



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-2037

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Life CO₂RK: Conservación y mejora de los alcornoques mediterráneos a través de la silvicultura del carbono

GUILLERMO PALACIOS-RODRIGUEZ¹, MIGUEL ÁNGEL LARA-GÓMEZ³,
CARLOS A. RIVAS¹, RAFAEL M. NAVARRO-CERRILLO²

1. Observatorio del Cambio Global en el Bosque Mediterráneo, Laboratorio de Digitalización y Desarrollo en Ecosistemas Forestales, DigiFoR+-ERSAF, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Crta. IV km. 396, Córdoba, 14071, Spain
2. Laboratorio de Dendrocronología, Silvicultura y Cambio Global – DendrodatLab – ERSAF, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Crta. IV, km. 396, E-14071 Córdoba, Spain
3. IDAF- Centro de Investigaciones Aplicadas al Desarrollo Agroforestal, Parque Científico y Tecnológico Rabanales 21, Córdoba, 14014, España

Resumen

El proyecto Life CO₂RK se centra en la conservación y mejora de los alcornoques mediterráneos, a través del papel fundamental de estos ecosistemas en la fijación de carbono y en la lucha contra el cambio climático. Life CO₂RK busca mejorar la gestión sostenible de estos bosques, potenciando su capacidad de absorción de carbono(C) , a la vez que promueve la biodiversidad y la adaptación al cambio climático. El proyecto está desarrollando itinerarios selvícolas orientados a optimizar el secuestro de C para diferentes tipologías de monte alcornocal. Estas estrategias de gestión, además, buscan aumentar la resiliencia de los alcornoques frente a los incendios forestales, las sequías, los procesos de decaimientos y otros factores asociados al cambio climático, manteniendo el equilibrio ecológico y social de las áreas rurales donde se encuentran estos bosques. El proyecto involucra a propietarios/as, gestores forestales, centros de investigación e instituciones públicas, fomentando la cooperación en la gestión y la conservación de este patrimonio natural. Además de los esquemas de gestión para una silvicultura del carbono en los alcornoques, el proyecto tiene previsto desarrollar un estándar de cuantificación y regulación de proyectos de compensación de carbono realizados en masas de alcornocal, en el marco del Sistema Andaluz de Compensación de Emisiones.

Palabras clave

Alcornocal, Silvicultura del carbono, Mitigación, Adaptación, Cambio Climático, Servicios ecosistémicos

1. Introducción

La implementación de sistemas de comercio de emisiones ha promovido reducciones significativas en los gases de efecto invernadero (GEI), al establecer mecanismos de incentivo económico para la disminución de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en múltiples sectores económicos. No obstante, los denominados sectores difusos, incluyendo los ámbitos residenciales, transporte, gestión de residuos, agricultura, emisiones de gases fluorados y otras actividades industriales de menor intensidad energética quedan fuera del alcance de estos sistemas (ICAP, 2021). A pesar de ello, estos sectores contribuyen aproximadamente con el 40% de las emisiones totales de GEI en la Unión Europea (UE) y con más del 60% en el caso



de España (MITERD, 2024). En este contexto, el Reglamento (UE) 2018/842 del Parlamento Europeo y del Consejo evidencia el compromiso de la UE con la reducción de emisiones en estos sectores. Este objetivo requiere el desarrollo de marcos normativos y operativos a nivel nacional y regional, orientados a canalizar los esfuerzos de mitigación hacia estrategias efectivas de secuestro adicional de carbono, complementarias a la captación natural de los ecosistemas.

Los alcornoques (*Quercus suber* L.) representan uno de los ecosistemas forestales más representativos de la península ibérica (MAGRAMA., 2007), no sólo por su importancia económica, sino también por su alto valor ecológico. Estos sistemas proporcionan una multiplicidad de bienes y servicios, cuya preservación resulta fundamental para el equilibrio ecológico regional (Campos et al., 2021). El principal producto de los alcornoques es el corcho; sin embargo, estos ecosistemas generan otros bienes entre los que destacan los recursos cinegéticos, la provisión hídrica, los productos forestales no madereros, la conservación y mejora del suelo, la mitigación del impacto de incendios forestales, la protección de la biodiversidad, el mantenimiento de la calidad del aire, el control biológico de plagas y la promoción de procesos de polinización (Anaya-Romero et al., 2016). . A nivel funcional, los alcornoques desempeñan un papel crucial en la mitigación del cambio climático, mediante la captura y almacenamiento de carbono atmosférico (Mechergui et al., 2024).

La gestión forestal sostenible constituye un factor determinante para la conservación y funcionalidad de las masas de alcornoque y los servicios ecosistémicos asociados (Montero and López, 2008). En el contexto actual de cambio climático, es imprescindible la adopción de enfoques innovadores y metodologías avanzadas que permitan afrontar los desafíos climáticos, promoviendo la sostenibilidad ambiental, económica y social de estos sistemas). Esta gestión debe estar alineada con las características ecológicas específicas de cada tipología de alcornoque, considerando tanto su dinámica ecológica como los objetivos de manejo definidos (Angiolini et al., 2021).

2. Objetivos

El proyecto LIFE CO₂RK lleva a cabo un conjunto de acciones integradas en tres países (España, Portugal e Italia), tanto a nivel nacional como regional, cada uno con diferentes realidades políticas, legales y operativas. Su objetivo es completar el diseño y desarrollo de herramientas legales, administrativas, financieras y técnicas que faciliten la certificación y el registro del carbono secuestrado mediante prácticas de gestión forestal. Estas herramientas permitirán su intercambio como compensación de emisiones y canalizarán inversiones de sectores difusos en busca de carbono compensado.

