida de muestras de suelo para la determinación de los indicadores del suelo propuestos:

3.4.2.1. Definición del área de muestreo

Determinar el punto georreferenciado con un dispositivo GPS o SIG y marcarlo con una estaca. Para delimitar el área de muestreo, fijar un extremo de una cinta métrica al punto georreferenciado y usarla para dibujar un círculo de 1 m de radio alrededor del punto central. Con una brújula, defina los tres puntos cardinales (norte, este, sur) con estacas individuales para facilitar los protocolos de muestreo específicos: el muestreo de mesofauna en el lado norte del círculo, el muestreo hidráulico en el lado sur y el muestreo de lombrices y densidad aparente en el lado este (**Figura 18**). En nuestro caso, los más relevantes son el muestreo de suelo a granel (bulk soil) y el muestreo de la densidad aparente (bulk density).

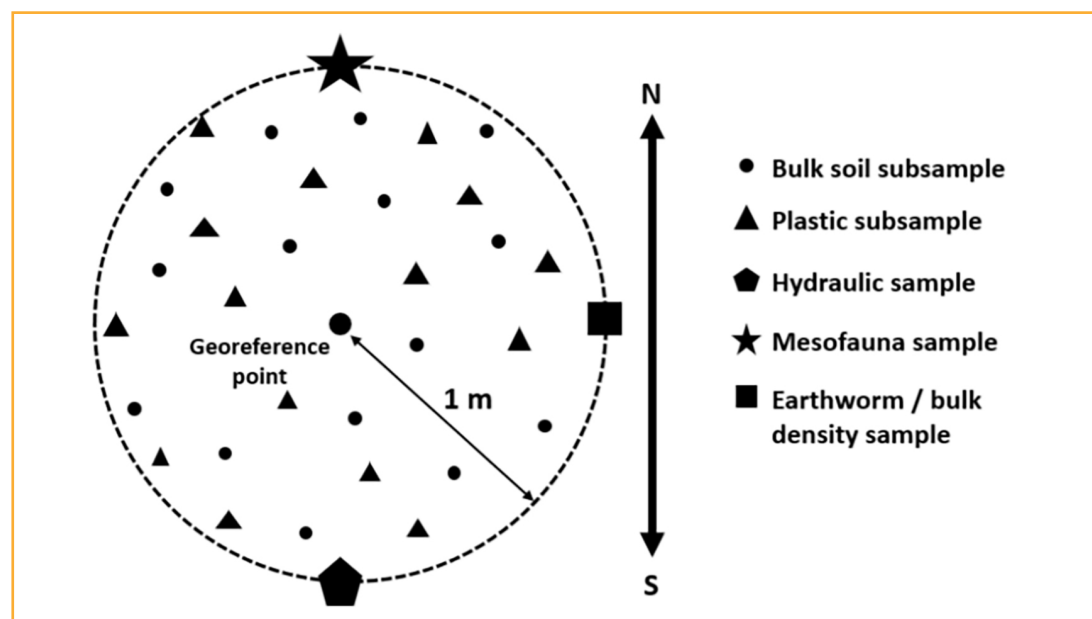


Figura 18. Enfoque de muestreo de BENCHMARKS. La muestra compuesta de suelo a granel (bulk soil), compuesta por 15 submuestras, se muestrea aleatoriamente dentro de un círculo de 1 m de radio. La muestra de densidad aparente en el lado este. Fuente: Symanczik et al. (2025).

3.4.2.2. Protocolo de muestreo de suelo a granel

Se toma una muestra compuesta de suelo a granel de aproximadamente 2 kg en cada punto de muestreo. La muestra compuesta consta de al menos 15 submuestras tomadas con una barrena o sacatestigos (de 3 a 5 cm de diámetro) aleatoriamente dentro del área de muestreo, a una profundidad de 0 a 20 cm en sistemas agrícolas.

Antes de tomar cualquier submuestra de suelo, retirar la vegetación, hojarasca, piedras, etc. de la superficie. Recoger las submuestras de suelo, separarlos con un cuchillo según la profundidad de muestreo requerida y colocar cada capa en una bolsa de plástico etiquetada correspondiente. Repetir este procedimiento hasta que se hayan recolectado todas las submuestras. Para el transporte, colocar la bolsa etiquetada con las 15 submuestras de aprox. 2 kg dentro de otra bolsa de plástico etiquetada para evitar perder la identificación de las muestras. Transportar las muestras en una caja refrigerada con paquetes de hielo, pero evitar colocarlas directamente sobre los paquetes de hielo (agregar una capa de material aislante).

Para evitar la contaminación cruzada de las muestras, usar siempre guantes de laboratorio al tocar el suelo y el equipo, y tratar de tocar el suelo lo menos posible. El equipo de muestreo debe limpiarse con agua, desinfectar con alcohol al 70% y secarse con papel de seda después de cada muestra compuesta. Además, se desechará el primer núcleo de suelo tomado en un nuevo sitio de muestreo.

3.4.2.3. Protocolo de muestreo de densidad aparente

En el lado este del área de muestreo, excavar un cuadrado de 20 cm x 20 cm x 20 cm con una pala y transfíralo a una bolsa o bandeja de plástico negra grande. Realizar una evaluación básica de la textura del suelo siguiendo las directrices de la FAO (FAO 2006). A

continuación, cubrir el exterior de un cilindro metálico (5 cm de diámetro x 5 cm de altura, 100 cm³ de volumen) con una capa muy fina de vaselina o grasa (solo si es necesario para facilitar la penetración del suelo). Introducir el cilindro horizontalmente en el suelo a los 10 cm de profundidad utilizando un taco de madera y un mazo (Figura 19). Una vez que el cilindro esté completamente insertado, retirar la tierra circundante con cuidado y delicadeza. Extraer el cilindro utilizando una pala o azada debajo si es necesario. Recortar el exceso de tierra que sobresalga de cada extremo del cilindro con un cuchillo recto. Transferir los cilindros a una bolsa de plástico etiquetada y empaquetar cada muestra dos veces (coloque la bolsa etiquetada dentro de otra bolsa de plástico para evitar perder la etiqueta en caso de que se desprenda de la bolsa).

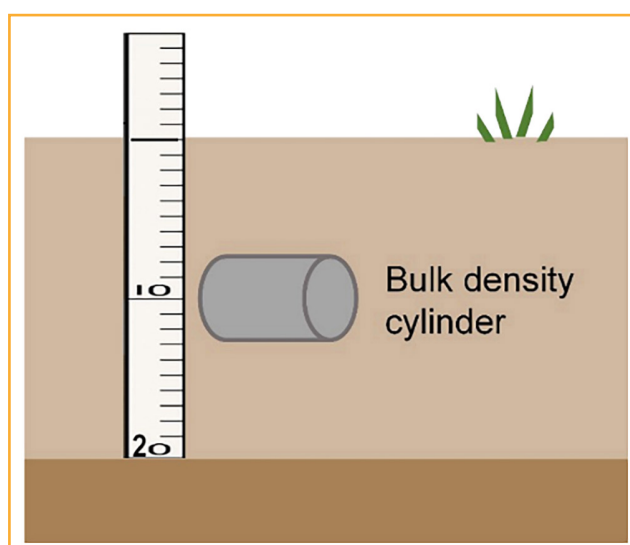


Figura 19. El cilindro de densidad aparente se inserta horizontalmente en el punto medio en el cubo de 20 cm x 20 cm x 20 cm. Fuente: Symanczik et al. (2025).

3.4.2.4 Procesamiento, almacenamiento y envío de muestras

El método de recogida y conservación de muestras se ha adaptado específicamente a los indicadores seleccionados en el proyecto, diferenciando entre los de carácter químico, físico y biológico. El procesamiento de las muestras de suelo a granel debe realizarse a más tardar el día después del muestreo (preferiblemente el mismo día) y si no fuera posible deberá ser almacenado en frío a una temperatura de 4°C. Romper con cuidado los agregados gruesos de suelo y mezclarlos para obtener una submuestra homogénea de 150 g para los análisis de estabilidad de los agregados y de 500 g para los análisis químicos (conservar a 4 °C hasta su envío por correo ordinario y una muestra de respaldo de 200 g (conservar localmente a 4 °C). Tamizar una submuestra de 500 g a 2 mm, o a 5 mm para suelos arcillosos y de turba, 200 g serán destinados a análisis enzimáticos y de biomasa bacteriana y fungica y 200 g para análisis microbiológicos. Enviar las muestras frescas tamizadas inmediatamente por correo urgente en una caja de poliestireno/termo llena de compresas frías por mensajería urgente. Tomar una submuestra de 10 a 20 g para análisis moleculares en un tubo de reacción de 15 ml o más. No compactar la tierra en el tubo. Fijar la etiqueta adicionalmente con cinta adhesiva transparente o escribir el ID de la muestra a mano en el tubo, ya que las etiquetas tienden a desprenderse al congelarse (almacenar a -20 °C, envío urgente con hielo seco). Si es posible, liofilizar las muestras y enviarlas por correo postal. Tomar una muestra de respaldo

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

de 20 a 30 g y almacenar localmente a -20 °C. Secar el resto de la tierra al aire a un máximo de 30 °C durante 48 h o más si es necesario.

Detalles a tener en cuenta:

Para garantizar que la muestra obtenida sea representativa de cada parcela, es necesario que las submuestras de suelo distribuidas de forma uniforme y de la misma forma en todas las parcelas. Posteriormente se procederá a su homogenización. La toma debe realizarse evitando zonas anómalas (bordes de caminos, rodadas o acumulaciones de enmiendas) que puedan sesgar los resultados.

Para el caso de los indicadores químicos (pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico del suelo, capacidad de intercambio catiónico, nutrientes y carbono activo), las muestras se recogen en bolsas de plástico limpias y se secan al aire en el laboratorio a temperatura ambiente (< 30 °C) para evitar pérdidas de carbono. Una vez secas, la muestra será tamizada a 2 mm y posteriormente una parte de esta será molida finamente, conservándose ambas en recipientes herméticos en condiciones de baja humedad y ausencia de luz hasta su análisis.

Los indicadores físicos (textura, fracciones de agregados, densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez, potencial hídrico) requieren procedimientos más específicos. Para la densidad aparente se utilizan cilindros de volumen conocido como se indica anteriormente, que deben extraerse con cuidado para no alterar la estructura. Los análisis de agregados y textura se realizan a partir de muestras sueltas, almacenadas en bolsas, evitando su compactación. En aquellos casos en que sea necesario conservar la estructura, como en los estudios de capacidad de campo, los cilindros se sellan inmediatamente tras la extracción para mantener la humedad natural.

Para la determinación de los indicadores biológicos (biomasa microbiana, respiración, actividad enzimática y abundancia relativa de bacterias y hongos) se basan en la recogida de suelo fresco, en bolsas o tubos estériles, evitando cualquier contaminación externa. Es necesario que para manipular estas muestras trabajemos con la máxima esterilidad, utilizando guantes de nitrilo y desinfectando las manos y materiales utilizados constantemente. Es muy importante que una parte de estas muestras se transporten refrigeradas a 4 °C hasta el laboratorio y deben ser procesadas en un plazo máximo de 48 horas. Específicamente, en el caso de las muestras destinadas a análisis moleculares como la secuenciación o la qPCR, cuando no es posible proceder a su análisis inmediato, estas se conservan congeladas a -20 °C o, preferiblemente, a -80 °C según el tipo de determinación requerida. En todos los casos es fundamental evitar los ciclos repetidos de congelación y descongelación, ya que comprometen la integridad del ADN y la fiabilidad de los resultados.

Almacenar los núcleos de suelo del muestreo de densidad aparente en la cámara frigorífica durante un máximo de una semana hasta su posterior procesamiento. Pesar el cilindro para determinar el peso fresco del suelo (mf) y colocar en un horno a 105 °C durante 48 h hasta alcanzar una masa constante. Transferir los cilindros del horno al desecador y dejar enfriar durante 4 h. Pesar los cilindros después de retirarlos del desecador (mt). Retirar el suelo, limpiar el cilindro y pesar el cilindro vacío (ms). Calcular la densidad aparente de la siguiente manera:

$$\rho \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = (\text{mt}-\text{ms})/\text{V.}$$

3.4.2.5 Cuantificación de la variación del COS en suelo

El contenido y la variación de COS se estimará siguiendo el enfoque de Poeplau et al. (2017):

$$\text{COS}_c = \text{COS}(\%) \times \text{DA} \times \text{Prof} \times (1-S)$$

donde COS_c es el contenido de carbono orgánico del suelo, COS (%) es el porcentaje de COS, DA es la densidad aparente, Prof (cm) es la profundidad de muestreo y se establece en 20 según el protocolo BENCHMARKS, y S es la proporción de la fracción volumétrica de fragmentos gruesos según Pacini et al., 2023. Las diferencias en la porosidad y las reservas de COS entre las clases de nivel de COS para cada métrica se evaluaron mediante las pruebas de Kruskal-Wallis y la prueba post hoc de Wilcoxon por pares, con una significancia evaluada en $\alpha = 0,05$ para ambas pruebas. (Feeney et al., 2024).

Para calcular la variación del COS en un intervalo de tiempo, se suele utilizar la siguiente fórmula:

$$\Delta \text{COS}_c = \frac{(\text{COS}_{ct2} - \text{COS}_{ct1})}{Y_{t2} - Y_{t1}}$$

donde ΔCOS_c es la variación en el contenido de carbono del suelo, en g kg⁻¹ año⁻¹, en el período de tiempo considerado, COS_{ct2} y COS_{ct1} son el contenido de carbono orgánico del suelo al final y al principio del periodo considerado, respectivamente, y Y_{t2} y Y_{t1} son el año final e inicial del período considerado, respectivamente (De Rosa et al., 2024).

3.4.3. Diseño para cuantificación del stock de carbono en biomasa vegetal

La regulación europea sobre eliminación de carbono y agricultura de carbono, conocida como el Reglamento CRCF (comentada en el apartado 3.1.2) establece un marco voluntario para certificar de estas actividades en toda la UE, y que busca fomentar la inversión en soluciones innovadoras y sostenibles para la captura y almacenamiento de carbono en los suelos agrícolas evitando así que sea emitido a la atmosfera en forma de CO₂, así como crear nuevas oportunidades de ingresos extras para los agricultores y administradores de tierras, complementando así los pagos de la PAC. Los agricultores podrán obtener certificados de carbono (referidos como *créditos de carbono*, o *carbon tokens*) mediante la implementación de buenas prácticas (agricultura de carbono) siempre y cuando el beneficio de estas prácticas dure al menos 5 años.

Se debe tener en cuenta que las actividades como la biomasa agrícola, que ya almacena carbono en la actualidad, no están incluidas en el ámbito de aplicación del Reglamento, y solo lo estarán aquellas que impliquen secuestro adicional respecto de las líneas base que se establezcan. Por ello, para este proyecto no hemos propuesto ninguna metodología para cuantificar el carbono de la biomasa vegetal de cultivos agrícolas (principalmente los cultivos perennes leñosos), ya que el secuestro de carbono por esa vía (biomasa) no sería elegible para obtener créditos de carbono.

A fecha de hoy no existen organismos de certificación independientes totalmente operativos que hayan sido aprobados para certificar créditos de carbono en actividades como

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

la agricultura de carbono. A pesar de haberse adoptado oficialmente en diciembre de 2024, todavía no se ha publicado las metodologías de certificación, que están siendo desarrolladas mediante actos delegados, y la Comisión Europea está preparando un Acto de Implementación para publicar estas reglas de verificación.

En esta línea, el proyecto CREDIBLE, financiado por la Unión Europea a través del programa Horizonte Europa, tiene como objetivo desarrollar la metodología para implementar los mercados de la agricultura de carbono y avanzar en los pagos por este servicio ecosistémico, articulando y apoyándose en otras políticas como la PAC. Entidades como las Cooperativas Agroalimentarias de España está participando en este proyecto y por tanto es recomendable que los técnicos de la Consejería de Agricultura, Agua y Desarrollo Rural mantengan contacto estrecho con esta asociación, o mejor todavía evalúen la participación directa en el proyecto CREDIBLE, con el fin de conocer de primera mano los detalles de la implementación de este mercado emergente y así poder trasladarlo con las mejores garantías a los agricultores de la región.

Además, otras iniciativas europeas, como la iniciativa 4por1000 (descrita en el apartado 4.1.2.2) también ofrece orientación y guía en cuanto a la certificación, interpretación de las normas y directrices que la UE va aprobando al respecto y qué organismos independientes se encargan de verificar los resultados y cómo los agricultores y otros administradores de tierras se pueden acoger a este Reglamento y obtener pagos adicionales por ello. Volvemos a animar a los técnicos de la Consejería Agricultura, Agua y Desarrollo Rural a participar en este tipo de iniciativas e insistimos y recomendamos la importancia de estar alineados con estas iniciativas de cara a obtener de primera mano la información más reciente.

3.5. Diseño de infraestructura IoT. Diseño metodológico de un sistema de sensores IoT y datos satelitales para el análisis funcional del suelo y cultivos tipo seleccionados.

3.5.1. Introducción y Objetivos

La cuantificación del carbono en suelos agrícolas ha experimentado una notable evolución en las últimas décadas. Las primeras aproximaciones se basaban en inventarios generales apoyados en cartografía edafológica y en factores por defecto propuestos por el IPCC. Posteriormente, la investigación avanzó hacia modelos de procesos más sofisticados (como RothC o Century) y hacia el uso de bases de datos georreferenciadas. No obstante, cuando estas metodologías se aplican a escala regional siguen existiendo limitaciones significativas: los datos de entrada disponibles son escasos y desactualizados, los muestreos de campo resultan puntuales y poco representativos, y apenas existen series temporales que permitan comprender la dinámica del carbono a medio y largo plazo.

En España, distintos proyectos han tratado de paliar estas carencias. El Mapa de Carbono Orgánico del Suelo (MITECO, 2022) y el proyecto MAPA-PAC, actualmente en ejecución, constituyen hitos importantes, al igual que estudios de referencia como el de Rodríguez Martín et al. (2016). Sin embargo, todos ellos presentan una resolución espacial insuficiente y carecen de la capacidad para capturar la variabilidad interanual asociada a las prácticas de manejo agrícola, especialmente en suelos de Castilla-La Mancha. A nivel autonómico, comunidades como Andalucía, Cataluña o Navarra ya han comenzado a desarrollar metodologías propias, incorporando inventarios regionales, prácticas de manejo e incluso esquemas de verificación asociados a la agricultura de carbono.

Paralelamente, los avances tecnológicos en sensores de campo, redes de comunicación IoT y teledetección satelital han abierto nuevas posibilidades. Experiencias internacionales de agricultura de precisión y proyectos europeos orientados a los servicios ecosistémicos han demostrado el valor de combinar mediciones in situ, datos de observación remota y modelización de procesos para evaluar los stocks y flujos de carbono en suelos agrícolas.

