



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Grado en Ingeniería Forestal y del Medio Natural

**ANÁLISIS TÉCNICO DE ALTERNATIVAS Y
PROPUESTA SELVÍCOLA PARA LA FIJACIÓN
DE CARBONO EN REBOLLARES DE MONTE
BAJO EN CASTILLA Y LEÓN**

Alumno: Ricardo Mateu Fernández

Tutor: Felipe Bravo Oviedo
Cotutor: Aitor Vázquez Veloso

Septiembre de 2025

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Resumen | 2 |
| 2. Antecedentes..... | 3 |
| 2.1. Distribución global del rebollo | 3 |
| 2.2. Ecología y situación de los rebollares en Castilla y León..... | 4 |
| 2.3. Situación actual del mercado de la madera y del carbono en España | 5 |
| 2.3.1. Mercado de madera..... | 5 |
| 2.3.2. Mercado del carbono | 7 |
| 3. Objeto del trabajo | 11 |
| 4. Marco de trabajo..... | 12 |
| 4.1. Zona de aplicación | 12 |
| 4.2. Datos..... | 13 |
| 4.3. Selvicultura de referencia | 14 |
| 4.4. Simulaciones selvícolas | 17 |
| 4.5. Análisis económico..... | 17 |
| 5. Análisis de alternativas de gestión..... | 19 |
| 5.1. Alternativas selvícolas y evolución de la masa forestal..... | 20 |
| 5.2. Alternativas selvícolas y secuestro de carbono | 24 |
| 5.3. Alternativas selvícolas y estimación económica de ejecución..... | 28 |
| 6. Selección de alternativas de gestión..... | 29 |
| 7. Bibliografía..... | 33 |
| 8. Anexos | 39 |
| 8.1. Anexo I: Planos | 39 |
| 8.2. Anexo II: Tablas de precios..... | 44 |
| 8.3. Anexo III: Tablas de producción..... | 49 |
| 8.4. Anexo VI: Detalle de resultados de volumen, biomasa y carbono..... | 51 |

1. Resumen

Este trabajo evalúa la viabilidad económica y el potencial de secuestro de carbono de distintas alternativas selvícolas aplicadas a rebollares (*Quercus pyrenaica*) de monte bajo en Castilla y León, unas masas actualmente degradadas e infraexplotadas, destinadas principalmente a la producción de leña. A través de simulaciones en SIMANFOR sobre cinco parcelas reales localizadas en Soria y con un horizonte de gestión de 90 años, se compararon seis escenarios selvícolas diferentes. Se analizaron variables como la producción de madera, la biomasa y el carbono acumulado, los costes de gestión y la valoración final del monte. Los resultados muestran que ningún escenario se autofinancia solo con la venta de madera, aunque algunos compensan las pérdidas al considerar el valor final de la masa. En función de los objetivos de gestión, algunos escenarios resultan más adecuados que otros: *gal* es adecuado para minimizar pérdidas y orientar la masa a una corta final, *abo* permite recuperar inversión a corto plazo extrayendo los árboles de mayor valor desde el inicio, mientras que *cyl* y *mix* ofrecen buenas perspectivas para una gestión continua a largo plazo, favoreciendo estructuras irregulares, mientras que *sys* genera costes elevados con una rentabilidad limitada. En un contexto con mercado de carbono desarrollado, *gal* y *mix* podrían ser los más rentables al combinar productividad y una alta acumulación de biomasa.

2. Antecedentes

2.1. Distribución global del rebollo

El rebollo (*Quercus pyrenaica* Wild.) se distribuye alrededor de Francia, España, Portugal y norte de Marruecos, con el 95% de la población mundial de esta especie concentrada en la Península Ibérica (*Figura 1*).

A nivel nacional, los rodales de rebollo abarcan una amplia variedad de áreas en España (*Figura 2*), encontrando la mayor parte de su distribución en la región de Castilla y León, con más de 500.000 hectáreas (MITECO, 2023) (Vázquez-Veloso et al., 2025).

La *Figura 3* muestra su distribución en Castilla y León, donde concentra 716.646 hectáreas de rebollar, lo que representa aproximadamente el 64% de la superficie total de esta especie en España. Esto convierte a esta comunidad autónoma en la región con mayor presencia de rebollo en el país, lo que destaca la relevancia ecológica y territorial que tienen estas masas forestales en su territorio (Montero & Herrero de Aza, 2022).

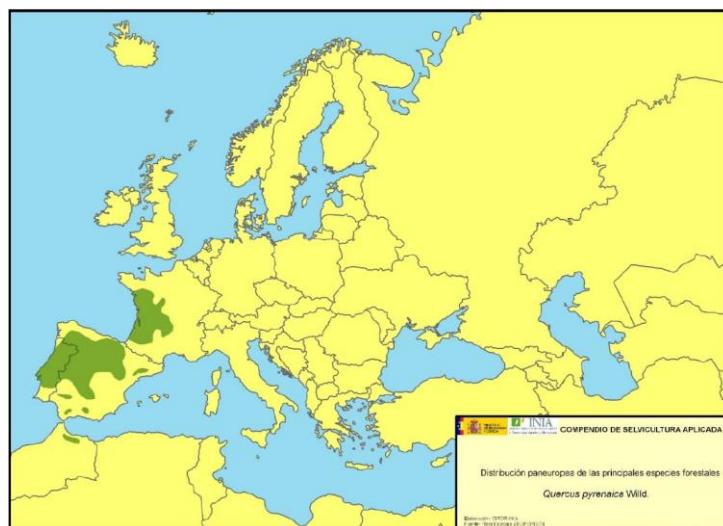


Figura 1. Distribución paneuropea de rebollo. Fuente: (Serrada et al., 2008)



Figura 2. Distribución de rebollo en España según los datos de las ediciones 2 y 3 del Mapa Forestal Español (MFE) e Inventario Forestal Nacional (IFN). Fuente: (Serrada et al., 2008)

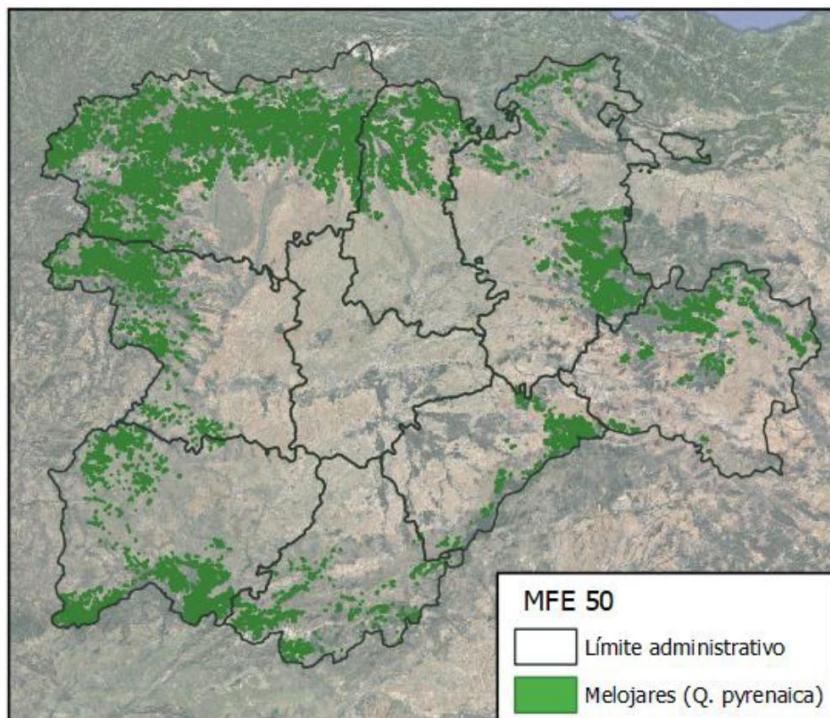


Figura 3. Rebollares (melojares) de Castilla y León según los datos del MFE50. Fuente: (Vázquez-Veloso et al., 2023a)

2.2. Ecología y situación de los rebollares en Castilla y León

El rebollo puede desarrollarse en un amplio rango de altitudes, desde los 370 hasta los 1.620 metros, aunque sus condiciones más favorables se encuentran entre 740 y 1.300 metros. En cuanto a las precipitaciones, esta especie crece en zonas que reciben entre 370 y 2.010 mm anuales, siendo el intervalo óptimo entre 650 y 1.500 mm. La temperatura media anual en su área de distribución varía entre 7,2 y 15,4 °C, con mejores condiciones para su crecimiento entre 8,6 y 12,5 °C. En lo que respecta a los suelos, el rebollo se encuentra exclusivamente en sustratos silíceos, como los derivados de granito o gneis, ya que no tolera terrenos calizos (Montero & Herrero de Aza, 2022; Sánchez-Palomares et al., 2008).

El área ecológica donde prospera el rebollo coincide frecuentemente con la de otras especies, dando lugar a formaciones arbóreas mixtas que adquieren cada vez mayor relevancia en el contexto del cambio climático (Vázquez-Veloso et al., 2023b). Estas masas mixtas suelen incluir especies como *Pinus sylvestris* L., *Pinus pinaster* Ait., *Quercus ilex* L. o *Fagus sylvatica* L., (MITECO, 2025b) (Porto Rodríguez et al., 2025).

La distribución del *Quercus pyrenaica* se encuentra entre la del pino silvestre (*P. sylvestris*), en zonas altas y frías, pudiendo juntarse también con *Quercus robur* y *Quercus petraea*, y la del pino negral (*P. pinaster*), en zonas más bajas y cálidas, en las que lo podemos encontrar también con *Q. ilex*, *Q. suber* y *Q. faginea* (Montero & Herrero de Aza, 2022), con la posibilidad de hibridación con especies estrechamente relacionadas como *Quercus petraea* (López González, 2007; Valbuena-Carabaña et al., 2005).

Una gran parte de los rebollares presentes en la actualidad corresponde a formaciones de monte bajo, históricamente destinadas a la obtención de leña y carbón vegetal, y de

manera ocasional a otros productos como puntales, duelas o traviesas de ferrocarril (Artigas, 2022; Bravo-Oviedo et al., 2008; López González, 2007; Sánchez-Palomares et al., 2008). Estos aprovechamientos no han requerido una planificación selvícola compleja, lo que ha contribuido a un escaso desarrollo desde el punto de vista de la gestión forestal e industrial. Con el tiempo, se han propuesto líneas de manejo orientadas a transformar estas masas de monte bajo en montes altos (Bravo-Oviedo et al., 2008) y a diversificar sus objetivos productivos y ambientales (Crespo & García, 2013b, 2013a). Sin embargo, la realidad estructural actual de muchos de estos rodales (caracterizada por fustes de pequeño tamaño) limita la rentabilidad de las actuaciones selvícolas (Tolosana, Montero, et al., 2022) (Vázquez-Veloso et al., 2025).

Esta falta de rentabilidad genera un círculo vicioso en el que la ausencia de actuaciones impide el aprovechamiento de productos de mayor valor, perpetuando su escaso atractivo económico. No obstante, la aparición de nuevos mercados, como el de productos transformados de madera (por ejemplo, tarimas, vigas laminadas o duelas), abre nuevas oportunidades para dinamizar la gestión de estos ecosistemas. En esta línea, el proyecto LIFE+REB ha demostrado que es posible revalorizar parte de la madera que tradicionalmente se destina a leña, transformándola en productos con mayor valor añadido y vida útil, como las duelas utilizadas en la fabricación de barricas o la madera estructural (Gutiérrez et al., 2025).

Adicionalmente, se explora el mercado de los créditos de carbono como una vía complementaria para obtener ingresos que contribuyan a hacer económicamente viables las actuaciones forestales en estas masas. Este tipo de iniciativas podrían servir para reactivar la gestión de masas que, de otro modo, permanecerían abandonadas.

Más allá del aspecto económico, el fomento de la gestión forestal sostenible en los rebollares tiene otras implicaciones importantes. Una mayor movilización de recursos forestales puede traducirse en la generación de nuevos empleos, lo cual ayuda a dinamizar la economía de zonas rurales que sufren problemas de despoblación. Además, la gestión activa de estas masas contribuye a reducir la acumulación de combustible vegetal, lo que disminuye el riesgo de incendios forestales y mejora la resiliencia del ecosistema. Asimismo, los tratamientos selvícolas adecuados repercuten positivamente en la salud del monte, favoreciendo estructuras más estables, diversas y resistentes a las plagas y al cambio climático.

2.3. Situación actual del mercado de la madera y del carbono en España

2.3.1. Mercado de madera

La industria maderera en España constituye un sector estratégico tanto a nivel nacional como europeo, con un peso económico considerable. De acuerdo con datos del INE (2023), su contribución al PIB se estima en más de 8.000 millones de euros anuales, y representa un 12 % de las superficies certificadas PEFC en Europa («La Industria de La Madera En España», s. f.).

Según el Anuario de Estadística Forestal (2023), en el año 2022, se cortaron en España 20 millones de metros cúbicos con corteza de madera, de los cuales más de 11 millones correspondieron a especies de coníferas y alrededor de 9 millones a frondosas. Esta cifra supone un incremento del 16 % respecto al año anterior, con un valor económico estimado de aproximadamente 1.042 millones de euros.

Entre las coníferas cortadas, destacan *Pinus radiata* (39 %), *Pinus pinaster* (30 %) y *Pinus sylvestris* (16 %). En cuanto a las frondosas, el eucalipto fue claramente dominante, representando el 88 % de las cortas de este grupo. Las siguientes figuras presentan la distribución porcentual de las cortas de madera en España durante el año 2022, desagregada por especie y diferenciando entre coníferas (Figura 4) y frondosas (Figura 5).

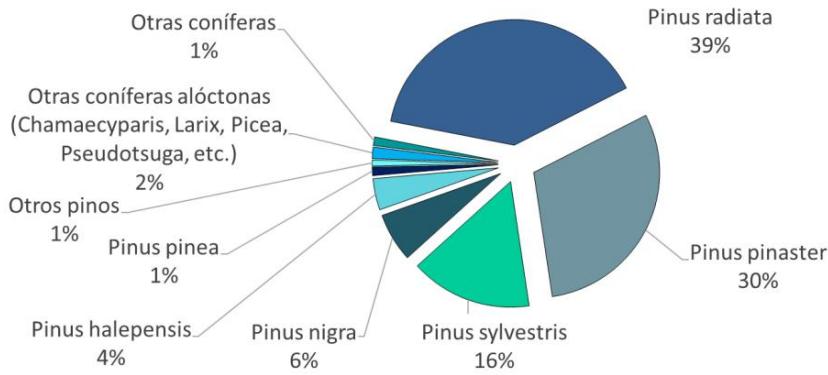


Figura 4. Distribución de las cortas de coníferas por especie en 2022.

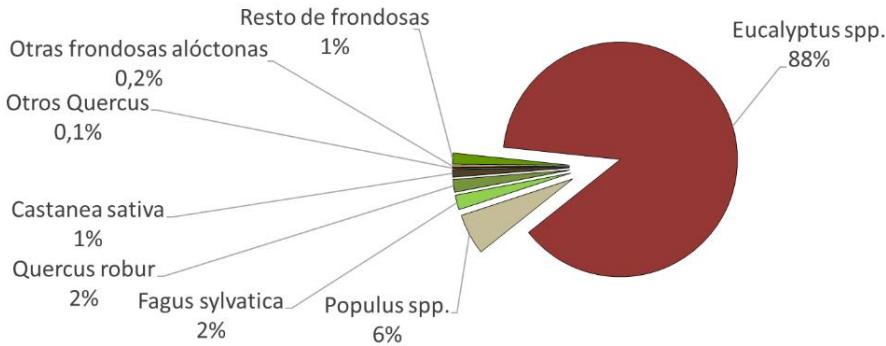


Figura 5. Distribución de las cortas de frondosas por especie en 2022.

Respecto al aprovechamiento de leñas, se extrajeron 1,43 millones de toneladas, un 3,4 % menos que en 2021, con un valor estimado de unos 49 millones de euros (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2023).

La siguiente *Tabla 1* muestra el volumen total de leñas extraídas en España durante el año 2022, desglosado por especie y grupo forestal. Se observa una clara predominancia de las especies frondosas, que representan el 67 % del total, entre las que destacan las especies del género *Quercus*, donde el rebollo representa un 7 %. En el caso de las coníferas (33 %), sobresalen especies como *Pinus halepensis* y *Pinus nigra*.

Tabla 1. Leñas extraídas por especie en 2022. Fuente: Anuario de Estadística Forestal 2022

| Grupo | Especie | Toneladas | % del total |
|---------------------|---------------------------|-----------|-------------|
| Frondosas (67 %) | <i>Quercus spp.</i> | 238,60 | 16 % |
| | <i>Quercus ilex</i> | 214,94 | 15 % |
| | <i>Quercus pyrenaica</i> | 109,52 | 7 % |
| | <i>Fagus sylvatica</i> | 88,22 | 6 % |
| | <i>Populus spp.</i> | 68,66 | 5 % |
| | <i>Eucalyptus spp.</i> | 24,64 | 2 % |
| | Otros <i>Quercus</i> | 25,83 | 2 % |
| | Sin especificar / resto | 192,39 | 13 % |
| Coníferas (33 %) | <i>Pinus spp.</i> | 12,94 | 1 % |
| | <i>Pinus halepensis</i> | 159,81 | 11 % |
| | <i>Pinus nigra</i> | 108,24 | 7 % |
| | <i>Pinus pinaster</i> | 66,52 | 5 % |
| | <i>Pinus radiata</i> | 57,90 | 4 % |
| | <i>Pinus sylvestris</i> | 19,75 | 1 % |
| | Coníferas sin especificar | 39,84 | 3 % |
| | Resto de coníferas | 5,03 | 3 % |

Castilla y León es una potencia nacional en la industria de la madera, produciendo el 14% total del país, solo superada por Galicia.

En esta comunidad, el *Pinus sylvestris* destaca por ser una especie de alto valor industrial, utilizada en la producción de madera maciza, tableros y papel. La comunidad cuenta con la mayor reserva nacional de esta especie, aunque su aprovechamiento sigue siendo inferior a su potencial, ya que solo se corta el 35 % de su crecimiento anual, una proporción ligeramente superior al promedio nacional, que se sitúa en el 23 %. Por su parte, el chopo (*Populus spp.*) es una de las especies más relevantes en Castilla y León por su rápido crecimiento y gran valor industrial. La comunidad concentra el 45 % del total de existencias de chopo en España, con aproximadamente 8 millones de m³, y aprovecha cerca del 50 % de su crecimiento anual, lo que evidencia su papel estratégico en la economía forestal regional (Junta de Castilla y León, 2020).

La especie que más se aprovecha para leña es el rebollo (*Quercus pyrenaica*), que con 109.000 toneladas representa un tercio de toda la leña de la comunidad autónoma. Entre las coníferas, la especie más común es el *Pinus pinaster* con 33.000 toneladas (Junta de Castilla y León, 2020).

2.3.2. Mercado del carbono

El mercado del carbono se estructura en dos grandes ámbitos complementarios: el mercado obligatorio y el voluntario.

En el mercado obligatorio del carbono participan entidades sujetas a regulaciones legales (empresas, gobiernos y organizaciones industriales) que adquieren

compensaciones de carbono para cumplir con los límites de emisiones establecidos por la normativa internacional. Este sistema se basa en el Protocolo de Kioto, adoptado en 1997 y en vigor desde 2005, que estableció por primera vez objetivos jurídicamente vinculantes de reducción de emisiones para los países industrializados, agrupados en el llamado Anexo I. Para facilitar su cumplimiento, el Protocolo creó mecanismos de flexibilidad, entre ellos el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que permite la obtención de créditos de carbono mediante proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo (*Annex I Parties*, 2025; United Nations Climate Change, s. f.).