Este flujo financiero privado puede ser clave para la conservación de los bosques de *Quercus* en la UE, los cuales, debido a su lento crecimiento, no suelen ser incluidos en las estrategias de fijación de CO₂, a pesar de que la evidencia científica demuestra que los ecosistemas complejos que generan tienen una notable capacidad de fijación de CO₂ (Agudo Romero et al., 2007). El proyecto se desarrolla en bosques de alcornoques, con capacidad de fijar importantes cantidades de CO₂ durante una larga vida útil (p. ej., corcho). Los resultados obtenidos pueden extrapolarse a una familia de especies con amplia distribución en toda la UE, presentes en hábitats prioritarios dentro de la Red Natura 2000, con un considerable impacto en la biodiversidad y la socioeconomía.

Los objetivos específicos del proyecto incluidos en esta comunicación son: i)

tipificación del monte alcornocal; ii) identificación de los almacenes de carbono y las actividades selvícolas aplicables a los alcornocales; iii) diseño de itinerarios selvícolas para el fomento de la fijación de carbono y adecuados a cada tipología; iv) desarrollo de la metodología para cuantificar la absorción de carbono proveniente de la silvicultura.

2. Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados hasta la fecha, se ha seguido la línea de trabajo presentada en la Figura 1, partiendo de una amplia evaluación del estado del arte relacionado con las políticas, metodologías y estrategias relacionadas con los mercados de carbono que ha permitido recopilar, analizar y sintetizar información relevante procedente de diversas fuentes. Esta metodología ha incluido la revisión de artículos científicos, libros, informes técnicos, bases de datos especializadas y publicaciones académicas. Se han seleccionado materiales de alto rigor y relevancia para garantizar una base sólida que respalde los resultados obtenidos y facilite una comprensión. Además, se ha priorizado el acceso a fuentes actualizadas y de reconocida calidad para asegurar que los datos empleados reflejen el estado actual del conocimiento en el ámbito de estudio.

Para diseñar los itinerarios selvícolas se han seguido ocho principios rectores de la Silvicultura orientada a la optimización del secuestro de C: i) El inventario del carbono; ii) la planificación forestal; iii) la flexibilización de la silvicultura; iv) la compatibilidad de usos; v) la organización espacial y temporal; vi) la dinámica de los almacenes de carbono; vii) la complejidad y la diversidad; viii) la dinámica ecológica.



Figura 1: Flujo de trabajo seguido para lograr los objetivos.

4. Resultados

4.1 Tipificación del monte alcornocal

En el proyecto LiFE Co₂rk ha propuesto una tipología forestal de base descriptiva para los alcornocales de Andalucía y del sur de Portugal. La tipología selvícola propuesta parte de propuestas de tipos de alcornocal que se han realizado previamente, así como de otras tipologías selvícolas propuesta para otras especies

de *Quercus* (Tabla 1, Fig. 2), y ha sido consensuada en diferentes rondas de consultas con propietarios y gestores de ambos países.

Tabla 1: Clave de determinación de las tipologías de alcornoque propuesta para el proyecto LIFE CO₂RK.

	Tipología LIFE CO ₂ RK	Características
1	Alcornocales puros y mixtos no degradados	Masas regulares con tendencia a la irregularidad según el índice de complejidad estructural.
2	Alcornocal degradado	Masas regulares densas mixtas según el índice de complejidad estructural
		Masas semirregulares densas según el índice de complejidad estructural
		Masas regulares densas según el índice de complejidad estructural.
3	Dehesas y montados	Alcornocales adeshados regulares puros (semirregulares) según el índice de complejidad estructural.
		Alcornocales adeshados regulares (semirregulares) mixtos según el índice de complejidad estructural.
4	Pinares con subpiso de alcornoque	Pinares en estado latizal y con estrato arbustivo
5	Plantaciones	Plantaciones y repoblaciones en tierras agrarias puras o mixtas de alcornoque
6	Manchas	Arbustados mixtos con presencia de alcornoque.
		Regenerado de alcornoque con mezcla de especies arbustivas

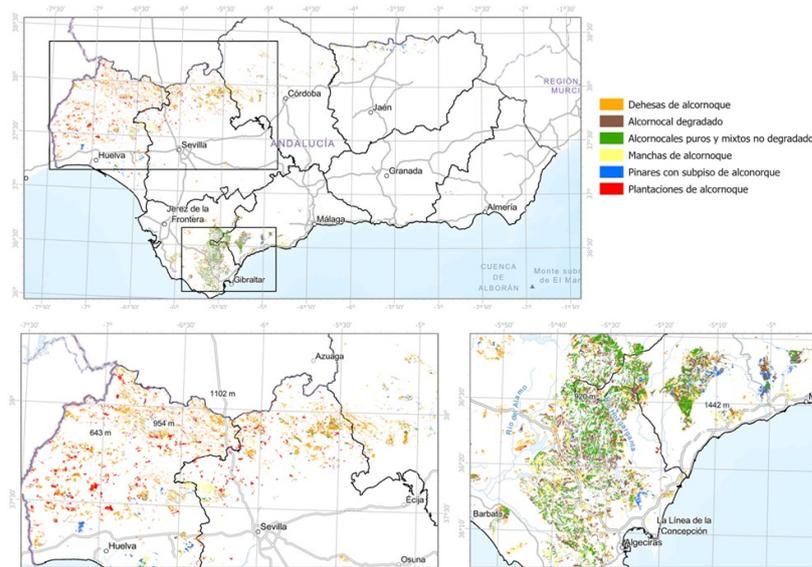


Figura 2: Distribución de las seis tipologías establecidas en Andalucía según datos de especies forestales de Andalucía con figuras en detalle de Sierra morena en las provincias de Huelva y Sevilla y parte de Córdoba (imagen izquierda) y de las zonas de Cádiz y Málaga con mayor presencia de alcornoques (imagen derecha).

4.2 Diseño de itinerarios selvícolas adecuados a cada tipología.



Un primer paso el diseño de los itinerarios fue la identificación de los almacenes de carbono y las actividades selvícolas aplicables a los alcornocales, posteriormente en función de la tipificación y de la selvicultura del carbono enunciados en este documento; se proponen seis itinerarios selvícolas en función de la tipificación de los alcornocales (Tabla 2).