En este contexto, Castilla-La Mancha parte de una situación en la que no existen aún redes sistemáticas de monitorización digital del carbono agrícola, lo que refuerza la necesidad de implantar una infraestructura IoT que complemente los inventarios nacionales y permita alinear los resultados regionales con los requerimientos europeos de la PAC y de la Estrategia de Suelos 2030.

La incorporación de tecnologías IoT supone un cambio de paradigma. Un sistema de este tipo integra sensores distribuidos en campo, redes de comunicación de bajo consumo, plataformas de gestión en la nube y herramientas de análisis avanzado, ofreciendo monitorización continua del estado del suelo y de los cultivos. La complementariedad con la teledetección (satelital o mediante drones) multiplica la capacidad de escalar la información, desde la parcela individual hasta toda la región, generando bases de datos homogéneas, verificables y útiles para la planificación y la toma de decisiones.

Castilla-La Mancha, con su elevado peso de cultivos leñosos (viñedo, olivar, almendro, pistacho) y herbáceos de secano, tiene la oportunidad de posicionarse a la vanguardia nacional en el desarrollo de una infraestructura digital de seguimiento del carbono en suelos agrícolas, alineada con los inventarios nacionales y con metodologías estandarizadas europeas. Esta infraestructura permitirá no solo cuantificar y verificar el secuestro de carbono agrícola, sino también generar valor añadido para los agricultores y técnicos, facilitando el acceso a eco-regímenes, potenciando esquemas de pagos por servicios ecosistémicos y consolidando un modelo agrario más sostenible y competitivo en el escenario europeo.

Por tanto, el principal objetivo de este apartado es diseñar un sistema IoT (Internet of Things) adaptado a la realidad agrícola de Castilla-La Mancha, que permita la monitorización continua y regionalizada de los suelos y cultivos para los siguientes propósitos:

- Cuantificar el secuestro de carbono agrícola en la capa superficial (0–20 cm), siguiendo las metodologías europeas y las exigencias de la nueva PAC.
- Caracterizar en tiempo real el estado edáfico y agronómico (humedad, temperatura, potencial hídrico, cobertura, flujos de CO₂) y vincularlo a las prácticas de manejo (laboreo, cubiertas vegetales, rotaciones, fertilización orgánica, riego).
- Generar indicadores verificables (SOC, ΔSOC anual, intensidad de manejo) que faciliten el reporte ante la PAC, la planificación regional y la posible implementación de esquemas de pagos por servicios ecosistémicos, especialmente centrado en el secuestro de carbono en cultivos agrícolas.
- Integrar datos multifuente (sensores in situ, teledetección satelital y dron, modelos de carbono como RothC, Century, etc.) en una plataforma interoperable que permita convertir la información en mapas, series temporales y reportes adaptados a técnicos, agricultores y administraciones.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- Reforzar la capacidad regional para anticiparse a los requerimientos de la UE en materia de agricultura de carbono, contribuyendo a un modelo agrario más sostenible, resiliente y competitivo.
- Validación de un sistema metodológico integral para la evaluación funcional del suelo agrícola y su contenido de carbono en explotaciones reales de Castilla y La Mancha.

3.5.2. Metodología para el diseño del IoT aplicado al caso de suelos agrícolas

La metodología propuesta para el diseño de una infraestructura IoT orientada al análisis funcional del suelo y cultivos agrícolas en Castilla-La Mancha se basa en la identificación, medición y seguimiento de variables clave que determinan el secuestro de carbono en los suelos y cultivos agrícolas. Estas variables abarcan tanto parámetros edáficos como vegetales, ya que el carbono orgánico del suelo depende de la interacción entre las propiedades intrínsecas del medio y las entradas de biomasa procedentes de los cultivos y de las prácticas de manejo aplicadas. Y el de la vegetación dependerá del tipo de cultivo y manejo realizado. La selección de indicadores responde a criterios científicos reconocidos por el IPCC y por los eco-regímenes de la PAC, y se centra en aquellos parámetros que pueden ser medidos de forma fiable mediante sensores in situ, teledetección o muestreo de campo. Este enfoque permite garantizar la generación de datos comparables, escalables y directamente aplicables a la evaluación de la agricultura de carbono en Castilla-La Mancha.

El sistema IoT se concibe como una red de sensores in situ (humedad, temperatura, conductividad, potencial hídrico, flujos de CO₂, espectroscopía NIR/MIR) combinados con fuentes de teledetección (sensores remotos vía satélite y dron). Estos dispositivos capturan datos de alta resolución espacial y temporal, que se transmiten en tiempo real mediante tecnologías de comunicación de bajo consumo (LoRaWAN, NB-IoT) hacia una plataforma centralizada. La infraestructura integra además protocolos de control de calidad, almacenamiento en bases de datos georreferenciadas y herramientas analíticas (modelos de carbono como RothC, BENCHMAKS, LUCAS, etc), lo que permite transformar los registros brutos en indicadores clave para la PAC, como el stock de carbono a 20-30 cm de profundidad, las tasas anuales de cambio y el impacto de las prácticas agrarias.

La metodología se fundamenta en tres principios rectores: (i) complementariedad de fuentes (sensores IoT, muestreo de suelo y datos satelitales), (ii) trazabilidad y verificación (protocolos MRV exigidos por la UE para créditos de carbono), y (iii) escalabilidad territorial, garantizando que la información pueda usarse tanto a escala de parcela como de región.

El sistema integra sensores IoT, análisis físicos, químicos y biológicos de suelo, así como teledetección aérea y satelital. Se incorporarán indicadores clave como: carbono orgánico total, fracciones de carbono particulado y mineral asociado, respiración basal, biomasa microbiana, infiltración, estabilidad de agregados, índices espectrales (NDVI, NDMI, PRI), y parámetros climáticos (precipitación, evapotranspiración, radiación). Este conjunto de variables permitirá evaluar no solo el stock de carbono, sino también la salud y funcionalidad global del suelo. La finalidad es generar indicadores fiables, extrapolables y aplicables que permitan justificar prácticas sostenibles ante los eco-regímenes de la PAC y avanzar en la digitalización agroambiental para la evaluación de servicios ecosistémicos (Figura 20).

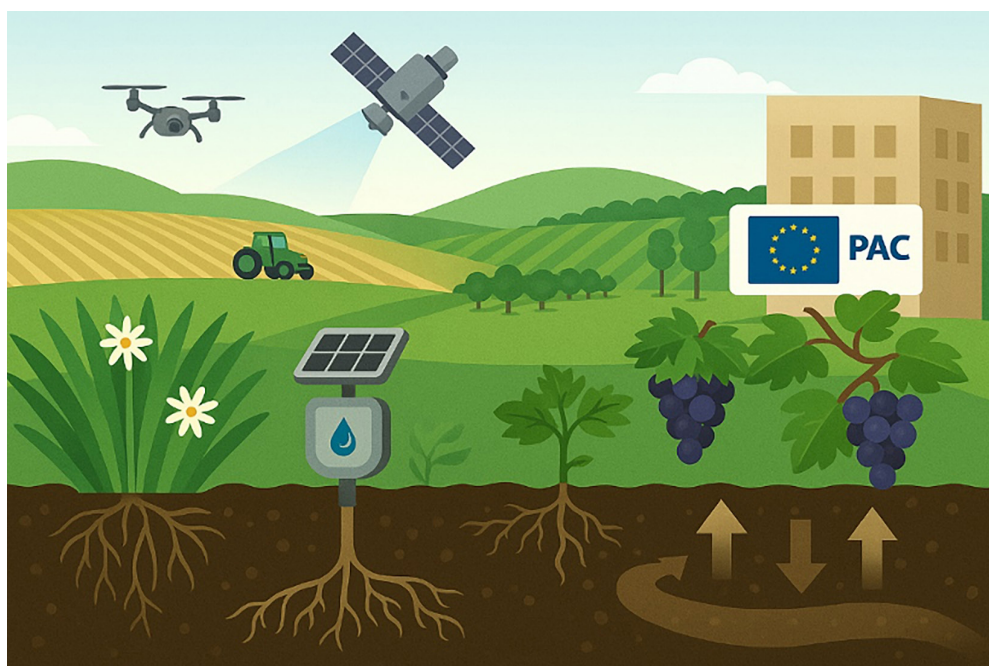


Figura 20. Resumen visual del sistema: integración de sensores, teledetección y análisis del suelo para evaluar su salud, los servicios ecosistémicos y la fijación de carbono, en el marco de los requerimientos de la PAC.

La investigación se desarrollará en varias fases, cada una centrada en validar la utilidad del sistema en condiciones reales de explotación, bajo un diseño previo para la monitorización, integración de datos y validación (Figura 21):

- Selección de parcelas agrícolas
 - Se identifican parcelas representativas de los principales cultivos de Castilla-La Mancha (cereales de secano, viñedo, olivar, almendro, pistacho y regadío).
 - La selección responde a criterios de diversidad edafoclimática y de prácticas de manejo, de forma que los resultados sean extrapolables a escala regional.
- Muestreo y análisis edafológicos
 - Se realizan extracciones de suelo para análisis físico-químicos y biológicos: contenido de carbono orgánico, textura, pH, capacidad de retención de agua, biomasa microbiana, entre otros.
 - Estos datos de laboratorio sirven como referencia para calibrar y validar los sensores IoT instalados en campo.
- Captación de información remota (dron UAV e imágenes satelitales)
 - Se valorará el uso de drones (UAV) en algunas de las parcelas para recoger datos de alta resolución mediante cámaras multispectrales, térmicas o hiperespectrales, útiles para caracterizar la cobertura vegetal, el vigor del cultivo y la variabilidad intra-parcela.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- Las imágenes satelitales (p. ej., Sentinel-1 y 2, Landsat) permiten ampliar la escala temporal y espacial del análisis, generando series históricas y mapas regionales de índices de vegetación, humedad y productividad.
- Integración y análisis de datos
- Los datos procedentes de sensores, análisis edáficos, drones y satélites se centralizan en una plataforma digital interoperable.
 - Mediante algoritmos de modelización y aprendizaje automático se transforman los registros brutos en indicadores verificables (SOC, Δ SOC anual, intensidad de manejo, huella hídrica y de carbono).
 - El sistema garantiza trazabilidad, control de calidad y compatibilidad con los estándares europeos (MRV, FAIR Data).
- Indicadores funcionales y mapas digitales
- El resultado del proceso son mapas temáticos e indicadores funcionales que describen el estado del suelo, los flujos de carbono y la respuesta a las prácticas de manejo agrícola.
 - Estos productos finales son la base para la toma de decisiones en la PAC, la planificación regional y la implementación de esquemas de pago por servicios ecosistémicos.

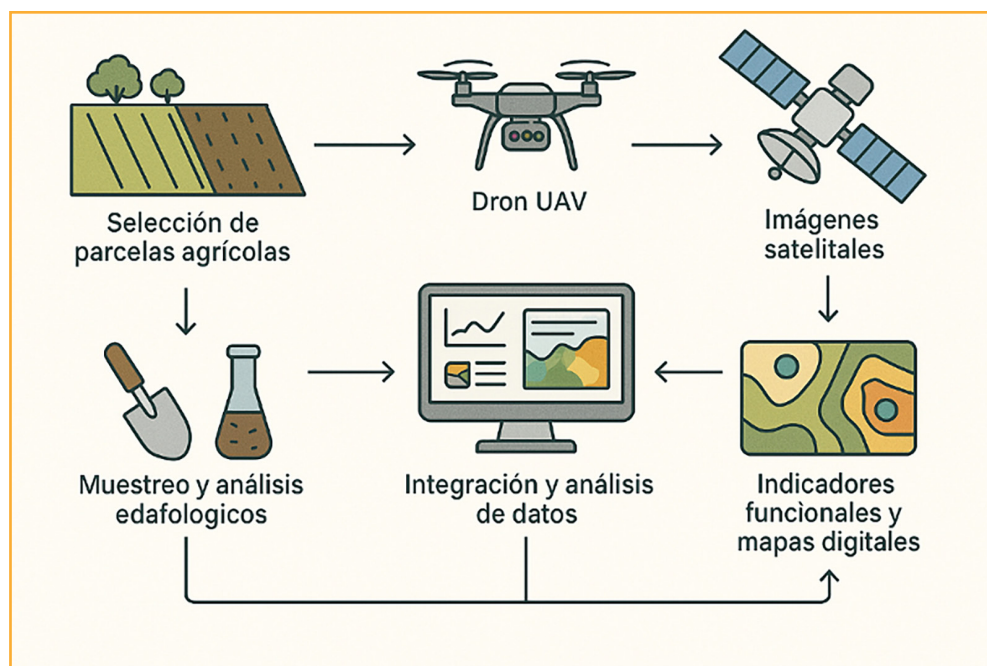


Figura 21. Esquema del proceso metodológico IoT.

El diseño de la infraestructura IoT requiere estructurar el proceso en una serie de fases que aseguren la recolección, transmisión y análisis eficiente de los datos obtenidos en campo. Estas fases establecen la secuencia lógica desde la selección de parcelas y la instalación

de sensores, hasta la integración de la información en plataformas digitales y su posterior interpretación. De este modo, se garantiza que el sistema proporcione datos fiables, trazables y comparables, fundamentales para evaluar el secuestro de carbono en suelos agrícolas y su vinculación con las prácticas de manejo apoyadas por la PAC.

3.5.2.1. Selección y caracterización de parcelas experimentales

Para la implementación de la infraestructura IoT se procederá a la selección de parcelas agrícolas representativas que reflejen la diversidad de manejos presentes en Castilla-La Mancha (laboreo convencional, laboreo reducido, cubiertas vegetales, rotaciones, regadío y secano, entre otros). Como se ha descrito en la Actividad 3, ya se ha realizado una selección de aquellos municipios castellano-machegos que cumplen los requisitos y representan alguna de las condiciones establecidas. El siguiente paso son visitas en campo para determinar exactamente las parcelas, entrevistas con el agricultor/administrador de la tierra para la exposición del proyecto y obtención de su colaboración, y evaluación de la localización de los sensores en un emplazamiento donde no interfiera con las prácticas habituales del agricultor en sus tareas diarias.

La selección de parcelas seguirá criterios técnicos adicionales: (i) representatividad de los principales cultivos de la región, (ii) diversidad edafoclimática, (iii) accesibilidad logística para instalación y mantenimiento de sensores, y (iv) existencia de contrastes de manejo en explotaciones próximas.

Una vez seleccionadas, cada parcela será caracterizada en campo para verificar la homogeneidad de las condiciones edafoclimáticas y de manejo, asegurando así la comparabilidad entre tratamientos. La caracterización incluirá: levantamiento edafológico con calicatas, muestreos de suelo para análisis físico-químico (SOC, nitrógeno total, fósforo, pH, CIC, textura, densidad aparente) y biológico (biomasa microbiana, respiración basal, actividad enzimática), inventario de vegetación y prácticas de cultivo documentadas mediante entrevistas estructuradas con agricultores.

Todas las parcelas serán georreferenciadas mediante GPS diferencial, delimitando un área experimental estandarizada de 20 × 20 metros, dentro de la cual se realizarán los muestreos y se instalarán los sensores IoT destinados al seguimiento continuo de las variables edáficas y vegetales. Además, se marcarán puntos de control permanentes (benchmarks) para repetir muestreos a lo largo de las campañas y asegurar comparabilidad temporal.

El diseño experimental se basará en un enfoque de “parcelas gemelas” cuando sea posible, es decir, seleccionar dos parcelas con condiciones similares pero manejos diferentes (ej. laboreo convencional vs. cubiertas vegetales) para aislar el efecto de la práctica en el secuestro de carbono. Este enfoque comparativo maximiza la robustez científica y la capacidad de transferir resultados a políticas agroambientales.

Los datos recogidos en estas parcelas piloto servirán como base para la calibración de modelos (RothC, Century, DNDC) y para la validación de indicadores satelitales (NDVI, NDMI, PRI), garantizando la trazabilidad y verificabilidad exigida por los protocolos MRV de la UE.

Este diseño busca combinar la robustez científica con la practicidad operativa, asegurando que los resultados obtenidos sean representativos y transferibles al conjunto de la región.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La red de parcelas experimentales se concibe, por tanto, como un nodo estratégico de monitorización que permitirá tanto la investigación científica como la validación de esquemas de pagos por servicios ecosistémicos y la implementación de la Estrategia de Suelos 2030 en Castilla-La Mancha.

3.5.2.2. *Instalación de sensores IoT*

Durante esta fase se procederá a la implementación de una red de sensores IoT en las parcelas experimentales previamente seleccionadas y caracterizadas. Se instalará un nodo por cada tipo de manejo agrícola, configurado para la medición continua de humedad, temperatura, conductividad eléctrica y salinidad del suelo a una profundidad de 10 cm. Además, en cada parcela se desplegarán sensores a distintas profundidades (10, 20 y 40 cm) con el fin de capturar la dinámica vertical del agua y del carbono en la zona de raíces.

La transmisión de los datos se efectuará a través de conectividad LoRa o 4G hacia un servidor remoto seguro, garantizando su disponibilidad y resguardo. Cuando la cobertura de red sea limitada, se recurrirá a tecnologías NB-IoT o a gateways intermedios (LoRaWAN) conectados a estaciones base locales. Este diseño híbrido permitirá asegurar la conectividad en zonas rurales dispersas.

Los sensores serán calibrados en campo mediante curvas de retención de agua específicas según la textura del suelo, y con soluciones tampón en el caso de las mediciones de pH, con el fin de asegurar la precisión y la comparabilidad de los registros obtenidos. La calibración incluirá además:

- Ensayos de conductividad eléctrica en soluciones estándar,
- Validación de sensores de CO₂ mediante cámaras de referencia,
- Sincronización temporal de los nodos para asegurar series homogéneas. Se establecerán protocolos de recalibración periódica (cada 6–12 meses) y controles cruzados con muestras de laboratorio.

Cada nodo IoT estará compuesto por: (i) un datalogger con bajo consumo energético y almacenamiento local, (ii) panel solar con batería de respaldo para garantizar autonomía, y (iii) antena de comunicación con capacidad de transmitir datos en tiempo real. Los sensores incluirán: sondas TDR/FDR para humedad y temperatura, sensores de conductividad y salinidad, tensiómetros digitales para potencial hídrico, sondas NIR/MIR portátiles para estimar carbono orgánico, y estaciones meteorológicas compactas para registrar lluvia, radiación y temperatura ambiente.

La información recopilada será almacenada y gestionada en una plataforma en la nube que permitirá la visualización en tiempo real, así como la descarga para análisis posteriores.

De forma complementaria, los datos de sensores IoT se integrarán con imágenes de satélite (Sentinel-1 y 2, Landsat, MODIS) y de drones para ampliar la escala espacial. Esta integración permitirá calibrar índices de vegetación (NDVI, PRI, NDMI) con datos de campo, generando modelos de predicción del carbono orgánico del suelo y de la productividad vegetal.

