



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a  
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

**Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022**

**ISBN 978-84-941695-6-4**

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

---

Organiza



## Impacto del precio del carbono en la programación óptima de claras y el valor actual neto en plantaciones de pino de Andalucía

ACUNA, M.<sup>1</sup>, NAVARRO-CERRILLO, R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Forest Industries Research Centre, University of the Sunshine Coast, Australia.

<sup>2</sup> Universidad de Córdoba, España.

### Resumen

Las claras comerciales pueden mejorar el secuestro y las existencias de carbono, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. En este trabajo, presentamos un modelo de programación lineal que optimiza la programación de claras y maximiza el valor actual neto (VAN) durante un período de planificación de 10 años. El modelo incluyó ingresos de dos fuentes: 1. trozas aserrables y biomasa extraídas durante las claras y 2. créditos por carbono al final del período de planificación. El área de estudio comprendió 631 rodales (30.000 ha) de pino ubicados en Andalucía. Se utilizaron datos LiDAR y modelos alométricos para estimar la biomasa forestal aérea, incluida la madera y las reservas de carbono. El análisis se centró en el impacto de los precios del carbono en el VAN, la optimización de las claras y reservas de carbono al final del período de planificación. Los resultados revelan que los programas de aclareo y el VAN son muy sensibles a los precios del carbono y que se obtienen los mejores rendimientos económicos cuando las existencias de carbono se agregan a los productos madereros (trozas aserrables y biomasa) como fuente de ingresos.

### Palabras clave

Programación de claras, programación lineal, valor actual neto, secuestro y existencias de carbono, Andalucía.

### 1. Introducción

En España, alrededor del 19% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> las fijan los bosques, siendo las plantaciones forestales una parte importante de este balance (MONTERO-POYATOS ET AL., 2005). *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinaster* Aiton. y *Pinus nigra* Arnold., y *Pinus sylvestris* L. son algunas de las especies más dominantes en extensas áreas del país. En el sur de España, estas plantaciones han dado lugar a bosques de gran homogeneidad, pero de notable disponibilidad de secuestro de carbono tanto en la biomasa como en el suelo, pero también en productos derivados de la madera (NAVARRETE-POYATOS ET AL., 2019). Investigaciones recientes en el país han demostrado que el aumento de la intensidad de las claras tiene el potencial de mejorar el secuestro de carbono en los bosques de pino, contribuyendo así también a la adaptación al cambio climático (RUIZ-PEINADO ET AL., 2016). Por lo tanto, se cree que subsidiar el secuestro de carbono en los bosques es una estrategia esencial para promover la silvicultura adaptativa en los bosques de pino mediterráneos.

Datos precisos de la cantidad de carbono sobre el suelo (AGC) y carbono orgánico en el suelo (SOC) y su distribución espacial son insumos esenciales para el desarrollo y ejecución de planes de manejo forestal en grandes áreas de plantaciones. En varios estudios anteriores, se han estimado reservas de carbono y se han generado mapas espaciales de existencias forestales en grandes áreas a partir de datos de LiDAR aéreo (ALS) (ENE ET AL., 2018; NAVARRO-CERRILLO ET AL., 2018; NAVARRETE-POYATOS ET AL., 2019). Aunque el uso de ALS en la gestión forestal no es nuevo, existe poca información sobre el uso de esta tecnología para estimar las existencias de carbono en plantaciones mediterráneas como insumos para la planificación forestal y la optimización de los aprovechamientos (NAVARRETE-POYATOS ET AL., 2019).