Uno de los instrumentos clave derivados de este marco son los Certificados de Emisión Reducida (CER). Cada uno representa una tonelada de CO₂ que se ha evitado emitir a la atmósfera, y puede ser comercializado por países del Anexo I para cumplir con sus metas de reducción. Estas transacciones se realizan dentro de un sistema formal y regulado, donde los créditos deben cumplir requisitos de verificación y trazabilidad. En 2006, este mercado movilizó aproximadamente 5.500 millones de dólares, lo que supuso la compensación de cerca de 1.600 millones de toneladas de CO₂ equivalente (Ministerio del Medio Ambiente, s. f.).

Paralelamente, en los mercados voluntarios, empresas u organizaciones adquieren Reducciones Verificadas de Emisiones (VER), también expresadas en toneladas de CO₂ equivalente. Aunque no están sujetas a exigencias legales, estas compensaciones permiten a los compradores mitigar su huella de carbono de forma voluntaria, cumpliendo estándares de verificación específicos (Ministerio del Medio Ambiente, s. f.).

En España coexisten ambos mercados. El sistema regulado es el más efectivo para la reducción de emisiones, mientras que el voluntario está en crecimiento, aunque su impacto todavía es limitado. En nuestro país, la evolución de estos mercados puede ser relevante de cara a la gestión de ciertas masas forestales cuyo interés industrial es más reducido.

En lo relativo a la gestión forestal, en España se siguen las directrices de la Unión Europea, que no contemplan pagos por el stock de carbono ya existente en masas forestales naturales. Sin embargo, sí pueden generarse ingresos a partir de actuaciones que incrementen la absorción de carbono respecto a una línea base de referencia, dentro de programas de certificación reconocidos. Entre estas actuaciones se incluyen prácticas de selvicultura, repoblación o restauración.

En la actualidad, las vías más viables para obtener este tipo de ingresos son los mercados voluntarios internacionales ya mencionados anteriormente, que operan con metodologías consolidadas a través de entidades como Verra (<https://verra.org/>) o Gold Standard (<https://www.goldstandard.org/>). Un ejemplo pionero en Europa fue el proyecto de gestión forestal mejorada (*Improved Forest Management, IFM*) desarrollado en Rumanía, verificado bajo el Verified Carbon Standard de Verra, que marcó un precedente en la certificación de este tipo de iniciativas.

A nivel comunitario, la Unión Europea aprobó en 2024 el Reglamento (UE) 2024/3012 (<http://data.europa.eu/eli/reg/2024/3012/oj>) sobre certificación voluntaria de absorciones de carbono, que incluye expresamente proyectos de *carbon farming* y de IFM. Actualmente se encuentran en fase de desarrollo las metodologías específicas para cada tipología de proyecto, que serán determinantes para definir las oportunidades y condiciones de acceso a ingresos para los propietarios forestales por secuestro de carbono.

Aunque en España todavía no se han registrado iniciativas de este tipo, existen estudios que han analizado los efectos económicos de integrar los pagos por carbono en la planificación forestal, como las evaluaciones sobre la modificación del turno de corte final para maximizar este tipo de ingresos (Bravo et al., 2008; Bravo & Díaz-Balteiro, 2004).

De acuerdo con las estimaciones del tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3), los árboles de Castilla y León acumulan un total aproximado de 190 millones de toneladas de biomasa, lo que se traduce en unos 95 millones de toneladas de carbono almacenado. (Junta de Castilla y León, 2020).

La *Tabla 2* recoge las existencias estimadas de biomasa y carbono en las distintas provincias de Castilla y León, diferenciando entre la biomasa aérea (tronco, ramas y hojas) y la biomasa radical (raíces). Estos datos son clave para comprender el potencial de secuestro de carbono de los ecosistemas forestales de la región, lo cual resulta especialmente relevante en el contexto de la gestión forestal orientada a la mitigación del cambio climático.

Tabla 2. Existencias de biomasa y carbono en Castilla y León. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

| Provincia | Biomasa aérea (t) | Biomasa radical (t) | Total biomasa (t) | Carbono aéreo (t) | Carbono radical (t) | Total carbono (t) |
|------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| Ávila | 9.992.035 | 4.425.332 | 14.417.368 | 4.996.018 | 2.212.666 | 7.208.684 |
| Burgos | 27.741.055 | 11.230.517 | 38.971.571 | 13.870.527 | 5.615.258 | 19.485.786 |
| León | 25.111.674 | 10.675.822 | 35.787.497 | 12.555.837 | 5.337.911 | 17.893.748 |
| Palencia | 8.933.764 | 3.379.040 | 12.312.804 | 4.466.882 | 1.689.520 | 6.156.402 |
| Salamanca | 15.081.842 | 8.591.906 | 23.673.748 | 7.540.921 | 4.295.953 | 11.836.874 |
| Segovia | 12.143.327 | 4.532.485 | 16.675.812 | 6.071.664 | 2.266.243 | 8.337.906 |
| Soria | 21.932.075 | 8.833.151 | 30.765.226 | 10.966.038 | 4.416.575 | 15.382.613 |
| Valladolid | 4.713.504 | 1.922.461 | 6.635.964 | 2.356.752 | 962.108 | 3.318.860 |
| Zamora | 7.576.416 | 3.562.033 | 11.138.448 | 3.788.208 | 1.781.016 | 5.569.224 |
| Castilla y León | 133.225.691 | 57.154.502 | 190.380.193 | 66.612.846 | 28.577.251 | 95.190.096 |

Además de las existencias totales de biomasa y carbono por provincia recogidas en el IFN3, resulta de interés analizar cómo ha evolucionado la cantidad media de biomasa y carbono acumulado específicamente en las masas de rebollar (*Quercus pyrenaica*) a lo largo del tiempo.

A continuación, se presentan dos tablas (*Tabla 3* y *Tabla 4*) que recogen los valores medios de biomasa total (WT, en toneladas por hectárea) y de carbono almacenado (C, en toneladas por hectárea) en los rebollares de Castilla y León y de cada una de sus provincias, comparando los datos de las tres últimas ediciones del Inventario Forestal Nacional (IFN2, IFN3 e IFN4). Esta información permite evaluar la evolución del potencial de secuestro de carbono de esta especie en el ámbito regional.

Tabla 3. Valores promedio de biomasa total (WT) de los rebollares de Castilla y León y cada una de sus provincias a lo largo de las tres ediciones más recientes del Inventario Forestal Nacional (IFN). Fuente: (Vázquez-Veloso et al., 2023a)

| Provincia | WT IFN2 (t/ha) | WT IFN3 (t/ha) | WT IFN4 (t/ha) |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ávila | 52,28 | 68,14 | 96,77 |
| Burgos | 68,72 | 92,80 | 115,54 |
| León | 58,11 | 57,99 | 85,56 |
| Palencia | 43,51 | 56,19 | 103,54 |
| Salamanca | 52,05 | 59,87 | 80,23 |
| Segovia | 37,52 | 53,12 | 63,19 |
| Soria | 43,49 | 56,64 | 77,79 |
| Zamora | 38,64 | 50,21 | 83,27 |
| Castilla y León | 52,26 | 63,58 | 88,22 |

Tabla 4. Valores promedio de stock de carbono total (CT) de los rebollares de Castilla y León y cada una de sus provincias y a lo largo de las tres ediciones más recientes del Inventario Forestal Nacional (IFN). Fuente: (Vázquez-Veloso et al., 2023a)

| Provincia | C IFN2 (t/ha) | C IFN3 (t/ha) | C IFN4 (t/ha) |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| Ávila | 26,14 | 34,07 | 48,38 |
| Burgos | 34,36 | 46,40 | 57,77 |
| León | 29,05 | 29,00 | 42,78 |
| Palencia | 21,75 | 28,10 | 51,77 |
| Salamanca | 26,03 | 29,94 | 40,11 |
| Segovia | 18,76 | 26,56 | 31,60 |
| Soria | 21,74 | 28,32 | 38,90 |
| Zamora | 19,32 | 25,10 | 41,64 |
| Castilla y León | 26,13 | 31,79 | 44,11 |

Los datos expuestos reflejan un incremento significativo tanto en la biomasa como en el carbono medio acumulado en los rebollares de Castilla y León en las últimas décadas. En conjunto, se ha pasado de valores medios de 52,26 t/ha de biomasa en el IFN2 a 88,22 t/ha en el IFN4, y de 26,13 t/ha de carbono a 44,11 t/ha en el mismo periodo. Este crecimiento no solo evidencia el potencial de estas masas para el almacenamiento de carbono, sino también su relevancia dentro de las estrategias de mitigación del cambio climático a nivel regional. Además, pone de manifiesto que el grado de aprovechamiento de estas masas forestales es menor que su crecimiento ordinario.

Como se ha comentado anteriormente, el uso tradicional del rebollo ha sido la producción de leña, un producto con bajo valor económico, debido al crecimiento lento, ramificación baja y forma irregular de los fustes. A esto hay que sumarle los altos costes de los trabajos forestales y que los árboles suelen tener poco valor maderero por su reducido tamaño. Todo esto hace que la gestión de estas masas no sea rentable en muchos casos. Por ello, el poder acceder a ingresos complementarios a través del mercado de carbono cobra especial importancia.

Tener en cuenta los mercados de carbono puede ser una oportunidad para mejorar la rentabilidad de los rebollares. Vender créditos de carbono generados por el crecimiento del bosque permitiría obtener ingresos extra, lo que puede animar a propietarios y gestores forestales a intervenir en estas masas, mejorando su estado actual y su futuro.

3. Objeto del trabajo

El objetivo principal de este proyecto es evaluar y comparar diferentes alternativas de gestión selvícola aplicadas a rebollares de monte bajo en Castilla y León, con el propósito de determinar su eficacia en la fijación de carbono y su viabilidad económica, con el fin de identificar la opción de gestión que optimice simultáneamente el secuestro de carbono y la rentabilidad.

Con el propósito de alcanzar el objetivo principal del trabajo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar alternativas selvícolas que representen diferentes formas e intensidades de gestión de *Quercus pyrenaica*, con el propósito de analizar su efecto sobre el desarrollo del bosque y su capacidad de fijar carbono.
- Simular la evolución del bosque bajo cada escenario utilizando la herramienta SIMANFOR (Bravo et al., 2025), considerando un horizonte temporal de 90 años.
- Analizar los resultados ecológicos y económicos de cada alternativa, incluyendo variables estructurales de la masa, un balance económico de las actuaciones y el carbono fijado por el bosque, con el fin de valorar su potencial aprovechamiento económico.
- Evaluar los resultados obtenidos y proponer las alternativas de gestión más adecuadas en función de distintos objetivos de manejo.

4. Marco de trabajo

4.1. Zona de aplicación

La zona de estudio se encuentra en la provincia de Soria, situada en el este de Castilla y León, en el noroeste de la península ibérica. En concreto, el análisis técnico se desarrolla sobre cinco parcelas distribuidas en masas puras de rebollo gestionadas como monte bajo. Según la última versión del Mapa Forestal Español, en la zona de estudio también encontramos ejemplares de *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica* (*MFE de máxima actualidad. Castilla y León, s. f.*). En el Anexo I se incluyen cuatro planos que permiten una mejor localización y contextualización espacial de las parcelas utilizadas en el estudio, facilitando la comprensión del entorno y las condiciones de partida.

Con el objetivo de caracterizar cuantitativamente las condiciones climáticas de la zona de estudio, se ha elaborado un climodiagrama correspondiente al municipio de Soria (*Figura 6*). Para ello, se ha empleado como periodo de referencia el comprendido entre los años 1993 y 2022, utilizando datos climáticos históricos procedentes de la base CRU-TS 4.06 (Harris et al., 2020), reescalados mediante WorldClim 2.1 (Fick & Hijmans, 2017). Este gráfico permite visualizar de manera integrada la relación entre precipitaciones y temperaturas mensuales medias a lo largo del año, proporcionando un contexto climático esencial para la interpretación de los resultados del estudio.

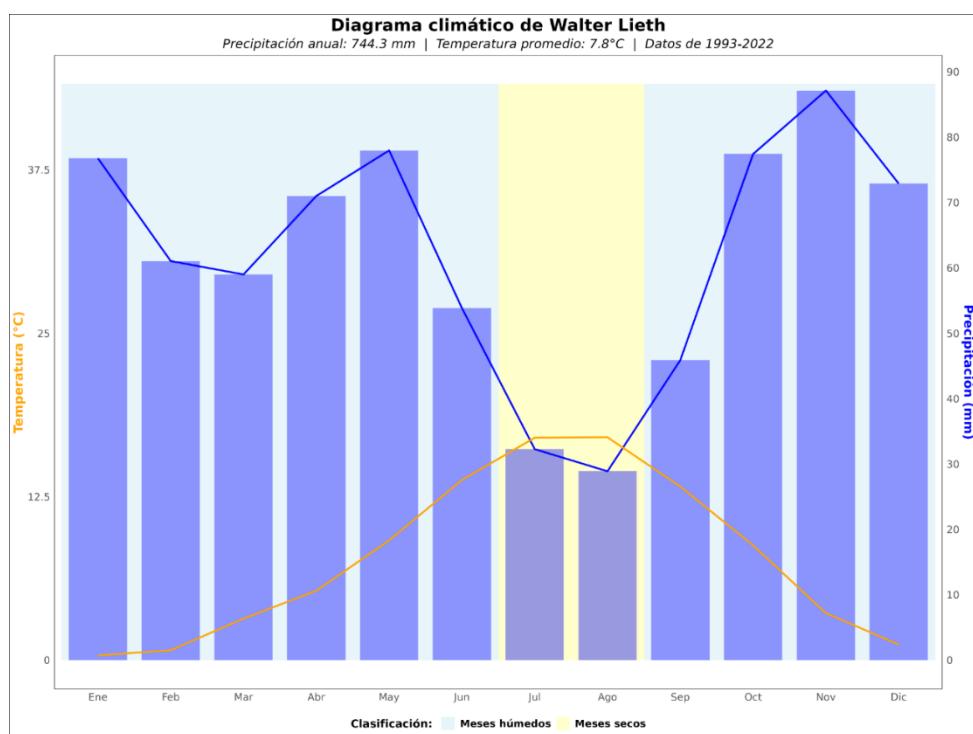


Figura 6. Climodiagrama de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

Este diagrama muestra un régimen térmico y pluviométrico característico del clima mediterráneo continentalizado. La precipitación anual asciende a 744,3 mm y la temperatura media se sitúa en 7,8 °C. Las precipitaciones se reparten de forma irregular, con picos durante la primavera y el otoño, y un mínimo durante los meses de julio y agosto, que se identifican como los únicos meses secos del año. En cuanto a las temperaturas, los inviernos son fríos, con medias cercanas a los 0 °C en enero y febrero, mientras que el mes más cálido es julio, con una media cercana a los 20 °C.

4.2. Datos

Los datos utilizados provienen de masas puras de rebollo de Castilla y León muestreadas durante finales de 2022 y comienzos de 2023, con sabia parada y sin hoja. Se consideraron masas puras aquellas cuya especie principal presentaba un área basimétrica superior al 90 %. En cada una de ellas se establecieron parcelas circulares de 15 metros de radio (aproximadamente 700 m²), en las que se marcaron todos los árboles con un diámetro normal (DBH) superior a 5 cm, registrando tanto su DBH como su posición mediante forcípula electrónica y estación total (*Figura 7*), respectivamente. Para el cálculo de alturas, se midió al menos el 10 % del arbolado, incluyendo árboles de distintas clases sociológicas y clases diamétricas, utilizando un dispositivo VERTEX LASER GEO. Estas alturas de referencia permitieron validar las alturas obtenidas del escaneo con LiDAR HLS (escáner LiDAR manual o *Handled LiDAR Scanner* por sus siglas en inglés) (*Figura 8*), realizado también en cada una de las parcelas. Por otro lado, 3 árboles de cada parcela han sido muestreados utilizando una barrena Pressler (*Figura 9*), obteniendo dos muestras de cada árbol para poder calcular así la edad promedio de la parcela y tener un registro de su crecimiento anterior al momento del muestreo, así como la edad promedio de la masa.



Figura 7. Operario calibrando la estación total



Figura 8. Dispositivo LiDAR HLS utilizado para escanear mientras se posiciona en una de las estacas de las parcelas



Figura 9. Extracción de muestras de madera con barrena Pressler

En la *Tabla 5* se recogen los datos iniciales de las cinco parcelas que constituyen la base sobre la que se han definido los escenarios selvícolas y se han desarrollado las simulaciones posteriores, donde se recogen las coordenadas en el sistema ETRS89 / UTM huso 30N (sistema oficial de referencia geoespacial en España), la densidad de cada parcela (N, medida en pies/ha), la edad media expresada en años, el área basimétrica (G, suma de las secciones transversales a 1,3 m de altura de todos los árboles por hectárea) y la altura dominante (Ho, en metros).

Tabla 5. Datos de inventario de las parcelas de estudio. Fuente: elaboración propia

| Parcela | UTM_X | UTM_Y | Edad (años) | N (pies/ha) | G (m ² /ha) | Ho (m) |
|---------|------------|--------------|-------------|-------------|------------------------|--------|
| so01 | 535.167,54 | 4.646.099,49 | 53 | 1.755 | 37,30 | 14,98 |
| so02 | 535.321,17 | 4.646.181,50 | 53 | 1.429 | 20,60 | 8,70 |
| so03 | 530.498,76 | 4.645.553,68 | 73 | 1.613 | 31,00 | 12,10 |
| so04 | 530.500,75 | 4.645.462,54 | 74 | 1.556 | 33,20 | 15,80 |
| so05 | 531.600,45 | 4.640.431,56 | 61 | 2.646 | 33,90 | 13,20 |

4.3. Selvicultura de referencia

Con objeto de analizar distintas estrategias de gestión orientadas a la fijación de carbono en rebollares de monte bajo, se definieron seis escenarios selvícolas, representando un gradiente de intervención, desde la ausencia total de manejo hasta opciones de gestión más intensiva. Todos ellos tienen horizonte temporal común de 90 años que termina en una edad de la masa de 140. Esta edad final se encuentra dentro del turno recomendado de la especie, que se establece entre 110 y 180 (Crespo Rodrigo & García Quintana, 2013). Aunque puede no ser el turno óptimo para todos los escenarios evaluados, se ha establecido un horizonte temporal común para facilitar su comparación. Llegados a la edad de turno no se realiza una corta final ni tampoco se plantean cortas de regeneración, pues cada escenario y objetivo de gestión requerirá diferentes actuaciones y esto queda fuera del propósito de este trabajo.

Para realizar una comparación respecto al crecimiento natural sin intervención, uno de los escenarios (Control) no contempla ninguna intervención selvícola, dejando crecer la masa de manera natural. En los restantes, se realizan cortas de diverso tipo (por lo bajo, por lo alto y sistemáticas, considerando o no árboles de futuro o de porvenir) y aplicadas con distinta periodicidad (10 o 20 años entre actuaciones) e intensidad (desde 10% hasta 30% de intensidad de corta). En este caso, el criterio de corta elegido ha sido la densidad (pies/ha), por lo que al referirnos a intensidad de corta nos referimos al porcentaje de densidad eliminada durante una intervención selvícola.

Además, algunos escenarios contemplan un porcentaje de árboles futuro o de porvenir, que son los escenarios *cyl* y *mix*, que explicaremos más adelante. Con estas combinaciones se pretende abarcar distintos tipos de gestión que se están actualmente utilizando como referencia o bien sugiriendo desde los paneles de expertos en gestión forestal (Gutiérrez et al., 2025; Vázquez-Veloso et al., 2025).