Esta infraestructura tecnológica proporcionará un sistema robusto y dinámico para el monitoreo de las condiciones edáficas, permitiendo evaluar de manera continua el impacto de distintos manejos agrícolas sobre el suelo y estableciendo la base de datos necesaria para la posterior cuantificación de la captura de carbono.

3.5.2.3. *Teledetección mediante UAV*

En esta fase se llevarán a cabo vuelos programados con vehículos aéreos no tripulados (UAV), equipados con cámaras multiespectrales (modelo RedEdge-MX o equivalente) y cámaras térmicas, con el objetivo de cubrir las parcelas experimentales seleccionadas para mejorar la calibración de las imágenes satelitales.

Los vuelos se realizarán siguiendo protocolos estandarizados: planificación previa con software de misión, altitud de vuelo entre 60 y 120 metros según el tamaño de la parcela, solapamiento longitudinal y transversal mínimo del 75 % para asegurar la correcta reconstrucción fotogramétrica, y programación en condiciones de cielo despejado para evitar variabilidad radiométrica por nubosidad.

La interpretación directa de estas imágenes tomadas por UAV se puede realizar combinando imágenes hiperespectrales y bibliotecas espectrales para la cuantificación directa de los patrones de suelo desnudo, y mediante imágenes multivariable para mapear los patrones de suelo desnudo como indicador de diferencias en el COS o en la clase de suelo.

Se incluirán paneles de calibración radiométrica en cada vuelo (Reflectance Panels) para corregir los valores de reflectancia absoluta y permitir comparabilidad temporal. La información espectral se validará con muestreos de campo de carbono orgánico y propiedades físicas del suelo, estableciendo modelos de regresión multivariante (PLSR, Random Forest) entre la firma espectral y las variables de laboratorio.

Los cambios en los patrones de vegetación visibles en imágenes remotas pueden utilizarse para detectar (cambios en) el uso del suelo y, por lo tanto, inferir las propiedades del suelo y los cambios en el COS. El análisis del cambio de uso del suelo, la productividad primaria neta y las reservas de COS son fundamentales para identificar puntos críticos de secuestro de COS.

Además de NDVI y NDRE, se calcularán índices adicionales: SAVI y OSAVI (cobertura vegetal ajustada por suelo), PRI (eficiencia fotosintética), CWSI (Crop Water Stress Index) derivado de imágenes térmicas y NBR2 (índice de humedad en el suelo). Estos índices permitirán caracterizar no solo el vigor de la vegetación, sino también la eficiencia en el uso del agua y la resiliencia frente al estrés climático.

A partir de las imágenes capturadas se generarán ortomosaicos corregidos y modelos digitales de superficie, los cuales constituirán la base para el cálculo de índices de vegetación (NDVI, NDRE) e indicadores térmicos asociados al estado hídrico y al estrés edáfico. Estos indicadores permitirán identificar diferencias en el vigor de la vegetación y establecer relaciones directas con las propiedades funcionales del suelo bajo distintos manejos agrícolas.

Los resultados de UAV se integrarán con imágenes satelitales (Sentinel-2, Sentinel-1 radar y Landsat) para escalar la información de parcela a paisaje, generando modelos de predicción del carbono orgánico del suelo (SOC) y de productividad agrícola a mayor escala.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Esta integración es clave para cumplir con los requisitos de trazabilidad y comparabilidad de la PAC y con los protocolos de monitorización, reporte y verificación (MRV) de la UE.

El procesamiento de las imágenes y la fotogrametría se realizarán mediante el software Agisoft Metashape, asegurando la precisión espacial y radiométrica necesaria para la interpretación y análisis de los datos. Complementariamente, se utilizarán plataformas de análisis espectral y geoespacial como QGIS, Google Earth Engine y Python (bibliotecas rasterio, scikit-learn) para la clasificación multiespectral y la generación de modelos predictivos.

3.5.2.4. Integración de teledetección satelital

Las imágenes satelitales serán utilizadas con el propósito de extrapolar espacialmente los resultados obtenidos mediante muestreos de campo, sensores in situ y plataformas UAV, permitiendo validar la escalabilidad de los indicadores funcionales a nivel de explotación agrícola e incluso de ámbito comarcal.

Se emplearán principalmente misiones Copernicus y Landsat:

- *Sentinel-2* (óptico multiespectral, resolución 10–20 m), para índices de vegetación (NDVI, NDRE, EVI), cobertura verde y mapeo de suelos desnudos.
- *Sentinel-1* (radar SAR, resolución 10 m), para estimar humedad del suelo y estructura superficial, especialmente útil en condiciones de nubosidad o en secanos de bajo vigor.
- *Landsat 8–9* (30 m, con series históricas desde 1984), para análisis multitemporal de carbono, productividad primaria y cambios de uso del suelo a largo plazo.
- *MODIS* (250–500 m, pero con series temporales diarias), para seguimiento de tendencias regionales de biomasa y estrés hídrico.

La combinación de datos multiescalares —sensores de suelo, teledetección proximal (UAV) y observación satelital— constituirá un elemento clave para la evaluación de la viabilidad del sistema como herramienta de monitorización agroambiental en diferentes escalas territoriales.

La integración metodológica seguirá un esquema de validación cruzada:

- UAV → valida y calibra los índices derivados de satélite en resolución fina.
- Sensores IoT y muestreos de suelo → proporcionan los valores de referencia (verdad de campo).
- Satélite → permite la proyección espacial y temporal a escala comarcal y regional.

Se calcularán indicadores clave: NDVI, NDRE, SAVI y PRI (cobertura y vigor de vegetación); NBR2 y NDMI (humedad del suelo y estrés hídrico); CWSI derivado de térmica; y mapas de productividad primaria neta (NPP). Estos indicadores, validados con UAV y sensores de campo, se convertirán en variables proxy del carbono orgánico del suelo (SOC), la fertilidad y la resiliencia de los agroecosistemas.

Esta integración permitirá no solo contrastar la consistencia de los indicadores generados en las parcelas experimentales, sino también proyectar su aplicabilidad en programas de seguimiento a escala regional orientados a la gestión sostenible del suelo y la captura de carbono.

3.5.3. Resultados técnicos esperados

El resultado principal del proyecto será el desarrollo y validación de un prototipo metodológico integral, que combine el análisis edáfico de campo con tecnologías digitales avanzadas (IoT, UAV, satélite), orientado a la generación de indicadores funcionales del suelo extrapolables mediante técnicas de teledetección.

Este prototipo estará respaldado por los siguientes productos específicos:

- Base de datos estructurada, compuesta por observaciones obtenidas en condiciones reales de campo y laboratorio, asegurando trazabilidad y calidad en la información. La base incluirá: datos continuos de sensores IoT (humedad, temperatura, CO₂ edáfico), registros espectrales UAV, imágenes satelitales procesadas y resultados analíticos de suelo (SOC, nutrientes, biomasa microbiana). Todos los datos estarán georreferenciados, con metadatos normalizados siguiendo los principios FAIR Data y estándares INSPIRE.
- Mapas digitales de indicadores funcionales del suelo, elaborados a diferentes escalas espaciales y temporales, que facilitarán la interpretación y aplicación de los resultados. Se generarán capas cartográficas de carbono orgánico del suelo (SOC), Δ SOC anual, humedad y potencial hídrico, índices de vigor vegetal (NDVI, NDRE, PRI), productividad primaria neta (NPP) y resiliencia climática. Estos mapas permitirán identificar “hotspots” de secuestro de carbono y zonas críticas de degradación.
- Protocolo metodológico detallado, que documentará el diseño del sistema, las técnicas empleadas y las condiciones de validación, garantizando su reproducibilidad. El protocolo incluirá: procedimientos de muestreo de suelo, instalación y calibración de sensores IoT, planificación de vuelos UAV, procesamiento de imágenes satelitales, integración de datos multifuente, control de calidad (QA/QC) y validación mediante análisis de laboratorio. Además, contendrá directrices para su uso en programas de monitorización, reporte y verificación (MRV) de la UE y para su integración en la Estrategia de Suelos 2030.
- Informe técnico de valorización, en el que se analizarán la aplicabilidad del sistema, sus costes operativos y las posibles vías de transferencia al mercado, así como su adopción por parte de usuarios institucionales. El informe contemplará escenarios de implementación a nivel de explotación, cooperativas y administraciones regionales, estimando costes por hectárea monitorizada, beneficios en términos de acceso a eco-regímenes PAC y potencial de participación en mercados voluntarios de carbono bajo el Reglamento CRCF (Carbon Removal Certification Framework).

El sistema desarrollado será directamente aplicable a la justificación de prácticas sostenibles en el marco de los ecorregímenes de la PAC y de los mercados voluntarios del Reglamento CRCF, además de constituir una herramienta de apoyo a la agricultura de precisión, mejorando la eficiencia en el uso de insumos y en el seguimiento del estado de salud

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

del suelo. Asimismo, proporcionará una base técnica sólida para procesos de certificación agroambiental y para la generación de créditos de carbono.

3.5.4. Identificación de posibles usuarios, aplicabilidad y transferencia de resultados

La infraestructura IoT y los indicadores generados se conciben con un claro enfoque de transferencia y aplicabilidad. El sistema se pondrá a disposición de agricultores, técnicos y administraciones mediante talleres formativos y plataformas digitales interactivas que permitan consultar mapas, series temporales y reportes en tiempo real. Además, se desarrollará un cuadro de mando en línea que facilite la visualización de los indicadores clave y su integración en sistemas de apoyo a la decisión. A nivel institucional, los resultados podrán incorporarse a los inventarios nacionales y a las plataformas de justificación de los eco-regímenes de la PAC. Asimismo, el sistema abre la posibilidad de generar productos con valor de mercado, como servicios de certificación agroambiental, herramientas de seguimiento de la salud del suelo o metodologías para la emisión de créditos de carbono.

El sistema metodológico propuesto está diseñado para ofrecer un amplio rango de aplicaciones dentro del sector agroambiental, con utilidad tanto en la gestión agronómica a nivel de explotación como en la verificación de políticas públicas y en la prestación de servicios tecnológicos especializados. Su carácter modular y escalable garantiza la adaptabilidad a diferentes perfiles de usuario, desde agricultores individuales hasta organismos institucionales y empresas del ámbito agrotech.

Los *agricultores individuales y cooperativas agrarias* constituyen los principales beneficiarios directos, al disponer de una herramienta objetiva y trazable para justificar el cumplimiento de prácticas sostenibles exigidas por los eco-regímenes de la PAC. La disponibilidad de indicadores funcionales del suelo les permitirá, además, optimizar las decisiones de manejo, riego y fertilización en el marco de la agricultura de precisión, mejorando la eficiencia en el uso de insumos, incrementando la productividad y facilitando el acceso a ayudas públicas.

En el *ámbito institucional*, las administraciones públicas —como la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, las diputaciones provinciales y el propio Ministerio de Agricultura— podrán emplear el sistema como instrumento de verificación técnica en programas de subvención agroambiental, control de cumplimiento de eco-regímenes y planificación territorial sostenible. Asimismo, permitirá establecer criterios objetivos en auditorías, certificaciones y estrategias de adaptación al cambio climático en el medio rural.

Las *empresas tecnológicas y de servicios técnicos agrarios* encontrarán en el sistema un producto transferible, susceptible de integrarse como módulo dentro de plataformas de agricultura digital ya existentes. En este contexto, puede ofrecerse como servicio comercial de análisis edáfico avanzado o como herramienta de monitorización de sostenibilidad, aportando un valor añadido que les permitirá diferenciarse en un mercado altamente competitivo.

De igual modo, las *entidades certificadoras y auditoras ambientales* podrán adoptar el prototipo como base técnica para la evaluación independiente de prácticas agrarias sostenibles. Su utilización en auditorías agroambientales, esquemas de certificación, etiquetado ecológico o verificación de créditos de carbono aportará credibilidad y rigor a los procesos de certificación vinculados al incremento de la materia orgánica del suelo.

Finalmente, el sistema presenta un alto potencial de uso en *centros de investigación, universidades y entidades de formación técnica*, donde podrá servir como plataforma para estudios comparativos, validación de políticas públicas y desarrollo de proyectos europeos relacionados con la sostenibilidad agrícola, la digitalización del medio rural y la innovación ambiental.

3.5.5. Impacto esperado por la implementación e integración del sistema IoT

La implantación del sistema tendrá un impacto directo en la capacidad de medir, reportar y verificar el secuestro de carbono en suelos agrícolas, proporcionando una base científica sólida para justificar los pagos asociados a los eco-regímenes de la Política Agraria Común (PAC). Al generar indicadores trazables y verificables de carbono orgánico en el suelo, el sistema permitirá demostrar de manera objetiva la eficacia de prácticas como el laboreo reducido, las cubiertas vegetales, las rotaciones o la incorporación de enmiendas orgánicas, facilitando así la elegibilidad de los agricultores en los mecanismos de apoyo económico vinculados a la sostenibilidad.

Desde el punto de vista ambiental, la información obtenida contribuirá a reforzar las estrategias de incremento del carbono orgánico del suelo, con beneficios asociados a la reducción de la erosión, la mejora de la fertilidad y la resiliencia frente al cambio climático. En el plano socioeconómico, el sistema se convertirá en una herramienta clave para garantizar el acceso de los agricultores de Castilla-La Mancha a esquemas de pagos por servicios ecosistémicos y créditos de carbono, reforzando la rentabilidad y competitividad de sus explotaciones en un contexto de transición climática.

A nivel institucional, la disponibilidad de datos continuos y regionalizados permitirá a la Comunidad Autónoma cumplir con los requerimientos europeos en materia de contabilidad de carbono y Estrategia de Suelos 2030, fortaleciendo su posición en el desarrollo de políticas agroambientales y en la implementación de un modelo agrario más sostenible. Finalmente, en el ámbito tecnológico, el sistema situará a Castilla-La Mancha como referente en la integración de metodologías digitales para la agricultura de carbono, favoreciendo su liderazgo en iniciativas nacionales y europeas orientadas a la descarbonización del sector agrícola.

3.5.6. Propuesta de herramienta web y móvil para la monitorización y verificación del carbono agrícola.

La infraestructura IoT diseñada para la monitorización del carbono en suelos agrícolas requiere de una capa digital que permita poner los datos al servicio de los usuarios. Esta capa se materializa en una aplicación accesible tanto en versión web como en dispositivos móviles, concebida para transformar la información procedente de sensores, teledetección y registros administrativos en indicadores operativos, trazables y de fácil interpretación con el fin de establecer una vía sencilla para propietarios y técnicos. Sin embargo, no siendo el objeto del presente proyecto, se integra solamente como una primera aproximación y no como un paso a ejecutar dentro del mismo en la propuesta a futuro marcada. Si no que deja una vía abierta que podría ser considerada por la administración competente cuando la evaluación haya sido validada.

El desarrollo de esta aplicación web y móvil exige la colaboración con una empresa especializada en soluciones digitales para la agricultura, con experiencia contrastada en In-

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

ternet of Things (IoT), Big Data y plataformas en la nube. Este perfil empresarial debe ser capaz de integrar en un entorno único los datos generados por sensores de campo, redes de comunicación (LoRaWAN, NB-IoT, 4G/5G) y herramientas de visualización geoespacial, garantizando la trazabilidad y la interoperabilidad de la información. Asimismo, resulta imprescindible que cuente con competencias en el diseño de dashboards interactivos y en el desarrollo de aplicaciones móviles para Android e iOS, adaptadas al uso en campo. De este modo, se asegura que la plataforma ofrezca consultas ágiles de indicadores, mapas temáticos e históricos de prácticas agrícolas, con un diseño robusto, escalable y alineado con los requisitos de monitorización y verificación de la PAC y de los esquemas de agricultura de carbono.

En términos de capital humano, el desarrollo de la aplicación requiere la intervención de diversos perfiles profesionales:

- Desarrolladores web y móviles, responsables de crear la interfaz y garantizar la usabilidad en distintos dispositivos.
- Ingenieros de bases de datos y arquitectos cloud, encargados de estructurar el almacenamiento seguro, redundante y escalable de la información.
- Especialistas en GIS y visualización geoespacial, que permitan integrar mapas, ortomosaicos UAV y series temporales en la aplicación.
- Diseñadores UX/UI, orientados a la adaptación de la plataforma a las necesidades prácticas de agricultores y técnicos.
- Consultores agrotech, con capacidad de traducir los requisitos de la PAC y de la agricultura de carbono en funcionalidades útiles para el usuario final.

La aplicación podría ofrecer funcionalidades diferenciadas según el perfil de usuario:

- Para agricultores y cooperativas agrarias: un panel de control de sus parcelas que permitirá monitorizar en tiempo real el estado del suelo, consultar mapas de carbono orgánico (SOC) y variaciones anuales (Δ SOC), recibir notificaciones sobre anomalías en humedad o temperatura, y generar reportes exportables para la justificación directa de prácticas sostenibles ante los eco-regímenes de la PAC.
- Para técnicos y asesores agronómicos: herramientas para comparar manejos (laboreo reducido, cubiertas vegetales, rotaciones), identificar prácticas más eficientes en la captura de carbono y elaborar recomendaciones basadas en datos objetivos. Además, podrán acceder a series temporales, históricos de prácticas y correlaciones entre indicadores edáficos y productivos.
- Para administraciones públicas: un sistema de verificación agroambiental que permitirá validar de forma automática el cumplimiento de los eco-regímenes y la eficacia de las medidas de mitigación asociadas al secuestro de carbono. La plataforma incluirá la posibilidad de generar reportes estandarizados para auditorías, planificación territorial y seguimiento de la Estrategia Europea de Suelos 2030.

La combinación de estas funcionalidades convierte a la aplicación en un puente entre la

tecnología y las políticas agroambientales, reforzando el acceso de los agricultores a ayudas de la PAC y aportando a las administraciones un sistema transparente y verificable. Además, la capacidad de registrar prácticas de manejo y vincularlas directamente con los indicadores de los sensores permitirá generar evidencia robusta sobre el impacto de la agricultura sostenible, facilitando el acceso a esquemas de pagos por servicios ecosistémicos y créditos de carbono.

En definitiva, la aplicación web y móvil constituye el componente operativo que traduce la complejidad del sistema IoT en un recurso accesible y útil para los distintos agentes del sector, garantizando que la información generada no quede restringida al ámbito técnico, sino que se convierta en un instrumento de apoyo real a la transición hacia una agricultura baja en carbono. Sin embargo, su integración deberá ser diseñada e implementada por profesionales adecuados, por lo que no ha sido incluida en el presupuesto a futuro ni en las ejecuciones técnicas expuestas en la sección 4.6.

3.6. Síntesis, cronograma, presupuesto previsto a futuro y transferencia de conocimiento

3.6.1. Introducción y objetivos

En la presente sección se presenta la síntesis del trabajo desarrollado en el marco del proyecto “*Reto Suelos Rurales Castilla-La Mancha*”, cuyo objetivo es operativizar y dar continuidad a las ideas, diagnósticos y propuestas recogidas en el documento técnico y desarrolladas en los apartados previos. Tras un proceso que ha incluido análisis normativo, revisión de experiencias previas, y diseño metodológico, se plantea ahora la propuesta de ejecución futura. Esta constituye un itinerario definido y realista que facilitará la implantación progresiva del proyecto en un horizonte cercano, garantizando su coherencia técnica y su viabilidad en el territorio.