La planificación del manejo forestal basada en carbono está relacionada principalmente con decisiones de cuándo y dónde cosechar, y qué regímenes silvícolas implementar (Triviño et al., 2015; Bouchard et al., 2017). Los rodales forestales representan unidades homogéneas dentro de un bosque; se delinean con fines de planificación forestal y aprovechamiento. La inclusión de reservas de carbono en la silvicultura adaptativa hace que la planificación de la cosecha sea más desafiante, lo que requiere soluciones cuantitativas para optimizar las decisiones de cosecha (POUDEL ET AL., 2012; JANDL ET AL., 2015). Estas decisiones también tienen un impacto en la cadena de valor forestal asociada a la producción de madera. Los precios del carbono en los mercados internacionales pueden modificar las actividades de aprovechamiento en vastas áreas geográficas y dentro de un horizonte de planificación muy largo (PUKKALA, 2020). El efecto de la fijación del precio del carbono puede ser uno de los factores claves para mejorar la silvicultura adaptativa en los bosques mediterráneos de pino. La mayoría de los estudios sobre el efecto del precio del carbono han demostrado que aumentar el precio del carbono aumenta las densidades óptimas de los rodales y pospone la tala final (p. ej., PUKKALA, 2018; ASSMUTH & TAHVONEN, 2018).

Los modelos de programación lineal (LP) se han utilizado tradicionalmente para abordar los problemas de optimización en la planificación forestal y proporcionan indicaciones sobre qué unidades de madera cosechar en cada período para satisfacer los objetivos silvícolas y de secuestro de carbono (AUGUSTYNZIK ET AL., 2016; AN ET AL., 2019). Los modelos LP se pueden formular y adaptar a condiciones específicas mediante la imposición de una serie de restricciones. Los datos y parámetros forestales y geográficos generalmente se obtienen y proporcionan mediante sistemas de información geográfica (SIG) (MOKHIREV ET AL., 2018) y se utilizan como entradas en modelos de optimización.

En el sur de España, la gestión forestal operativa en plantaciones de pino mediterráneo de edad uniforme se planifica habitualmente para períodos de 10 años; incluye decisiones sobre qué rodales se harán las claras cada año, así como sobre la secuencia de claras durante el período de planificación. Las operaciones de aclareo son costosas y deben planificarse cuidadosamente para maximizar los beneficios económicos. Por lo tanto, los ingresos de los productos de madera y biomasa extraídos durante las claras deben compensar los altos gastos en las operaciones de aprovechamiento y transporte que se requieren para entregar estos productos desde el bosque hasta los clientes finales. Nuestra hipótesis es que la optimización de los programas de claras puede mejorar la captura y las existencias de carbono, lo que aumenta los beneficios económicos y contribuye a la mitigación del cambio climático. Por lo tanto, la tarificación del carbono puede desempeñar un papel esencial en la generación de una fuente adicional de ingresos, pero también en la promoción de la silvicultura adaptativa en los pinares mediterráneos (NAVARRO-CERRILLO ET AL., 2019).

## 2. Objetivos

Tomando en cuenta el contexto anterior, el objetivo general del estudio fue analizar el impacto de los precios de carbono en la programación óptima de claras y el VAN en plantaciones de pino situadas en Andalucía. Nuestros objetivos específicos fueron i) evaluar el impacto de los precios del carbono en la programación de las claras, ii) evaluar el impacto de los precios del carbono y la programación de claras en las existencias de carbono al final del período de planificación, y iii) evaluar el impacto de los precios del carbono y la programación de las claras en el VAN.

## 3. Metodología

### 3.1 El área de estudio

El área de estudio estuvo formada por 631 masas forestales situadas en el área forestal de Filabres, ubicada en Almería (37° 22' N, 2° 50' O). Filabres cubre un área de 45.000 ha con una altitud que oscila entre los 750 y los 2.168 m.s.n.m. La precipitación media anual ronda los 320 mm

mientras que las temperaturas medias anuales oscilan entre los 7 y los 16°C. El clima varía desde termomediterráneo en las zonas por debajo de los 350 m hasta oromediterráneo en las zonas más altas, con una precipitación media anual en torno a los 375 mm y una temperatura media de 14,5°C. El área tiene una topografía escarpada (>35%) con una elevación máxima de 2.170 m. La vegetación de Filabres presenta un pronunciado gradiente altitudinal. Ha sido fuertemente moldeada por varios programas de reforestación llevados a cabo entre 1955 y 1983. Los pinos son las especies más comunes en el área, incluyendo *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris*. Dentro de Filabres, nuestro estudio se centró en los bosques administrados por la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de Andalucía (ADAE), que es el organismo responsable de proporcionar planes de gestión forestal que aseguren la producción sostenible de madera. En las áreas de manejo forestal designadas, la extracción de madera se ha llevado a cabo desde 1999 tomando como base los planes de manejo forestal que regulan las operaciones de aprovechamiento.