Tabla 2: *Itinerario selvícola de masas de alcornocales degradados. Línea base acorde con las pautas de gestión tradicionales y según normativa aplicable.*

Alcornocales degradados		
Actividad selvícola	Línea Base	Selvicultura de C
Descor-che	Desbornizado a CSC (circunferencia normal sobre el corcho) mínima de 65 cm	Incremento de la CSC mínima para el desbornizado hasta los 95 cm. Esta práctica retrasa el estancamiento en crecimiento derivado de este tratamiento, y por tanto aumenta el carbono presente en el almacén de biomasa del alcornocal.
	Descorche (X años)	Aumento del periodo descorche un año más respecto a la línea base (X), lo que supondrá una mayor capacidad de crecimiento al no verse disminuido el crecimiento corriente del corcho en este periodo.
	Aprovechamiento en todos los alcornocales incluidos en el turno de descorche.	No extraer el corcho de los árboles de escaso interés económico (mal conformados, presencia de chancros y pudriciones, portes inadecuados) o en áreas perimetrales a focos de seca. Aumento del vigor del arbolado mejorando su resiliencia ante el patógeno, lo que supone a largo plazo una menor pérdida del stock de carbono al evitar el decaimiento.
Trata-mientos de regenera-ción	Ausencia de cortas de regeneración y/o de cortas sanitarias utilizando el residuo del tratamiento para leñas.	Realización de cortas de regeneración orientada a los individuos más decrepitos o que presenten un mayor riesgo de daños por agentes bióticos, con la finalidad de iniciar de abrir huecos en el dosel arbóreo y crear las condiciones idóneas para favorecer la regeneración. Eliminación de pies que presenten estados de decrepitud acusados y grados de defoliación elevados, así como calidades de corcho muy deficientes o que sean de difícil descorche (chancros, portes deficientes, oquedades, etc.). los árboles apeados se dejan en el monte para formar parte del almacén de C correspondiente a los árboles muertos en descomposición. Aprovechamiento de la "curruca" para trituración en industria del corcho (alto valor) y con estabilización a largo plazo de C.
	Regeneración natural comprometida, con escasez de clases diamétricas inferiores, poniendo en riesgo los principios de pervivencia, estabilidad y resiliencia	Trabajos de densificación mediante plantación en rasos o zonas de fracción de cabida defectiva.
	Refuerzo de la regeneración (densificación) mediante siembras en aquellas zonas de alta fracción de cabida cubierta y que, a priori, se consideren que presentan condiciones más favorables para conseguir la regeneración mediante este método de repoblación.	
	Protección de los tramos de regeneración frente a los herbívoros mediante cerramiento de protección por daños. Implica la reducción de la población de fauna cinegética responsable de la falta de regeneración.	
	Desbroces selectivos para favorecer la regeneración natural, mejorando las condiciones en el establecimiento de las plántulas durante la fase inicial de crecimiento (por la eliminación de la competencia), y el rebrote posterior del matorral para que proporcionen el abrigo y protección que las plantas requieren durante las etapas más avanzadas de su desarrollo.	



	<p>Incorporación al almacén del suelo de la materia orgánica procedente de la eliminación de los residuos del tratamiento mediante trituración y astillado. Incrementado el SOC.</p> <p>Incremento del stock de biomasa aérea del estrato arbustivo de mayor porte y diversidad específica al favorecer el crecimiento de este estrato tras el desbroce.</p>	
	<p>Enriquecimiento de la biodiversidad mediante el apoyo al establecimiento de otras especies, como puede ser <i>Q. canariensis</i>, <i>Q. faginea</i>, <i>Q. ilex</i> entre otras.</p>	
	<p>Disminución de la presión que una alta carga cinegética ejerce sobre la regeneración mediante el control de la población de ungulados con batidas de gestión, aprovechamiento sin retorno económico.</p>	
	<p>Enriquecimiento con especies o variedades “resistentes” a <i>Phytophthora</i>.</p>	
Trata-mientos de mejora o intermedios	<p>Apertura de ruedos y veredas mediante desbroce selectivo.</p> <p>Se realiza en la totalidad de los pies de alcornoque que vayan a ser objeto de aprovechamiento (los descorchados y aquellos bornizos que alcancen las dimensiones requeridas para su entrada en producción)</p> <p>Superficie del tratamiento de 2 m de radio a partir del tronco del árbol.</p> <p>Eliminación de los residuos mediante quema.</p>	<p>Ampliación de esta actuación a todos los bornizos mayores de 50 (70) cm de circunferencia normal sobre corcho (CSC). Posibilidad de realización de desbroces a hecho.</p> <p>Incorporación al almacén del suelo de la materia orgánica procedente de la eliminación de los residuos del tratamiento mediante trituración y astillado. Incrementado el carbono orgánico en suelo (SOC).</p> <p>Incremento del stock de biomasa aérea del estrato arbustivo al favorecer el crecimiento de este estrato tras el desbroce.</p>
	<p>Ausencia de desbroces (selectivos) para favorecer las condiciones del regenerado establecido</p>	<p>En zonas con elevada densidad de sotobosque, donde los pies menores de alcornoque requieran reducir la competencia por los nutrientes y agua del suelo, entre la vegetación existente y el regenerado. Se tratará, de forma selectiva, sobre las especies de matorral serial inmediato, en un radio de 3-4 m.</p> <p>Además de favorecer el crecimiento del regenerado de alcornoque se incorporará al almacén del suelo de la materia orgánica procedente de la eliminación de los residuos del tratamiento mediante trituración y astillado. Incrementado el SOC.</p> <p>Incremento del stock de biomasa aérea del estrato arbustivo al favorecer el crecimiento de este estrato tras el desbroce.</p>
	<p>Aperturas de cortafuegos y/o fajas auxiliares, realizados según la normativa de prevención de incendios, y eliminación de residuos mediante quema.</p>	<p>Trituración a astillado de los residuos de este tratamiento, favoreciendo la incorporación al almacén del suelo del SOC.</p>
Trata-mientos fitosanitarios	<p>Ausencia de tratamientos fitosanitarios (Luque et al., 2001)</p>	<p>Aplicación de tratamientos específicos para evitar el desarrollo y expansión de daños de <i>seca</i> (por ejemplo, mediante la aplicación de enmiendas, bioproductos u otros).</p> <p>Aumento del vigor del arbolado mejorando su resiliencia ante el patógeno, lo que supone a largo plazo una menor pérdida del stock de carbono al evitar los procesos de mortalidad (o daños parciales, defoliación).</p>

4.3 Desarrollo de la metodología para cuantificar la absorción de carbono.

Una vez identificadas las actividades selvícolas que se incluyen en los distintos itinerarios se elaboraron fichas para cuantificar como estas actividades aumentan los almacenes de carbono (Tabla 3).