La agricultura de la región se encuentra en un momento decisivo. La región, con su enorme peso productivo y su diversidad de cultivos, afronta grandes retos derivados del cambio climático: pérdida de fertilidad de los suelos, reducción de recursos hídricos, incremento de temperaturas extremas y presión creciente sobre los sistemas agrarios. Sin embargo, esos mismos retos abren también oportunidades únicas. Las prácticas agrícolas orientadas al secuestro de carbono ofrecen la posibilidad de regenerar suelos, mejorar la biodiversidad, hacer más resilientes las explotaciones y, al mismo tiempo, contribuir a los compromisos climáticos regionales, nacionales y europeos.

Este plan no pretende ser un documento meramente teórico, sino una hoja de ruta práctica y flexible. Su propósito es ofrecer una primera aproximación a la implantación de las actuaciones propuestas, organizándolas en fases de ejecución claras, con prioridades, responsables y recursos definidos. De este modo, se facilita la transición desde un modelo agrícola intensivo y vulnerable hacia otro más sostenible, competitivo y alineado con las políticas tanto establecidas como en desarrollo marcadas por la Unión Europea.

La ejecución de este proyecto no solo persigue reducir emisiones y aumentar el almacenamiento de carbono en suelos y cultivos. También aspira a generar beneficios sociales y económicos: apoyar a los agricultores en la modernización de sus explotaciones, favorecer la innovación tecnológica (sensores, plataformas digitales, teledetección), abrir la puerta a nuevas fuentes de financiación (mercados de carbono, programas europeos) y situar a Cas-

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

tilla-La Mancha como región pionera en la agricultura climáticamente inteligente.

La necesidad de avanzar hacia modelos productivos más sostenibles en CLM es urgente, dada la doble condición de la región como territorio agrícola de alta relevancia económica y como espacio altamente vulnerable a los impactos del cambio climático. En este contexto, las prácticas de secuestro de carbono en suelos agrícolas se presentan no solo como una estrategia ambiental, sino también como un mecanismo de resiliencia socioeconómica, capaz de generar beneficios adicionales en términos de biodiversidad, calidad del suelo, eficiencia en el uso del agua y acceso a nuevos mercados (créditos de carbono, producción sostenible, etc.).

Por lo tanto, este plan constituye la continuidad lógica del trabajo técnico previamente desarrollado, adoptando ahora un enfoque orientado a la acción. Se configura como un documento de carácter operativo, destinado a servir de guía para los distintos agentes implicados (administraciones públicas, cooperativas, agricultores, centros de investigación y sociedad civil) en la consecución de un objetivo común que pretende avanzar hacia un modelo agrícola más resiliente, eficiente y alineado con los compromisos de mitigación y adaptación al cambio climático marcados por las políticas actuales.

Tras esta contextualización, resulta necesario concretar cuáles son los objetivos que guiarán su desarrollo. Estos objetivos constituyen la base estratégica sobre la que se organizarán las actuaciones previstas, permitiendo orientar los esfuerzos de todos los agentes implicados hacia un mismo propósito común. En las siguientes líneas se presentan de forma detallada, sirviendo como punto de partida para estructurar las fases de implantación y los mecanismos de seguimiento del proyecto.

- Operativizar las actuaciones diseñadas en el documento técnico, priorizando aquellas con mayor impacto y viabilidad en la fase inicial.
- Definir un cronograma de implantación progresiva (corto, medio y largo plazo) que facilite la transición desde proyectos piloto hacia la consolidación regional.
- Asegurar la disponibilidad de recursos financieros, técnicos y humanos, explorando diferentes mecanismos de financiación pública y privada.
- Implementar un sistema de seguimiento, reporte y verificación (MRV) que garantice la medición transparente del secuestro de carbono y los co-beneficios ambientales.
- Fomentar la transferencia de conocimiento y la capacitación, promoviendo la adopción de prácticas sostenibles por parte del sector agrario.
- Contribuir a las estrategias climáticas y agrarias de ámbito regional, nacional y europeo, posicionando a Castilla-La Mancha como territorio de referencia en agricultura baja en carbono.

3.6.2 Propuesta de fases de ejecución y estimación preliminar del tiempo de implantación

La puesta en marcha del proyecto se concibe como un proceso progresivo, estructurado en tres fases que permiten combinar la generación temprana de resultados con la consolidación a medio y largo plazo. Este enfoque escalonado facilita la gestión de recursos, la

validación técnica y la implicación gradual de los distintos agentes del territorio. Para facilitar la puesta en marcha y favorecer la implicación de los diferentes agentes del territorio, el proyecto se plantea en fases sucesivas que a continuación se

Fase 1. Inicial / Piloto (años 1–3)

Se centra en la implantación de prácticas de fácil adopción y bajo riesgo, con el fin de generar resultados visibles en el corto plazo. Entre las principales actuaciones destacan:

- Establecimiento de parcelas demostrativas en cultivos representativos de la región (viñedo, olivar, almendro, pastos).
- Implementación de cubiertas vegetales, rotaciones con leguminosas y enmiendas orgánicas.
- Desarrollo de pilotos de monitorización IoT y satelital para validar metodologías de cuantificación de carbono.
- Acciones de formación inicial y sensibilización dirigidas a agricultores y técnicos.

Fase 2. Escalado (años 4–6)

En esta etapa se busca ampliar la escala de aplicación, incorporando a cooperativas y explotaciones representativas en diferentes zonas agroclimáticas. Se prevé:

- Extensión progresiva de las prácticas validadas en la fase piloto.
- Integración de sistemas digitales de seguimiento (IoT + plataformas web/móvil) en explotaciones colaboradoras.
- Refuerzo de los mecanismos de financiación mediante programas europeos, PAC y posibles esquemas de mercado voluntario de carbono.
- Consolidación de redes de intercambio de conocimiento entre agricultores y técnicos.

Fase 3. Consolidación (años 7–10)

El objetivo de esta fase es alcanzar una integración plena del modelo en la región, tanto a nivel técnico como institucional:

- Generalización de las prácticas de secuestro de carbono en la agricultura regional.
- Integración de resultados en políticas agrarias y climáticas de Castilla-La Mancha.
- Participación en mercados de carbono y esquemas de certificación reconocidos.
- Evaluación integral de los impactos obtenidos en carbono, biodiversidad y resiliencia agrícola.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Una vez definidas las fases de ejecución y el cronograma preliminar a largo plazo, resulta necesario detallar de manera específica las actuaciones previstas para la Fase I, que constituye el punto de partida del proyecto. Esta etapa inicial es clave, ya que permitirá validar en condiciones reales las prácticas propuestas, generar resultados tempranos y establecer la base metodológica y organizativa sobre la que se apoyará el desarrollo posterior. Cabe señalar que, en este documento, no se desarrollan en detalle las Fases 2 y 3, ya que deberán replantearse y concretarse una vez se disponga de los resultados obtenidos en la Fase I. De este modo, se garantiza que el escalado y la consolidación del proyecto se basen en evidencias contrastadas y en aprendizajes derivados de la experiencia demostrativa inicial.

A continuación, se presenta la propuesta de ejecución correspondiente a esta primera fase.

3.6.2.1. Fase I. Inicial / Piloto (años 1–3)

Su finalidad es validar en condiciones reales las prácticas propuestas, generar resultados tempranos y establecer la base metodológica y organizativa que permitirá avanzar hacia fases posteriores de mayor escala. Esta etapa se concibe como un proceso de aprendizaje y demostración, en el que se pondrán en marcha experiencias piloto en explotaciones representativas de Castilla-La Mancha en base a los siguientes objetivos específicos:

1. Validar en campo las prácticas de secuestro de carbono propuestas en el documento técnico, mediante la creación de parcelas demostrativas en cultivos representativos (viñedo, olivar, almendro, pastos, cereal).
2. Establecer protocolos técnicos de referencia para el muestreo de suelos, la monitorización con sensores IoT y la integración de datos satelitales.
3. Generar una línea base de indicadores sobre el carbono almacenado en suelos, así como sobre otros servicios ecosistémicos asociados.
4. Impulsar la formación y sensibilización inicial de agricultores, técnicos y cooperativas, fomentando la adopción progresiva de las prácticas sostenibles.
5. Evaluar la viabilidad técnica y socioeconómica de las medidas implantadas, identificando fortalezas, limitaciones y ajustes necesarios antes de la fase de escalado.
6. Mejorar la zonificación agraria existente con el fin de ampliar los estudios a otros cultivos y sistemas productivos, facilitando así la extensión progresiva del proyecto a nuevas áreas y escenarios agroclimáticos.

Una vez definidos los objetivos que guiarán la Fase I, resulta necesario concretar las actuaciones previstas que permitirán alcanzarlos. Estas acciones se organizan en distintos ámbitos de intervención y constituyen la base operativa sobre la que se apoyará la ejecución de esta primera etapa del proyecto.

3.6.2.1.1. Dimensionamiento de parcelas y sensores en zonas agrícolas

El dimensionamiento de la red experimental se ha definido bajo criterios de representatividad y rigor estadístico. En primer lugar, se establece la comparación de distintos ma-

nejos agrícolas asociados a los eco-regímenes de la PAC dentro de cada cultivo prioritario, con el fin de evaluar su impacto diferencial sobre el secuestro de carbono y la salud del suelo. En segundo lugar, se asegura la cobertura de los principales estratos edafo-climáticos de Castilla-La Mancha, de manera que los resultados obtenidos sean extrapolables a escala regional. Finalmente, se fija una intensidad mínima de muestreo de tres réplicas por combinación cultivo–manejo–estrato, lo que garantiza una potencia estadística suficiente para detectar cambios significativos y validar los indicadores en condiciones reales de explotación.

Para garantizar la comparabilidad de los manejos en los diferentes cultivos y la eficiencia en el uso de recursos, la red de muestreo se estructura de la siguiente manera:

Parcelas por eco-regímenes.

En este grupo, dentro de una misma localidad y cultivo, se establece un conjunto de tres parcelas por cada manejo agrícola distinto alineado con los eco-regímenes de la PAC, por ejemplo:

1. Manejo tradicional (laboreo intensivo).
2. Cubierta vegetal natural o manejada.
3. Manejo mejorado (siembra directa, rotaciones con leguminosas o incorporación de enmiendas orgánicas).

Estas parcelas se mantienen en el tiempo y deben ser remuestreadas a los 3 años, lo que permite evaluar la evolución del carbono orgánico del suelo (Δ SOC) y otros indicadores bajo condiciones reales de manejo. A continuación se expone el número de parcelas estimadas para los muestreos en campo e instalación de IoT.

Albacete (Total: 48)

Cultivo	R	A = R×3 (Total)
Almendra	4	12
Pistacho	4	12
Viñedo	4	12
Cereal	4	12

Ciudad Real (Total: 48)

Cultivo	R	A = R×3 (Total)
Viñedo	4	12
Olivar	4	12
Cereal	4	12
Pastos	4	12

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Cuenca (Total: 36)

Cultivo	R	A = R×3 (Total)
Viñedo	4	12
Cereal	4	12
Almendra	4	12

Toledo (Total 48)

Cultivo	R	A = R×3 (Total)
Cereal	4	12
Olivar	4	12
Viñedo	4	12
Pistacho	4	12

Guadalajara (Total: 36)

Cultivo	R	A = R×3 (Total)
Cereal	4	12
Pastos	4	12
Girasol*	4	12

Finalmente, se ha considerado oportuno incluir el girasol* en Guadalajara. Este cultivo, aunque menos extendido que el cereal, representa un herbáceo de secano estratégico en la provincia y en las rotaciones regionales, y permite comparar manejos PAC (laboreo reducido, cubiertas) ampliando la diversidad de sistemas evaluados.

En resumen, se establece un mínimo de 216 parcelas distribuidas en Castilla-La Mancha, con una cobertura equilibrada entre cultivos leñosos y herbáceos, manejos agrícolas vinculados a los eco-regímenes de la PAC y los principales estratos edafo-climáticos regionales y que garanticen un nivel suficiente de potencia estadística y capacidad de calibración de la infraestructura IoT.

Conviene señalar que esta propuesta tiene carácter preliminar y podrá ajustarse en función de la disponibilidad real de explotaciones colaboradoras y de los resultados de la campaña baseline. Su distribución está condicionada por las limitaciones detectadas en la zonificación agraria (sección 4.3), lo que obliga a mantener un diseño flexible y adaptativo. Así, las 216 parcelas deben entenderse como un punto de partida sólido y representativo pero sujeto a cambios y a mejoras conforme avance la implantación del proyecto.

3.6.2.1.2. Implantación de sensores IoT en la red de parcelas.

La red de 216 parcelas distribuidas en Castilla-La Mancha constituye la base de la monitorización de carbono y servicios ecosistémicos. La estrategia de sensorización IoT se estructura de forma realista desde el punto de vista técnico y económico, a la vez que científicamente robusta. Para ello, se plantea un modelo de instrumentación escalonada adaptada a los objetivos de cada parcela:

1. Todas las parcelas contarán con un kit básico de sensores IoT, orientado a recoger información mínima estandarizada:
 - Humedad y temperatura del suelo (a 20 cm de profundidad).
 - Conductividad eléctrica.
 - Temperatura y humedad ambiental.
2. Un subconjunto del 15–20 % de las parcelas ($\approx$ 30-35 en total), distribuidas proporcionalmente entre provincias y cultivos prioritarios, se seleccionará para un nivel de instrumentación ampliada, que incluirá:
 - Sensores de CO₂ en continuo.
 - Tensiómetros digitales (potencial hídrico).
 - Estaciones meteorológicas compactas (precipitación, radiación, viento).
 - Comunicación LoRaWAN o NB-IoT para transmisión de datos.

Estas parcelas actuarán como “nodos de calibración”, aportando la información necesaria para validar y ajustar los modelos y algoritmos aplicables al resto de la red. El diseño garantiza que todas las parcelas aporten datos homogéneos y comparables, pero también que una parte de ellas profundice en la calibración necesaria para mejorar la calidad de las estimaciones a escala regional. La distribución de los kits ampliados se distribuirá de manera proporcional entre provincias, asegurando que todos los cultivos prioritarios dispongan de parcelas de referencia avanzadas. Este planteamiento equilibra la necesidad de robustez científica con la viabilidad logística y presupuestaria, maximizando la representatividad y la capacidad de extrapolación de los resultados.

Aunque los costes finales dependerán del precio de mercado en el momento de la adquisición, así como de los modelos de las tecnologías seleccionadas y disponibles, se establecen en el presupuesto precios actuales y orientativos para garantizar la planificación.

La instalación y mantenimiento de la red de parcelas y sensores IoT constituye un elemento clave para asegurar la calidad de los datos y la comparabilidad en el tiempo. La instalación se realizará al inicio de la campaña de muestreo, en periodos de baja interferencia con las labores del campo, con sensores enterrados en las profundidades definidas y nodos protegidos mediante mástiles, cajas estancas y alimentación solar. Cada parcela quedará georreferenciada y documentada en fichas técnicas. Todos los dispositivos serán calibrados en campo frente a muestras de referencia, estableciendo una línea base de datos verificable.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

El mantenimiento consistirá en revisiones semestrales de funcionamiento y estado físico, recalibraciones anuales de los sensores críticos y verificación de la conectividad. La responsabilidad de estas tareas recaerá en equipos técnicos provinciales de apoyo, que registrarán digitalmente cada intervención para garantizar trazabilidad y control de calidad. Se establecerá un registro digital de incidencias y actuaciones, garantizando trazabilidad de todos los eventos de instalación, mantenimiento y recalibración.

3.6.2.1.3. Muestreo de campo y análisis de laboratorio

El muestreo de campo constituye la base científica para evaluar el contenido y la dinámica del carbono orgánico del suelo en la red de parcelas establecida. Las muestras recogidas se procesarán en laboratorio siguiendo protocolos armonizados referenciados en la sección 4.4., lo que permitirá obtener datos de referencia sólidos y comparables en el tiempo. Estos resultados serán además esenciales para la calibración y validación de los sensores IoT instalados en parcela, asegurando la coherencia entre la monitorización en continuo y los análisis puntuales de laboratorio. Con estos criterios definidos, se procede a exponer el dimensionamiento del esfuerzo de muestreo en campo.

Aplicando este esquema a la red de 216 parcelas, el esfuerzo estimado será el descrito en la tabla 13.

Tabla 13. Esfuerzo de muestreo de laboratorio previsto en la Fase I

Concepto	Estimación
Muestras baseline (año 1)	216 parcelas
Muestras repetición (año 3-4)	216 parcelas
Subconjunto profundidad extendida (20%)	50 por campaña × 2 campañas = 100
TOTAL	532

La Fase I implicará entre 1.376 y 1.386 muestras de suelo de laboratorio, lo que proporciona una base sólida para validar los sensores IoT, asegurar la trazabilidad de los datos y alimentar los modelos de carbono con series comparables y verificables. Las muestras se tratarán conforme a lo descrito en la sección 4.4. y deberán ser analizadas en laboratorios especializados seleccionados que garanticen la fiabilidad y buen hacer de los métodos establecidos.

3.6.2.1.4. Integración de datos de campo con sensores IoT y datos de teledetección, y generación de la línea base regional.

Se integrarán los resultados de laboratorio con la monitorización IoT y la observación remota (UAV y satélite) para generar indicadores consistentes, escalables y verificables de carbono y salud del suelo. En esta sección se deberá ejecutar lo siguiente:

- Calibración cruzada y control de calidad (QA/QC)
- Alineación temporal y espacial.

- Curvas de calibración. QA/QC.
- Procesado de observación remota (UAV y satélite)
- Modelización predictiva y fusión de datos y validación
- Escalado espacial y temporal
- Generación de entregables (mapa inicial de COS, Δ SOC, indicadores indicadores funcionales y mapas de servicios)

La ejecución de estas tareas exige contar con una infraestructura técnica adecuada y con equipos especializados que permitan garantizar la calidad y continuidad de los datos. Tanto la calibración de sensores IoT como el procesado de imágenes UAV y satelitales requieren un soporte instrumental robusto, así como plataformas digitales capaces de integrar información multifuente y generar productos verificables. A continuación, se detallan los recursos materiales y tecnológicos imprescindibles para su desarrollo, cuya cuantificación servirá de base para la posterior estimación presupuestaria.

Infraestructura y equipos

- Plataforma digital / servidor en nube (con capacidad para datos geoespaciales e IoT en tiempo real).
- Software de análisis: Software GIS. Teledetección (SNAP para Sentinel, Google Earth Engine, Metashape para UAV). Modelado estadístico/ML (R, Python, scikit-learn, TensorFlow/PyTorch).
- UAV multiespectral + cámara térmica con software de vuelo y ortomosaico.
- Licencias mínimas (p. ej., almacenamiento, dashboards interactivos si se quiere visualizar en tiempo real).