### 3.2 Balance de carbono en la biomasa y en el suelo

La Tabla 1 presenta un resumen de las variables dasométricas de *Pinus sp.* en Filabres. Los reservorios de carbono para la biomasa viva total por sobre y debajo del suelo (Mg ha<sup>-1</sup>) se obtuvieron de un estudio previo realizado en la misma área. Se calcularon a partir de la combinación de 2.302 parcelas de inventario, datos de LiDAR aéreo de baja densidad y modelos alométricos de biomasa (más detalles en NAVARRETE-POYATOS ET AL. (2019)).

Tabla 1. Caracterización dasométrica de las plantaciones de pino en Filabres. dq: diámetro medio cuadrático en cm. AB: área basimétrica in m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. N: número de árboles por hectárea. Ho: altura dominante de Assman en m. Wt: biomasa total como biomasa de carbono en MgC ha<sup>-1</sup>.

Variable	<i>Pinus halepensis</i>		<i>Pinus nigra</i>		<i>Pinus sylvestris</i>		<i>Pinus pinaster</i>	
	Media	ESM*	Media	ESM	Media	ESM	Media	ESM
d <sub>q</sub> (cm)	17,57	0,23	18,45	0,16	17,94	0,32	23,75	0,21
AB (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	10,19	0,33	19,48	0,50	14,41	1,09	24,02	0,62
N (árboles ha <sup>-1</sup> )	419,32	10,88	732,35	18,23	605,04	48,29	536,81	12,93
H <sub>o</sub> (m)	9,10	0,12	9,49	0,11	8,92	0,18	11,30	0,09
W <sub>t</sub> (MgC ha <sup>-1</sup> )	19,93	0,75	49,05	1,40	35,23	2,65	43,49	1,19

\* ESM: Error estándar de la media

Los modelos espaciales obtenidos con LiDAR aéreo se importaron en la calculadora ráster de QGIS Spatial Analyst para generar un mapa de 50 m/pixel de la estructura del bosque (biomasa sobre el suelo, volumen y área basal) en el área de estudio. Se aplicó un coeficiente de conversión biomasa/C estándar de 0,505 para obtener el contenido de carbono de la biomasa (PENMAN ET AL., 2003). El SOC se modeló utilizando ecuaciones alométricas y variables dasométricas como predictores (más detalles en NAVARRO-CERRILLO ET AL. (2018) Y NAVARRETE-POYATOS ET AL. (2019)). Se generó un mapa general de existencias de C (Mg ha<sup>-1</sup>) a escala de rodal para todos los rodales de pino en el área de estudio, el cual incluyó la cantidad inicial de carbono de madera que podría ser potencialmente aprovechada de un rodal en un periodo cualquiera dentro del horizonte de planificación. Las ubicaciones de las zonas de protección y los rodales de aprovechamiento se delimitaron utilizando ArcGis 10.1 (ESRI, 2011) a partir de ortofotografías locales, las cuales fueron utilizadas para planificar las operaciones de aprovechamiento e intervenciones silvícolas.

Los cambios en las existencias generales de carbono (AGC y SOC) durante el período de 10 años se calcularon considerando el crecimiento previsto de la biomasa arbórea y el SOC para un programa de claras que incluía la eliminación del 30 % al 50 % del área basimétrica. Como resultado, este procedimiento designaba los árboles que se eliminarían durante las claras comerciales y precomerciales, que inicialmente se dividieron en dos grupos: trozas para aserrío y biomasa.