Tabla 3: Ficha para estimación del balance de C originada por actuación selvícola de desbroces del matorral.



Desbroce del matorral									
Definición									
<ul style="list-style-type: none"> Desbroces (selectivos o a hecho) del matorral serial. Línea base: Ausencia de desbroces. 									
Adicionalidad									
<ul style="list-style-type: none"> El matorral eliminado se deja en el monte (el C se traslada a los almacenes H y MM). Crecimiento de nuevo matorral y aumento del crecimiento en la vegetación remanente. 									
Almacenes donde se produce la adicionalidad									
(BA = Biomasa aérea viva; BR = Biomasa radicular viva; H = Hojarasca; MM = Madera muerta; SOC = Carbono orgánico en suelo)									
X	BA	X	BR	X	H	X	MM	X	SOC
Movimiento de Carbono entre diferentes almacenes									
Unidades de medición									
<ul style="list-style-type: none"> Superficie desbrozada (ha). C fijado en los diferentes almacenes (Mg ha⁻³). Pérdida de carbono fijado en los diferentes almacenes (Mg ha⁻³), carbono que fijaría el matorral si no fuera desbrozado. 									
Método de cuantificación para desarrollo de ecuaciones									
<p>Para cuantificar la biomasa se usa el modelo único estimación de biomasa a nivel nacional, de matorrales de Montero et al., (2020). Esta fórmula de cuantifico se basa en dos parámetros: altura media y fracción de cabida cubierta (FCC) (%).</p> <p>Biomasa total acumulada (tn ha⁻¹ MS) en función de FCC y altura media. Para España peninsular y balear. Fórmulas de cálculo y coeficientes acorde Montero et al., (2020).</p>									
Hm (dm)	Altura media								
FCC (%)	5	10	15	20	25	30	35		
10	2,61	4,9	7,1	9,22	11,3	13,35	15,36		
20	3,64	6,84	9,9	12,87	15,77	18,62	21,43		
30	4,46	8,38	12,13	15,77	19,33	22,82	26,27		
40	5,19	9,76	14,12	18,36	22,5	26,57	30,58		
50	5,88	11,06	16,01	20,81	25,5	30,11	34,68		
60	6,56	12,35	17,87	23,22	28,46	33,58	38,61		
70	7,27	13,67	19,79	25,72	31,53	37,32	42,85		
80	8,04	15,13	21,89	28,45	34,87	41,18	47,39		
90	8,97	16,88	24,43	31,76	38,93	45,97	52,9		
100	11,06	20,81	30,11	39,14	47,97	56,65	65,2		
<p>Ecuación 1: Ecuación alométrica para el cálculo de biomasa acorde Montero et al., (2020).</p> $W (tn ha^{-1}) = a_i * Hm \operatorname{arccoseno} (\sqrt{FCC/100})^{b_i}$ <p>Coeficientes y parámetros del modelo alométrico de estimación de biomasa acorde Montero et al., (2020).</p>									

Parámetro		Valor									
a1		1,6893814									
b1		0,9116759									
También se dispone de información para la tasa de acumulación de biomasa.											
Tasa de acumulación anual de Biomasa (tn ha ⁻¹ año ⁻¹ MS) en función de FCC y altura media. Para España peninsular y balear. Fórmulas de cálculo y coeficientes acorde Montero et al., (2020).											
Hm (dm)	Altura media										
Fcc (%)	5	10	15	20	25	30	35				
10	0,2	0,27	0,32	0,36	0,4	0,43	0,46				
20	0,37	0,49	0,59	0,67	0,74	0,8	0,85				
30	0,53	0,72	0,86	0,97	1,07	1,16	1,24				
40	0,7	0,95	1,13	1,29	1,42	1,53	1,64				
50	0,89	1,2	1,43	1,62	1,78	1,93	2,06				
60	1,09	1,47	1,75	1,98	2,18	2,36	2,53				
70	1,31	1,77	2,11	2,39	2,64	2,86	3,05				
80	1,58	2,13	2,54	2,88	3,18	3,44	3,68				
90	1,93	2,61	3,12	3,53	3,91	4,24	4,5				
100	2,84	3,84	4,58	5,19	5,72	6,19	6,62				
Ecuación 2: Ecuación alométrica para el cálculo de tasa de acumulación anual de biomasa acorde Montero et al., (2020).											
$Y(\text{tn ha}^{-1} \text{ año}) = a_i * Hm \arccoseno (\sqrt{FCC/100})^{b2}$											
Tabla 3.4: Coeficientes y parámetros del modelo alométrico de estimación de acumulación biomasa acorde Montero et al., (2020).											
Parámetro		Valor									
a1		0,6605358									
b1		0,4347823									
b2		1,681778									
Biomasa media modelo: 15,28.											
Crecimiento medio modelo: 1,67											
Coeficiente de transformación de carbono en CO ₂ : 1,8333											
Variables de cálculo											
<ul style="list-style-type: none"> Carbono adicional (Mg ha⁻¹) = $\Delta C_0 \times S_0$. Donde S₀ = superficie de matorral desbrozada. Aumento del SOC. 											
Periodo de permanencia											
<ul style="list-style-type: none"> 10 años. 											
Métodos de verificación											
<ul style="list-style-type: none"> Revisión del Proyecto de Ordenación de Montes o Plan Técnico de Gestión, donde deberá indicarse la selvicultura aplicada, incluidos los desbroces. 											
Tipologías de alcornocal donde se aplican											
(T1 = Alcornocales puros y mixtos no degradados; T2 = Alcornocales degradados; T3. Dehesas y montados de alcornoque; T4 = Pinar con subpiso de alcornoque; T5 = Plantaciones; T6 = Manchas de alcornoque)											
X	T1	X	T2	X	T3	X	T4	X	T5	X	T6
Justificación científica											
<ul style="list-style-type: none"> La eliminación total (desbroces a hecho) o parcial (desbroces selectivos, ruedos y veredas) del matorral liberará recursos para la vegetación remanente, que crecerá más (Molinas i de Ferrer et al., 2000) Los matorrales pueden competir con las plantaciones jóvenes (Torres Álvarez, 2003) Durante el período de permanencia las especies de matorral rebrotarán o germinarán de semilla ocupando de nuevo el espacio y acumulando más carbono (Montero et al., 2020). Se considera como incremento de carbono la diferencia entre el C presente tras el desbroce y el acumulado en el año 10 (período de permanencia). 											