En el diseño de los escenarios selvícolas se han contemplado distintas estrategias con el fin de evaluar su impacto sobre la evolución del monte a lo largo del periodo simulado. Así, los escenarios *gal*, *sys* y *abo* se han planteado como modelos simplificados, basados cada uno en un único tipo de tratamiento (corta por lo bajo, cortas sistemáticas y cortas por lo alto, respectivamente). El objetivo de estos tres escenarios es comparar la evolución de las masas bajo diferentes enfoques de gestión, manteniendo constantes otros factores como la intensidad y la frecuencia de intervención, lo que permite aislar el efecto del tipo de corta sobre la dinámica forestal. Se espera que estas alternativas, al ser aplicadas de forma reiterada y homogénea, muestren distintos comportamientos en términos de extracción de volumen, regeneración y acumulación de biomasa y carbono, ofreciendo una visión clara del impacto que tiene cada tipo de intervención cuando se aplica de manera continuada y uniforme.

Por otro lado, los escenarios *cyl* y *mix* responden a una estrategia distinta, cuyo propósito es transitar desde un monte bajo, característico de las formaciones rebrotadas de rebollo, hacia un monte alto, fomentando la regeneración por semilla y evitando el rebrote. Estos modelos de gestión han sido diseñados tomando como referencia el documento de Vázquez-Veloso et al (2025). Este tipo de manejo se basa en intervenciones suaves y espaciadas en el tiempo, permitiendo conservar la estructura del bosque, mantener su productividad y, a su vez, maximizar su capacidad como sumidero de carbono.

Al mantener una cobertura arbórea continua mediante claras y clareos moderados, se preserva una importante cantidad de biomasa aérea activa durante todo el ciclo de gestión, lo que garantiza una fijación de carbono constante. Además, este enfoque promueve el desarrollo de árboles longevos y de mayor diámetro, con una mayor capacidad de acumulación de carbono a lo largo del tiempo. A esto se suma el efecto positivo de mantener parte del ramaje o madera muerta en el suelo, lo cual favorece el almacenamiento de carbono en los horizontes edáficos y en la biomasa muerta, aportando estabilidad al sistema y promoviendo la biodiversidad.

En conjunto, esta estrategia de gestión se alinea con los objetivos actuales de mitigación del cambio climático, permitiendo que los rebollares, tradicionalmente infrautilizados desde una perspectiva productiva, desempeñen un papel clave en la absorción y fijación de carbono atmosférico, tanto en la biomasa viva como en el suelo. En la *Tabla 6* se presenta un resumen de cada escenario selvícola.

Tabla 6. Resumen de los 6 escenarios selvícolas. Fuente: elaboración propia

| Escenario | Edad (años) | Tipo de corte | Intensidad (%) | Árboles futuro (%) |
|-----------|-------------|---|----------------|--------------------|
| Control | - | Sin corte | - | - |
| gal | 50 | Corta por lo bajo | 10 | - |
| | 60 | Corta por lo bajo | 10 | - |
| | 80 | Corta por lo bajo | 20 | - |
| | 100 | Corta por lo bajo | 20 | - |
| | 120 | Corta por lo bajo | 20 | - |
| | 140 | Corta por lo bajo | 20 | - |
| abo | 50 | Cortas por lo alto | 10 | - |
| | 60 | Cortas por lo alto | 10 | - |
| | 80 | Cortas por lo alto | 20 | - |
| | 100 | Cortas por lo alto | 20 | - |
| | 120 | Cortas por lo alto | 20 | - |
| | 140 | Cortas por lo alto | 20 | - |
| sys | 50 | Cortas sistemáticas | 10 | - |
| | 60 | Cortas sistemáticas | 10 | - |
| | 80 | Cortas sistemáticas | 20 | - |
| | 100 | Cortas sistemáticas | 20 | - |
| | 120 | Cortas sistemáticas | 20 | - |
| | 140 | Cortas sistemáticas | 20 | - |
| mix | 50 | Cortas sistemáticas con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 70 | Corta por lo bajo | 10 | - |
| | 70 | Cortas sistemáticas con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 90 | Corta por lo bajo | 10 | - |
| | 90 | Cortas sistemáticas con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 110 | Corta por lo bajo | 10 | - |
| | 110 | Cortas sistemáticas con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 130 | Corta por lo bajo | 10 | - |
| | 130 | Cortas sistemáticas con árboles de futuro | 10 | 30 |
| cyl | 50 | Cortas sistemáticas con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 50 | Cortas por lo alto con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 70 | Cortas sistemáticas con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 70 | Cortas por lo alto con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 90 | Cortas sistemáticas con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 90 | Cortas por lo alto con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 110 | Cortas sistemáticas con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 110 | Cortas por lo alto con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 130 | Cortas sistemáticas con árboles de futuro | 10 | 30 |
| | 130 | Cortas por lo alto con árboles de futuro | 10 | 30 |

4.4. Simulaciones selvícolas

Para llevar a cabo las simulaciones selvícolas correspondientes, usaremos la plataforma web SIMANFOR (Sistema de Información para el Manejo Forestal Sostenible) diseñada para simular y evaluar diferentes escenarios de gestión forestal. Su objetivo principal es facilitar la toma de decisiones técnicas mediante la evaluación cuantitativa del impacto de prácticas selvícolas sobre indicadores clave como el volumen, la biomasa, el carbono, el valor económico o la biodiversidad. La herramienta permite modelar la evolución de masas forestales en el tiempo a partir de datos de inventario, integrando modelos de crecimiento, funciones de producción y criterios de manejo definidos por el usuario (Bravo et al., 2025).

En este trabajo se aplicó un modelo de crecimiento de árbol individual independiente de la distancia, ajustado específicamente para masas de *Quercus pyrenaica* de Castilla y León. Dicho modelo integra diferentes submodelos estáticos y dinámicos, enfocados en variables estructurales y de producción. Entre los primeros se incluyen modelos para estimar el índice de sitio (Adame et al., 2006), la relación entre altura y diámetro (Adame, del Río, et al., 2008), el volumen del árbol (M. Rodríguez et al., 2015), la biomasa aérea (Ruiz-Peinado et al., 2012) y el carbono almacenado (Castaño-Santamaría & Bravo, 2012). Por otro lado, los submodelos dinámicos permiten proyectar la evolución de la masa mediante funciones de supervivencia (Adame et al., 2010b), crecimiento diamétrico (Adame, Hynynen, et al., 2008) y acumulación de masa (Adame et al., 2010a).

4.5. Análisis económico

Para evaluar la rentabilidad de los distintos escenarios de gestión selvícola propuestos, se ha realizado un análisis económico basado en el cálculo del Valor Actual Neto (VAN). Este indicador permite estimar el valor actualizado de los beneficios netos generados a lo largo del turno de gestión, fijado en este estudio en 100 años, utilizando una tasa de descuento del 2 %.

Los costes considerados incluyen únicamente las operaciones directamente relacionadas con el aprovechamiento forestal: señalamiento de pies, apeo, preparación de la madera, saca mecanizada y carga mecanizada. Los precios unitarios de cada actuación han sido tomados del cuadro de tarifas de Tragsa, 2024, y se presentan detalladamente en una tabla anexa ([Anexo II: Tablas de precios, Tabla 7](#)). Hay que destacar que los precios de apeo y preparación de la madera varían en función del diámetro de los árboles y de la densidad de cada masa, los cuales se han tenido en cuenta a la hora de calcularlo para cada escenario selvícola, mientras que el resto de las operaciones tienen costes fijos por unidad. Los costes contemplados van desde el marcaje a la saca de madera a cargadero, excluyendo los relativos al transporte posterior a fábrica.

En cuanto a los ingresos, se ha supuesto la venta exclusiva de madera de *Quercus pyrenaica*, destinada íntegramente a leñas por ser su destino habitual, con un precio de mercado de 35 €/t utilizado como referencia el Anuario de Estadística Forestal 2022. Para poder emplear este valor en las cálculos, ha sido necesario expresarlo en €/m³, para ello, se ha utilizado la densidad básica de la madera de rebollo, estimada en 0,655 t/m³ (Acuña-Rello et al., 2009), lo que ha permitido realizar la conversión correspondiente y adaptar el precio a las unidades utilizadas en el modelo.

Adicionalmente, se ha considerado una valoración del valor del monte al final del turno, estimando el volumen final de madera en pie y diferenciando entre el volumen con potencial para madera de sierra y aquel destinado a leñas. Estos volúmenes se valorarán aplicando los precios de mercado correspondientes (84,5 €/m³ y 35 €/m³ respectivamente), reflejados en las tablas anexas ([Anexo II: Tablas de precios, Tabla 8](#) y [Tabla 9](#)). Ante la posibilidad de optar por emplear el volumen de sierra o el volumen de sierra de cánter como referencia para dicha valoración, se ha seleccionado el volumen de sierra al considerar que sus requisitos dimensionales son más restrictivos (F. Rodríguez et al., 2008) y, por tanto, garantizan una estimación más conservadora y representativa del valor comercial de la madera aprovechable.

Para la actualización de los flujos de caja se ha empleado la fórmula general del VAN:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Donde:

I_0 es la inversión inicial

F_t son los flujos de dinero en cada periodo t

n es el número de periodos de tiempo

k es el tipo de descuento o tipo de interés exigido a la inversión

5. Análisis de alternativas de gestión

Este apartado recoge y analiza los resultados promedio obtenidos tras simular los distintos escenarios selvícolas sobre las cinco parcelas de estudio. El objetivo es comparar el comportamiento de las distintas alternativas de gestión en relación con variables clave como de la densidad, el área basimétrica, el volumen de madera extraído, la biomasa y el carbono acumulado, siendo las dos últimas variables analizadas en un apartado específico debido a su relevancia en este trabajo. Posteriormente se presentarán los costes y los ingresos que generan cada uno de sus escenarios.

Los valores detallados de producción maderera, biomasa y carbono acumulado por escenario, así como su evolución temporal, pueden consultarse en el [Anexo III](#), donde se presenta la *Tabla 13*, que muestra la producción de cada escenario en cada momento temporal. Estos valores corresponden a los promedios obtenidos a partir de las cinco parcelas simuladas. Para consultar los datos brutos y desglosados por parcela, se puede acceder al [repositorio de GitHub](#) asociado a este trabajo, donde se encuentran los resultados originales obtenidos con SIMANFOR, junto con el archivo Excel empleado para realizar los cálculos económicos.

Es importante señalar que las parcelas de estudio no partían de una misma edad inicial, ya que algunas presentaban una edad de 53 años mientras que otras alcanzaban los 61, 73 ó 74 años, según ya mostramos en la [Tabla 5](#). Esta diferencia ha condicionado la aplicación de ciertas actuaciones selvícolas dentro de las simulaciones. Concretamente, en los escenarios donde las primeras intervenciones estaban programadas para realizarse a una edad de referencia de 50 ó 60 años, aquellas parcelas que ya superaban dicha edad al inicio de la simulación no han recibido dichas actuaciones. Esta circunstancia debe tenerse en cuenta a la hora de interpretar los resultados, especialmente en las primeras etapas del análisis temporal comprendida por debajo de los 70 años de edad.

5.1. Alternativas selvícolas y evolución de la masa forestal

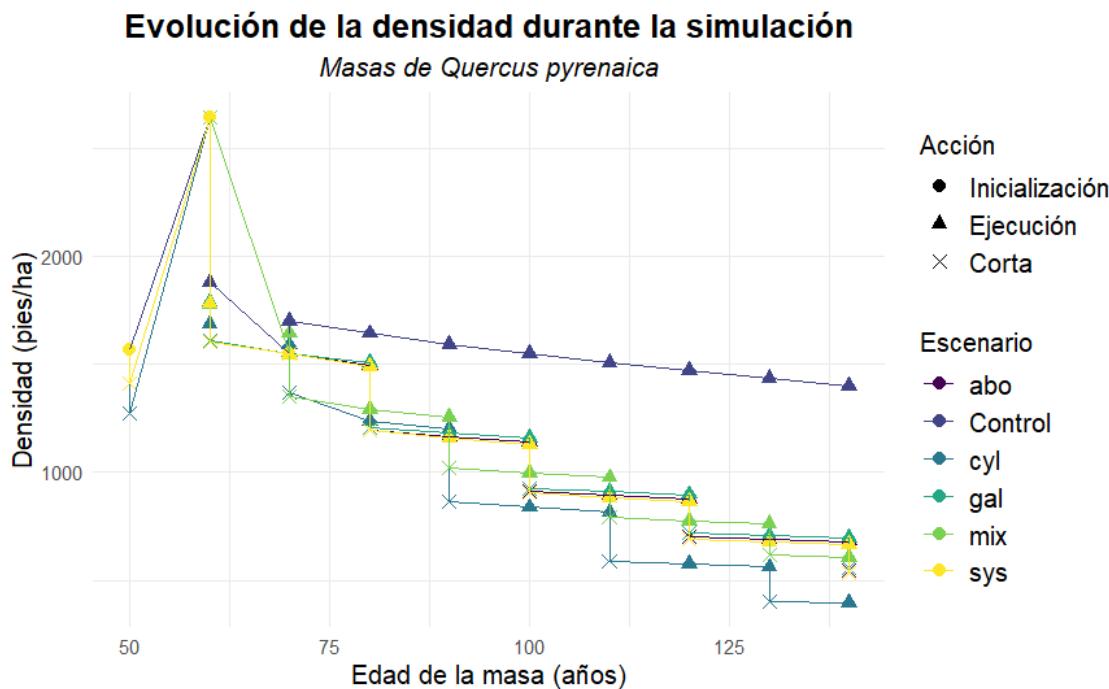


Figura 10. Evolución de la densidad durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

En este primer gráfico (Figura 10), al igual que veremos en los siguientes, se aprecian variaciones bruscas en la densidad de todos los escenarios desde el comienzo de la simulación (50 años) hasta su estabilización a los 70 años aproximadamente. Como ya comentamos anteriormente, esta variación se debe a la distinta edad inicial de las parcelas estudiadas, cuyos valores aparecen en promedio en las figuras mostradas en los resultados y parten con distintos valores de densidad, área basimétrica, etc. Sin embargo, por consistencia en los distintos escenarios de gestión, se ha tenido en cuenta la edad inicial de la masa y no se han realizado las intervenciones en aquellas que no cumplieran la edad mínima a la que cada corta fue planteada.

El escenario control, al no contemplar cortas, muestra una evolución natural con una disminución progresiva y moderada de la densidad debido a la mortalidad natural. Es el escenario que mantiene una densidad más alta a lo largo de todo el turno (1500 pies/ha en promedio).

En todos los escenarios con intervención, se observa un pico inicial debido a la fase de inicialización (entre 50 y 60 años), seguido por una caída brusca tras las primeras cortas a los 80 años, y después una disminución progresiva vinculada a nuevas intervenciones y mortalidad.

El escenario cyl muestra una reducción de la densidad algo más pronunciada que los demás escenarios, obteniendo una densidad final de aproximadamente 450 pies/ha.

Escenarios abo, gal, mix y sys: presentan una evolución similar entre sí, con una disminución escalonada de la densidad tras las distintas cortas. La diferencia entre estos escenarios no es muy marcada en términos de densidad final (entre 500 y 600 pies/ha),

reflejando la intención de aplicar intensidades de corta similares para hacer una comparativa más fiel entre escenarios de gestión, como se detalla en la metodología.

Evolución de la altura dominante durante la simulación

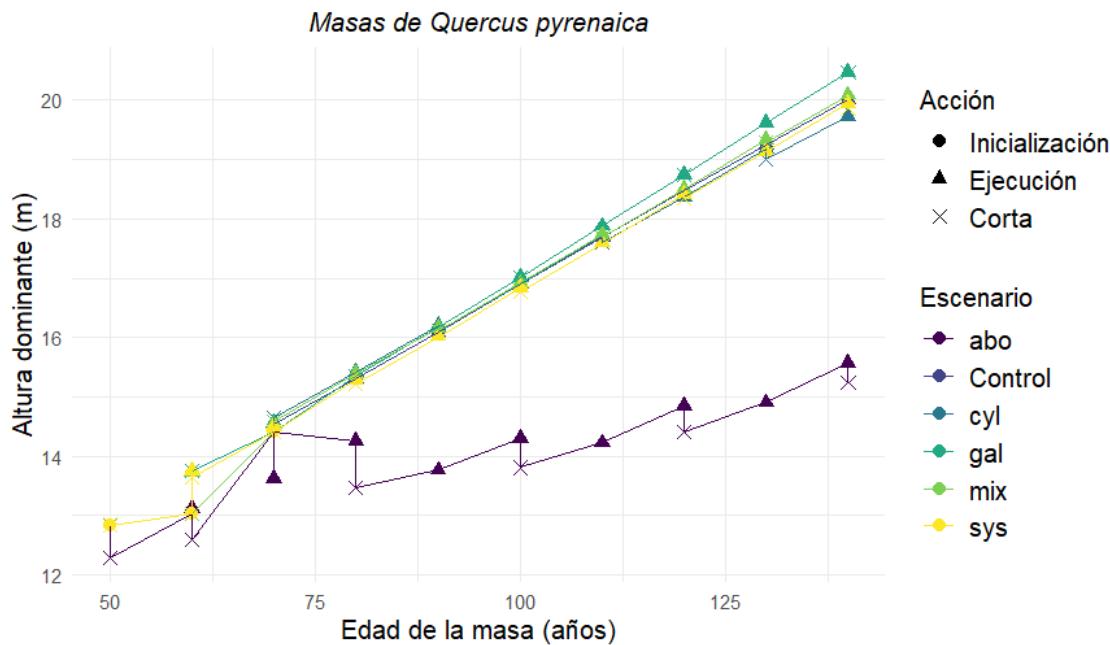


Figura 11. Evolución de la altura dominante durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

La *Figura 11* permite observar dos grupos claramente diferenciados en cuanto a la evolución de la altura dominante.

El escenario control presenta un crecimiento continuo y progresivo, prácticamente alcanzando las mayores alturas dominantes al final del turno (20m).

Los escenarios *gal*, *mix*, *sys* y *cyl* impulsan el crecimiento vertical de la masa (especialmente *gal*, que alcanza en torno a 21m de altura), ya que, en el caso de los dos primeros, al tratarse de cortas por lo bajo, se eliminan los pies más desfavorecidos, y los tratamientos con árboles futuro del escenario *cyl* fomentan el crecimiento de los árboles dominantes, alcanzando una altura similar a la observada en ausencia de gestión (entre 20,5 y 19,5m).

El escenario *abo* presenta una evolución mucho más lenta que los anteriores (15,5m a final de turno), ya que está basado en cortas por lo alto y estas eliminan los árboles dominantes.