3.6.2.1.5. Producción de informes técnicos y materiales de apoyo

La adecuada gestión y comunicación de los resultados constituye un eje fundamental de la Fase I. Para garantizar que el conocimiento generado sea útil y transferible, se prevé la elaboración de un conjunto de informes y productos técnicos que permitan, por un lado, validar los procedimientos desde el punto de vista científico, y por otro, facilitar su aplicación práctica por parte de agricultores, cooperativas y administraciones. Por lo tanto se distribuyen en dos grupos:

1. Informes técnicos (científicos y de gestión)

Para asegurar la trazabilidad y el rigor científico de los resultados obtenidos, se prevé la elaboración de un conjunto de informes técnicos que sirvan tanto para la validación metodológica como para la gestión del proyecto. Estos documentos constituirán la base de referencia para el seguimiento temporal del carbono en los suelos y para orientar las decisiones en fases posteriores, y constará al menos de los siguientes documentos:

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- **Informe de línea base (baseline):** consolidará los resultados iniciales obtenidos en la Fase 1. Incluirá los análisis de laboratorio sobre carbono orgánico del suelo y otros indicadores físico-químicos y biológicos, junto con los primeros datos validados de la red de sensores IoT. A partir de esta información se generarán los mapas iniciales de carbono orgánico en la capa superficial (0–20 cm) y en un subconjunto ampliado hasta los 30 cm de profundidad. Este documento constituirá la referencia oficial para el seguimiento temporal del proyecto y permitirá calcular de forma robusta el Δ SOC en los próximos 3 años.
- **Informes intermedios (anuales o bienales):** con periodicidad anual o bienal según la disponibilidad de datos, recogerán el estado actualizado de la red de parcelas y sensores, ofreciendo una visión consolidada del avance del proyecto. En ellos se presentarán resultados agregados por cultivo y provincia, lo que permitirá identificar tendencias preliminares y contrastes territoriales. Además, incluirán un registro de incidencias metodológicas y los ajustes aplicados, asegurando la transparencia del proceso y la mejora continua de los protocolos.
- **Informe final de Fase 1:** se elaborará tras un periodo de 3 a 4 años y constituirá el documento de referencia para evaluar los logros y limitaciones del proyecto en su etapa inicial. En él se consolidarán todos los resultados obtenidos, incluyendo la evaluación de la variabilidad temporal y espacial del carbono orgánico del suelo. Asimismo, se presentará la validación metodológica resultante de la integración de datos de laboratorio, sensores IoT y teledetección, garantizando la solidez de los procedimientos aplicados. Finalmente, el informe ofrecerá un conjunto de recomendaciones estratégicas orientadas al escalado y consolidación de la red de monitorización en la Fase 2.
- **Protocolos técnicos validados:** constituirán un producto clave de la Fase 1, ya que asegurarán la reproducibilidad y estandarización de las metodologías aplicadas. Este conjunto incluirá manuales detallados de muestreo de suelos, una guía práctica para la instalación y calibración de sensores IoT, así como los procedimientos de control de calidad (QA/QC) necesarios para la integración de datos multifuente y para el cumplimiento de los requisitos europeos de monitorización, reporte y verificación (MRV). De este modo, se establecerá una base metodológica sólida que permitirá tanto la continuidad del proyecto como su transferencia a otras iniciativas regionales y nacionales.

2. Materiales de transferencia (prácticos y divulgativos)

- **Fichas técnicas por cultivo y manejo:** se elaborarán fichas breves y prácticas que describan los principales resultados por cultivo y tipo de manejo (tradicional, con cubierta o mejorado). Estas fichas recogerán indicadores clave de salud del suelo, buenas prácticas de gestión y recomendaciones para facilitar la justificación ante los eco-regímenes de la PAC.
- **Guías prácticas para agricultores y técnicos de campo:** se publicarán guías más extensas que, en un lenguaje accesible, expliquen cómo interpretar los indicadores (SOC, humedad, NDVI, etc.) y aplicar prácticas agrícolas sostenibles. Estas guías estarán orientadas a la mejora de la rentabilidad ligada al secuestro de carbono y a la reducción de insumos.

- **Plataforma digital interactiva:** se desarrollará una herramienta en línea que permita consultar mapas, gráficos e indicadores de forma dinámica. Los usuarios podrán acceder a información por provincia, cultivo o tipo de manejo, y descargar reportes personalizados. Esta plataforma facilitará el acceso en tiempo real a la información, aumentando la transparencia y la utilidad práctica del proyecto.
- **Resúmenes ejecutivos para administraciones y cooperativas:** con el fin de garantizar una adecuada transferencia a los responsables de la toma de decisiones, se elaborarán resúmenes ejecutivos que presenten los principales resultados de manera clara y sintética. Estos documentos estarán enfocados en la relevancia de los hallazgos para la PAC, la Estrategia de Suelos 2030 y los mercados de carbono.
- **Material audiovisual y talleres de difusión:** para facilitar la transferencia en el medio rural, se prepararán materiales audiovisuales (vídeos cortos, infografías) y se organizarán talleres provinciales con agricultores, técnicos y cooperativas. Estas actividades permitirán comunicar los resultados de forma accesible y fomentar la adopción de prácticas sostenibles en el territorio.

3.6.2.1.6. Plan de transferencia y capacitación

La Fase I del proyecto no solo busca generar conocimiento científico y técnico, sino también asegurar que este conocimiento se traduzca en aprendizaje práctico, participación activa y preparación de los actores implicados para la implementación de fases futuras. Para ello, se plantea un plan de transferencia articulado en torno a tres ejes: formación aplicada, innovación participativa y comunicación abierta a la sociedad.

1. **Formación aplicada a agricultores y técnicos de campo:** se organizarán programas de capacitación dirigidos a agricultores, cooperativas y asesores técnicos, centrados en las mejores prácticas de manejo para el secuestro de carbono: cubiertas vegetales, siembra directa, rotaciones, uso de enmiendas orgánicas y gestión eficiente del riego. Estos programas combinarán sesiones teóricas con prácticas en campo, de modo que los participantes puedan comprobar directamente los beneficios de cada técnica sobre el suelo, la productividad y la resiliencia frente a la sequía y específicamente en el secuestro de carbono por parte de sus cultivos y otros servicios ecosistémicos.
2. **Living Labs y aprendizaje participativo:** el proyecto incorporará un enfoque de Living Lab, creando espacios de experimentación y co-creación en torno a las parcelas experimentales iniciales. Estos laboratorios vivos servirán para que agricultores, investigadores, empresas tecnológicas y administraciones puedan interactuar, compartir experiencias y validar conjuntamente las prácticas más eficaces. Además, permitirán introducir innovaciones progresivas (sensores IoT, nuevas técnicas de manejo, herramientas digitales) en un entorno real y con participación activa de los usuarios finales.
3. **Preparación de diferentes actores para fases siguientes:** el plan de transferencia contempla un conjunto de actividades orientadas a preparar a los distintos actores implicados para la transición hacia la Fase 2 (escalado) y la Fase 3 (consolidación) del proyecto. En este marco, se organizarán talleres de alineación con administraciones regionales y locales, con el fin de facilitar la integración de los resultados en las políticas agrarias y climáticas. Asimismo, se desarrollarán programas de capacitación

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

dirigidos a cooperativas y gestores agrarios en materia de esquemas de certificación y mercados de carbono, de modo que estén en condiciones de aprovechar las oportunidades derivadas de estos mecanismos. Durante estos encuentros se fomentará la creación de una red de agricultores referentes que actúen como multiplicadores en sus territorios, contribuyendo a la difusión de buenas prácticas y a la adopción progresiva de modelos de manejo agrícola más sostenibles

4. **Sensibilización y comunicación pública:** se desarrollarán acciones de comunicación para el público general, incluyendo jornadas abiertas, materiales audiovisuales e infografías divulgativas con el objetivo de reforzar la percepción social del valor de los suelos agrícolas como sumideros de carbono y como generadores de servicios ecosistémicos con el fin generar un clima favorable para la adopción de prácticas sostenibles en la región.

El número de actividades en cada provincia (Tabla 14) responde a la doble necesidad de cubrir los cultivos estratégicos seleccionados en la red de parcelas y asegurar la participación equilibrada de los actores clave del territorio (agricultores, cooperativas y administraciones).

Tabla 14. Acciones de transferencia y preparación de actores por provincia

Provincia	Talleres institucionales	Capacitación en certificación/ mercados de carbono	Living Labs	Talleres Agricultores	Total acciones previstas
Albacete	2	1	2	6	11
Ciudad Real	2	1	2	8	13
Cuenca	2	1	1	5	9
Guadalajara	2	1	1	5	9
Toledo	2	1	2	7	12
TOTAL	10	5	8	31	54

La distribución responde a criterios de representatividad territorial y diversidad de cultivos, reforzando aquellas provincias con mayor número de parcelas y mayor heterogeneidad de sistemas agrícolas, sin descuidar la cobertura mínima en el resto del territorio. De este modo, se garantiza que todos los actores clave (administraciones, cooperativas y agricultores) estén alineados y preparados para escalar el modelo en las siguientes fases del proyecto.

3.0.1.0.7. Cronograma de implementación Fase I.

El cronograma se presenta en Excel, en la versión final se implementará en el documento.

3.0.1.0.8. Estructura de recursos humanos

La correcta ejecución del proyecto requiere de un dimensionamiento adecuado de los recursos humanos, alineado con las actividades definidas en el cronograma y con la complejidad técnica de cada tarea de desarrollo de la fase 1. Para ello, se han identificado los principales perfiles profesionales necesarios y se ha estimado su dedicación en equivalentes a jornada completa a lo largo de los tres años de duración establecidos para la Fase 1.

El planteamiento combina equipos especializados por áreas (campo, laboratorio, sensorización IoT, teledetección, modelización de datos y transferencia) con una estructura de coordinación central que garantice la coherencia metodológica y la trazabilidad de todas las actuaciones. La dedicación se distribuye de forma variable en el tiempo, con una carga más intensa en los años 1 y 3, coincidiendo con las campañas de muestreo de campo, instalación y recalibración de sensores, y validación de resultados.

Además, la ejecución de la Fase 1 requiere un equipo multidisciplinar que integre perfiles científicos, técnicos, de gestión y de transferencia. A continuación se describen los perfiles necesarios para la implementación de la fase 1, así como las tareas asociadas:

1. Coordinación y gestión

- **Coordinador/a técnico/a del proyecto**
 - Supervisión global del proyecto y del cronograma.
 - Enlace con administraciones, cooperativas y financiadores.
 - Validación de informes y entregables finales.
- **Técnico/a de gestión y apoyo administrativo**
 - Gestión documental, compras y contratos.
 - Seguimiento presupuestario y justificación económica.
 - Apoyo en la organización de eventos y talleres.

2. Equipo científico

- **Investigador/a principal (IP)**
 - Liderar el diseño experimental de la red de parcelas.
 - Garantizar el rigor científico y metodológico del proyecto.
 - Dirigir la redacción de artículos científicos y publicaciones.
 - Representación académica en congresos y foros internacionales.

ACTUACIONES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- **Investigadores/as asociados/as**

- **Edafólogo/a (suelo y carbono orgánico):** diseñar protocolos de muestreo de suelo, liderar la cuantificación de SOC y Δ SOC, validar indicadores edáficos adicionales para calibrar sensores.
- **Especialista en cambio climático y servicios ecosistémicos:** evaluar la contribución de prácticas al ciclo de carbono y mitigación climática, definir indicadores de servicios ecosistémicos (agua, biodiversidad, resiliencia), alinear resultados con PAC y Estrategia Europea de Suelos 2030.
- **Investigador/a en modelización y MRV (monitoreo, reporte y verificación):** desarrollar modelos predictivos de SOC y Δ SOC con datos de campo, IoT y satélite, asegurar compatibilidad con estándares de MRV (UE, IPCC, certificación), validar resultados mediante métodos estadísticos y machine learning.

3. Equipo de campo y muestreo

- **Técnicos/as de campo (2 personas)**

- Selección y validación de parcelas representativas.
- Contacto directo con agricultores y cooperativas.
- Organización y supervisión de campañas de muestreo.
- Mantenimiento y revisión del sistema IoT

4. Equipo de laboratorio

- **Técnico/a de laboratorio**

- Procesado y preparación de muestras.
- Controles de calidad en rutina.
- Manejo de base de datos de resultados.

5. Equipo SIG y teledetección

- **Especialista SIG y teledetección**

- Georreferenciación y zonificación agraria.
- Integración de datos de parcelas, sensores y satélites en SIG.
- Elaboración de mapas de resultados (SOC, Δ SOC, servicios ecosistémicos).
- Procesado de imágenes Sentinel, Landsat y UAV.

- Calibración de datos remotos con observaciones de campo.

- Generación de ortomosaicos e índices de vegetación.

6. Equipo de comunicación y transferencia

- Especialista en transferencia y capacitación

- Diseño de programas de formación para agricultores.
- Elaboración de guías y fichas técnicas.
- Organización de talleres y jornadas de capacitación.
- Dinamización participativa en campo.
- Promoción del intercambio entre agricultores, investigadores y técnicos.
- Apoyo en innovación participativa y co-creación.

- Técnico/a en diseño y comunicación

- Redacción de informes divulgativos y resúmenes ejecutivos.
- Maquetación de informes técnicos y documentos visuales.
- Coordinación de materiales audiovisuales y web.

Aunque se necesita un equipo multidisciplinar con perfiles ajustados a las distintas especialidades requeridas para la realización del proyecto, algunos de ellos podrían participar en diferentes actividades reduciéndose la necesidad de contratación.

3.6.3. Presupuesto

El presupuesto se adjunta en Excel, se incorporará en el documento durante la maquetación.



04

**CONCLUSIONES,
RECOMENDACIONES
Y SIGUIENTES
PASOS**

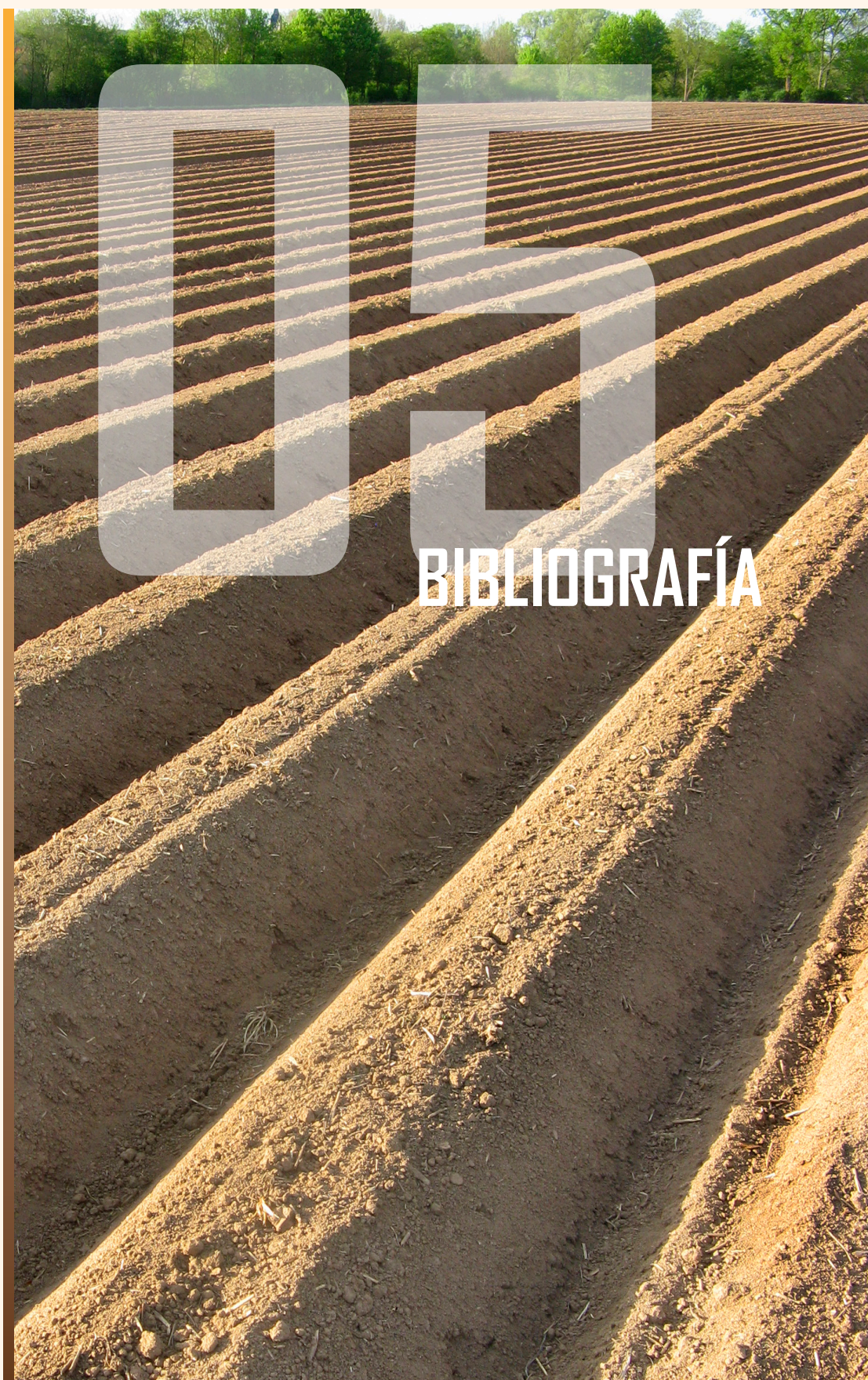
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y SIGUIENTES PASOS

Actualmente no existe todavía una legislación plenamente operativa a nivel europeo que establezca de forma armonizada la metodología para determinar el stock de carbono orgánico en suelos agrícolas. La futura Ley Europea de Vigilancia del Suelo y los actos delegados del Reglamento de Agricultura de Carbono avanzan en esa dirección, pero sus protocolos oficiales aún no han sido publicados ni transpuestos al marco normativo español. Esto implica que los proyectos regionales, como el presente, deben diseñarse con un carácter necesariamente preliminar y flexible, aplicando las mejores referencias disponibles (protocolos IPCC, LUCAS, BENCHMARKS, entre otros), pero con la conciencia de que será necesario adaptar las metodologías cuando el marco europeo esté definido. Lejos de ser una limitación, esta situación brinda la oportunidad de generar experiencias piloto en Castilla-La Mancha que puedan servir de referencia y preparen al sector para una rápida integración de los futuros estándares europeos.