5. Discusión

5.1 Tipificación del monte alcornocal

La tipificación del alcornocal en el proyecto Life CO₂RK hace énfasis en la necesidad de cierta simplicidad metodológica y con capacidad descriptiva en atención a la utilidad que debe tener para su aplicación a la planificación de la selvicultura de la especie a escala de monte, como es el caso de los alcornocales sujetos a Proyectos y Planes de Ordenación Forestal. En este estudio se definieron categorías/tipos generales que después se caracterizaron. En este sentido, los



criterios que orientan esta tipología son los siguientes:

Se considera alcornocal todas las formaciones donde el alcornoque sea la especie principal del estrato dominante. Esta condición incluye situaciones de formaciones/rodales abiertos (dehesas), masas aisladas o procedentes de incendios, etc., donde, aun siendo el alcornoque la especie dominante o única, la espesura defectiva marca el umbral de lo que puede considerarse una comunidad arbórea. Por otro lado, no se impone un valor mínimo ni de densidad ni de área basimétrica, a diferencia de otras tipologías propuestas para el alcornoque, ya que se valora el papel que los rodales de alcornoque tienen en la dinámica de la especie a escala de paisaje.

Se define el grado de mezcla a partir de un umbral de composición específica (expresado en fracción de cabida cubierta, área basimétrica, o número de pies) y orientado a considerar la estructura y las características de la masa para comprender su funcionamiento y poder acometer su gestión selvícola (Serrada et al., 1993). En ese sentido, y siguiendo las recomendaciones de los autores, se han tenido en cuenta los criterios espaciales (distribución horizontal de las especies, distribución vertical de las especies), así como los criterios temporales (mezclas permanentes, y mezclas transitorias).

Se determina la estructura de la masa a través de una “reinterpretación” de las formas principales de masa (regulares, semirregulares e irregulares), descrita de forma indirecta a través de la “organización” tridimensional de los estratos de cada tipo de alcornocal (verificable mediante muestreo con relascopio de la distribución del área basimétrica en los grupos diamétricos). Se expresa el regenerado de alcornoque (y otras especies acompañantes) a través de la complejidad estructural, ya que determina la capacidad de las masas para desarrollarse hasta convertirse en masas estructuralmente maduras, o bien, su incapacidad en el caso de masas degradadas, con pies poco vigorosos y prácticamente sin crecimiento ni regeneración. En el regenerado se incluyen, a priori, las clases naturales de repoblado, monte bravo y pies de diámetro normal menor de 20 cm (latizal), sin restricciones de densidad, aunque debe ser suficiente para considerar consolidada la regeneración. De este modo, incorporamos a la tipología aquellos estadíos en que se advierte un proceso de colonización potencial del alcornoque en el seno de masas de alcornoque y de otras especies (ej., pinares con subpiso), asignando a cada uno de los tipos un “potencial” de secuestro de C. La tipología permite establecer, con criterios objetivos (complejidad específica y estructural), la capacidad de cada tipo para “desempeñar” dicha función.

Por tanto, en beneficio de la sencillez y de la facilidad de generalización, se renuncia a utilizar criterios o variables que, por ser de determinación o cálculo laborioso, y que resultan poco operativas (p. e.j., altura dominante, volumen, edad cronológica de la masa, clases artificiales de edad, estado de vigor del arbolado, etc.). A partir de estos criterios, este proyecto establece una tipología inicial que permite establecer la capacidad de las masas para “desempeñar” diferentes funciones ecológicas (secuestro de carbono), y su papel como masas estructuralmente maduras, o degradadas.

Los resultados de las tipologías combinado con SIPNA (Sistema de Información sobre el Patrimonio Natural de Andalucía) arrojan la distribución de las distintas tipologías (Fig. 2).

5.2 Identificación de los almacenes de carbono y las actividades selvícolas aplicables a los alcornocales.



La gestión forestal orientada a la absorción de C, o la selvicultura del C, se basa en actuaciones selvícolas cuyo objetivo final es aumentar el secuestro de carbono en un sistema forestal. Las actuaciones selvícolas optimizan la producción de bienes directos, así como los servicios ambientales derivados de su presencia y, en gran medida, pueden revertir o atenuar la degradación producida por factores como los incendios, los agentes bióticos, o el sobrepastoreo. Las actuaciones selvícolas pueden ayudar a dirigir a los sistemas forestales hacia estructuras altamente eficiente en el secuestro y el almacenamiento de carbono (Cañellas et al., 2017; Noormets et al., 2015). En masas forestales ya establecidas, las actuaciones selvícolas que se puedan emplear dependerán del estado inicial que presenten. Se pueden aplicar varios tratamientos selvícolas para promover un mayor almacenamiento de carbono (Ruiz-Peinado et al., 2017). Estos tratamientos están condicionados por la especie principal y el estado selvícola inicial de la masa y deben adaptarse a las condiciones particulares de cada monte (Forest Stewardship Council 2021).