### 3.3 Modelo de optimización

Para resolver el problema de la planificación de claras desarrollamos un modelo de programación lineal de entero mixto que genera programas óptimos de claras para un conjunto de rodales con el objetivo de maximizar el VAN durante el período de planificación de 10 años. El modelo incluyó los flujos de ingresos generados tanto por la venta de trozas aserrables y biomasa generada durante las claras, así como por valor de las existencias de carbono (AGC y SOC) en los rodales al final del período de planificación. También incluyó los costos asociados con el aprovechamiento y el transporte de trozas de aserrío y biomasa a los clientes finales. En cada período, los ingresos generados por la venta de madera aserrada y biomasa, así como los costos asociados a su aprovechamiento y transporte, se descontaron a una tasa de interés. Para ello, se calculó un factor de descuento por período, asumiendo que los flujos ocurrieron en el punto medio del período. En el caso de las existencias de carbono solo se contabilizaron como fuente de ingresos al final del período de planificación (año 10) y se descontaron de la misma manera que los ingresos y costos asociados a las trozas aserrables y la biomasa. Además, se incluyeron tres grupos de restricciones en el modelo para garantizar que a) todos los rodales del grupo disponible tuvieran una clara durante el período de planificación, b) el volumen de trozas aserrables y biomasa entregados a los clientes finales no excediera el volumen disponible de estos productos en los rodales, y c) el flujo de trozas aserrables pudiera tener una variación máxima del 5% entre períodos consecutivos.

La formulación matemática del modelo es una adaptación de aquella presentada por ACUNA ET AL. (2021). Se sugiere al lector consultar este artículo para una revisión detallada de las ecuaciones. El modelo de optimización se implementó utilizando la librería DocPlex de IBM. Esta librería forma parte del programa de Modelamiento IBM Decision Optimization CPLEX para Python que se ofrece con la licencia Apache v2.0 (<https://pypi.org/project/docplex/>). El modelo se ejecutó en un ordenador equipado con una unidad de procesamiento Intel® Core™ i7-8850H, 2,60 GHz (6 núcleos) y 32 Mb de memoria RAM.

Para calcular el VAN se utilizó una tasa de interés del 5% en todos los escenarios. Los precios genéricos entregados para los troncos aserrables y la biomasa fueron de 70 € t<sup>-1</sup> y 32 € t<sup>-1</sup>, respectivamente, y se obtuvieron de un aserradero y una central de biomasa locales. Basado en estudios previos en España (ACUNA ET AL., 2017), se utilizó un costo único de transporte de 0,08 € t<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup> para madera aserrada y biomasa. Las distancias de los rodales a los clientes finales se calcularon con ArcGis 10.1 (ESRI, 2011); oscilaron entre 9,2 y 135,9 km (promedio de 66,3 km) hasta el aserradero y entre 40,4 y 134,7 km (promedio de 83,2 km) hasta la central de biomasa. Los costes de las claras oscilaron entre 12,4 y 1055,8 € ha<sup>-1</sup> (promedio de 390,5 € ha<sup>-1</sup>), dependiendo del período de ejecución de la clara (año 1 a 10), suponiendo un aprovechamiento semimecanizado típico de las plantaciones de pino en el sur de España. Así, las siguientes actividades se incluyeron en el cálculo de costos: apeo, apilamiento, procesamiento y extracción de trozas a orilla del camino. En el caso de la biomasa residual, también se incluyó en el cálculo del coste el astillado al borde de vías de extracción. Los costes de extracción y astillado por tonelada se obtuvieron de estudios previos realizados en la zona (BADILLO ET AL., 2012), y se ajustaron por pendiente y distancia de extracción.

### 3.4 Resultados del modelo de optimización y análisis de sensibilidad

Las soluciones óptimas para las claras se obtuvieron utilizando la maximización del VAN como función objetivo. El análisis se realizó para un rango de precios de carbono que oscila entre 0 € y 25 € por Mg, utilizando una tasa de interés del 5%. Se consultó al mercado de carbono del Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (<https://sandbag.org.uk/carbon-price-viewer/>) para definir los precios del carbono utilizados en el estudio. Se evaluaron tres escenarios (estrategias) y se calcularon y compararon sus VAN:

1. Ingresos por la venta de trozas aserrables y biomasa obtenidas durante las claras (SC1),
2. Ingresos solo por existencias de carbono C al final del período de planificación de 10 años (SC2),

3. Ingresos tanto por la venta de trozas aserrables y biomasa obtenidas durante las claras, como por las existencias de carbono al final del período de planificación de 10 años (SC3). La mayoría de los análisis realizados y los resultados presentados en este estudio están relacionados con este escenario.