Evolución del área basimétrica durante la simulación

Masas de *Quercus pyrenaica*

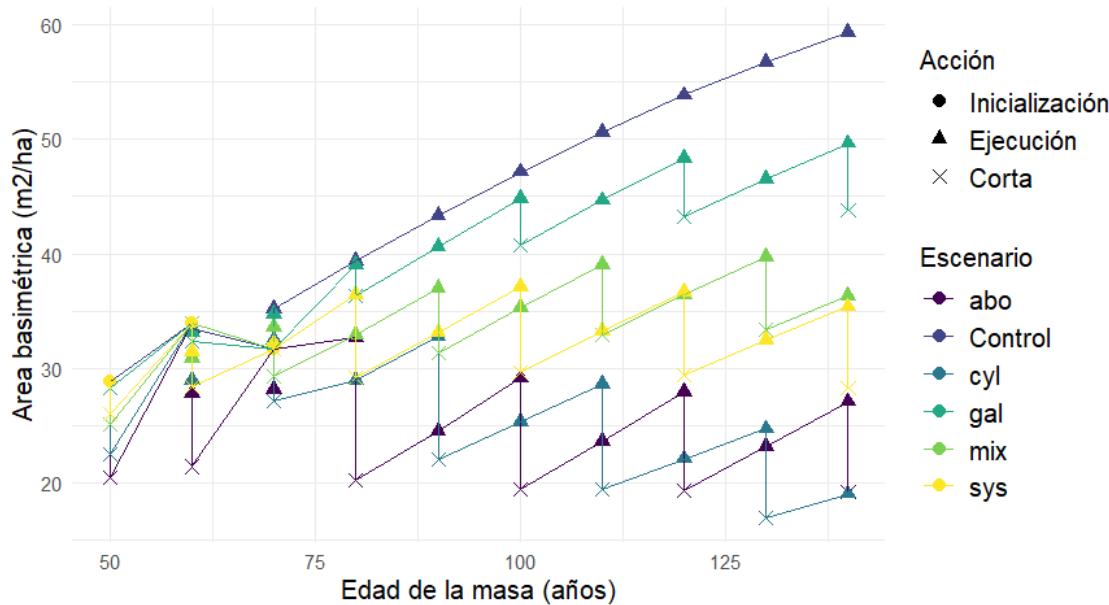


Figura 12. Evolución del área basimétrica durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

La *Figura 12* muestra cómo el escenario control es el que presenta un crecimiento continuo y sostenido del área basimétrica durante todo el periodo simulado, alcanzando los mayores valores finales (cerca de 60 m²/ha). Al no realizarse cortas, el desarrollo de la masa no se ve interrumpido, lo que permite acumular más madera, aunque también aumenta la competencia entre árboles y existen pérdidas por mortalidad natural, como hemos visto en el gráfico de la densidad.

El escenario *abo* es el que ha reportado una reducción más drástica en el área basimétrica al final del turno (20 m²/ha), siguiendo una evolución bastante pareja al escenario *cyl*. Pese a seguir las mismas intensidades de corta en cuanto a densidad de la masa, el hecho de retirar los árboles de mayor tamaño conlleva a una reducción más drástica del área basimétrica en cada intervención, tal y como se muestra en la *Figura 12*.

Los escenarios *sys*, *mix* y *gal* muestran valores más estables del área basimétrica a lo largo del tiempo, donde se puede ver cómo las cortas eliminan una proporción de esta variable similar al crecimiento del periodo entre cortas en cada intervención. Los escenarios *mix* y *sys* finalizan el turno con valores entre los 30 y los 35 m²/ha, y *gal* destaca ligeramente con valores en torno a 45 m²/ha.

Evolución del volumen acumulado durante la simulación

Masas de *Quercus pyrenaica*

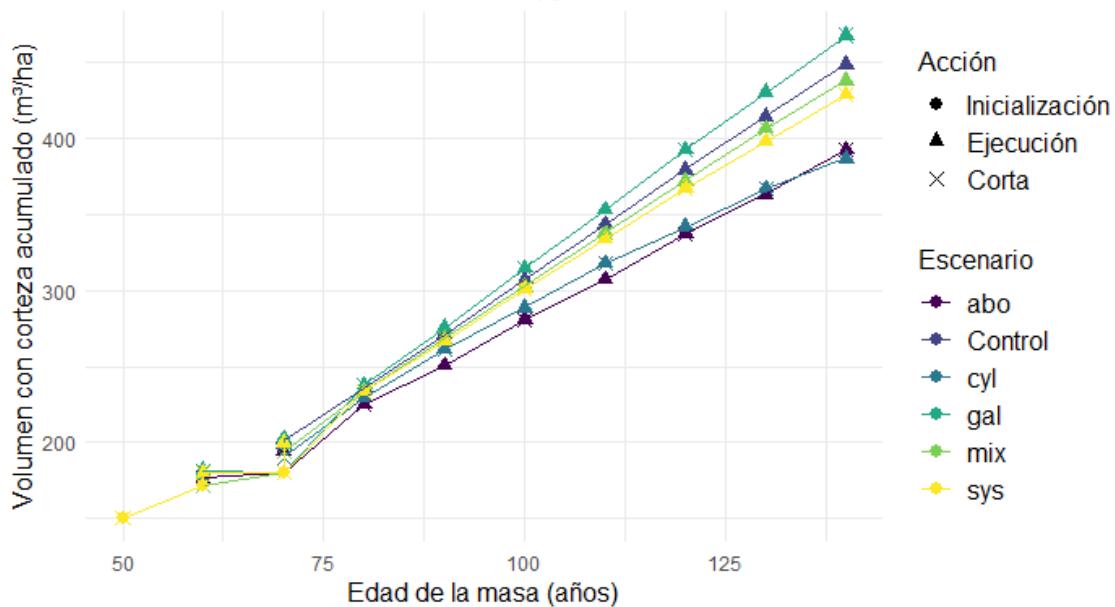


Figura 13. Evolución del volumen con corteza acumulado durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

En los gráficos donde se presenta la evolución de variables como el volumen o el carbono en forma acumulada, no se están descontando las cortas realizadas a lo largo del turno. Es decir, estas representaciones incluyen tanto lo que permanece en pie como lo que ya ha sido extraído en cada intervención selvícola. El objetivo de esta forma de representar los datos es ofrecer una visión integrada de la producción total generada a lo largo del escenario, permitiendo valorar con mayor precisión la productividad global de cada alternativa, independientemente del momento en el que se hayan realizado las extracciones.

La *Figura 13* muestra que la ausencia de cortas del escenario sin gestión permite una acumulación progresiva del volumen, aunque con riesgo de competencia excesiva o estancamiento en el crecimiento si la densidad es demasiado alta.

El escenario *gal* alcanza el mayor valor de volumen acumulado, superando los 450 m³/ha a final de turno. Esto se debe a la eliminación exclusiva de pies del estrato dominado, dejando desarrollarse a los más grandes.

Los escenarios *mix* y *sys* presentan una evolución paralela entre sí y bastante similar al control, aunque algo inferior (430 m³/ha).

Los escenarios *abo* y *cyl* muestran una evolución muy pareja y algo más lenta que los anteriores escenarios, ya que las cortas por lo alto eliminan pies del estrato dominante, al contrario que el escenario *gal*. Alcanzan unos 390 m³/ha a final de turno.

5.2. Alternativas selvícolas y secuestro de carbono

En este apartado se analizan los efectos de los diferentes escenarios de gestión selvícola sobre la capacidad de las masas de rebollo para almacenar carbono a lo largo del turno simulado. Para ello, los resultados se han desglosado en dos variables principales: biomasa y carbono almacenado.

Para detallar algo más el análisis, ambas variables se desglosaron en biomasa/carbono aéreo (incluyendo tronco, ramas de distintos tamaños y hojas) y biomasa/carbono total, considerando esta última como la suma de la parte aérea más la fracción correspondiente a las raíces. La evolución de la parte aérea se mostrará con los valores en pie, mientras que en lo referente al total, se mostrarán los valores acumulados.

Esta distinción responde a la necesidad de diferenciar entre el carbono retenido en las partes visibles del árbol (tronco, ramas y hojas), que es directamente afectado por las intervenciones selvícolas, y el que permanece en las raíces, el cual representa un componente importante del secuestro de carbono a largo plazo.

Conviene señalar que las tendencias que veremos en la variable del carbono (tanto aéreo como total) serán prácticamente idénticas a las mostradas en los gráficos de biomasa. Esto se debe a que los valores de carbono se han obtenido mediante la aplicación de un coeficiente de conversión (Montero et al 2005), sobre los resultados de biomasa, concretamente multiplicando por un factor estándar que representa el contenido medio de carbono en la materia vegetal. Por ello los gráficos de biomasa y carbono se comentarán de forma conjunta. Aun así, los gráficos se muestran igualmente para poder dimensionar el carbono en t/ha.

Evolución de la biomasa aérea durante la simulación

Masas de *Quercus pyrenaica*

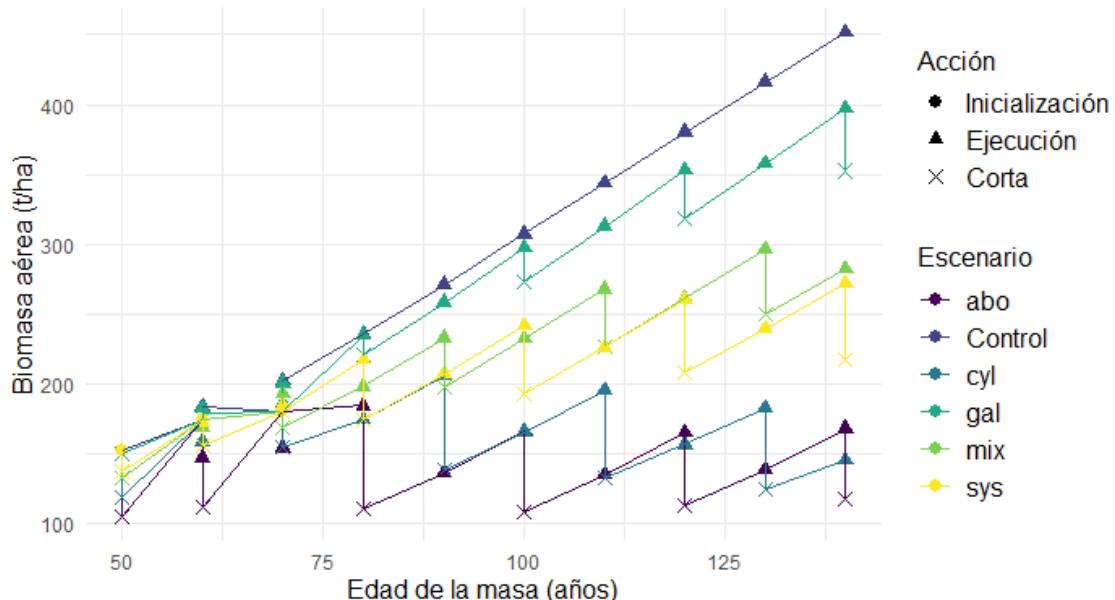


Figura 14. Evolución de la biomasa aérea durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

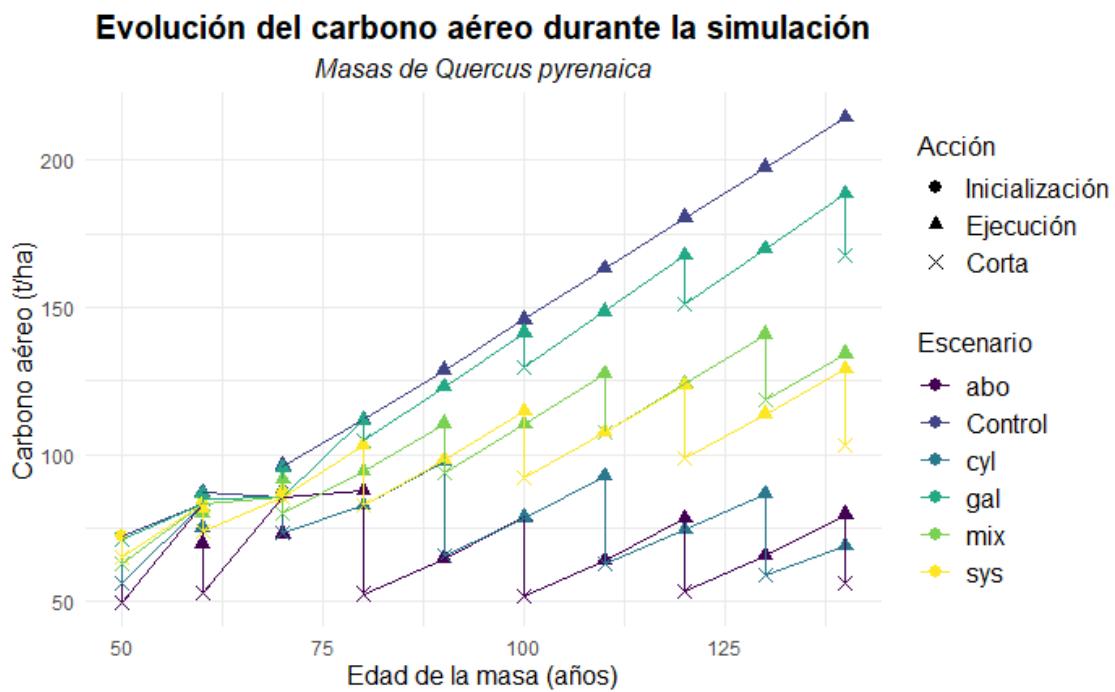


Figura 15. Evolución del carbono aéreo durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

En las *Figuras 14* y *15* se ve como a lo largo de la simulación, se observa cómo el escenario control, sin ningún tipo de intervención, mantiene las mayores cantidades de biomasa y carbono en pie, resultado esperable al no existir extracciones.

Entre los escenarios con gestión, *gal* destaca por conservar una elevada cantidad de biomasa aérea, lo que sugiere que el régimen de cortas aplicado permite mantener un alto volumen en pie. Los escenarios *mix* y *sys* también muestran una evolución estable y con valores intermedios, mientras que *cyl* y *abo* registran los valores más bajos a lo largo de todo el periodo simulado. Estos dos últimos escenarios, al estar basados en cortas por lo alto, tienden a eliminar los árboles dominantes y de mayor porte, lo que reduce considerablemente la cantidad de biomasa y carbono aéreo mantenido en el monte.

Evolución de la biomasa total acumulada durante la simulación

Masas de *Quercus pyrenaica*

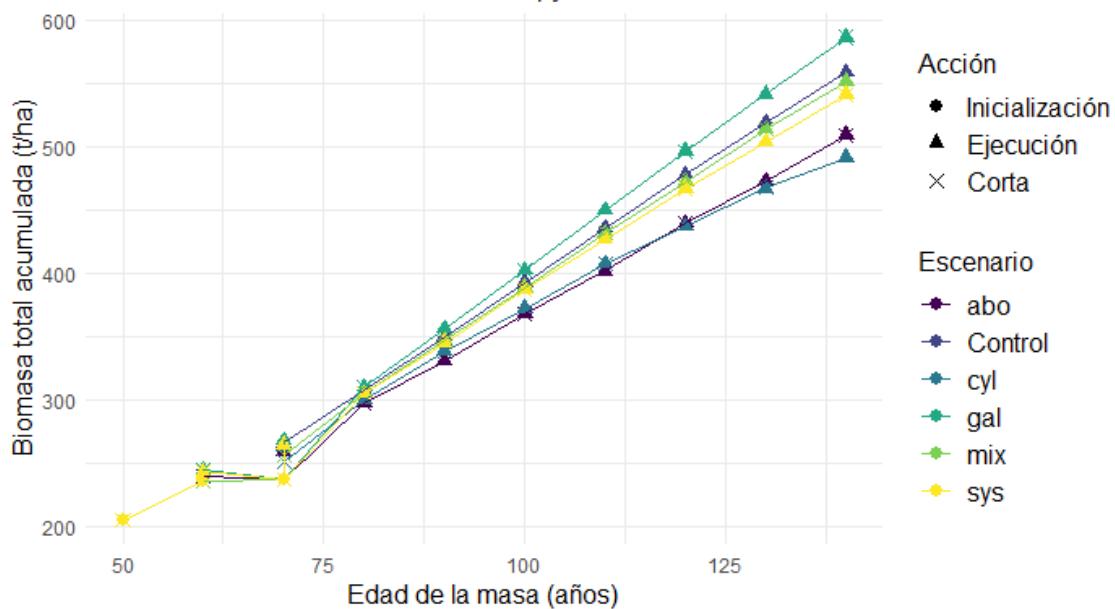


Figura 16. Evolución de la biomasa total acumulada durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

Evolución del carbono total acumulado durante la simulación

Masas de *Quercus pyrenaica*

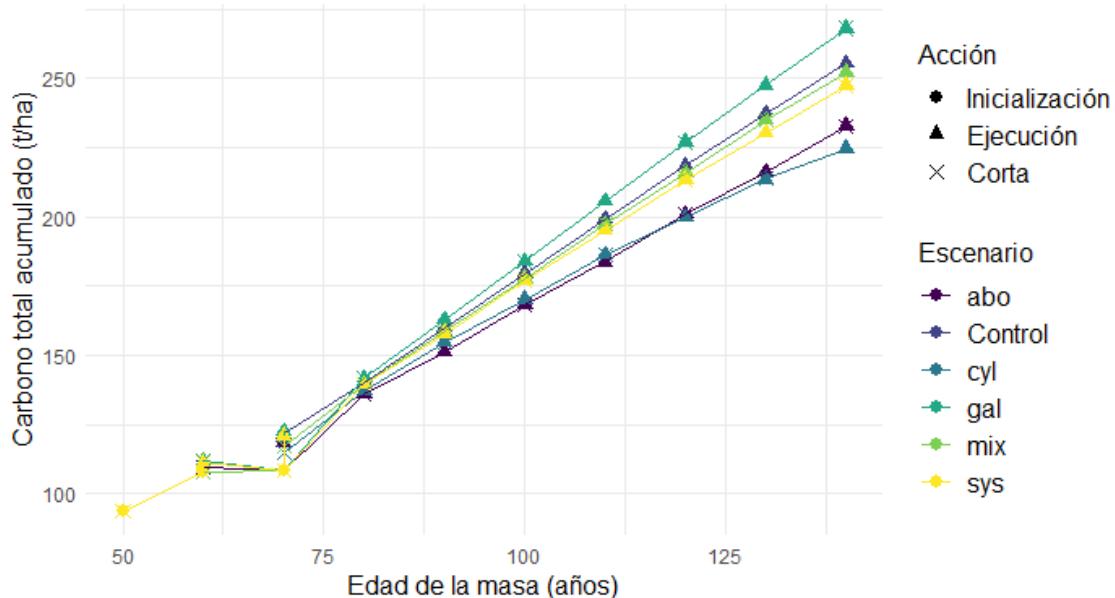


Figura 17. Evolución del carbono total acumulado durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

Las Figuras 16 y 17 permiten evaluar la cantidad total de biomasa y carbono generados por las masas forestales bajo cada escenario de gestión. En este caso, los valores representados consideran tanto la biomasa en pie como la extraída a lo largo de las distintas cortas, proporcionando así una visión completa de la productividad acumulada durante todo el periodo simulado.

El escenario *gal* destaca como el más productivo, seguido por *mix* y *sys*, superando incluso al escenario control. Esto sugiere que una gestión planificada no solo permite mantener la productividad del monte, sino que puede optimizar el secuestro de carbono a lo largo del tiempo.

En contraste, los escenarios *cyl* y *abo* presentan los menores valores de biomasa y carbono total. Este resultado se debe a las cortas por lo alto, que eliminan preferentemente los árboles de mayor tamaño, reduciendo así la capacidad de acumulación de biomasa y, en consecuencia, el secuestro de carbono.

En el [Anexo VI](#) se incluyen los gráficos complementarios que no han sido incorporados en este apartado por motivos de síntesis, pero que resultan útiles para una comprensión más completa de los resultados. Entre ellos se encuentran las representaciones de la evolución del volumen en pie, la biomasa aérea acumulada, el carbono aéreo acumulado, así como la biomasa total en pie y el carbono total en pie por escenario.

5.3. Alternativas selvícolas y estimación económica de ejecución

En este apartado se presentan los resultados económicos derivados de la aplicación de cada una de las alternativas selvícolas simuladas. Para ello, se han elaborado dos tablas que resumen los principales indicadores económicos obtenidos. La *Tabla 7* recoge los costes asociados a las actuaciones de gestión forestal y los ingresos generados exclusivamente por la venta de madera como leña a lo largo del turno completo (90 años), tanto en términos absolutos como actualizados mediante el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), utilizando una tasa de descuento del 4%. Se ha incluido también una tabla desglosada en el [Anexo II](#), donde se detallan los costes e ingresos por actuación y escenario. Cabe señalar que en esta tabla no se ha incluido el escenario control (*ctrl*), ya que este no ha generado ni costes ni ingresos a lo largo del periodo simulado.