La mayoría de los proyectos de carbono en Europa se basan en proyectos de forestación, dejando los proyectos de REDD+ (Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques) para países en vías de desarrollo. Actualmente existen dos corrientes de actuación para maximizar las absorciones de los sistemas forestales; la proforestación (no intervenir los bosques) (Moomaw et al., 2019), y aquella que propone modificar las prácticas de gestión forestal para aumentar las reservas de carbono (equilibrio de ganancias y pérdidas de CO₂) (National Academies of Sciences, 2018). Esto está relacionado con las investigaciones recientes que sugieren que la reforestación a gran escala no es viable; por su coste y por la competencia con otros usos del suelo como sería el agrícola. Se estima que para cumplir los objetivos climáticos mediante forestaciones se requiere aproximadamente 10 millones de km², un área mayor que Canadá.

Por el contrario, el objetivo de modificar las prácticas de gestión forestal para maximizar la absorción de carbono se basa en la magnitud de las reservas históricas de C en comparación con las reservas contemporáneas, que son mucho más bajas. En gran medida, los enfoques de secuestro de C en ecosistemas terrestres pueden verse como un proceso para revertir la degradación anterior de los ecosistemas. Además, el aumento de las reservas de C en la biomasa y en el suelo puede aportar servicios ecosistémicos adicionales, incluidos la protección de las cuencas hidrográficas, el aumento de la biodiversidad y una mejor salud y fertilidad del suelo (National Academies of Sciences, 2018). Todo ello obliga a considerar la selvicultura orientada al secuestro de C como un elemento central de las políticas para maximizar las actuaciones de mitigación (Navarro-Cerrillo et al., 2022).

5.3 Diseño de itinerarios selvícolas adecuados a cada tipología.

La selvicultura del carbono (C) en los montes alcornocales requiere de datos precisos de inventarios forestales que permitan evaluar el cambio de variables dendrométricas a lo largo del tiempo (Ruiz-Benito et al., 2012). Aunque los inventarios existentes proporcionan información básica sobre el diámetro, altura (MAGRAMA., 2007) y producción de corcho, es necesario obtener datos más detallados para cuantificar la biomasa y el carbono almacenado en diferentes componentes del bosque. Estos inventarios ayudan a valorar el impacto de la gestión en el carbono almacenado y guiar las estrategias de manejo a largo plazo.



La planificación de la silvicultura del C debe ser flexible y adaptarse a los cambios ambientales y socioeconómicos, así como a las necesidades de los distintos usos del monte alcornocal, como los ganaderos y cinegéticos. Los objetivos de secuestro de carbono deben integrarse con los del Proyecto de Ordenación del Monte (POM) y los Planes Técnicos de Gestión (PTG), los cuales guían las acciones silvícolas en función de la sostenibilidad y rentabilidad de la explotación. Esta planificación debe considerar no solo la gestión de carbono, sino también la conservación de la biodiversidad y la adaptación al cambio climático (Piqué Nicolau, 2013).

En la práctica, la gestión de los montes alcornocales implica la aplicación de turnos largos en los tratamientos silvícolas para restaurar la estructura y composición de las masas forestales, adaptándose a los efectos del clima y las perturbaciones (Montero and López, 2008). La implementación de estos turnos debe considerar la variabilidad espacial dentro de un mismo monte y la necesidad de establecer refugios climáticos, así como la retención de árboles adultos para aumentar la acumulación de carbono. Las intervenciones también deben ser diseñadas para mejorar la biodiversidad y la resiliencia del ecosistema, especialmente en áreas vulnerables a perturbaciones.

Finalmente, el principio de complejidad y diversidad es crucial en la silvicultura del C, ya que busca mantener una estructura forestal heterogénea que favorezca tanto la producción de bienes directos como la conservación de hábitats y la biodiversidad (Montero and López, 2008). Esta estrategia promueve el uso de técnicas como las cortas de regeneración y la creación de rodales de reserva para asegurar la adaptación del monte alcornocal al cambio climático y mejorar su resiliencia frente a perturbaciones, y aumentando sus reservas de carbono (Fig. 3). Aunque este enfoque puede implicar una reducción de los ingresos inmediatos, a largo plazo favorece la estabilidad ecológica y la capacidad de secuestro de carbono del ecosistema.

5.4 Desarrollo de la metodología para cuantificar la absorción de carbono.

El ciclo de carbono incluye cambios en las existencias de carbono debidos a procesos continuos y a eventos diferenciados (es decir, perturbaciones como incendios, plagas y enfermedades, cambios en el uso de la tierra, gestión forestal y otros) (Kim et al., 2017) Los procesos continuos pueden afectar a las existencias de carbono de todas las áreas año tras año, mientras que los eventos diferenciados (gestión forestal y las perturbaciones) producen emisiones y redistribuyen el carbono del ecosistema en áreas específica y en el año en el que se produce el evento. Las ganancias incluyen el crecimiento de la biomasa en sus componentes aéreos y subterráneos; y las pérdidas están clasificadas en aprovechamientos de madera, recogida de madera para combustible y las pérdidas por perturbaciones naturales (p. ej. huracanes, inundaciones) (IPCC, 2006a). Los cambios de un almacén de C se pueden calcular (Cambios en las existencias anuales de carbono de un almacén dado en función de las pérdidas y las ganancias, método de pérdidas y ganancias). Los cambios en las existencias de C en la biomasa en tierras forestales que permanecen como tales se basan en las estimaciones de las pérdidas y de las ganancias anuales en las existencias en biomasa. El cambio anual en la biomasa es la diferencia entre las existencias de biomasa en el momento t_2 y en el momento t_1 , dividido por la cantidad de años transcurridos entre las existencias (IPCC, 2006b).