Después de cada ejecución del modelo, los resultados por período (1 a 10) y precios del carbono se exportaron a Excel; estos incluyeron el flujo de trozas aserrables y biomasa desde los rodales a los clientes finales, los ingresos asociados a trozas aserrables y biomasa, los ingresos de las existencias de carbono, los costos de aclareo y transporte, y los ingresos netos descontados los costes. Los resultados también incluyeron el período óptimo de aclareo de cada rodal y el valor correspondiente de la función objetivo (VAN). Todos los análisis y resúmenes estadísticos se realizaron en Python, utilizando las bibliotecas NumPy y Pandas. Además, se crearon mapas con las soluciones espaciales óptimas utilizando el software ArcGIS® de Esri.

## 4 Resultados

### 4.1 Efecto del precio del carbono sobre el VAN

Como era de esperar, el aumento de los precios del carbono resultó en un VAN más alto para los dos escenarios (SC2 y SC3) que incluían créditos de carbono como fuente de ingresos (Figura 1). En SC2, el VAN creció casi 28,0 M€ (de aproximadamente 7,0 M€ a 35,0 M€) cuando el precio del carbono se incrementó desde 5 Mg<sup>-1</sup> a 25 Mg<sup>-1</sup>. Asimismo, en SC3, el VAN creció en más de 20,0 M€ (de unos 16,4 M€ a 36,5 M€) cuando el precio del carbono se incrementó de 5 Mg<sup>-1</sup> a 25 Mg<sup>-1</sup>. Para cualquier precio del carbono de 5€ Mg<sup>-1</sup> a 25€ Mg<sup>-1</sup>, los VAN en SC3 siempre fueron más altos que los de SC2. En otras palabras, los mejores VAN siempre se obtuvieron cuando los ingresos generados por las trozas aserrables y la biomasa extraída durante las claras se sumaron a los obtenidos por las existencias de carbono al final del período de planificación de 10 años. La diferencia en VAN entre SC3 y SC2 fue menor a medida que aumentó el precio del carbono, ascendiendo a 9,3 M€, 7,3 M€, 5,3 M€, 3,4 M€ y 1,5 M€, para un precio del carbono de 5 Mg<sup>-1</sup> €, 10 Mg<sup>-1</sup> €, 15 Mg<sup>-1</sup> €, 20 Mg<sup>-1</sup> €, 25 Mg<sup>-1</sup> €, respectivamente.

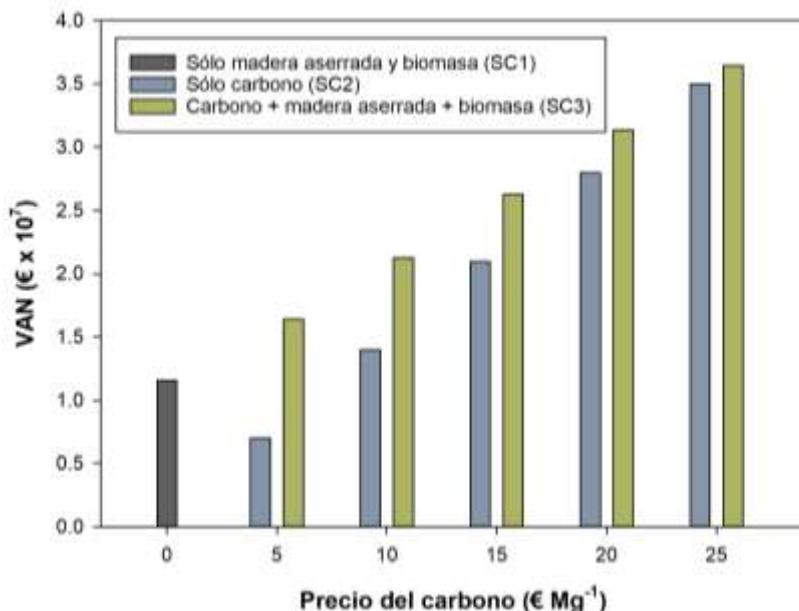


Figura 1. VAN según precio del carbono (desde 0 a 25 € Mg<sup>-1</sup> de carbono) para los tres escenarios incluidos en el estudio.