Tabla 7. Resumen de gastos e ingresos durante la aplicación del escenario. Fuente: elaboración propia. Los gastos e ingresos se presentan sin el VAN

| Escenario | Gastos (€/ha) | Ingresos (€/ha) | Total con VAN 4% (€/ha) |
|------------|---------------|-----------------|-------------------------|
| <i>abo</i> | 106.393,12 | 60.076,45 | -11.720,00 |
| <i>cyl</i> | 84.704,95 | 42.433,86 | -9.256,22 |
| <i>gal</i> | 65.702,32 | 60.965,07 | -8.777,04 |
| <i>mix</i> | 76.484,99 | 52.755,84 | -9.015,86 |
| <i>sys</i> | 118.283,46 | 59.455,08 | -11.701,73 |

Por otro lado, la *Tabla 8* muestra una estimación del valor del monte al finalizar el turno, incluyendo las existencias finales de carbono (expresadas en toneladas por hectárea), así como el volumen de madera con potencial para sierra y para leñas (m³/ha), junto con los ingresos que podrían obtenerse por su comercialización según los precios de mercado establecidos, recogidos en las [Tablas 10](#) y [11](#) del [Anexo II](#).

Tabla 8. Carbono y valoración final por escenario. Fuente: elaboración propia

| Escenario | Carbono (t/ha) | Valoración final (€/ha) | | | | |
|------------|----------------|-------------------------|-----------|--------|----------|--------------|
| | | Sierra | | Leña | | Total (€/ha) |
| | | m3/ha | €/ha | m3/ha | €/ha | |
| <i>abo</i> | 69,83 | 1,62 | 136,89 | 166,55 | 3.818,07 | 3.954,96 |
| <i>cyl</i> | 81,99 | 52,95 | 4.474,44 | 90,03 | 2.063,85 | 6.538,29 |
| <i>gal</i> | 197,42 | 145,55 | 12.298,81 | 245,33 | 5.624,24 | 17.923,04 |
| <i>mix</i> | 159,23 | 88,24 | 7.456,62 | 191,21 | 4.383,40 | 11.840,02 |
| <i>sys</i> | 122,75 | 66,05 | 5.581,56 | 202,79 | 4.648,91 | 10.230,48 |
| Control | 255,51 | 116,15 | 9.815,01 | 332,05 | 7.612,34 | 17.427,35 |

6. Selección de alternativas de gestión

Una vez expuestos los resultados obtenidos tras la simulación, podemos evaluar y comparar la evolución y estado final de la masa ante los distintos escenarios selvícolas planteados, además de determinar la eficacia de cada uno en la fijación de carbono y su viabilidad económica, con el fin de identificar la opción que mejor se adapte a distintos propósitos de cada gestor forestal.

Antes de empezar a discutir los resultados, hay que destacar que, aunque la [Tabla 8](#) muestre unos valores del escenario control significativamente superiores a todos los demás escenarios al final de la simulación, cualquier tipo de gestión por mínima que sea, es más conveniente que la inacción. La ausencia de manejo simulada por el escenario control refleja la realidad de la mayoría de los rebollares, provocando su estancamiento, lo que reduce sus tasas de crecimiento, aumenta el riesgo de incendio asociado a sus altas densidades (Schelhaas et al., 2003; Tolosana et al., 2017; Vázquez-Veloso et al., 2025), y empeora su estado sanitario. Todo esto sirve como motivación para fomentar la gestión de estos rebollares, que además de aumentar la rentabilidad de este tipo de rodales y producir madera de mejor calidad, contribuye a crear nuevos puestos de empleo asociados al sector forestal y dinamizar las zonas rurales que actualmente están viviendo un proceso de despoblación.

Volviendo a los resultados del escenario control, al no haber realizado intervenciones selvícolas el balance de gastos e ingresos durante la simulación es inexistente, mientras que la valorización de la madera al final del turno es de 17.427,35 €/ha, suponiendo un total de 255,51 t/ha de carbono acumulado. Consideramos la posibilidad de que el modelo que empleamos para la simulación esté sobredimensionando los resultados de este escenario, ya que se esperaba comparativamente una menor producción a causa del estancamiento y mortalidad natural que no se ve reflejada en los resultados. Con esto se quiere recalcar que los resultados están generados a partir de simulaciones, permitiendo comparar distintos escenarios de gestión, pero con desviaciones de la realidad como ya se han notificado en estudios anteriores (Vázquez-Veloso et al., 2025).

El siguiente escenario con mejores resultados en cuanto a carbono secuestrado y a rentabilidad económica es *gal*, con un total de 197,42 t/ha de carbono a final de turno y una valoración final de 17.923,04 €/ha. Al estar basado exclusivamente en cortas por lo bajo, la masa ha adaptado una estructura de rodal homogéneo con árboles de gran porte, por lo que podría ser un buen escenario si se quisiera obtener madera de calidad, a pesar de las limitaciones que ofrecen los rebollares en monte bajo. Algunos de los destinos de la madera que permiten obtener mejores rendimientos económicos, como es el caso de madera para duelas de barricas (Gutiérrez et al., 2025; Vázquez-Veloso et al., 2023b), podrían verse favorecidos por este escenario de gestión, considerando también que los tamaños promedio de los árboles al final de turno oscilan entre 27,82 cm y 38,07 cm respecto a su diámetro normal.

Tanto los enfoques selvícolas *cyl* como *mix* utilizaron claras sistemáticas con árboles de futuro durante la simulación, pero las diferencias entre ellos radican en el uso de claras por lo alto con árboles de futuro, frente a claras por lo bajo, respectivamente. Mientras el escenario *cyl* favorece la reducción de la competencia entre los árboles dominantes y los árboles futuro, el escenario *mix* actúa principalmente disminuyendo la competencia entre los árboles de menor tamaño, lo que genera una dinámica de desarrollo del rodal notablemente distinta a lo largo del periodo simulado (Vázquez-Veloso et al., 2025). En cuanto a los resultados, el escenario con cortas por lo bajo es el siguiente con los valores

más altos después de *gal*, ha secuestrado 159,23 t/ha de carbono a final de turno y ha obtenido una valoración final de 11.840,02 €/ha; sin embargo, *cyl* es el segundo escenario con los valores más bajos (81,99 t/ha y 6.538,29 €/ha), solo superando a *abo*. Estos resultados son coherentes con el objetivo de ambos escenarios, que no se centran en la producción de madera, sino que su propósito principal es transformar el monte bajo en una masa irregular. Al final del periodo simulado, esto permite realizar una intervención sostenible sin recurrir a una corta a hecho. Este enfoque contrasta con el escenario *gal*, cuya estructura final sí está pensada para un aprovechamiento final de ese tipo.

El escenario *abo* aplica exclusivamente cortas por lo alto. Tal como se observa en el apartado [5.1](#), esto da lugar a una masa con una densidad similar a la del resto de escenarios, pero con un área basimétrica y, sobre todo, una altura dominante mucho menores. Estas diferencias se deben a la eliminación progresiva de los árboles del estrato superior. Como resultado, se alcanzan 69,83 t/ha de carbono secuestrado al final del turno y una valoración final de 3.954,96 €/ha. Este escenario extrae los árboles de mayor valor comercial en cada actuación, por lo que se esperaba mejores resultados económicos (o al menos pérdidas más reducidas) en las intervenciones intermedias. Sin embargo, tal como se refleja en la [Tabla 12](#), los beneficios obtenidos en esas fases resultan menores de lo que cabría anticipar, lo que sugiere que la rentabilidad a corto plazo de este modelo es más limitada de lo que inicialmente se podría suponer. Aunque no sea una práctica común, nos permite evaluar el comportamiento de un escenario orientado a maximizar los retornos a corto plazo, ya que se extrae lo más rentable desde el inicio, dejando una masa residual empobrecida al final del turno.

Finalmente, el escenario basado únicamente en cortas sistemáticas (sys) ha mostrado resultados similares al escenario *mix*, aunque ligeramente inferiores en términos de carbono secuestrado (122,75 t/ha) y valoración final del monte (10.230,48 €/ha). Este tipo de manejo implica una extracción de árboles de todos los tamaños en cada intervención, lo que permite reducir la inversión directa en las cortas intermedias al obtener madera de cierto valor ya desde las primeras actuaciones, aunque no se hayan considerado destinos de sierra para estos aprovechamientos intermedios. En comparación con el escenario *gal*, donde se eliminan principalmente los árboles de menor valor en fases iniciales con el objetivo de favorecer una corta final más rentable, sys distribuye las extracciones de forma más homogénea, renunciando a un incremento notable del valor final de la masa (de forma similar a *abo*). Esta estrategia refleja una orientación hacia la rentabilidad a medio plazo, sacrificando parcialmente el desarrollo estructural del rodal y el potencial valor maderero acumulado al final del turno. Aunque esta aproximación limita la capacidad de conducir la masa hacia una estructura concreta con fines productivos o ecológicos definidos, resulta útil para evaluar escenarios de gestión con menor inversión inicial y retornos más progresivos.

Si ahora nos fijamos en lo gastos e ingresos de cada escenario ([Tabla 7](#)), así como su Valor Actual Neto al final del periodo de la simulación, nos damos cuenta de que ninguno de los escenarios fue autofinanciado, es decir, ninguno ha generado los ingresos suficientes a lo largo de los 90 años como para compensar los costes de gestión (apeo, preparación, costes fijos), a pesar de que no se han considerado gastos adicionales como el transporte a fábrica. Esta situación ya ha sido reportada anteriormente en Tolosana et al. (2022), en el que la gestión de los encinares se acercaba al balance cero, pero se encarecía en el caso de los rebollares. El origen de esta situación se remonta a que los cambios socioeconómicos del S. XX provocaron un abandono en la gestión de los montes bajos debido a la pérdida de rentabilidad (Carvalho et al., 2017), y como consecuencia se empezó a desaprovechar un recurso forestal básico y a perder la biodiversidad asociada a las prácticas selvícolas tradicionales (Müllerová et al., 2015),

y por ello hoy en día el aprovechamiento de estos montes bajos es poco rentable (Tolosana et al., 2022). Por esa razón nuestro estudio parte de unas masas de rebollo en mal estado, siendo uno de los motivos por lo que ningún escenario es capaz de autofinanciarse; además, al haber perdido progresivamente otros usos tradicionales (pastoreo, recolección), el aprovechamiento de madera, especialmente para leña, se ha convertido en su principal destino.

Otro motivo que puede impedir la autofinanciación de los escenarios es que no estamos teniendo en cuenta el valor que podría aportar la venta de créditos de carbono, dado que es algo que en España no está bien desarrollado para casos de gestión forestal mejorada (*Improved Forest Management, IFM*) como el nuestro. Además, a la hora de los aprovechamientos intermedios, sólo estamos teniendo en cuenta la venta de madera para leña (35 €/m³), mientras que si en cada corta también se incorporase la venta de madera para sierra (84,5 €/m³), los ingresos aumentarían de forma notable, aunque no homogénea para cada uno de los escenarios de gestión.

Una corta final a los 140 años permitiría que algunos escenarios alcanzasen la autofinanciación (*gal* y *mix*), al superar las pérdidas reflejadas en su VAN mediante la valoración final de la masa. Esta edad de corta se ha establecido como un punto de referencia común para todos los escenarios, siguiendo a Crespo Rodrigo & García Quintana (2013), aunque en la práctica podría adaptarse según las características de la masa y los objetivos de gestión. En escenarios orientados a la producción de madera de calidad, o en contextos donde el secuestro de carbono adquiera valor económico, se recomienda alargar el turno para maximizar la rentabilidad y los beneficios ecosistémicos (Ruiz-Peinado et al., 2017); según esto, hipotetizamos que si aumentásemos el tiempo entre actuaciones de cada escenario 30 años aproximadamente, el carbono secuestrado podría aumentar hasta el punto de que algunos escenarios superen los valores del escenario control.

Las ganancias podrían ser mayores si tenemos en cuenta que no consideramos la venta de madera para duelas o vigas, que es una madera de mejor calidad y más cara que la madera de sierra (Gutiérrez et al., 2025). Además, a la hora de cuantificar el volumen de sierra, estamos tomando los valores más restrictivos, pudiendo contar también con el volumen de sierra de cánter (Rodríguez et al., 2008). Sin embargo, los datos económicos no nos aportan detalles sobre la variabilidad de precios según las distintas posibilidades de madera de sierra en cuanto a su calidad y tamaño, y es por eso que hemos decidido tomar los valores más restrictivos.

También es importante señalar que tanto los precios de venta de la madera como los costes asociados a las actuaciones selvícolas están sujetos a variaciones. El precio de la madera puede fluctuar en función del mercado, la calidad del producto o incluso factores regionales, mientras que los costes de gestión pueden diferir en función de la empresa que se contrate. En este proyecto, se ha optado por utilizar tarifas de Tragsa (2024), cuyos costes se presentan en la [Tabla 9](#) del [Anexo II](#).

Si tenemos en cuenta todo lo mencionado anteriormente, podemos concluir diciendo que si el objetivo del proyecto fuese minimizar pérdidas económicas con una inversión reducida y una estructura de rodal homogénea enfocada a una corta a hecho, el escenario *gal* sería el idóneo, si se quisiera recuperar la inversión a largo plazo y transformar la masa existente a una masa irregular para tener una gestión continua sin considerar cortas a hecho, *cyl* o *mix* serían las opciones más convenientes, si por el contrario se necesitase recuperar la inversión a corto plazo, la opción sería un escenario que extraiga los árboles de mayor valor desde el principio, como *abo*. El escenario *sys*, genera costes elevados y una rentabilidad limitada, lo que sugiere que su aplicación debe evaluarse cuidadosamente en función de la estructura inicial del monte. En un

contexto en el que el mercado de carbono estuviera bien desarrollado en España, los escenarios con mayor acumulación de biomasa, en nuestro caso *gal* y *mix*, podrían resultar más rentables, al ofrecer un equilibrio entre productividad y servicios ecosistémicos.

7. Bibliografía

- Acuña-Rello, L., Díez Barra, R., Casado-Sanz, M., Herraez Garrido, F., Fernández de Córdoba, G., Pérez Díez, B., Izquierdo Bustamante, S., & Gómez Fernández, M. (2009). Aptitud de la madera de *Q. pyrenaica* Willd. De Castilla y León para la fabricación de duelas. *Actas 5º Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales, Avila.*
- Adame, P., del Río, M., & Cañellas, I. (2008). A mixed nonlinear height–diameter model for pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Forest Ecology and Management*, 256(1-2), 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.04.006>
- Adame, P., Herguido, J., Cañellas, I., & Roig, S. (2006). Modelización del índice de sitio para *Quercus pyrenaica* Willd. En la provincia de Soria. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 15(2), 211-223.
- Adame, P., Herguido, J., Cañellas, I., & Roig, S. (2010a). Modelos de masa incorporada para *Quercus pyrenaica* Willd. En Soria. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 29, 109-116.
- Adame, P., Herguido, J., Cañellas, I., & Roig, S. (2010b). Modelos de supervivencia para *Quercus pyrenaica* Willd. En Soria. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 19(1), 85-95.
- Adame, P., Hynynen, J., Cañellas, I., & Del Río, M. (2008). Individual-tree diameter growth model for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) coppices. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4), 1011-1022. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.019>
- Annex I Parties. (2025). <https://www.encyclopedia.com/environment/energy-government-and-defense-magazines/annex-i-parties>
- Artigas, P. (2022). Guía para la gestión del hábitat 9230* Robledales galaico-portugueses con *Quercus robur* y *Quercus pyrenaica*. En *Hábitats de Interés*

- Comunitario de la Región Biogeográfica Atlántica en Castilla y León* (pp. 419-454). Junta de Castilla y León.
- Bravo, F., Bravo-Oviedo, A., & Diaz-Balteiro, L. (2008). Carbon sequestration in Spanish Mediterranean forests under two management alternatives: A modeling approach. *European Journal of Forest Research*, 127(3), 225-234. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0198-y>
- Bravo, F., & Díaz-Balteiro, L. (2004). Evaluation of new silvicultural alternatives for Scots pine stands in northern Spain. *Annals of Forest Science*, 61(2), 163-169. <https://doi.org/10.1051/forest:2004008>
- Bravo, F., Ordóñez, C., Vázquez-Veloso, A., & Michalakopoulos, S. (2025). SIMANFOR cloud Decision Support System: Structure, content, and applications. *Ecological Modelling*, 499, 110912. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110912>
- Bravo-Oviedo, A., del Río, M., & Montero, G. (2008). El rebollar de Coca (Segovia): Evolución de las repoblaciones mixtas de *Pinus pinaster* y *Quercus pyrenaica*. *Forestia*, 40, 38-44.
- Carvalho, J., Magagnotti, N., Nicolescu, V. N., Ruch, P., Spinelli, R., & Tolosana, E. (2017). Active management of traditional coppice forests: An interface between silviculture and operations. En A. Unrau, G. Becker, R. Spinelli, D. Lazdina, N. Magagnotti, V. N. Nicolescu, P. Buckley, D. Bartlett, & P. D. Kofman (Eds.), *Coppice Forests in Europe* (pp. 72-76). Albert Ludwig University of Freiburg.
- Castaño-Santamaría, J., & Bravo, F. (2012). Estimación del contenido de carbono en masas de rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.) en el centro-norte de España. *Ecología Aplicada*, 11(1), 49-60.
- Crespo, A., & García, J. (2013a). Criterios técnicos para la transformación a monte alto en rebollares. En *Gestión forestal sostenible en los hábitats de interés comunitario de Castilla y León* (pp. 205-214). Junta de Castilla y León.

- Crespo, A., & García, J. (2013b). Modelos de gestión selvícola en rebollares. En *Gestión forestal sostenible en los hábitats de interés comunitario de Castilla y León* (pp. 195-204). Junta de Castilla y León.
- Crespo Rodrigo, A., & García Quintana, I. (2013). Guía de gestión para los rebollares (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Actas 6º Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales, Vitoria-Gasteiz.*
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/JOC.5086>
- Gutiérrez, S., Sánchez, T., Blázquez-Casado, A., Rojo, L. I., Sarmiento, L. A., García Varona, R., Esteruelas, E., Flüshöh, F., Ordóñez, C., Vázquez, A., Bravo, F., & Caballé, G. (2025). LIFE+REB: Revalorización de los rebollares (*Quercus pyrenaica*) de Castilla y León. *9º Congreso Forestal Español. Gijón, España*, 1-8. <https://9cfe.congresoforestal.es/wp-content/uploads/2025/9cfe-1907.pdf>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data* 2020 7:1, 7(1), 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Junta de Castilla y León. (2020). *El sector forestal en Castilla y León. Informe IIP 3/2020* (p. 138). Consejería de Fomento y Medio Ambiente.
- La Industria de la Madera en España: Datos, Retos . (s. f.). *LaMadera.Net*. Recuperado 14 de agosto de 2025, de <https://lamadera.net/industria-de-la-madera-en-espana/>
- López González, G. (2007). *Guía de los árboles y arbustos de la Península Ibérica y Baleares* (3.ª ed.). Mundi-Prensa.
- MFE de máxima actualidad. Castilla y León.* (s. f.). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado 20 de agosto de 2025, de

- https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/biodiversidad/mfe_castilla_y_leon.html
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2023). *Anuario de Estadística Forestal 2022*. Gobierno de España. <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/anuario-de-estadistica-forestal>
- Ministerio del Medio Ambiente. (s. f.). *Preguntas Frecuentes*. <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/preguntas-frecuentes/>
- Montero, G., & Herrero de Aza, C. (2022). Fichas de impactos, vulnerabilidad y oportunidades de adaptación al cambio climático para ecosistemas arbolados: Rebollares y quejigares. En F. Bravo (Ed.), *Adaptación al cambio climático: Directrices para la adaptación de la gestión del patrimonio natural y la política forestal al cambio climático en Castilla y León*. Universidad de Valladolid.
- Müllerová, J., Hédl, R., & Szabó, P. (2015). Coppice abandonment and its implications for species diversity in forest vegetation. *Forest Ecology and Management*, 343(1), 88-100.
- Porto Rodríguez, J. C., Vázquez Veloso, A., Sánchez Pellicer, T., Blázquez Casado, A., Bravo-Oviedo, F., & Ruano Benito, I. (2025). Impacto de la gestión forestal en la productividad de bosques mixtos de *Quercus pyrenaica* y *Pinus sylvestris* en Castilla y León. *Actas del IX Congreso Forestal Español (9CFE)*.
- R Core Team. (2021). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rodríguez, F., Broto, M., & Lizarralde, I. (2008). CubiFOR: herramienta para cubicar, clasificar productos y calcular biomasa y CO2 en masas forestales de Castilla y León. *Revista Montes*, 95, 33-39.