Para cuantificar como la gestión forestal afecta a las existencias de carbono se han propuesto fichas de las actuaciones silvícolas y secuestro de carbono (tabla 3). Las



fichas de cuantificación recogen la metodología para evaluar el secuestro de carbono y son una herramienta clave para evaluar el impacto de las actividades selvícolas en el secuestro de carbono en los ecosistemas forestales. Estas fichas contienen todos los apartados necesarios para ofrecer una medición precisa y detallada del impacto de la intervención, permitiendo entender cómo las acciones de manejo forestal afectan los diferentes almacenes de carbono en un bosque (Fig. 4).

En primer lugar, las fichas incluyen una definición clara de la adicionalidad, explicando el aumento en la captura de carbono que se genera a partir de la intervención selvícola y la línea base, que representa el escenario sin la actividad. Además, detallan los distintos almacenes de carbono donde ocurre esta adicionalidad. En el apartado de "movimiento de carbono entre diferentes almacenes", se ilustran las transferencias de carbono que resultan de la actividad selvícola, lo que permite visualizar cómo el carbono se mueve dentro del ecosistema. Las fichas especifican las unidades de medición para cuantificar el carbono, asegurando la precisión en los cálculos, y describen el método de cuantificación utilizado para el desarrollo de ecuaciones que estimen el secuestro de carbono de forma fiable. También detallan las variables necesarias para realizar estos cálculos y proporcionan una estimación del valor del carbono que se puede secuestrar en el ecosistema a través de la actividad selvícola. Además, se especifica el periodo de permanencia de las actuaciones.

Las fichas incluyen métodos de verificación para asegurar la precisión de las estimaciones, garantizando que el carbono secuestrado sea validado y verificable. También se identifican las tipologías de alcornocal en las que se pueden aplicar estos métodos de cuantificación, adaptándolos a las características específicas de cada tipo de bosque. Finalmente, las fichas incluyen una justificación científica que respalda el uso de los métodos y evaluaciones descritas, ofreciendo un marco completo y robusto para medir y cuantificar el secuestro de carbono en la silvicultura desarrollada. Este enfoque integrado permite gestionar eficazmente las intervenciones selvícolas para optimizar el secuestro de carbono.

5.5 Plan de Acción y próximos pasos del proyecto

Además de establecer esquemas de gestión específicos para una silvicultura del carbono adaptada a los alcornocales, el proyecto tiene como objetivo principal el desarrollo de un estándar de cuantificación y regulación para proyectos de compensación de carbono en estas formaciones forestales. Este estándar busca proporcionar un marco metodológico robusto y científicamente validado que permita medir, reportar y verificar el carbono secuestrado en las masas de alcornocal como resultado de las intervenciones selvícolas. La regulación propuesta garantizará la transparencia y la coherencia en la implementación de estos proyectos, estableciendo criterios claros para la evaluación de la adicionalidad, los métodos de cálculo de carbono almacenado, los periodos de permanencia y los mecanismos de verificación. Además, este estándar tiene el potencial de facilitar la integración de los alcornocales en mercados de carbono voluntarios o regulados, promoviendo incentivos económicos para la gestión sostenible de estos ecosistemas. De esta manera, se asegura que las acciones de compensación de carbono no solo contribuyan a mitigar el cambio climático, sino que también apoyen la conservación de la biodiversidad, la mejora de los servicios ecosistémicos y el desarrollo socioeconómico de las comunidades locales vinculadas a la gestión del monte alcornocal. Este enfoque integral refuerza la viabilidad y la relevancia de los proyectos de carbono en alcornocales,



posicionándolos como una herramienta clave para abordar desafíos ambientales y sociales a largo plazo.

6. Conclusiones

La implementación de estrategias avanzadas de gestión forestal, como las desarrolladas en el proyecto LIFE CO₂RK, demuestra un notable potencial para abordar el desafío del secuestro de carbono en ecosistemas mediterráneos, particularmente en alcornocales. Este enfoque combina herramientas técnicas y metodológicas que no solo cuantifican la absorción de carbono, sino que también promueven prácticas selvícolas adaptadas a las especificidades ecológicas y socioeconómicas de los bosques estudiados.

Los resultados de este estudio destacan la relevancia de la silvicultura del carbono como una estrategia clave para mitigar el cambio climático, mejorar la biodiversidad y fomentar la resiliencia de los ecosistemas forestales frente a perturbaciones. Al mismo tiempo, se subraya la necesidad de adaptar estas prácticas a contextos específicos, promoviendo enfoques flexibles y multidimensionales que respondan tanto a las prioridades ambientales como a los objetivos socioeconómicos de las comunidades locales. Las acciones promovidas por el proyecto LIFE CO₂RK tienen el potencial de ser replicadas y escaladas en otros contextos dentro de la UE, estableciendo un precedente para el manejo forestal sostenible y la silvicultura del C. Este trabajo refuerza la importancia de considerar la silvicultura como aliada esencial en la transición hacia un modelo de desarrollo más sostenible y bajo en carbono.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo al proyecto LIFE CO₂RK - *Slow growing forests management for Climate Change Mitigation* (LIFE-2022-SAP-CLIMA-101114049), financiado en el Programa LIFE de la Comisión Europea y a todos sus socios participantes. El contenido de este artículo refleja únicamente las opiniones de sus autores y la Unión Europea/CINEA no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en él.

8. Bibliografía

AGUDO ROMERO, R., MUÑOZ MARTÍNEZ, M., DEL PINO DEL CASTILLO, Ó., 2007. 1^{er} Inventario de sumideros de CO₂ en Andalucía. Sevilla.

ANAYA-ROMERO, M., MUÑOZ-ROJAS, M., IBÁÑEZ, B., MARAÑÓN, T., 2016. Evaluation of forest ecosystem services in Mediterranean areas. A regional case study in South Spain. *Ecosyst Serv* 20, 82–90.