Los resultados obtenidos evidencian la necesidad de dar un paso más allá en la región y avanzar hacia una estrategia alineada con las principales iniciativas internacionales y europeas en materia de suelo y cambio climático. En este sentido, se recomienda que la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha refuerce su participación en programas de referencia como la iniciativa internacional “4 por 1000”, orientada a incrementar el contenido de carbono orgánico en los suelos, así como en esquemas de valoración y certificación vinculados a los mercados voluntarios de carbono. De igual modo, resulta estratégico conectar con las iniciativas impulsadas desde la Unión Europea, entre las que destacan la Misión Europea en Suelos, y los proyectos financiados a través del instrumento LIFE, INTERREG, SUDOE, etc. La integración en estas plataformas no solo permitirá acceder a experiencias consolidadas y metodologías armonizadas, sino que también abrirá la puerta a nuevas oportunidades de financiación, cooperación internacional y transferencia de conocimiento hacia agricultores, técnicos y administraciones.

El trabajo propuesto en el marco del presente proyecto integra una Fase 1 preliminar, orientada a la validación metodológica y a la generación de un primer diagnóstico sobre el potencial de los suelos agrícolas de Castilla-La Mancha en materia de secuestro de carbono y provisión de servicios ecosistémicos. Esta etapa inicial permitirá identificar indicadores clave, establecer protocolos de muestreo y conservación de muestras, y diseñar una red preliminar de parcelas de referencia. No obstante, los resultados obtenidos no constituirán un punto final, sino la base sobre la que deberán articularse nuevas propuestas de futuro. En particular, se plantea la necesidad de avanzar hacia una Fase 2 de escalado, en la que se amplíe la red de parcelas, se mantenga la monitorización iniciada en la Fase 1 y se incorpore la caracterización de los suelos de nuevos cultivos, con la intención de implantar la metodología en todo el territorio castellano-manchego. Finalmente, se prevé una Fase 3 de consolidación, orientada a lograr la plena integración del modelo en la región, mediante la generalización de las prácticas de secuestro de carbono en la agricultura regional, la incorporación de los resultados en políticas agrarias y climáticas de Castilla-La Mancha, la participación en mercados de carbono y esquemas de certificación reconocidos, y la evaluación integral de los impactos obtenidos en carbono, biodiversidad y resiliencia agrícola.

La prosperidad y el estatus económico de naciones y regiones van unidos indisolublemente a la de los suelos que alberga. Contribuyamos entre todos a recuperar y mejorar la salud de los suelos de Castilla-La Mancha.



BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, E., Díaz-Gaona, C., Reyes Palomo, C., García Laureano, R., Sánchez Rodríguez, M., & Rodríguez Estévez, V. (2019). *Producción ecológica mediterránea y cambio climático: Estado del conocimiento* (Informe técnico). Asociación Valor Ecológico CAAE (Ecovalia). ISBN: 978-84-09-08694-8.

Amorós, J. A., Bravo, S., García Navarro, F. J., Pérez de los Reyes, C., Chacón Vozmediano, J. L., Martínez Gascuña, J., & Jiménez Ballesta. (2015). *Atlas de suelos vitícolas de Castilla-La Mancha*. Ciudad Real: Arte y Comunicación Calatrava. Financiado por Globalcaja-UCLM. ISBN: 978-84-608-1398-9.

Arias-Navarro, C., Baritz, R. and Jones, A. editor(s), 2024. The state of soils in Europe. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/7007291>, JRC137600.

Asociación de Desarrollo Rural Molina de Aragón–Alto Tajo. (2022). Proyecto piloto: Evaluación de carbono en pastos permanentes de Guadalajara. Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES) & GEFOREST. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha / RECAMDER.

ADESIMAN. (2022). *Proyecto piloto: Evaluación de carbono en viñedos de Tarancón (D.O. Uclés, Cuenca)*. Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES) & GEFOREST. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha / RECAMDER.

ADIMAN. (2022). *Proyecto piloto: Evaluación de carbono en almendros de Villanueva de la Jara (Cuenca)*. Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES) & GEFOREST. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha / RECAMDER.

Asociación Alto Guadiana Mancha. (2022). *Proyecto piloto: Evaluación de carbono en viñedos de Ciudad Real*. Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES) & GEFOREST. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha / RECAMDER.

Asociación para la Promoción del Desarrollo de la Comarca Campos de Hellín. (2022). *Proyecto piloto: Evaluación de carbono en albaricoqueros de Campos de Hellín (Albacete)*. Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES) & GEFOREST. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha / RECAMDER.

Consejería de Desarrollo Sostenible, Dirección General de Medio Natural y Biodiversidad. (2022). *Identificación y evaluación de servicios ecosistémicos: Iniciativas para la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha*. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Depósito legal: TO 345-2022.

De Rosa, D., Ballabio, C., Lugato, E., Fasiolo, M., Jones, A., & Panagos, P. (2024). Soil organic carbon stocks in European croplands and grasslands: How much have we lost in the past decade?. *Global Change Biology*, 30(1), e16992.

Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES), & GEFOREST. (2022–2023). *Proyecto piloto: Aplicación informática para la estimación de stocks de carbono en sistemas agrícolas*. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha / RECAMDER.

Fabeiro Cortés, C., & Brasa Ramos, A. (s.f.). *Agricultura y cambio climático en Castilla-La Mancha*. En *Impactos del cambio climático en Castilla-La Mancha* (Capítulo 5, pp. 123-138). Univer-

sidad de Castilla-La Mancha, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete.

Feeney, C. J., Bentley, L., De Rosa, D., Panagos, P., Emmett, B. A., Thomas, A., & Robinson, D. A. (2024). Benchmarking soil organic carbon (SOC) concentration provides more robust soil health assessment than the SOC/clay ratio at European scale. *Science of the Total Environment*, 951, 175642.

Jones, A.; Orgiazzi, A.; Panagos, P.; Scarpa S.; Havenga, C. & Van Eynde, E. (2024). LUCAS 2022 Soil Module. D2.1. Overview of soil sampling.

Martín, J. R., Álvaro-Fuentes, J., Gonzalo, J., Gil, C., Ramos-Miras, J. J., Corbí, J. G., & Boluda, R. (2016). Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma*, 264, 117-125.

Miranda Jiménez, C., Santesteban García, L. G., Loidi, M., & Royo Díaz, J. B. (2014). Cuantificación y reparto de la biomasa aérea en cuatro cultivares de vid para estimaciones de huella de carbono. En E. García-Escudero Domínguez & I. Martín Rueda (Coords.), I Jornada del Grupo de Viticultura y Enología: Comunicaciones (pp. 182-187). Logroño: SECH. ISBN 978-84-8125-675-8.

Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A. and Fernández-Ugalde, O. (2018), LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. *Eur J Soil Sci*, 69: 140-153. <https://doi.org/10.1111/ejss.12499>

Pacini, L., Yunta, F., Jones, A., Montanarella, L., Barrè, P., Saia, S., Chen, S., & Schillaci, C. (2023). Fine earth soil bulk density at 0.2 m depth from Land Use and Coverage Area Frame Survey (LUCAS) soil 2018. *European Journal of Soil Science*, 74(4), e13391. <https://doi.org/10.1111/ejss.13391>

Panagos, P., Montanarella, L., Barbero, M., Schneegans, A., Aguglia, L., & Jones, A. (2022). Soil priorities in the European Union. *Geoderma Regional*, 29, e00510.

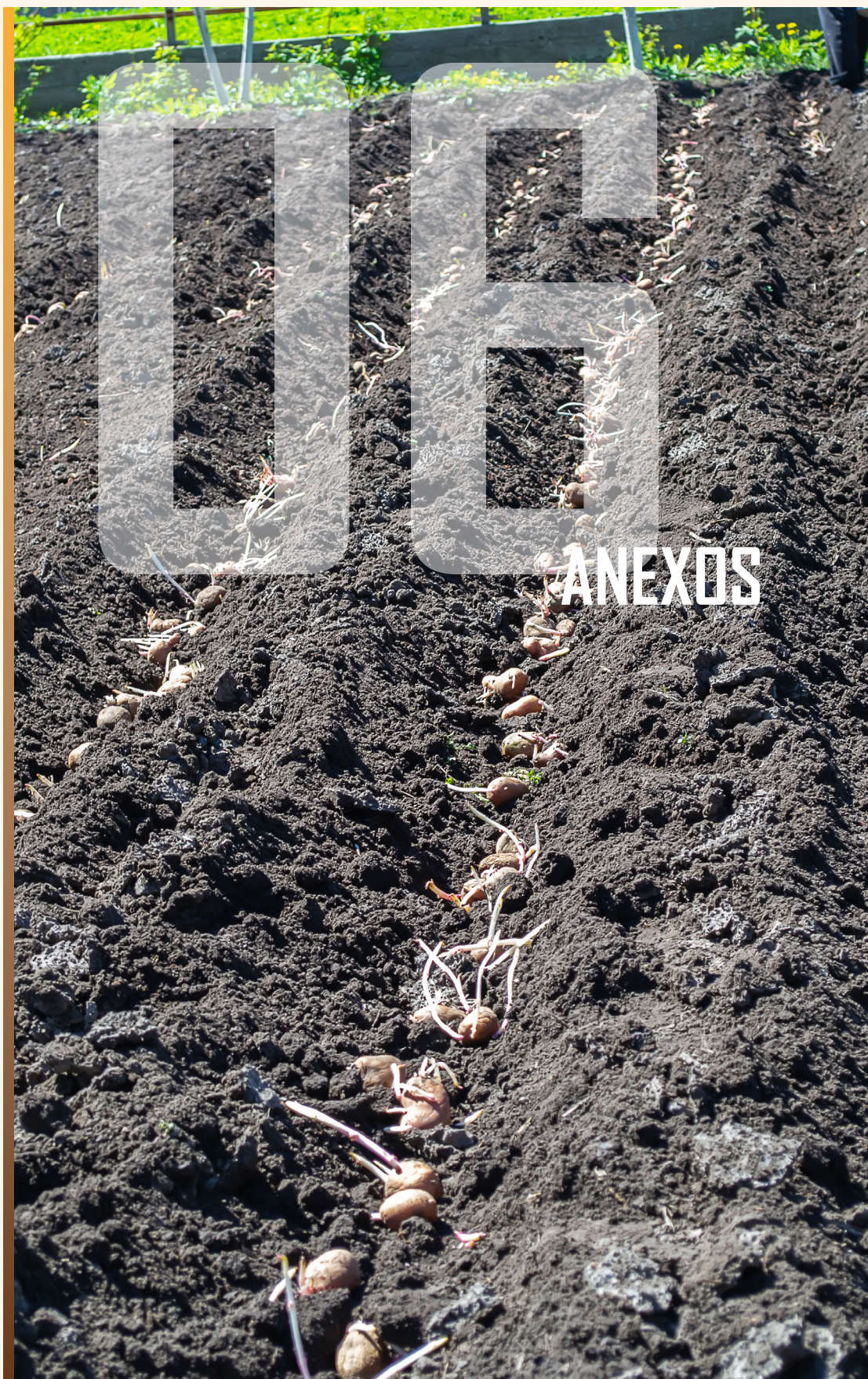
Poeplau, C., Vos, C., and Don, A. (2017): Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content, *SOIL*, 3, 61-66, <https://doi.org/10.5194/soil-3-61-2017>

Rodríguez Martín, J., Álvaro-Fuentes, J., Gonzalo, J., Gil, C., Ramos-Miras, J. J., Corbí, J. G., & Boluda, R. (2016). Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma*, 264, 117-125.

Rodríguez Martín, J. A., López Arias, M., Grau Corbí, J. M., & Gil Cañaveras, C. (2009). *Metales pesados, materia orgánica y otros parámetros de los suelos agrícolas y pastos de España*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) & Ministerio de Ciencia e Innovación.

Symanczik, S., Lori, M., Bacq-Labreuil, A., Beriot, N., Berlin, A., Bünemann, E.K., Cheval, P., Creamer, R., Cunha, L., David, F., Di Lonardo, P., Götzinger, S., Hofman, J., Mäkipää, R., Martínez-Mena, M., Möller, J., Reis, F., Sandén, T., Törmänen, T. & Mulder, T. 2025. BENCHMARKS soil sampling protocol : Guidelines for agricultural and forest systems. Natural Resources and Bioeconomy Studies 40/2025. Natural Resources Institute Finland. Helsinki. 32 p





Anexo I. Fichas de proyectos desarrollados en Castilla-La Mancha

Proyecto I: Proyecto I: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de viñedos en Tarancón (D.O. Uclés)

- **Fecha:** 06/11/2024
- **Entidad responsable:** ADESIMAN y Consejería de Agricultura y Desarrollo Rural (JCCM); participación EES y GEFOREST.
- **Objetivo principal:** Evaluar los stocks actuales de carbono en fincas de viñedos de Tarancón (D.O. Uclés) y testar una metodología innovadora para su futura incorporación a mercados de carbono.
- **Metodología aplicada:**
 - Medición directa de biomasa aérea y radicular en cepas.
 - LiDAR terrestre (aplicado pioneramente en viñedos).
 - Estimaciones con ecuaciones alométricas.
 - SoilGrids para contenido de carbono en suelo.
 - Modelos estadísticos de huella de carbono compatibles con protocolos internacionales.
- **Indicadores empleados:** Biomasa aérea, biomasa radicular, carbono en suelo, CO₂eq/ha, tokens (bonos de carbono).
- **Resultados principales:**
 - Stocks de CO₂e en biomasa: 4,24 t/ha.
 - Stocks de CO₂e biomasa + suelo: 100,45 t/ha.
 - Potencial de comercialización: 3,39 tokens/ha (tras buffer del 20%).
 - Validación preliminar de metodología replicable a otros cultivos perennes (olivo, almendro, albaricoquero).
- **Cultivos / sistemas agrícolas:** Viñedos (variedades Tempranillo, Macabeo, Airén, Graciano).
- **Escala espacial/temporal:** Piloto local (Tarancón), replicable a otras zonas y cultivos perennes de CLM.
- **Buenas prácticas / enfoques innovadores:**
 - Uso pionero de LiDAR terrestre en viñedos.

- Metodología integradora suelo + biomasa.
- Enfoque hacia generación de créditos de carbono como fuente de ingresos.
- **Limitaciones / vacíos detectados:**
 - Necesidad de calibrar ecuaciones alométricas locales (actualmente extrapoladas).
 - SoilGrids ofrece valores potenciales, no siempre reales.
 - Solo se evaluaron stocks actuales, sin análisis detallado de escenarios futuros de gestión.

Proyecto 2: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de almendros en Villanueva de la Jara (Villanueva de la Jara, Cuenca).

- **Fecha:** 07/10/2024
- **Entidad responsable:** ADIMAN, Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES) y GEFOREST.
- **Colabora:** Consejería de Agricultura y Desarrollo Rural (JCCM).
- **Financiación:** ADIMAN, con apoyo de RECAMDER y JCCM.
- **Objetivo principal:** Validar y aplicar una metodología robusta para cuantificar el carbono almacenado en fincas de almendros, evaluar su contribución a los servicios ecosistémicos y analizar su potencial de incorporación a mercados de carbono.
- **Metodología aplicada:**
 - LiDAR terrestre para inventario y modelado 3D de árboles.
 - Muestreo de suelo (físico-químico y biológico).
 - Modelos alométricos específicos para almendros.
 - Estimación de carbono en biomasa aérea y radicular.
 - Uso de SoilGrids para carbono en suelo (con ajuste -20% por conservadurismo).
 - Aplicación de protocolos IPCC e INIA-CSIC para factores de conversión.
- **Indicadores empleados:** Altura y diámetro de árboles, biomasa aérea y radicular, carbono orgánico en suelo, densidad aparente, indicadores físico-químicos (pH, MO, CIC, CE), indicadores biológicos (respiración, actividad enzimática).

- **Resultados principales:**

- Biomasa media en almendros: 18,26 t/ha $\approx$ 8,24 tCO₂eq/ha.
- Carbono en suelo: 21,47 t/ha $\approx$ 78,70 tCO₂eq/ha.
- Total biomasa + suelo: $\approx$ 96,73 tCO₂eq/ha.
- Potencial de comercialización: 14,61 tokens/ha (tras buffer 20%).
- Validación metodológica pionera en CLM con LiDAR terrestre para cultivos perennes.

- **Cultivos / sistemas agrícolas:** Almendros (Villanueva de la Jara, Cuenca).

- **Escala espacial/temporal:** Local piloto, con metodología replicable en otros cultivos perennes.

- **Buenas prácticas / enfoques innovadores:**

- Primer uso documentado de LiDAR terrestre en almendros en la región.
- Integración de análisis físico-químico y biológico del suelo con modelado 3D de biomasa.
- Propuesta de esquemas innovadores de créditos: conservación, stocks futuros, mejora.

- **Limitaciones / vacíos detectados:**

- Ecuaciones alométricas no calibradas localmente.
- Valores de SoilGrids reflejan potencial más que realidad.
- Necesidad de evaluar escenarios de gestión agrícola y residuos (ej. uso de cáscaras para biomasa).

Proyecto 3: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en pastos permanentes en Sierra Molina y Tortuera, Guadalajara

- **Fecha:** 18/11/2024

- **Entidad responsable:** Asociación Desarrollo Rural Molina de Aragón – Alto Tajo (con apoyo de RECAMDER y Consejería de Agricultura JCCM).

- **Colaboradores:** Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES), UCLM (laboratorio de suelos).

- **Financiación:** ADR Molina de Aragón – Alto Tajo, JCCM.

- **Objetivo principal:** Validar una metodología de cuantificación de carbono en pastos permanentes, evaluar los stocks actuales en biomasa y suelo, y explorar su potencial para generar créditos de carbono y servicios ecosistémicos.
- **Metodología aplicada:**
 - Clasificación tipológica del pasto (San Miguel 2019, vinculación con sistema EUNIS).
 - Muestreo de suelo (0–10 cm) y análisis físico-químico y biológico en laboratorio UCLM.
 - Estimaciones de biomasa herbácea (aérea y radicular) mediante factores IPCC.
 - Factores de conversión estándar (0,47 C/biomasa).
 - Buffer del 20% para estimar créditos (tokens).
- **Indicadores empleados:** Biomasa herbácea aérea y radicular, carbono en suelo, densidad aparente, pH, CE, respiración microbiana.
- **Resultados principales:**
 - Biomasa herbácea: 23,26 tCO₂eq/ha.
 - Carbono suelo (0–10 cm): 44,71 tCO₂eq/ha.
 - Total: 67,97 tCO₂eq/ha.
 - Créditos disponibles: 18,61 tokens/ha.
 - Metodología replicable a otros sistemas pastorales de CLM.
- **Cultivos / sistemas agrícolas:** Pastos permanentes bajo pinar y zonas abiertas, con ganado (caballos, ovejas, bovino) y fauna silvestre (ciervos).
- **Escala espacial/temporal:** Piloto en Sierra Molina y Tortuera (Guadalajara).
- **Buenas prácticas / enfoques innovadores:**
 - Inclusión de indicadores biológicos de suelo (actividad enzimática, respiración).
 - Clasificación ecológica de hábitats compatible con normativa europea.
 - Propuesta de esquemas de créditos diferenciados (conservación, stocks futuros, mejora).
- **Limitaciones / vacíos detectados:**
 - Solo se analizó el horizonte 0–10 cm, sin profundización estratificada.