- Rodríguez, M., Ruiz-Peinado, R., del Río, M., & Bravo, F. (2015). Modelos de estimación del volumen de árboles individuales de *Quercus pyrenaica* Willd. En Castilla y León. *Forestia*, 61, 57-63.
- Ruiz-Peinado, R., Bravo, F., del Río, M., & Montero, G. (2012). Modelos de biomasa para *Quercus pyrenaica* Willd. En montes de Castilla y León. *Forest Systems*, 21(1), 100-111.
- Ruiz-Peinado, R., Bravo-Oviedo, A., López-Senespleda, E., Bravo, F., & Del Río, M. (2017). Forest management and carbon sequestration in the Mediterranean region: A review. *Forest Systems*, 26(2), eR04S. <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11205>
- Sánchez-Palomares, O., Sánchez-Serrano, F., & Carreira, J. A. (2008). *El rebollar: Ecología y selvicultura*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G. J., & Schuck, A. (2003). Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology*, 9(11), 1620-1633. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x>
- Serrada, R., Montero, G., & Reque, J. A. (2008). *Compendio de Selvicultura Aplicada en España*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Educación y Ciencia.
- Tolosana, E., Laina, R., Ferrari, R., Martín, M., & Torrijos, Y. (2017, junio). *Economic evaluation of mechanized and motormanual options for selective felling of Quercus pyrenaica coppices in Leon (NW Spain)*.
- Tolosana, E., Montero, G., del Río, M., & Bravo-Oviedo, A. (2022). Selvicultura adaptativa para los bosques del siglo XXI: desafíos y oportunidades. En *Gestión forestal adaptativa al cambio global* (pp. 23-45). Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Tolosana, E., Spinelli, R., Laina Relaño, R., Aminti, G., & López Vicens, I. (2022). Cortas selectivas sobre montes bajos jóvenes de encina y rebollo: Comparación de su

ejecución mecanizada con taladora-apiladora pesada con la alternativa de motosierra y apilado manual. Productividad, costes y efectos ambientales. *Actas 8º Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales, Lleida.*

Tragsa. (2024).

[Tarifas.tragsa.es/prestowebisapi.dll?FunctionGo&id=1692&cod=Tragsa2024/F/F06&path=Tragsa2024W-Act-sujetas.cfg](https://tarifas.tragsa.es/prestowebisapi.dll?FunctionGo&id=1692&cod=Tragsa2024/F/F06&path=Tragsa2024W-Act-sujetas.cfg).

<https://tarifas.tragsa.es/prestowebisapi.dll?FunctionGo&id=1692&cod=Tragsa2024/F/F06&path=Tragsa2024W-Act-sujetas.cfg>

United Nations Climate Change. (s. f.). *¿Qué es el Protocolo de Kyoto? | CMNUCC.*

Recuperado 20 de agosto de 2025, de https://unfccc.int/es/kyoto_protocol

Valbuena-Carabaña, M., González-Martínez, S. C., Sork, V. L., Collada, C., Soto, A., Goicoechea, P. G., & Gil, L. (2005). Gene flow and hybridisation in a mixed oak forest (*Quercus pyrenaica* Willd. And *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) in central Spain. *Heredity*, 95(6), 457-465. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800752>

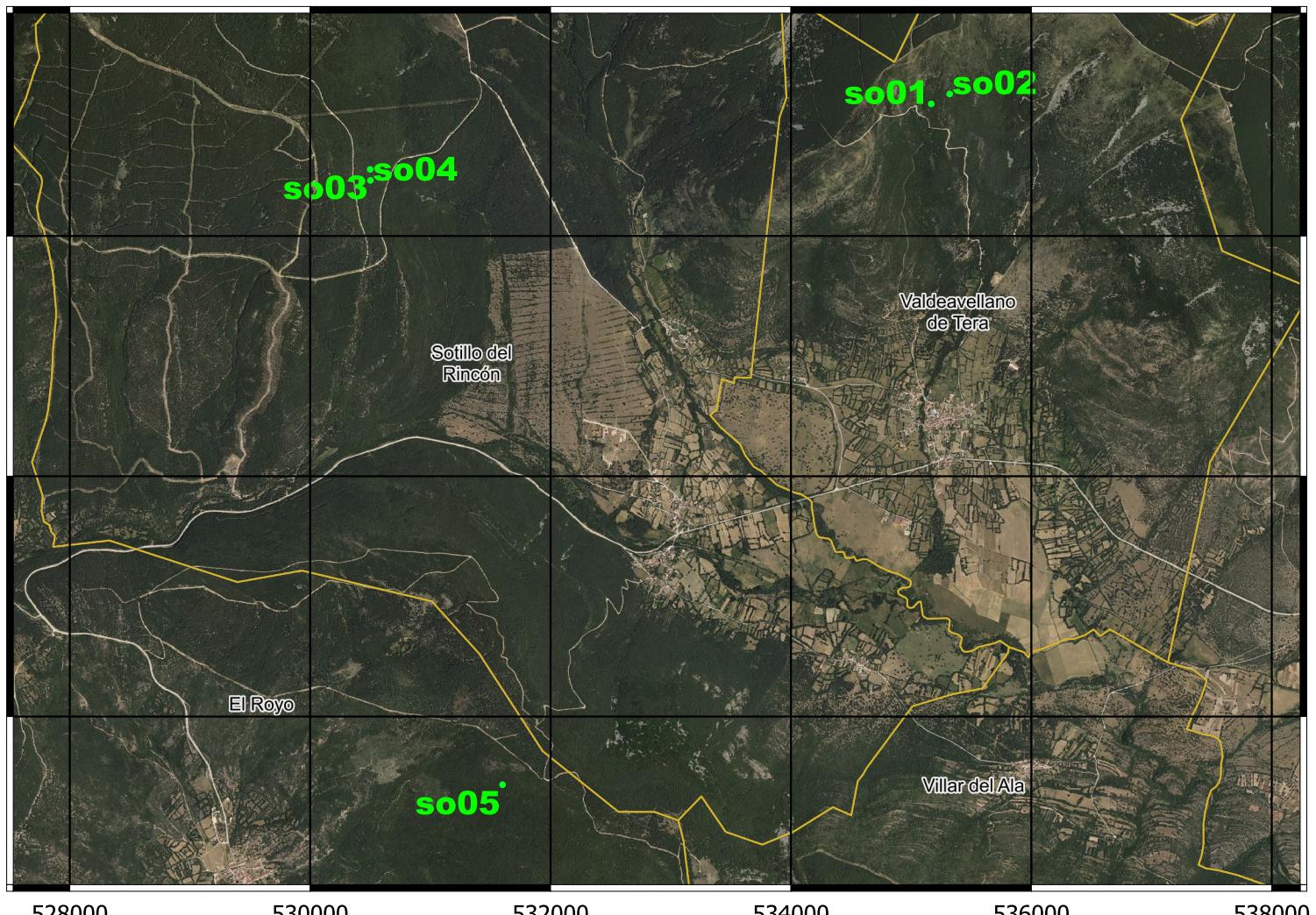
Vázquez-Veloso, A., Ordóñez, C., & Bravo, F. (2023a). A.1.2 *Análisis de la evolución de los rebollares y sus stocks de carbono*. LIFE +REB. (LIFE20 CCM/ES/001778). iuFOR - Universidad de Valladolid.

Vázquez-Veloso, A., Ordóñez, C., & Bravo, F. (2023b). A.2.1. *Ampliación de los conocimientos básicos acerca de la ecología de los rebollares*. LIFE +REB. (LIFE20 CCM/ES/001778). iuFOR - Universidad de Valladolid.

Vázquez-Veloso, A., Ordóñez, C., & Bravo, F. (2025). Evaluación de alternativas selvícolas para la conversión de rebollares a monte alto y su gestión como masas irregulares. 9º Congreso Forestal Español. Gijón, España. <https://9cfe.congresoforestal.es/wp-content/uploads/2025/9cfe-1568.pdf>

8. Anexos

8.1. Anexo I: Planos



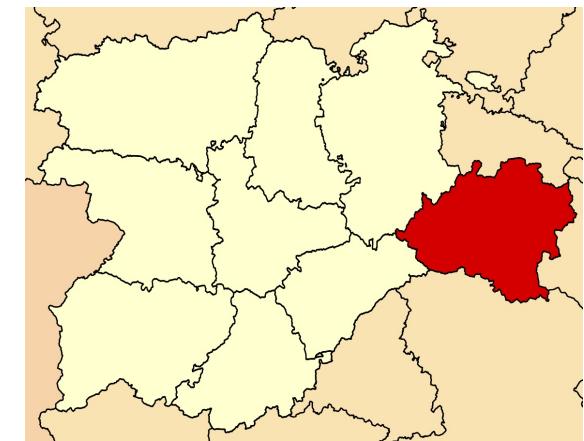
528000 530000 532000 534000 536000 538000

750 0 750 1.500 2.250 m



Leyenda

- Límites Municipales
- Límites Provinciales



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS (PALENCIA)



Gestión de Rebollares en Castilla y León

— TÍTULO DEL PROYECTO —

ESTIIIAA -Universidad de Valladolid

PROMOTOR

1:55000

1

ESCALA

Nº PLANO

Situación de las parcelas

— TÍTULO DEL PLANO —

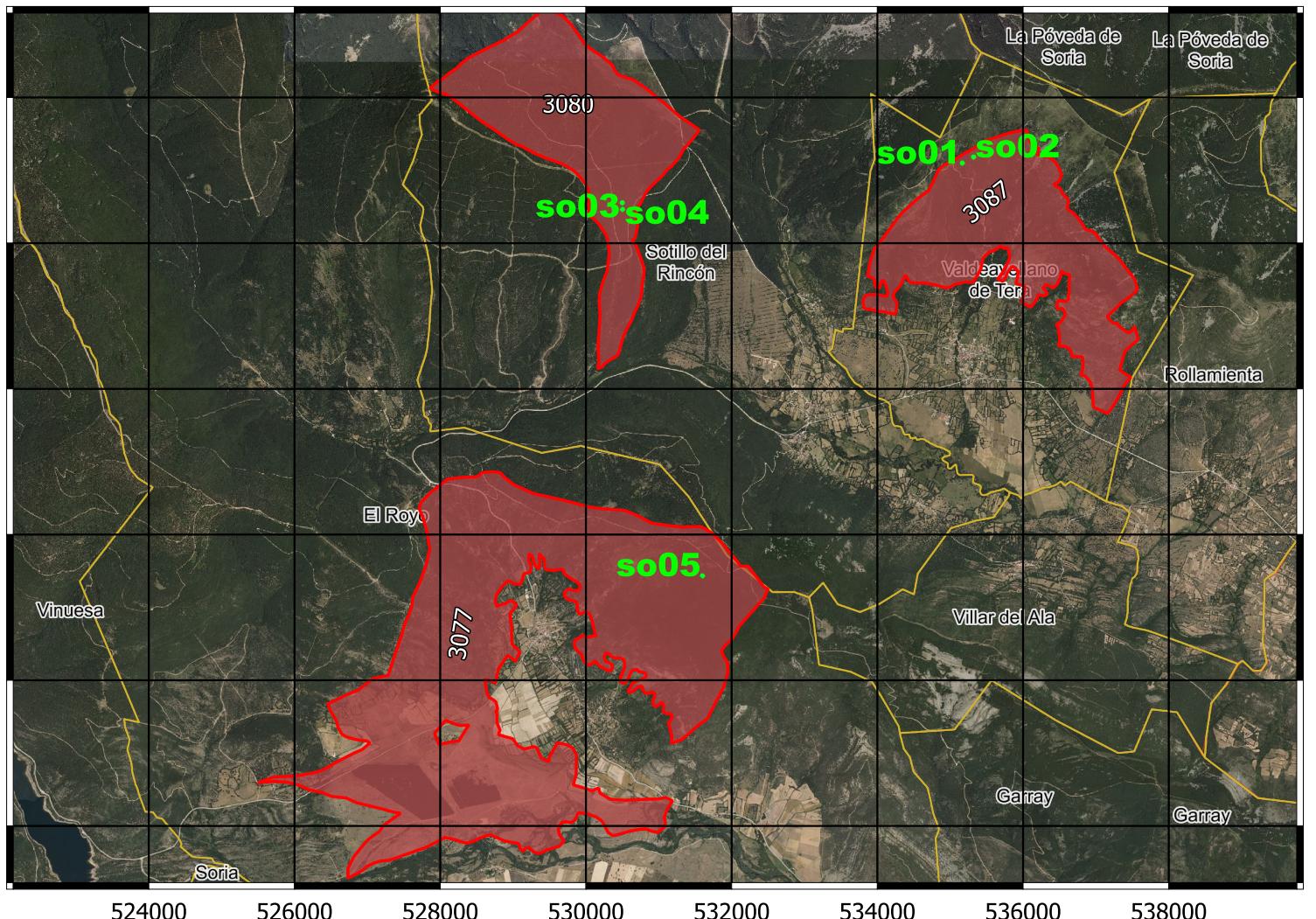
Ingeniería Forestal y del Medio Natural

TITULACIÓN

ALUMNO/A:
Ricardo Mateu Fernández

FECHA: 15/07/2025

FIRMA



750 0 7501.500 m

Leyenda

- Parcelas (green)
- Rodales Demostrativos (red)
- Límites Municipales (yellow)



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS (PALENCIA)



Gestión de Rebollares en Castilla y León

TÍTULO DEL PROYECTO

ESTIIAA -Universidad de Valladolid

PROMOTOR

Rodales Demostrativos

TÍTULO DEL PLANO

Ingeniería Forestal y del Medio Natural

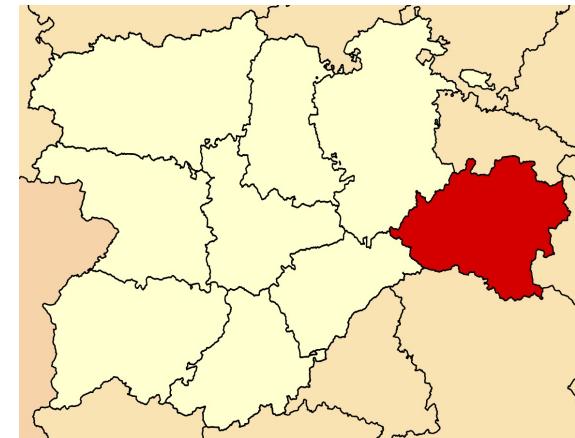
TITULACIÓN

1:90000

2

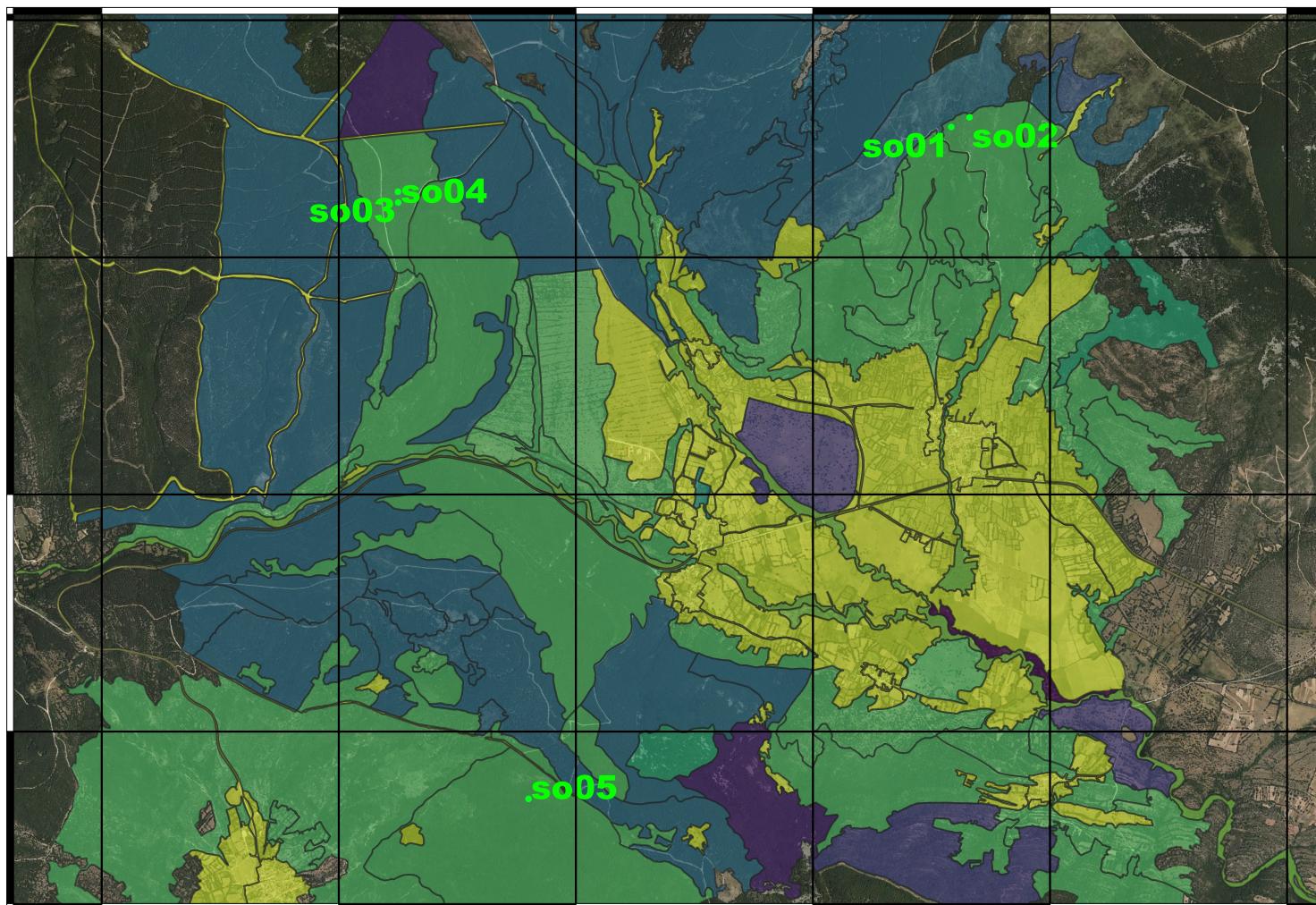
ESCALA

Nº PLANO



FECHA: 15/07/2025

FIRMA



528000

530000

532000

534000

536000

538000

4641000
4643000
4645000
4647000

750 0 750 1.500 2.250 m



Leyenda

Especie principal

- Crataegus monogyna
- Fagus sylvatica
- Fraxinus angustifolia
- Juniperus communis
- Pinus sylvestris
- Populus nigra
- Populus x canadensis
- Quercus petraea
- Quercus pyrenaica
- Salix spp.
- sin datos
- Otro

| | | |
|--|--|---|
|  UNIVERSIDAD DE VALLADOLID E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS (PALENCIA) | |  |
| Gestión de Rebollares en Castilla y León | | |
| TÍTULO DEL PROYECTO | | |
| ESTIIIAA -Universidad de Valladolid | | 1:57000 |
| PROMOTOR | | |
| Composición forestal de la zona de estudio | | 3 |
| TÍTULO DEL PLANO | | |
| Ingeniería Forestal y del Medio Natural | | ESCALA |
| ALUMNO/A: Ricardo Mateu Fernández | | |
| FECHA: 15/07/2025 | | N.º PLANO |
| TITULACIÓN | | |
| FIRMA | | |