ANGIOLINI, C., FOGGI, B., SARMATI, S., GABELLINI, A., GENNAI, M., CASTAGNINI, P., MUGNAI, M., VICIANI, D., FANFARILLO, E., MACCHERINI, S., 2021. Assessing the conservation status of EU forest habitats: The case of *Quercus suber* woodlands. *For Ecol Manage* 496, 119432.

CAMPOS, P., MESA, B., ÁLVAREZ, A., 2021. Uncovering the hidden numbers of nature in the standard accounts of society: Application to a case study of oak woodland dehesa and conifer forest farms in andalusia-spain. *Forests* 12, 638. <https://doi.org/10.3390/F12050638/S1>

CAÑELLAS, I., SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M., BOGINO, S.M., ADAME, P., MORENO-FERNÁNDEZ, D., HERRERO, C., ROIG, S., TOMÉ, M., PAULO, J.A., BRAVO, F., 2017. Carbon Sequestration in Mediterranean Oak Forests 403–427.

DUQUE-LAZO, J., NAVARRO-CERRILLO, R.M., RUÍZ-GÓMEZ, F.J., 2018. Assessment of



the future stability of cork oak (*Quercus suber* L.) afforestation under climate change scenarios in Southwest Spain. *For Ecol Manage* 409, 444–456.

FOREST STEWARDSHIP COUNCIL, 2021. Guía para la demostración de impactos en los servicios del ecosistema. FSC-GUI-30-006 V1-1 ES.

ICAP, 2021. Emissions Trading Worldwide: Status Report 2021, Julie Côté. Chris Shipley, Berlin.

IPCC, 2006a. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Capítulo 1. Introducción.

IPCC, 2006b. Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero. Volumen 4. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Capítulo 2: Metodologías genéricas aplicables a múltiples categorías de uso de la tierra.

KIM, H.N., JIN, H.Y., KWAK, M.J., KHAINI, I., YOU, H.N., LEE, T.Y., AHN, T.H., WOO, S.Y., 2017. Why does *Quercus suber* species decline in Mediterranean areas? *J Asia Pac Biodivers* 10, 337–341.

LUQUE, J., PERA, J., PARLADÉ IZQUIERDO, X., 2001. El decaimiento del alcornoque en Cataluña: síntomas y hongos asociados. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, ISSN 1131-7965, Vol. 10, N° 2, 2001, págs. 271-290.

MAGRAMA., 2007. Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3).

MECHERGUI, K., JAOAUDI, W., BELLO-RODRÍGUEZ, V., ACHOUR, H., AMMARI, Y., 2024. Evaluation of biomass, carbon storage capability, tree-ring and cork-ring growth of *Quercus suber*: a review. *Plant Ecol Divers*.

MITERD, 2024. INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Serie 1990-2023 INFORME RESUMEN Noviembre de 2024.

MOLINAS I DE FERRER, M.L., CARITAT, A., VILAR SAIS, L., Masson, P., 2000. Efecto de los tratamientos silvopastorales en el crecimiento del alcornoque. *Scientia gerundensis*, ISSN-e 2385-4758, ISSN 0213-5930, N°. 24, 1999-2000, págs. 27-35.

Montero, G., López, E., 2008. Silvicultura de *Quercus suber* L, in: *Compendio de Silvicultura Aplicada En España*. Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid, Spain, pp. 779–829.

MONTERO, G., LÓPEZ-LEIVA, C., RUIZ-PEINADO, R., LÓPEZ-SENEPLEDA, E., ONRUBIA, R., PASALODOS, M., 2020. Producción de biomasa y fijación de carbono por los matorrales españoles y por el horizonte orgánico superficial de los suelos forestales.

MOOMAW, W.R., MASINO, S.A., FAISON, E.K., 2019. Intact Forests in the United States: Proforestation Mitigates Climate Change and Serves the Greatest Good. *Frontiers in Forests and Global Change* 2, 449206.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, 2018. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration*.

NAVARRO-CERRILLO, R.M., RUIZ-GÓMEZ, F.J., CAMARERO, J.J., CASTILLO, V., BARBERÁ, G.G., PALACIOS-RODRÍGUEZ, G., NAVARRO, F.B., BLANCO, J.A., IMBERT,



J.B., CACHINERO-VIVAR, A.M., MOLINA, A.J., DEL CAMPO, A.D., 2022. Long-Term Carbon Sequestration in Pine Forests under Different Silvicultural and Climatic Regimes in Spain. *Forests* 13, 450.

NOORMETS, A., EPRON, D., DOMEQ, J.C., MCNULTY, S.G., FOX, T., Sun, G., King, J.S., 2015. Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis. *For Ecol Manage* 355, 124–140.

PIQUÉ NICOLAU, M., 2013. Planificación forestal en espacios naturales protegidos herramientas integradoras en un contexto de cambio. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*.

RUIZ-BENITO, P., GÓMEZ-APARICIO, L., ZAVALA, M.A., 2012. Large-scale assessment of regeneration and diversity in Mediterranean planted pine forests along ecological gradients. *Divers Distrib* 18, 1092–1106.

RUIZ-PEINADO, R., BRAVO-OVIEDO, A., LÓPEZ-SENEPLEDA, E., BRAVO, F., DEL RÍO, M., 2017. Forest management and carbon sequestration in the Mediterranean region: A review. *For Syst* 26.

SERRADA, R., DONCEL, I.G., LÓPEZ, C., 1993. Tipificación dasométrica de los rebollares (*Quercus pyrenaica* Willd.) de la Comunidad de Madrid. *Alternativas silvopastorales*, in: *Congresos Forestales*.

TORRES ÁLVAREZ, E., 2003. Experiencias sobre regeneración natural de alcornoque (*Quercus suber* L.). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, ISSN 1575-2410, ISSN-e 2386-8368, N°. 15, 2003 (Ejemplar dedicado a: *Actas de la III Reunión sobre Regeneración Natural y IV Reunión sobre Ordenación de Montes*), págs. 37-48 37–48.