- No se evaluaron escenarios de gestión ni cargas ganaderas en detalle.
- Necesidad de integrar biomasa leñosa (árboles y arbustos) en futuros estudios.

Proyecto 4: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de viñedos en Ciudad Real

- **Fecha:** 07/11/2024
- **Entidad responsable:** Asociación Alto Guadiana Mancha, Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES) y GEFOREST..
- **Gestión/financiación:** Asociación Alto Guadiana Mancha, con apoyo de RECAMDER y Consejería de Agricultura y Desarrollo Rural (JCCM).
- **Objetivo principal:** Evaluar los stocks actuales de carbono en fincas de viñedos de Ciudad Real y testar una metodología innovadora para estimar su potencial de captura, con vistas a su incorporación a mercados de carbono y servicios ecosistémicos.
- **Metodología aplicada:**
 - Inventario de cepas mediante LiDAR terrestre + medición tradicional (altura, diámetro).
 - Aplicación de ecuaciones alométricas publicadas (Miranda et al.) para biomasa aérea y radicular.
 - Conversión de biomasa a carbono y CO₂eq (factores IPCC).
 - SoilGrids para carbono en suelo (0–30 cm), con ajuste conservador (-20%).
 - Buffer de seguridad del 20% para estimar créditos de carbono (tokens).
- **Indicadores empleados:** Biomasa aérea y radicular (t/ha), carbono orgánico del suelo (t/ha), CO₂eq total y tokens/ha.
- **Resultados principales:**
 - Biomasa: 6,49 tCO₂eq/ha.
 - Biomasa + suelo (0–30 cm): 94,97 tCO₂eq/ha.
 - Créditos disponibles: 5,19 tokens/ha (tras buffer 20%).
 - Valores consistentes entre parcelas, independientemente de variedad, marco de plantación o edad.
- **Cultivos / sistemas agrícolas:** Viñedos (variedades Airén, Tempranillo, Macabeo; marcos en vaso y espaldera).

- **Escala espacial/temporal:** Piloto en varias fincas de Ciudad Real, metodología replicable a otros cultivos leñosos.
- **Buenas prácticas / enfoques innovadores:**
 - Uso pionero de LiDAR terrestre en viñedos de CLM.
 - Metodología combinada biomasa + suelo + factores conservadores para tokens.
 - Enfoque hacia mercados de servicios ecosistémicos.
- **Limitaciones / vacíos detectados:**
 - Necesidad de desarrollar ecuaciones alométricas locales.
 - SoilGrids refleja valores potenciales más que reales.
 - No se evaluaron prácticas agrícolas diferenciadas ni escenarios futuros de gestión.

Proyecto 5: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de albaricoques en Hellín (Campos de Hellín, Albacete).

- **Fecha:** 21/10/2024
- **Entidad responsable:** EAsociación para la promoción del desarrollo de la comarca Campos de Hellín, Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES) y GEFOREST.
- **Colabora:** Consejería de Agricultura y Desarrollo Rural (JCCM).
- **Financiación:** Asociación para la promoción del desarrollo de la comarca Campos de Hellín, con apoyo de RECAMDER y JCCM.
- **Objetivo principal:** Validar y aplicar una metodología robusta para cuantificar el carbono almacenado en fincas de albaricoque, evaluar su papel como sumidero agrícola y explorar su potencial de incorporación en mercados de carbono.
- **Metodología aplicada:**
 - Inventario de árboles mediante **LiDAR terrestre** (modelado 3D).
 - Estimación de biomasa aérea y radicular con **ecuaciones alométricas** (*Prunus armeniaca* L.).
 - Conversión a carbono y CO₂eq con factores estándar (INIA-CSIC, IPCC).
 - Estimación de carbono en suelo a partir de **SoilGrids (0–30 cm)**, aplicando reducción del 20% por conservadurismo.

- Cálculo de **tokens (bonos de carbono)** a partir de stocks de biomasa (con buffer del 20%).
- **Indicadores empleados:** Altura y diámetro de árboles, biomasa aérea y radicular, carbono orgánico del suelo (COS), CO₂eq/ha, tokens/ha.
- **Resultados principales:**
 - Biomasa: 8,94 tCO₂eq/ha.
 - Biomasa + suelo (0–30 cm): 92,89–101,8 tCO₂eq/ha (según finca).
 - Créditos disponibles: 7,15 tokens/ha (solo biomasa considerada comercializable).
 - Coherencia de resultados entre variedades y edades de albaricoque (Murciana, Flopria, Bulida).
- **Cultivos / sistemas agrícolas:** Albaricoques (Campos de Hellín, variedades Murciana, Flopria y Bulida).
- **Escala espacial/temporal:** Local piloto (tres parcelas en Hellín), metodología extrapolable a otros cultivos leñosos de CLM.
- **Buenas prácticas / enfoques innovadores:**
 - Primer uso de **LiDAR terrestre en albaricoque** en España.
 - Inclusión de esquemas de bonos diferenciados: conservación, stocks futuros, mejora.
 - Metodología replicable y alineada con protocolos internacionales.
- **Limitaciones / vacíos detectados:**
 - Carbono del suelo no comercializable bajo esquemas actuales, aunque tiene gran relevancia.
 - Ecuaciones alométricas no calibradas localmente.
 - SoilGrids refleja valores potenciales, no siempre reales.
 - No se incluyó un análisis de escenarios de gestión agrícola y residuos (ej. uso de huesos como biomasa).

Proyecto 6: Evaluación del carbono almacenado y el potencial de captura de carbono en fincas de Toledo

- **Fecha:** 2024
- **Entidad responsable:** Grupo de Desarrollo Rural Montes de Toledo, y participan Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES) y GEFOREST.

- **Financiación:** Programa LEADER a través de Grupo de Acción Local.
- **Objetivo principal:** Evaluar los stocks de carbono almacenados en fincas de olivar de los Montes de Toledo y desarrollar una metodología de cuantificación que permita valorar su contribución a los servicios ecosistémicos, facilitando su posible integración en mercados voluntarios de carbono.
- **Metodología aplicada:**
 - Medición y estimación de biomasa aérea del olivar mediante tecnología LiDAR terrestre.
 - Aplicación de ecuaciones alométricas y factores de conversión compatibles con protocolos IPCC para la estimación de biomasa y carbono.
 - Estimación del carbono orgánico del suelo a partir de la base de datos SoilGrids.
 - Conversión de stocks de carbono a equivalentes de CO₂ (CO₂eq) mediante factores estandarizados.
 - Cálculo del potencial de generación de créditos de carbono (tokens), aplicando un buffer de seguridad del 20%, en línea con prácticas habituales de los mercados voluntarios.
- **Indicadores empleados:** biomasa aérea; carbono en biomasa; carbono orgánico del suelo; CO₂eq/ha; potencial de generación de tokens de carbono.
- **Resultados principales:**
 - Stocks de CO₂eq en biomasa: 13,72 t CO₂eq/ha.
 - Stocks de CO₂eq en biomasa + suelo: 99,76 t CO₂eq/ha.
 - Distribución del carbono: aproximadamente 14% en biomasa aérea y 86% en suelo.
 - Potencial de comercialización estimado: 10,97 tokens/ha (tras aplicación del buffer del 20%).
- **Cultivos / sistemas agrícolas:** Olivar tradicional de secano en los Montes de Toledo.
- **Escala espacial/temporal:** Estudio piloto a escala de finca en los Montes de Toledo, con potencial de réplica a otras zonas olivareras de Castilla-La Mancha y a otros cultivos leñosos perennes.
- **Buenas prácticas / enfoques innovadores:**
 - Uso de tecnología LiDAR terrestre para la estimación de biomasa en olivar.
 - Integración de datos de biomasa y suelo en un marco metodológico compatible con estándares internacionales.

- Orientación explícita a la estimación del potencial de acceso a mercados voluntarios de carbono.
- **Limitaciones / vacíos detectados:**
 - Estimación del carbono del suelo basada en bases de datos globales (SoilGrids), sin muestreo directo en campo.
 - Carácter piloto del estudio, que requiere validación adicional y ampliación de la base de datos local.
 - Ausencia de escenarios diferenciados de manejo agrícola (cubiertas vegetales, laboreo, poda, etc.) y de análisis dinámicos a largo plazo.

Proyecto 7: Desarrollo de aplicación informática para la estimación de stocks de carbono agrícola en CLM

- **Fecha:** 2024
- **Entidad responsable:** Escuela de Emprendimiento Sostenible (EES) y GEFOREST.
- **Financiación:** Programa LEADER a través de Grupo de Acción Local.
- **Objetivo principal:** Desarrollar una aplicación informática que permita calcular de manera automatizada los stocks de carbono (biomasa aérea, radicular y suelo) en cultivos agrícolas de Castilla-La Mancha, integrando datos de campo, teledetección y repositorios globales.
- **Metodología aplicada:**
 - Desarrollo de una base de datos relacional con parámetros de biomasa y carbono por cultivo.
 - Integración de datos de LiDAR terrestre y satelital, SoilGrids y modelos alométricos.
 - Implementación de algoritmos de cálculo siguiendo protocolos IPCC y estándares internacionales.
 - Interfaz gráfica sencilla para uso por técnicos y agricultores.
- **Indicadores empleados:** Biomasa aérea y radicular, carbono en suelo, CO₂eq/ha, potencial de tokens de carbono.
- **Resultados principales:**
 - Creación de una herramienta informática operativa para el cálculo automatizado de stocks de carbono.
 - Validación preliminar con proyectos piloto (viñedo, almendro, albaricoque, pastos).

- Potencial de aplicación en toda la región y extrapolación a otros cultivos perennes.
- **Cultivos / sistemas agrícolas:** Viñedos, almendros, albaricoques, pastos (pilotos integrados).
- **Escala espacial/temporal:** Regional (CLM), con base en pilotos locales.
- **Buenas prácticas / enfoques innovadores:**
 - Primera herramienta informática regional para cálculo de carbono en suelos agrícolas.
 - Integración de múltiples fuentes de datos en una plataforma unificada.
 - Facilita la futura certificación y comercialización de créditos de carbono.
- **Limitaciones / vacíos detectados:**
 - Requiere alimentación continua con datos actualizados de campo.
 - Ecuaciones alométricas aún no calibradas localmente.
 - Dependencia de repositorios globales (SoilGrids), con valores potenciales más que reales.

Anexo II. Descripción de otros proyectos Fichas de proyectos desarrollados en Castilla-La Mancha

1. El Atlas de Suelos Vitícolas de Castilla-La Mancha.

Es una publicación pionera iniciada en 2010 por la Universidad de Castilla-La Mancha, el IVICAM (actual IRIAF) y la Universidad Autónoma de Madrid, y publicada en 2015. La obra recopila y describe 110 perfiles de suelo vitícola representativos de prácticamente todas las denominaciones de origen de la región, con la excepción de Mondéjar, aportando para cada uno datos analíticos de los perfiles del suelo, descripciones morfológicas y fotografías de los diferentes perfiles clasificados. En su elaboración se aplicaron metodologías internacionales, entre ellas las normas de Naciones Unidas y del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) para la clasificación y descripción de suelos. El atlas caracteriza parámetros fundamentales como la textura, la composición mineral y de materia orgánica, la estructura, la profundidad, la presencia de carbonatos, la capacidad de retención de agua, el drenaje y la pedregosidad, entre otros. Sus objetivos son facilitar el reconocimiento de la diversidad edáfica vitícola, difundir la tipología de los suelos manchegos y servir como herramienta para técnicos, agricultores, bodegueros y administraciones en la planificación del uso del suelo y en la mejora de la calidad de los vinos. La obra pone de relieve la amplia diversidad de suelos existentes en Castilla-La Mancha (calizos, franco-arcillosos, arenosos, entre otros) y constituye un hito en el conocimiento vitícola de la región, al sentar las bases para futuros estudios y actuaciones en torno al viñedo.

Entre la información recopilada en el *Atlas de Suelos Vitícolas de Castilla-La Mancha*, varios parámetros resultan de especial interés para la estimación del stock de carbono en los suelos vitícolas de la región. El contenido de materia orgánica constituye el principal indicador, ya que determina de forma directa la fracción de carbono orgánico. La textura y la proporción de fracciones finas, particularmente las arcillas, son relevantes para la estabilización de dicho carbono en el suelo, mientras que la pedregosidad limita la fracción efectiva de suelo fino con capacidad de almacenamiento. Asimismo, la profundidad efectiva del perfil, junto con la densidad aparente, permite calcular el stock de carbono por unidad de superficie. El contenido en carbonatos aporta información adicional al distinguir entre carbono orgánico e inorgánico, especialmente en suelos calizos predominantes en Castilla-La Mancha. Finalmente, las propiedades relacionadas con la capacidad de retención de agua y el drenaje influyen en la dinámica de la materia orgánica y, por tanto, en la acumulación o pérdida de carbono a largo plazo.

Aunque la información del *Atlas de Suelos Vitícolas de Castilla-La Mancha* constituye una fuente valiosa para aproximarse a la estimación del stock de carbono en los suelos de viñedo, su disponibilidad presenta limitaciones, ya que hasta el momento solo se ha podido acceder a la obra en formato impreso, sin contar con ejemplares digitales ni con los datos en un formato de base de datos que permita su tratamiento directo. Además, debe considerarse que los perfiles descritos fueron recopilados hace más de una década, por lo que es posible que los cambios en los manejos vitícolas de la región (laboreo, cubiertas vegetales, fertilización, riego, etc.) hayan influido en la dinámica del carbono del suelo. No obstante, pese a estas restricciones, los datos disponibles representan un punto de partida sólido para una primera aproximación al análisis del stock de carbono en los suelos vitícolas manchegos, aportando una base metodológica y comparativa sobre la que se pueden plantear estudios más actualizados y específicos.

2. El informe técnico Producción Ecológica Mediterránea y Cambio Climático: Estado del conocimiento (Ecovalia/UCO, 2019)

Este informe sintetiza los resultados de un exhaustivo metaanálisis basado en 1.023 publicaciones científicas revisadas sobre agricultura mediterránea y emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque se trata de un estudio de alcance nacional, incluye datos específicos de Castilla-La Mancha, aportando una referencia directa que destaca el potencial de la región en la mitigación climática. Concretamente, el informe aporta datos de Castilla-La Mancha, destacando su peso en cultivos ecológicos como el viñedo (53% de la superficie estatal), el olivar (33%), los frutos secos (23%), los cereales de invierno (37%) y las hortalizas (17%). El estudio analiza tanto agricultura convencional como ecológica, con especial énfasis en esta última, y concluye que el viñedo ecológico presenta un alto potencial de secuestro de carbono en el suelo, especialmente mediante prácticas como la implantación de cubiertas vegetales, la aplicación de enmiendas orgánicas y la reincorporación de restos de poda y subproductos de vinificación, lo que permite reducir la huella de carbono en un promedio del 33% y alcanzar valores negativos cuando estas prácticas se generalizan. Esta información resulta de gran interés para valorar el papel de la región en la mitigación climática, ya que el estudio demuestra que prácticas como las cubiertas vegetales, las enmiendas orgánicas y la reincorporación de restos de poda reducen de forma significativa la huella de carbono e incrementan el secuestro de carbono en los suelos mediterráneos. No obstante, al tratarse de un metaanálisis bibliográfico a nivel nacional, el informe no incluye parámetros edáficos de detalle (como textura, densidad aparente, profundidad o contenido absoluto de carbono orgánico) ni valores de stock de carbono medidos en campo, lo que impide calcular directamente las reservas de carbono en los suelos agrícolas de Castilla-La Mancha. La metodología empleada consistió en una búsqueda sistemática en Web of Knowledge y revisión de referencias cruzadas, seleccionando estudios hasta 2017 según criterios de calidad y rigor, con especial atención a los metaanálisis. Los artículos se clasificaron según el tipo de manejo (convencional, ecológico o mixto), el tipo de emisión analizada, secuestro de carbono, análisis de ciclo de vida, tipo de producción (herbáceos, leñosos, pastos y ganadería), así como por metodología aplicada (factores IPCC, estudios modelizados, mediciones directas de distinta duración o revisiones). De este modo, no se limita a factores de emisión estandarizados, sino que integra mediciones de campo, modelizaciones y revisiones sistemáticas, lo que refuerza la solidez de sus conclusiones.

En consecuencia, este estudio constituye una base metodológica y comparativa sólida, que puede ser una primera aproximación útil para identificar tendencias y prácticas de manejo favorables, pero su aplicación a la estimación del stock de carbono en la región requiere complementarlo con fuentes edafológicas específicas y actualizadas.

3. El estudio nacional de Rodríguez Martín et al. (2016), publicado en la revista internacional *Geoderma*

Este estudio científico tiene una repercusión significativa para los futuros trabajos sobre el stock de carbono en los suelos de Castilla-La Mancha. Sus resultados confirman que la región se encuentra entre las áreas con menores contenidos de carbono orgánico del suelo, generalmente por debajo del 1% de SOC y con valores de 20–40 Mg C/ha en el horizonte 0–30 cm, lo que pone de relieve la vulnerabilidad edáfica de un territorio marcado por condiciones semiáridas y un uso agrícola intensivo. Esta constatación no solo ofrece una línea base de referencia para contrastar estudios posteriores a escala regional, sino que también justifica la necesidad de priorizar a Castilla-La Mancha en políticas y proyectos de conser-

vación y secuestro de carbono. La metodología aplicada en este trabajo se basó en un muestreo sistemático con 4.401 puntos georreferenciados a nivel nacional distribuidos en una malla de 8×8 km en áreas agrícolas y 16×16 km en forestales y pastizales, con recogida de muestras compuestas de los 30 cm superficiales del suelo. En cada localización se determinó el contenido de carbono orgánico (SOC, método Walkley-Black), la densidad aparente (método del cilindro) y la pedregosidad (fracción gruesa >2 mm), variables que se integraron en la fórmula estándar para calcular el stock de carbono orgánico en suelos ($SOCS = SOC \times BD \times profundidad \times (1 - \text{fracción gruesa})$). Posteriormente, estos parámetros fueron interpolados mediante técnicas geoestadísticas de kriging ordinario, apoyadas en semivariogramas (herramienta estadística usada en geoestadística para describir cómo varía una propiedad del suelo (en este caso el carbono orgánico, la densidad aparente o la pedregosidad) en el espacio en función de la distancia entre puntos de muestreo) para caracterizar la dependencia espacial, generando mapas continuos con resolución de 100×100 m para todo el territorio nacional. Este enfoque metodológico constituye un referente replicable que puede ser adaptado a futuros inventarios regionales en Castilla-La Mancha, permitiendo aumentar la resolución espacial y mejorar la precisión de los diagnósticos. Finalmente, al identificar la baja reserva de carbono como una limitación, el estudio subraya el alto potencial de mejora de los suelos de Castilla-La Mancha mediante la implantación de prácticas de manejo sostenibles (cubiertas vegetales, laboreo reducido, incorporación de residuos orgánicos), lo que deberá ser un eje prioritario en los análisis y estrategias en un futuro próximo.