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS (PALENCIA)



Gestión de Rebollares en Castilla y León

TÍTULO DEL PROYECTO

ESTIIIAA -Universidad de Valladolid

1:1300

4

PROMOTOR

ESCALA

Nº PLANO

Detalle de cada parcela

ALUMNO/A:
Ricardo Mateu Fernández

Ingeniería Forestal y del Medio Natural

FECHA: 15/07/2025

TITULACIÓN

FIRMA

8.2. Anexo II: Tablas de precios

Tabla 9. Tarifas Actuaciones Tragsa. Fuente: elaboración propia a partir de las tarifas de Tragsa, 2024

| Código | Ud | Resumen | Precio Unitario |
|--------|-----|--|-----------------|
| | | APROVECHAMIENTOS, CLARAS Y CLAREOS | |
| F06216 | jor | Señalamiento de pies | 203,7 |
| F06104 | pie | Apeo árboles ø normal <=12 cm | 0,41 |
| F06105 | pie | Apeo árboles ø >12-<=20 cm, densidad > 1.500 pies/ha | 0,67 |
| F06106 | pie | Apeo árboles ø >12-<=20 cm, densidad >750 <=1.500 pies/ha | 0,63 |
| F06107 | pie | Apeo árboles ø >12-<=20 cm, densidad <= 750 pies/ha con matorral | 0,54 |
| F06108 | pie | Apeo árboles ø >12-<=20 cm, densidad <= 750 pies/ha sin matorral | 0,43 |
| F06109 | pie | Apeo árboles ø >20-<=30 cm, densidad > 750 pies/ha | 1,01 |
| F06110 | pie | Apeo árboles ø >20-<=30 cm, densidad <= 750 pies/ha con matorral | 0,92 |
| F06111 | pie | Apeo árboles ø >20-<=30 cm, densidad <= 750 pies/ha sin matorral | 0,64 |
| F06112 | pie | Apeo árboles ø > 30 cm | 2,36 |
| F06121 | est | Prep.madera árboles cort, ø <12 cm, pte<=25% | 44,94 |
| F06122 | est | Prep.madera árboles cort, ø <12 cm, pte>25% | 55,39 |
| F06123 | est | Prep.madera árboles cort, ø >12-<=20 cm, d>1.500 pte<=25% | 27,35 |
| F06124 | est | Prep.madera árboles cort, ø >12-<=20 cm, d>1.500 pte>25% | 33,63 |
| F06125 | est | Prep.madera árboles cort. ø>12-<=20cm, d 750-1.500 pte<=25% | 20,39 |
| F06126 | est | Prep.madera árboles cort, ø>12-<=20cm, d 750-1.500 pte>25% | 25,29 |
| F06127 | est | Prep.madera árboles cort, ø>12-<=20cm, d<750 con mat.pte<=25% | 20,86 |
| F06128 | est | Prep.madera árboles cort, ø>12-<=20cm, d<750 con mat.pte>25% | 25,73 |

| | | | |
|--------|----------------|--|-------|
| F06129 | est | Prep.madera árboles cort. ø>12-<=20cm, d<750 sin mat.pte<=25% | 19,5 |
| F06130 | est | Prep.madera árboles cort. ø>12-<=20 cm, d<750 sin mat.pte>25% | 24,14 |
| F06131 | est | Prep.madera árboles cort, ø >20-<=30cm, d>750 pte<=25% | 21,94 |
| F06132 | est | Prep.madera árboles cort, ø >20-<=30cm, d>750 pte > 25% | 26,82 |
| F06133 | est | Prep.madera árboles cort. ø>20-<=30cm, d<750 con mat.pte<=25% | 18,23 |
| F06134 | est | Prep.madera árboles cort. ø>20-<=30cm, d<750 con mat.pte>25% | 22,2 |
| F06135 | est | Prep.madera árboles cort. ø>20-<=30cm, d<750 sin mat.pte<=25% | 17,1 |
| F06136 | est | Prep.madera árboles cort.ø>20-<=30cm, d<750 sin mat. pte>25% | 20,79 |
| F06179 | est | Saca mecanizada madera pendiente >30%-<=50% D. <200 m | 5,72 |
| F06180 | m ³ | Saca mecanizada madera pendiente >30%-<=50% D. <200 m | 9,55 |
| F06181 | est | Saca mecanizada madera pendiente >30%-<=50% D.200-400 m | 8,31 |
| F06182 | m ³ | Saca mecanizada madera pendiente >30%-<=50% D.200-400 m | 13,85 |
| F06183 | est | Saca mecanizada asc.maderaø<12cm.pte>50% D.<200 m | 53,01 |
| F06184 | est | Saca mecanizada asc.maderaø>12-<=20 cm.pte>50% D.<200 m | 33,87 |
| F06185 | est | Saca mecanizada asc.maderaø>20-<=30 cm.pte>50% D.<200 m | 16,9 |
| F06188 | m ³ | Saca mecanizada asc.maderaø>30 cm.pte>50% D. < 200 m | 20,76 |
| F06191 | est | Saca mecanizada desc.maderaø<12cm.pte>50% D.<200 m | 59,79 |
| F06192 | est | Saca mecanizada desc.maderaø>12-<=20 cm.pte>50% D.<200 m | 37,24 |
| F06193 | est | Saca mecanizada desc.maderaø>20-<=30 cm.pte>50% D.<200 m | 19,48 |
| F06196 | m ³ | Saca mecanizada desc.maderaø>30 cm.pte>50% D. < 200 m | 23,7 |
| F06199 | est | Saca descendente tracción animal, ø >12 cm, pte<50% D<=100 | 22,27 |
| F06200 | est | Saca descendente tracción animal, ø >12 cm, pte<50% D.100-200m | 30,97 |

| | | | |
|--------|----------------|---|-------|
| F06214 | est | Saca descendente tracción animal, ø <=12 cm, pte<50% D<=100 | 27,65 |
| F06215 | est | Saca descendente tracción animal, ø <=12 cm, pte<50% D.100-200m | 38,46 |
| F06209 | est | Saca mec.madera pte< 30% distancia <200 m | 3,85 |
| F06210 | m ³ | Saca mec.madera pte< 30% distancia <200 m | 6,56 |
| F06211 | est | Saca mecanizada madera pte< 30% D. 200-400 m | 4,75 |
| F06212 | m ³ | Saca mecanizada madera.pte< 30% D. 200-400 m | 7,95 |
| F06213 | est | Carga madera con grúa 101/130 CV | 1,48 |

En las *Tablas 10 y 11*, las categorías “Otros pinos”, “Otras coníferas”, “Otros Quercus”, y “Otras frondosas” agrupan tanto especies que han sido notificadas directamente bajo esa denominación como otras especies menos representadas individualmente, que se han integrado en estas categorías para simplificar la presentación de los datos.

Tabla 10. Cortas totales por especie y precios unitarios asociados en 2022 en España. Fuente: Los valores de volumen se refieren a madera con corteza. Anuario de Estadística Forestal 2022. Lo marcado en amarillo representa el precio empleado para las estimaciones económicas

| Especie | Volumen (m ³) | Precio (€/m ³) | | Precios licitación pública €/m ³ |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------|---|
| | | En pie | En cargadero | |
| <i>Pinus radiata</i> | 4.663.534 | 26,9 | 54,8 | 24,6 |
| <i>Pinus pinaster</i> | 3.568.718 | 22,2 | 44,8 | 12,3 |
| <i>Pinus sylvestris</i> | 1.850.978 | 33,7 | 56,8 | 15,9 |
| <i>Pinus nigra</i> | 744.091 | 26,3 | 43,7 | 12,2 |
| <i>Pinus halepensis</i> | 477.842 | 25,3 | 46,4 | 3,6 |
| <i>Pinus pinea</i> | 130.348 | 16,6 | 39,5 | 7,3 |
| Otros pinos | 88.225 | 33,0 | 53,0 | 13,1 |
| Otras coníferas alóctonas | 176.151 | 32,8 | 48,5 | 15,8 |
| Otras coníferas | 130.132 | 12,8 | 53,8 | 11,9 |
| Total coníferas | 11.830.019 | 26,3 | 50,8 | 116,9 |
| <i>Eucalyptus spp.</i> | 7.545.238 | 29,9 | 42,4 | 19,0 |
| <i>Populus spp.</i> | 486.912 | 117,9 | 158,5 | 71,2 |
| <i>Fagus sylvatica</i> | 173.582 | 38,9 | 59,2 | 17,0 |
| <i>Quercus robur</i> | 150.449 | 71,3 | 98,1 | 6,2 |
| <i>Castanea sativa</i> | 92.555 | 40,0 | 60,1 | 15,6 |
| <i>Quercus rubra</i> | 36.417 | 41,9 | 63,9 | 19,8 |
| Otros <i>Quercus</i> | 10.479 | 55,2 | 84,5 | 5,6 |
| Otras frondosas alóctonas | 18.739 | 20,5 | 39,8 | 7,5 |
| Otras frondosas | 131.374 | 42,8 | 74,1 | 18,9 |
| Total frondosas | 8.645.745 | 36,1 | 51,1 | 181 |

Tabla 11. Leñas extraídas por especie y propiedad, y precios asociados por especie en 2022 en España. Fuente: Anuario de Estadística Forestal 2022. Lo marcado en amarillo representa el precio empleado para las estimaciones económicas

| Especie | Propiedad | | Total (t) | Precio CC.AA €/t | |
|---------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|--------------|
| | Pública | Privada | | En pie | En cargadero |
| <i>Pinus spp.</i> | 4.326 | 8.611 | 12.937 | 11,1 | 31,5 |
| <i>Pinus halepensis</i> | 136.175 | 23.635 | 159.81 | 13,8 | 36,7 |
| <i>Pinus nigra</i> | 88.864 | 19.378 | 108.242 | 15,7 | 44,6 |
| <i>Pinus pinaster</i> | 10.28 | 56.239 | 66.519 | 14,9 | 16,0 |
| <i>Pinus radiata</i> | 643 | 57.251 | 57.895 | 12,1 | 27,4 |
| <i>Pinus sylvestris</i> | 9.733 | 10.014 | 19.747 | 21,9 | 34,9 |
| Coníferas sin especificar | 2.958 | 36.879 | 39.837 | 9,8 | 30,5 |
| Resto de coníferas | 1.016 | 4.013 | 5.029 | 10,0 | 33,6 |
| Total coníferas | 253.997 | 216.019 | 470.016 | 14,1 | 33,7 |
| <i>Quercus spp.</i> | 21.959 | 216.644 | 238.603 | 38,3 | 58,2 |
| <i>Quercus ilex</i> | 18.289 | 196.652 | 214.942 | 96,4 | 28,9 |
| <i>Quercus pyrenaica</i> | 35.206 | 74.315 | 109.521 | 99,9 | 35 |
| <i>Fagus sylvatica</i> | 77.458 | 10.758 | 88.216 | 16,8 | 35,7 |
| <i>Populus spp.</i> | 1.622 | 67.036 | 68.659 | 16,0 | 33,2 |
| <i>Eucalyptus spp.</i> | - | 24.637 | 24.637 | 6,1 | 30,0 |
| Otros <i>Quercus</i> | 8.793 | 17.037 | 25.83 | 50,6 | 38,1 |
| Frondosas sin especificar | 3.842 | 39.129 | 42.971 | 26,2 | 46,5 |
| Resto de frondosas | 94.491 | 54.929 | 149.42 | 9,4 | 23,7 |
| Total frondosas | 261.66 | 701.139 | 962.799 | 37,8 | 34,1 |

Tabla 12. Desglose de los gastos e ingresos por actuación y escenario. Fuente: elaboración propia

| | Tiempo simulado | Apeo (€/ha) | Preparación (€/ha) | Costes fijos (€/ha) | Leñas (€/ha) | Total (€/ha) | Total con VAN 4% |
|-----|-----------------|-------------|--------------------|---------------------|--------------|--------------|------------------|
| abo | 0 | 70,28 | 7.702,99 | 213,13 | 3.929,49 | -4.056,91 | |
| | 10 | 43,85 | 14.221,25 | 213,13 | 7.254,61 | -7.223,62 | |
| | 30 | 122,73 | 21.523,96 | 213,13 | 10.979,90 | -10.879,92 | |
| | 50 | 93,48 | 24.591,98 | 213,13 | 12.544,97 | -12.353,62 | |
| | 70 | 72,00 | 25.252,25 | 213,13 | 12.881,80 | -12.655,58 | |
| | 90 | 58,55 | 11.361,02 | 213,13 | 12.485,69 | 852,99 | |
| cyl | 0 | 131,32 | 7.575,97 | 213,13 | 3.864,69 | -4.055,74 | |
| | 20 | 123,77 | 18.315,28 | 213,13 | 9.343,08 | -9.309,11 | |
| | 40 | 93,48 | 20.491,88 | 213,13 | 10.453,41 | -10.345,07 | |
| | 60 | 63,64 | 19.531,61 | 213,13 | 9.963,56 | -9.844,83 | |
| | 80 | 43,76 | 17.268,58 | 213,13 | 8.809,13 | -8.716,35 | |
| gal | 0 | 70,28 | 7.702,99 | 213,13 | 3.929,49 | -4.056,91 | |
| | 10 | 44,00 | 14.249,92 | 213,13 | 7.269,23 | -7.237,81 | |
| | 30 | 189,87 | 9.832,50 | 213,13 | 11.054,93 | 819,43 | |
| | 50 | 145,89 | 11.332,31 | 213,13 | 12.741,20 | 1.049,87 | |
| | 70 | 114,84 | 10.468,10 | 213,13 | 13.164,09 | 2.368,01 | |
| | 90 | 89,38 | 10.183,46 | 213,13 | 12.806,13 | 2.320,17 | |
| mix | 0 | 70,28 | 7.702,99 | 213,13 | 3.929,49 | -4.056,91 | |
| | 20 | 127,96 | 18.934,38 | 213,13 | 9.658,89 | -9.616,57 | |
| | 40 | 97,94 | 24.152,96 | 213,13 | 12.321,02 | -12.143,01 | |
| | 60 | 116,81 | 11.908,91 | 213,13 | 13.389,49 | 1.150,64 | |
| | 80 | 62,32 | 12.244,80 | 213,13 | 13.456,95 | 936,70 | |
| sys | 0 | 70,28 | 7.702,99 | 213,13 | 3.929,49 | -4.056,91 | |
| | 10 | 43,83 | 14.216,82 | 213,13 | 7.252,35 | -7.221,43 | |
| | 30 | 122,31 | 21.450,29 | 213,13 | 10.942,32 | -10.843,41 | |
| | 50 | 92,66 | 24.374,16 | 213,13 | 12.433,86 | -12.246,09 | |
| | 70 | 70,90 | 24.867,93 | 213,13 | 12.685,74 | -12.466,21 | |
| | 90 | 54,60 | 23.937,92 | 213,13 | 12.211,32 | -11.994,33 | |

8.3. Anexo III: Tablas de producción

Tabla 13. Tabla de producción de todos los escenarios con cada actuación. Fuente: elaboración propia.
Volumen cc: volumen con corteza