En SC3, el NVP asociado a las existencias de C representó el 42,7%, 65,7%, 79,8%, 89,2% y 95,9 % del VAN total para un precio del carbono de 5 € Mg<sup>-1</sup>, 10 € Mg<sup>-1</sup> y 15 € Mg<sup>-1</sup>, 20 € Mg<sup>-1</sup>, 25 € Mg<sup>-1</sup>, respectivamente. Esto significa que a partir de un precio del carbono de unos 6,5 € Mg<sup>-1</sup>, la

contribución de los bonos de carbono al VAN total superó a la de la venta de madera aserrada y biomasa. Además, el precio de equilibrio del carbono en el que el propietario es indiferente a producir solo trozas para aserrar y biomasa durante las claras (SC1) u obtener solo créditos por el saldo de las existencias de carbono (AGC y SOC) al final del período de planificación (SC2) fue calculado en 8,5 € Mg<sup>-1</sup>.

#### 4.2 Efecto del precio del carbono sobre los ingresos anuales

El VAN depende tanto de los ingresos obtenidos en cada período como de la tasa de interés. La Figura 2 muestra los ingresos en SC3 del período 1 al 9; los ingresos en estos períodos están asociados únicamente a la venta de trozas aserrables y biomasa extraída durante las claras. Las curvas de ingresos mostraron un fuerte descenso desde el período 1 hasta los períodos 2-4, desde donde comienzan a aumentar de manera constante hasta el período 9. Estos puntos de inflexión se producen en el período 3 para un precio del carbono de 0 € Mg<sup>-1</sup> y 5 € Mg<sup>-1</sup>, en el período 2 para un precio del carbono de 10 € Mg<sup>-1</sup>, 20 € Mg<sup>-1</sup> y 25 € Mg<sup>-1</sup>, y en el período 4 para un precio del carbono de 15 € Mg<sup>-1</sup>. Más allá de estos puntos de inflexión, las curvas de ingresos vuelven a aumentar y convergen para todos los precios del carbono, alcanzando un valor máximo en el período 9 que oscila entre 1,59 M€ y 1,66 M€.

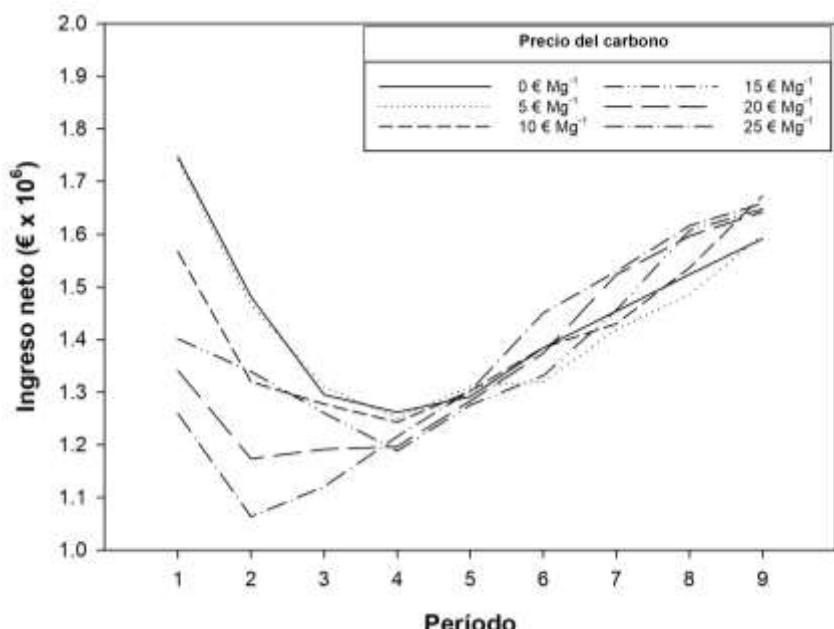


Figura 2. Ingresos netos por períodos según precio del carbono (desde 0 a 25 € Mg<sup>-1</sup> de carbono) para los tres escenarios incluidos en el estudio.