4. El estudio Metales pesados, materia orgánica y otros parámetros de los suelos agrícolas y pastos de España (MARM/INIA, 2009)

Este estudio constituye una de las bases edafológicas más completas y homogéneas a nivel nacional. A partir de un muestreo sistemático en malla de 8×8 km en más de 4.000 parcelas agrícolas y de pastos, con muestras compuestas de los 0–25 cm superficiales, se analizaron parámetros de gran interés tanto para la calidad del suelo como para la estimación del carbono orgánico: materia orgánica, pH, textura, carbonatos, fósforo, potasio, junto con el contenido en metales pesados y otros indicadores. Los resultados permiten disponer de un diagnóstico detallado a escala provincial, y en el caso de Castilla-La Mancha ponen de manifiesto un déficit generalizado de materia orgánica, con valores medios entre 1,36% en Toledo y 1,86% en Guadalajara, equivalentes a aproximadamente un 1% de carbono orgánico. Estos contenidos se reducen aún más en cultivos leñosos estratégicos de la región, como el viñedo y el olivar, confirmando la baja fertilidad orgánica de estos suelos y su alta vulnerabilidad a la degradación. Desde la perspectiva del stock de carbono, esta información es muy relevante. Aunque el estudio no calcula directamente las reservas en Mg C/ha, sí proporciona los valores básicos de materia orgánica y características edáficas necesarios para, combinados con datos de densidad aparente y pedregosidad, realizar dichas estimaciones. En este sentido, en el estudio se complementa directamente con el artículo de Geoderma (Rodríguez Martín et al., 2016), que sí integra esos parámetros en un cálculo nacional del stock de carbono y sitúa a Castilla-La Mancha entre las regiones con menores valores (20–40 Mg C/ha en los 30 cm superficiales). La coincidencia entre ambos estudios (baja materia orgánica en MARM/INIA y bajos stocks en Geoderma) refuerza la conclusión de que los suelos agrícolas de Castilla-La Mancha presentan un amplio margen de mejora en sus reservas de carbono. Además, la información adicional sobre metales pesados incluida en el inventario de MARM/INIA es especialmente útil para la región, ya que permite evaluar la viabilidad y seguridad ambiental del uso de enmiendas orgánicas (compost, estiércoles, subproductos agroindustriales) como herramienta para incrementar el carbono del suelo. Por tanto, este estudio no solo es relevante como diagnóstico de partida, sino también como

complemento metodológico y ambiental a trabajos posteriores como el de Geoderma, ofreciendo una base sólida para la planificación de futuros estudios y programas de mejora del stock de carbono en los suelos agrícolas de Castilla-La Mancha.

5. El proyecto de investigación AGL2012-34199 “Incrementar la sostenibilidad de los agroecosistemas: recuperar las funciones ecológicas del suelo para reducir insumos y potenciar la supresividad edáfica” (2013–2015)

Este proyecto, financiado por el antiguo Ministerio de Economía y Competitividad y ejecutado por el INIA, se centró en restaurar las funciones ecológicas de los suelos agrícolas para reducir el uso de fertilizantes y fitosanitarios y, al mismo tiempo, aumentar la capacidad natural del suelo para suprimir patógenos. Entre las estrategias abordadas destacaron la incorporación de enmiendas orgánicas, el uso de subproductos agroalimentarios y el fomento de la actividad biológica edáfica, medidas que no solo inciden en la resiliencia y la supresividad del suelo, sino que también repercuten directamente en el incremento de la materia orgánica y las reservas de carbono. En este sentido, aunque el objetivo central no fue la cuantificación del stock de carbono, los enfoques del proyecto resultarían plenamente aplicables a regiones como Castilla-La Mancha, donde los suelos agrícolas presentan bajos contenidos de carbono orgánico y, por tanto, un elevado potencial de mejora. Así, los resultados de este proyecto podrían proporcionar información para la gestión de la fertilidad biológica y la sanidad del suelo con estrategias de secuestro de carbono y sostenibilidad agraria. Sin embargo, el proyecto finalizado en 2015 solamente ha generado una publicación científica denominada “Effects of cover crops on soil biota, soil fertility and weeds, and *Pratylenchus* suppression in experimental conditions” (https://brill.com/view/journals/nemy/21/3/articlep227_1.xml?ebody=Abstract%2FExcerpt), y no se ha encontrado otra información relevante que pueda ser utilizada. Tampoco el contacto con los responsables del proyecto ha dado fruto para la disponibilidad de datos relevantes para el objetivo del presente proyecto.

6. El proyecto PID2019-105373RB-I00-El carbono orgánico y la biodiversidad del suelo como herramientas mitigadoras del efecto del cambio climático sobre los cultivos (2020-2024) (CLIMBIO SOIL)

Este proyecto, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (convocatoria 2019, inicio 01/06/2020), aborda el papel del carbono orgánico y la biodiversidad del suelo como herramientas para mitigar los efectos del cambio climático sobre los cultivos. Consta de, al menos, un subproyecto en el IRIAF-CIAPA Marchamalo (Guadalajara) orientado a evaluar el efecto de estrés climático (aumento de temperatura y reducción de disponibilidad hídrica) sobre los suelos y los cultivos, y a valorar prácticas de manejo que mejoren carbono del suelo y comunidades edáficas (microbiota y fauna) como base de resiliencia agronómica. Hasta el momento se han identificado dos publicaciones científicas que referencian directamente al proyecto. La primera (Management legacy drives soil food web resistance and resilience to climatic stress) analiza cómo los legados de manejo del suelo (laboreo convencional vs. no laboreo, monocultivo vs. rotación) condicionan la resistencia y resiliencia de la biota edáfica y de los cultivos frente a sequías y episodios de calor, destacando el papel positivo del no-till combinado con rotaciones en la acumulación de carbono orgánico del suelo y en la estabilidad de las comunidades edáficas. La segunda (Organic amendments drive agroecosystem multifunctionality and soil micro-food web short-term dynamics) evalúa el efecto de enmiendas orgánicas de distinta calidad (relación C:N) sobre la multifuncionalidad del suelo y las cadenas tróficas microbianas, mostrando que la calidad de la enmienda

es determinante para potenciar la actividad biológica, la diversidad edáfica y, en consecuencia, la capacidad de secuestro de carbono a corto plazo. Sin embargo, ambos estudios se desarrollan fuera de Castilla-La Mancha y presentan limitaciones en cuanto a la extrapolación directa de sus resultados, sin embargo proporcionan evidencia experimental valiosa sobre los mecanismos mediante los cuales el manejo de conservación y las enmiendas orgánicas contribuyen al incremento del carbono orgánico del suelo y a la resiliencia de los agroecosistemas mediterráneos, aspectos centrales y directamente alineados con los objetivos del proyecto que aquí se plantea para el contexto regional de Castilla-La Mancha. Aunque se ha contactado directamente con la investigadora principal de los proyectos 5 y 6, nos ha comunicado que no existen datos disponibles derivados de los proyectos que se hayan realizado en la comunidad autónoma, y por tanto, aunque la investigación es interesante y podría ser de interés no aporta datos relevantes para el presente proyecto al no haberse desarrollado el estudio en Castilla-La Mancha.

7. “Desarrollo de estrategias para la valoración de la capacidad de resiliencia de cultivos leñosos y variedades frente al cambio climático” (2023–2029)”.

El IRIAF, a través del IVICAM (Instituto de la Vid y el Vino de Castilla-La Mancha) y con financiación FEDER Regional, están desarrollando actualmente este proyecto. El objetivo general es dar respuesta a los efectos del cambio climático sobre el sector agrícola de Castilla-La Mancha mediante la implementación de estrategias que contribuyan a la sostenibilidad del viñedo y del pistacho, dos cultivos clave de la región. El proyecto contempla líneas de trabajo como la eficiencia hídrica de variedades y portainjertos de vid, la acidificación biológica como alternativa enológica para mitigar la pérdida de acidez de los mostos, el desarrollo de marcadores moleculares y genómicos para la identificación y mejora genética del pistacho, y la implementación de innovaciones para el sector. Los resultados parciales ya publicados incluyen la identificación de variedades de vid más tolerantes a la sequía (ej. Bobal, Garnacha Peluda, Mazuela, Moribel, Albillo Real, Coloraillo, Verdejo) y la caracterización de variedades alternativas a Tempranillo (ej. Benedicto, Moribel) que podrían ofrecer una mayor adaptación sin comprometer el rendimiento. También destacan avances en la bioacidificación enológica y en la secuenciación genómica del pistacho como base para programas de mejora varietal y conservación de la biodiversidad. Aunque este proyecto no aporta directamente datos que podrían ser utilizados para el cálculo de los stocks de carbono en suelos agrícolas, sí resulta altamente relevante al situarse en el ámbito de la adaptación varietal, la gestión hídrica y la resiliencia agroecológica de diferentes tipos de cultivo y variedades, cuyos factores de estudio podrían tener relación con la dinámica del carbono orgánico y la sostenibilidad de los cultivos leñosos en el contexto semiárido de Castilla-La Mancha. Existen diferentes publicaciones desarrolladas en el seno de este proyecto que pueden ser consultadas en la web de IRIAF (<https://iriaf.castillalamancha.es/proyectos/desarrollo-de-estrategias-para-la-valoracion-de-la-capacidad-de-resiliencia-de-cultivos>).

La revisión de proyectos de investigación relacionados con el cambio climático y la sostenibilidad de los sistemas agrarios en Castilla-La Mancha muestra una evolución en los últimos años: inicialmente, la mayor parte de las referencias disponibles correspondían a estudios con más de cinco años de antigüedad, lo que limitaba su aplicabilidad como base actual. Sin embargo, la identificación de iniciativas en curso, como CLIMBIOSOIL (2020–2024) o el proyecto del IRIAF-IVICAM sobre resiliencia de cultivos leñosos (2023–2029), evidencia que se están desarrollando nuevas líneas de investigación en la región. No obstante, estos proyectos, aun siendo de gran relevancia por su enfoque en la resiliencia, la biodiversidad y la adaptación varietal, no cumplen con los requisitos específicos para la estimación

directa del stock de carbono en suelos agrícolas, ya que no generan datos edafológicos sistemáticos (densidad aparente, pedregosidad, carbono orgánico total por perfiles) ni bases de datos abiertas que permitan cálculos regionales detallados. En consecuencia, aunque constituyen un contexto científico valioso y actual, su utilidad para la cuantificación del carbono del suelo es indirecta y complementaria, y deben ser combinados con inventarios edafológicos previos y nuevos muestreos específicos para poder abordar con rigor esta estimación en Castilla-La Mancha.

8. El capítulo “Agricultura y cambio climático en Castilla-La Mancha” (Fabeiro y Brasa, UCLM)

Esta publicación ofrece un análisis contextual de la relación entre el sector agrario regional y el cambio climático, aportando una base conceptual útil para interpretar los estudios de stock de carbono en suelos. El texto señala que en 2006 la agricultura representaba el 13,5% de las emisiones de GEI en CLM, principalmente en forma de N₂O y CH₄, y destaca la especial vulnerabilidad de la región debido a que cerca del 90% de su superficie cultivada es de secano, muy sensible a las variaciones en temperatura y precipitación. El documento subraya que el incremento del carbono orgánico del suelo constituye la vía más eficaz de mitigación en agricultura, reconociendo que las buenas prácticas agrarias (laboreo reducido, incorporación de estiércoles y restos de cultivo, cubiertas vegetales, rotaciones mejoradas o agricultura ecológica) pueden incrementar los depósitos de carbono en el suelo. Además, aporta estimaciones de secuestro potencial en suelos agrícolas según distintas prácticas (p. ej. incorporación de restos de cultivo: 2,54 t CO₂/ha/año, agroenergía: 2,27 t CO₂/ha/año, estiércol: 1,38 t CO₂/ha/año, no laboreo: 1,42 t CO₂/ha/año), aunque advierte de la elevada incertidumbre asociada a estas cifras.

Es importante señalar que este capítulo no propone una metodología original ni protocolos específicos para la cuantificación del stock de carbono, como los que aplican otros inventarios nacionales (ej. Geoderma 2016 o MARM/INIA 2009). En su lugar, ofrece un marco conceptual y estimaciones bibliográficas (principalmente del ECCP, 2004) que sirven como referencia general de los potenciales de secuestro bajo distintas prácticas agrarias. Por tanto, aunque no constituye una fuente metodológica para el cálculo directo del carbono del suelo en Castilla-La Mancha, sí representa una referencia clave de carácter contextual y comparativo, que refuerza la relevancia de estudiar y cuantificar el stock de carbono en los suelos agrícolas de la región en el marco de la mitigación y adaptación al cambio climático.

9. El Proyecto de identificación y valoración de servicios ecosistémicos en Castilla-La Mancha (JCCM, 2022)

Este proyecto, promovido por la Consejería de Desarrollo Sostenible en el marco de la Estrategia Regional de Infraestructura Verde, tiene como finalidad cuantificar y poner en valor los beneficios que aportan los ecosistemas a la sociedad y la economía regional, incluyendo de forma explícita el almacenamiento de carbono en la vegetación y en el suelo.

El estudio aplica metodologías europeas (KIP-INCA) de contabilidad de capital natural y genera cartografía regionalizada sobre servicios clave como el almacenamiento de carbono, la regulación climática, el control de la erosión, la retención hídrica y la polinización de cultivos. Esta información permite identificar las áreas con mayor capacidad de provisión de servicios ecosistémicos y constituye un diagnóstico territorial de gran utilidad para la planificación agraria y ambiental.

En relación con el carbono en suelos y cultivos, el proyecto aporta un primer marco económico y territorial de referencia. Aunque centra gran parte de sus análisis en ecosistemas forestales —ejemplificado en el caso del Monte de Utilidad Pública nº106 Los Palancares y Agregados (Cuenca), donde se valoraron servicios como la fijación de carbono, la conservación de suelos y el uso recreativo— también incluye los sistemas agrícolas y esteparios, en especial las ZEPA cerealistas. En estas zonas se reconoce la contribución de la agricultura a la conservación de la biodiversidad y se vinculan pagos compensatorios a los agricultores por prácticas sostenibles compatibles con la PAC.

El informe subraya que servicios como la retención del suelo, el control de la erosión y la polinización de cultivos son esenciales para la sostenibilidad agraria, y propone avanzar hacia esquemas de pago por servicios ecosistémicos que reconozcan también el papel del secuestro de carbono en suelos agrícolas. En este sentido, los resultados constituyen una base metodológica y política para trasladar la valoración de servicios ecosistémicos al ámbito productivo, alineando la agricultura manchega con los objetivos de sostenibilidad y mitigación del cambio climático de la Unión Europea.

Anexo III. Estudios en otras comunidades autónomas españolas

Existen varias iniciativas autonómicas con foco (directo o indirecto) en secuestro de carbono agrícola y, en bastantes casos, enlazadas con la PAC (eco-regímenes, Plan Estratégico, Grupos Operativos, etc.), que se pueden consultar en el Anexo III.

Andalucía (IFAPA / AEAC-SV / sector olivar)

- **LIFE Agromitiga**: impulsa agricultura de conservación para aumentar el C del suelo y desarrollar una metodología aplicable (huella/contabilidad) en explotaciones; ensayos en olivar y herbáceos. Junta de Andalucía+2lifeagromitiga.eu+2
- **GO C-Olivar (D.O.P. Estepa)**: grupo operativo que cuantifica C secuestrado en fincas de olivar y publica resultados parciales (toneladas CO₂ capturadas) —transferible a eco-regímenes de cubiertas en leñosos. asajasevilla.es

Extremadura

- **Despliegue de eco-regímenes PAC**: adopción >91% de la SAU en 2023 (cubiertas, siembra directa, rotaciones), creando una base amplia para monitorizar impactos en C del suelo si se integran métricas regionales. Juntaex+1

Comunitat Valenciana (IVIA)

- **Estimación de potencial de secuestro en suelos agrícolas CV** por el IVIA/CEDAS (orden de decenas de Mt C de potencial). Punto de partida para priorizar cultivos/manejos (cubiertas en cítricos/viña, no laboreo, enmiendas) y vincularlos a eco-regímenes. ivia.gva.es+1

Cataluña (IRTA / clúster INNOVI / PEPAC)

- **AgriCarboniCat / AgriRegenCat**: programas financiados por el Fondo Climático para probar prácticas regenerativas y de “carbon farming” en explotaciones, con enfoque en medir efectos (suelo, agua, rendimiento) y transferirlos al sector. irta.cat+-2Valencia Fruits+2
- **GO CARBONFLOW (viñedo)**: proyecto de grupo operativo cofinanciado por el PEPAC 2023-2027; evalúa manejo del suelo (mulching, enmiendas) para maximizar el sumidero de C en viñedos de secano. Ruralcat+1

Navarra (INTIA / Gobierno de Navarra)

- **CO₂FARM**: iniciativa para desarrollar mercado de agricultura de carbono, centrándose en prácticas que incrementen el C del suelo y su verificación—encaja con eco-regímenes y posibles créditos voluntarios. Neiker+1

Región de Murcia

- **Agroalnext (línea regional)**: proyecto para retener C en suelo vía enmiendas orgánicas exógenas, con objetivos de fertilidad y secuestro; potencial de alineación con eco-regímenes de manejo de suelo. [CARM](#)

ANEXOS

Anexo IV. Ficha de visita de campo para validación de parcelas experimentales

Proyecto: _____

Provincia: _____ Municipio: _

Fecha: ____ / ____ / ____ Técnico responsable: _

1. Identificación de la parcela

Código parcela / SIGPAC: _____

Coordenadas GPS: _____

Accesibilidad: ☐ Fácil ☐ Media ☐ Difícil Observaciones: _____

2. Cobertura y uso del suelo

Cultivo principal: _____

Cultivos secundarios / rotaciones: _____

Cobertura vegetal actual: ☐ Completa ☐ Parcial ☐ Escasa

3. Manejo agrario

Tipo de manejo: ☐ Convencional ☐ Ecológico

Régimen hídrico: ☐ Secano ☐ Regadío

Prácticas observadas:

- Cubiertas vegetales: ☐ Sí ☐ No

- Siembra directa: ☐ Sí ☐ No

- Rotaciones con leguminosas: ☐ Sí ☐ No

- Otras: _____

4. Observaciones ambientales

Condiciones del suelo (textura, pH, erosión, etc.): _____

Condiciones climáticas locales (lluvia, exposición, etc.): _____

Limitaciones o restricciones (pendiente, infraestructuras, figuras de protección): _____

5. Documentación gráfica

Fotografías tomadas: ☐ Sí ☐ No N° de fotos: _____

Observaciones adicionales: _____