| Escenario | Acción | Edad media (años) | N (pies/ha) | dg (cm) | G (m ² /ha) | Ho (m) | Volumen cc (m ³ /ha) | WT (tn/ha) | CT (tn/ha) |
|-----------|-----------|-------------------|-------------|---------|------------------------|--------|---------------------------------|------------|------------|
| abo | Corta | 63 | 1.714,06 | 14,39 | 13,28 | 27,63 | 147,34 | 198,97 | 90,91 |
| abo | Ejecución | 67 | 1.689,20 | 15,08 | 13,63 | 29,37 | 137,50 | 213,46 | 97,53 |
| abo | Corta | 67 | 1.582,25 | 14,44 | 13,32 | 25,52 | 159,02 | 184,99 | 84,52 |
| abo | Ejecución | 73 | 1.545,12 | 15,40 | 13,62 | 28,17 | 153,17 | 205,04 | 93,68 |
| abo | Ejecución | 83 | 1.496,71 | 16,87 | 14,25 | 32,68 | 110,41 | 243,61 | 111,30 |
| abo | Corta | 83 | 1.197,37 | 14,84 | 13,47 | 20,22 | 184,15 | 147,45 | 67,37 |
| abo | Ejecución | 93 | 1.166,10 | 16,57 | 13,77 | 24,58 | 136,17 | 180,63 | 82,53 |
| abo | Ejecución | 103 | 1.140,04 | 18,24 | 14,29 | 29,13 | 108,89 | 218,66 | 99,90 |
| abo | Corta | 103 | 912,03 | 16,67 | 13,81 | 19,43 | 166,32 | 143,83 | 65,72 |
| abo | Ejecución | 113 | 893,90 | 18,54 | 14,23 | 23,60 | 135,17 | 177,38 | 81,04 |
| abo | Ejecución | 123 | 877,99 | 20,33 | 14,84 | 27,91 | 113,01 | 215,30 | 98,37 |
| abo | Corta | 123 | 702,39 | 18,92 | 14,41 | 19,31 | 165,39 | 147,38 | 67,34 |
| abo | Ejecución | 133 | 691,09 | 20,85 | 14,90 | 23,15 | 138,87 | 180,19 | 82,33 |
| abo | Ejecución | 143 | 680,79 | 22,70 | 15,57 | 27,08 | 118,51 | 216,82 | 99,06 |
| abo | Corta | 143 | 544,63 | 21,42 | 15,25 | 19,25 | 168,17 | 152,82 | 69,83 |
| Control | Ejecución | 67 | 1.748,68 | 15,65 | 14,01 | 32,74 | 180,82 | 241,56 | 110,36 |
| Control | Ejecución | 73 | 1.701,43 | 16,41 | 14,55 | 35,22 | 201,48 | 266,36 | 121,69 |
| Control | Ejecución | 83 | 1.643,35 | 17,66 | 15,31 | 39,38 | 235,26 | 307,28 | 140,39 |
| Control | Ejecución | 93 | 1.593,83 | 18,82 | 16,10 | 43,37 | 270,73 | 349,85 | 159,83 |
| Control | Ejecución | 103 | 1.549,45 | 19,90 | 16,89 | 47,14 | 306,84 | 392,91 | 179,50 |
| Control | Ejecución | 113 | 1.508,77 | 20,90 | 17,69 | 50,64 | 343,06 | 435,84 | 199,12 |
| Control | Ejecución | 123 | 1.470,86 | 21,82 | 18,47 | 53,85 | 378,93 | 478,14 | 218,44 |
| Control | Ejecución | 133 | 1.435,09 | 22,68 | 19,25 | 56,76 | 414,08 | 519,40 | 237,29 |
| Control | Ejecución | 143 | 1.401,03 | 23,47 | 20,01 | 59,38 | 448,21 | 559,29 | 255,51 |
| cyl | Corta | 63 | 1.685,80 | 14,93 | 13,50 | 28,97 | 155,60 | 209,72 | 95,82 |
| cyl | Ejecución | 67 | 1.632,38 | 15,61 | 14,01 | 30,04 | 165,76 | 221,58 | 101,24 |
| cyl | Ejecución | 73 | 1.588,89 | 16,44 | 14,54 | 32,45 | 184,99 | 244,85 | 111,87 |
| cyl | Corta | 73 | 1.358,50 | 16,13 | 14,68 | 26,69 | 151,77 | 201,23 | 91,94 |
| cyl | Ejecución | 83 | 1.237,97 | 17,60 | 15,42 | 28,94 | 173,36 | 226,56 | 103,51 |
| cyl | Ejecución | 93 | 1.199,96 | 19,01 | 16,20 | 32,80 | 205,20 | 265,30 | 121,21 |
| cyl | Corta | 93 | 911,97 | 18,36 | 16,11 | 23,23 | 144,56 | 187,30 | 85,58 |
| cyl | Ejecución | 103 | 838,34 | 19,96 | 16,90 | 25,32 | 164,56 | 211,24 | 96,51 |
| cyl | Ejecución | 113 | 816,94 | 21,47 | 17,72 | 28,59 | 193,79 | 246,67 | 112,70 |
| cyl | Corta | 113 | 620,88 | 20,80 | 17,60 | 20,38 | 137,49 | 175,26 | 80,08 |
| cyl | Ejecución | 123 | 574,02 | 22,48 | 18,37 | 22,09 | 155,07 | 196,38 | 89,73 |
| cyl | Ejecución | 133 | 561,78 | 24,01 | 19,19 | 24,72 | 180,31 | 226,98 | 103,70 |
| cyl | Corta | 133 | 426,95 | 23,32 | 19,01 | 17,71 | 128,65 | 162,08 | 74,06 |
| cyl | Ejecución | 143 | 396,49 | 25,04 | 19,72 | 19,03 | 142,98 | 179,44 | 81,99 |
| gal | Corta | 63 | 1.714,06 | 15,31 | 13,50 | 30,77 | 165,59 | 222,86 | 101,82 |
| gal | Ejecución | 67 | 1.692,75 | 15,93 | 14,02 | 32,56 | 178,35 | 240,62 | 109,93 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|-----|----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| gal | Corta | 67 | 1.585,44 | 16,31 | 14,02 | 32,05 | 180,36 | 237,38 | 108,45 |
| gal | Ejecución | 73 | 1.553,36 | 17,14 | 14,56 | 34,70 | 200,04 | 263,60 | 120,43 |
| gal | Ejecución | 83 | 1.506,94 | 18,45 | 15,35 | 39,02 | 220,92 | 306,02 | 139,80 |
| gal | Corta | 83 | 1.205,55 | 19,89 | 15,35 | 36,32 | 234,93 | 286,71 | 130,98 |
| gal | Ejecución | 93 | 1.180,81 | 21,26 | 16,17 | 40,67 | 258,63 | 332,44 | 151,87 |
| gal | Ejecución | 103 | 1.157,87 | 22,53 | 17,01 | 44,81 | 272,83 | 379,08 | 173,17 |
| gal | Corta | 103 | 926,30 | 24,01 | 17,01 | 40,75 | 297,37 | 347,37 | 158,68 |
| gal | Ejecución | 113 | 911,44 | 25,33 | 17,88 | 44,67 | 311,67 | 394,16 | 180,06 |
| gal | Ejecución | 123 | 897,22 | 26,54 | 18,74 | 48,31 | 315,77 | 441,00 | 201,46 |
| gal | Corta | 123 | 717,78 | 28,05 | 18,74 | 43,21 | 350,78 | 397,18 | 181,44 |
| gal | Ejecución | 133 | 707,87 | 29,30 | 19,61 | 46,55 | 353,46 | 442,43 | 202,11 |
| gal | Ejecución | 143 | 698,26 | 30,46 | 20,48 | 49,64 | 346,24 | 487,15 | 222,54 |
| gal | Corta | 143 | 558,61 | 31,95 | 20,48 | 43,76 | 390,88 | 432,16 | 197,42 |
| mix | Corta | 63 | 1.714,06 | 14,94 | 13,50 | 29,49 | 158,34 | 213,42 | 97,51 |
| mix | Ejecución | 67 | 1.687,68 | 15,59 | 14,00 | 31,17 | 171,94 | 229,79 | 104,99 |
| mix | Ejecución | 73 | 1.642,59 | 16,39 | 14,53 | 33,64 | 176,53 | 253,81 | 115,96 |
| mix | Corta | 73 | 1.404,42 | 16,95 | 14,60 | 30,76 | 191,85 | 232,87 | 106,39 |
| mix | Ejecución | 83 | 1.290,47 | 18,29 | 15,39 | 32,89 | 198,23 | 258,05 | 117,89 |
| mix | Ejecución | 93 | 1.257,19 | 19,65 | 16,16 | 37,02 | 211,93 | 299,96 | 137,04 |
| mix | Corta | 93 | 1.074,90 | 20,23 | 16,14 | 33,58 | 232,74 | 272,82 | 124,63 |
| mix | Ejecución | 103 | 996,11 | 21,55 | 16,92 | 35,31 | 232,01 | 296,25 | 135,33 |
| mix | Ejecución | 113 | 975,87 | 22,90 | 17,73 | 39,08 | 241,96 | 339,02 | 154,87 |
| mix | Corta | 113 | 834,37 | 23,50 | 17,71 | 35,24 | 267,46 | 306,54 | 140,03 |
| mix | Ejecución | 123 | 776,19 | 24,77 | 18,51 | 36,43 | 259,81 | 327,19 | 149,47 |
| mix | Ejecución | 133 | 762,83 | 26,07 | 19,34 | 39,71 | 264,91 | 368,49 | 168,34 |
| mix | Corta | 133 | 652,22 | 26,71 | 19,31 | 35,66 | 294,17 | 331,86 | 151,60 |
| mix | Ejecución | 143 | 608,14 | 27,91 | 20,09 | 36,33 | 279,45 | 348,57 | 159,23 |
| sys | Corta | 63 | 1.714,06 | 15,04 | 13,50 | 29,85 | 160,39 | 216,08 | 98,72 |
| sys | Ejecución | 67 | 1.688,66 | 15,69 | 14,01 | 31,56 | 164,11 | 232,85 | 106,39 |
| sys | Corta | 67 | 1.581,76 | 15,69 | 13,95 | 29,67 | 174,33 | 219,07 | 100,09 |
| sys | Ejecución | 73 | 1.542,66 | 16,55 | 14,50 | 32,19 | 183,60 | 242,83 | 110,95 |
| sys | Ejecución | 83 | 1.491,59 | 17,90 | 15,28 | 36,42 | 173,59 | 283,52 | 129,53 |
| sys | Corta | 83 | 1.193,27 | 17,90 | 15,22 | 29,14 | 216,99 | 226,81 | 103,63 |
| sys | Ejecución | 93 | 1.159,25 | 19,37 | 16,02 | 33,17 | 206,61 | 267,04 | 122,00 |
| sys | Ejecución | 103 | 1.129,94 | 20,73 | 16,84 | 37,09 | 193,04 | 308,96 | 141,15 |
| sys | Corta | 103 | 903,95 | 20,73 | 16,78 | 29,67 | 241,29 | 247,17 | 112,92 |
| sys | Ejecución | 113 | 883,20 | 22,18 | 17,59 | 33,26 | 225,51 | 286,52 | 130,90 |
| sys | Ejecución | 123 | 864,62 | 23,53 | 18,42 | 36,70 | 207,28 | 326,99 | 149,38 |
| sys | Corta | 123 | 691,70 | 23,53 | 18,34 | 29,36 | 259,10 | 261,59 | 119,51 |
| sys | Ejecución | 133 | 678,21 | 24,96 | 19,14 | 32,44 | 237,71 | 298,37 | 136,31 |
| sys | Ejecución | 143 | 665,83 | 26,28 | 19,95 | 35,37 | 215,08 | 335,86 | 153,43 |
| sys | Corta | 143 | 532,66 | 26,28 | 19,85 | 28,30 | 268,84 | 268,68 | 122,75 |

8.4. Anexo VI: Detalle de resultados de volumen, biomasa y carbono

Evolución del volumen con corteza durante la simulación

Masas de *Quercus pyrenaica*

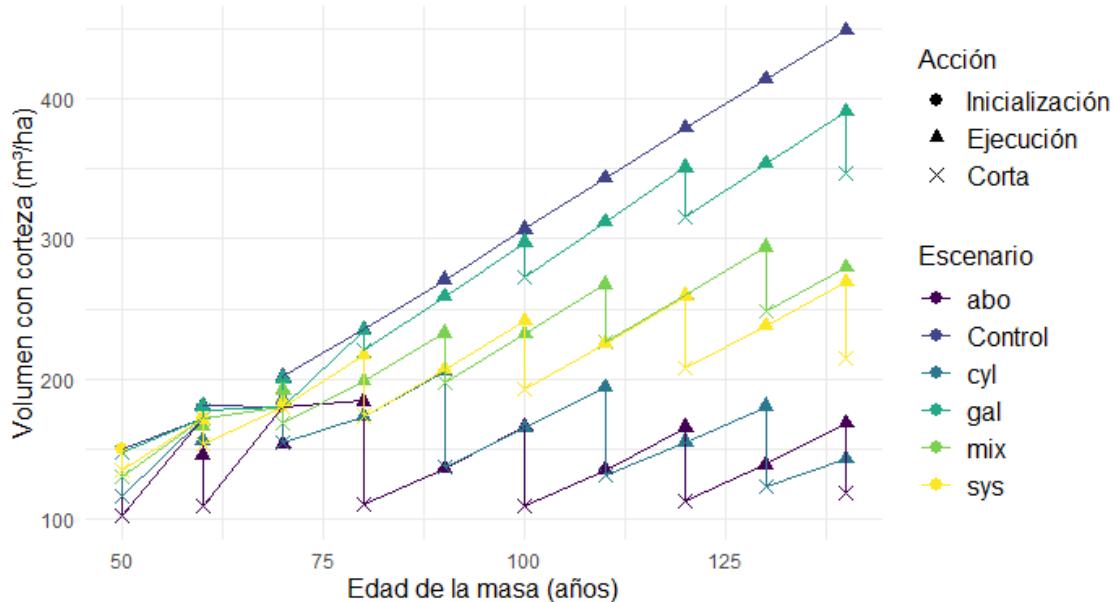


Figura 18. Evolución del volumen con corteza durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

Evolución biomasa aérea acumulada durante la simulación

Masas de *Quercus pyrenaica*

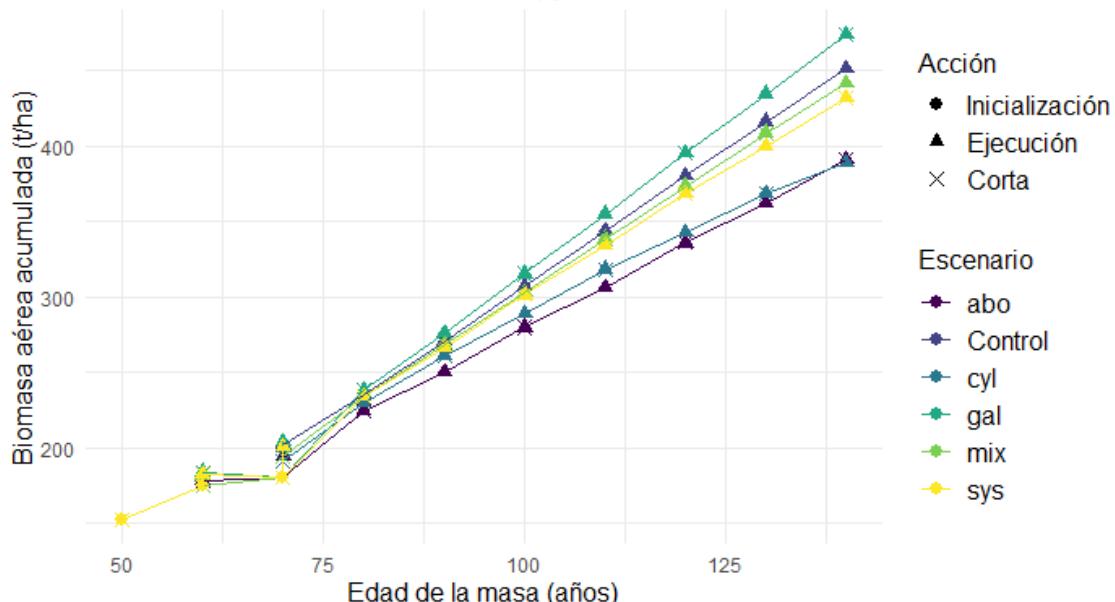


Figura 19. Evolución de la biomasa aérea acumulada durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

Evolución del carbono aéreo acumulado durante la simulación

Masas de *Quercus pyrenaica*

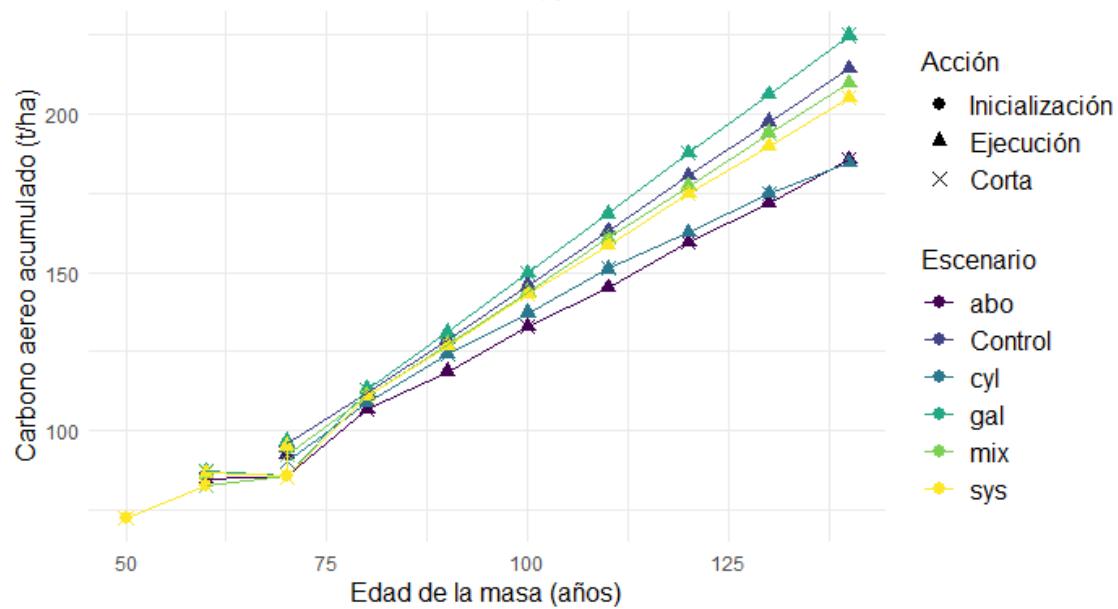


Figura 20. Evolución del carbono aéreo acumulado durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

Evolución de la biomasa total durante la simulación

Masas de *Quercus pyrenaica*

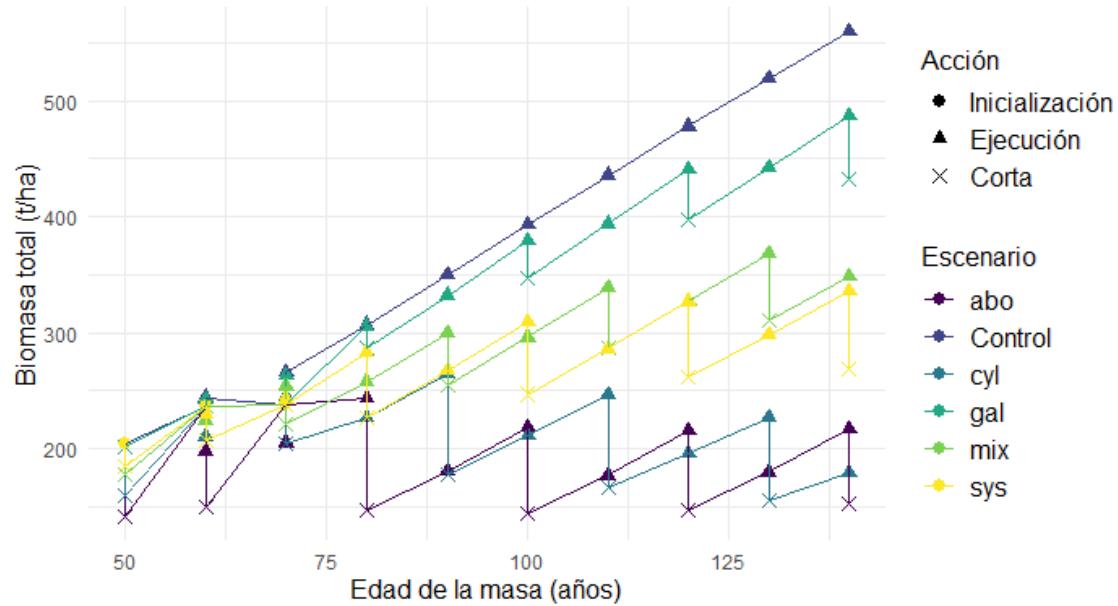


Figura 21. Evolución de la biomasa total durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)

Evolución del carbono total durante la simulación

Masas de *Quercus pyrenaica*

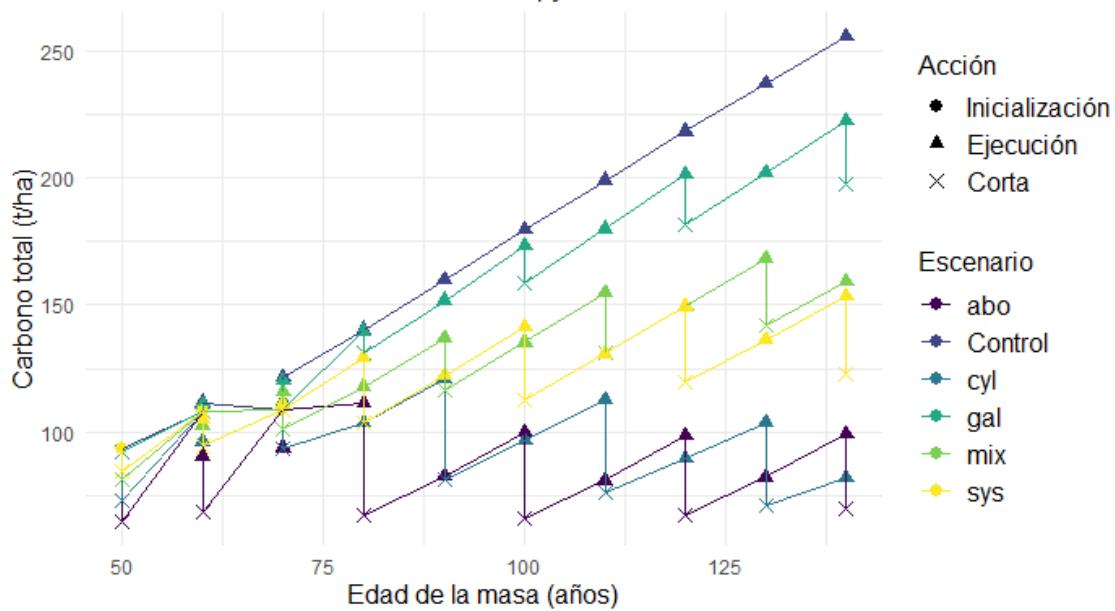


Figura 22. Evolución del carbono total durante la simulación. Fuente: elaboración propia con R (R Core Team, 2021)