En el período 10 hubo un aumento sustancial en los ingresos cuando se utilizaron precios de carbono positivos, que se debió principalmente a la alta contribución de las existencias de carbono a los ingresos totales. Los ingresos de carbono ascendieron a 7,7 M€ (precio del carbono de 5 € Mg<sup>-1</sup>), 15,7 M€ (precio del carbono de 10 € Mg<sup>-1</sup>), 24,0 M€ (precio del carbono de 15 € Mg<sup>-1</sup>), 32,4 M€ (precio del carbono de 20 € Mg<sup>-1</sup>), y 40,7 M€ (precio del carbono de 25 € Mg<sup>-1</sup>). Estos ingresos representaron el 81,8%, 89,5%, 93,2%, 94,7% y 95,7%, respectivamente, del total de ingresos obtenidos en el período 10.

#### 4.3 Efecto del precio del carbono sobre la programación de las claras y el arreglo espacial de los rodales aclarados durante el horizonte de planificación

La Figura 5 muestra la disposición espacial de los rodales aclarados durante el período de planificación de 10 años. Es evidente que los precios del carbono tuvieron un impacto en el arreglo espacial y en el número de rodales que fueron aclarados en cada período. Para precios de carbono de 0 € Mg<sup>-1</sup> y 5 € Mg<sup>-1</sup>, los rodales aclarados en los dos primeros períodos (promedio de 51 rodales en el período 1 y 64 rodales en el período 2 para ambos precios de carbono) se concentraron espacialmente en el centro y en el norte de Filabres. El aclarado de estos rodales generó un promedio de 770 toneladas de trozas aserrables y 591 toneladas de biomasa. Además, tuvieron un aporte promedio de 1.032 Mg de AGC y 2.074 Mg de SOC al final de los 10 años de planificación. Los rodales en el centro de Filabres estaban rodeados por rodales cuyas claras se realizaron períodos posteriores, con 71 rodales aclarados en el período 7, 66 rodales en el período 8, 61 rodales en el período 9 y 84 rodales en el período 10. El aclarado de estos rodales generó un promedio de 544 toneladas de trozas aserrables y 325 toneladas de biomasa. Además, estos rodales tuvieron un aporte promedio de 572 Mg de AGC, y 1.571 Mg de SOC. Se observó una disposición espacial similar para los rodales aclarados cuando el precio del carbono fue de 10 € Mg<sup>-1</sup>; la diferencia más notable fue el aumento en el número de rodales ubicados en la zona más al norte de Filabres que fueron aclarados en el período 1.

Por el contrario, para precios de carbono de 20 € Mg<sup>-1</sup> y € 25 Mg<sup>-1</sup>, los rodales clareados en los dos primeros períodos (promedio de 164 rodales en el período 1 y 45 rodales en el período 2 para ambos precios de carbono) se concentraron espacialmente en las zonas más al sur y más al norte de Filabres. Durante las claras se generó un promedio de 384 toneladas de trozas aserrables y 244 toneladas de biomasa. Asimismo, la clara de estos rodales tuvo un aporte promedio de 607 Mg de AGC, y 1.997 Mg de SOC al final de los 10 años de planificación. Los rodales en el medio de la región fueron aclarados en períodos posteriores con 50 rodales clareados en el período 7, 52 en el período 8, 59 en el período 9 y 74 en el período 10. Las claras de estos rodales generaron un promedio de 613 toneladas de trozas aserrables y 496 toneladas de biomasa. Asimismo, realizaron un aporte promedio de 796 Mg de AGC y 1.979 Mg de SOC.

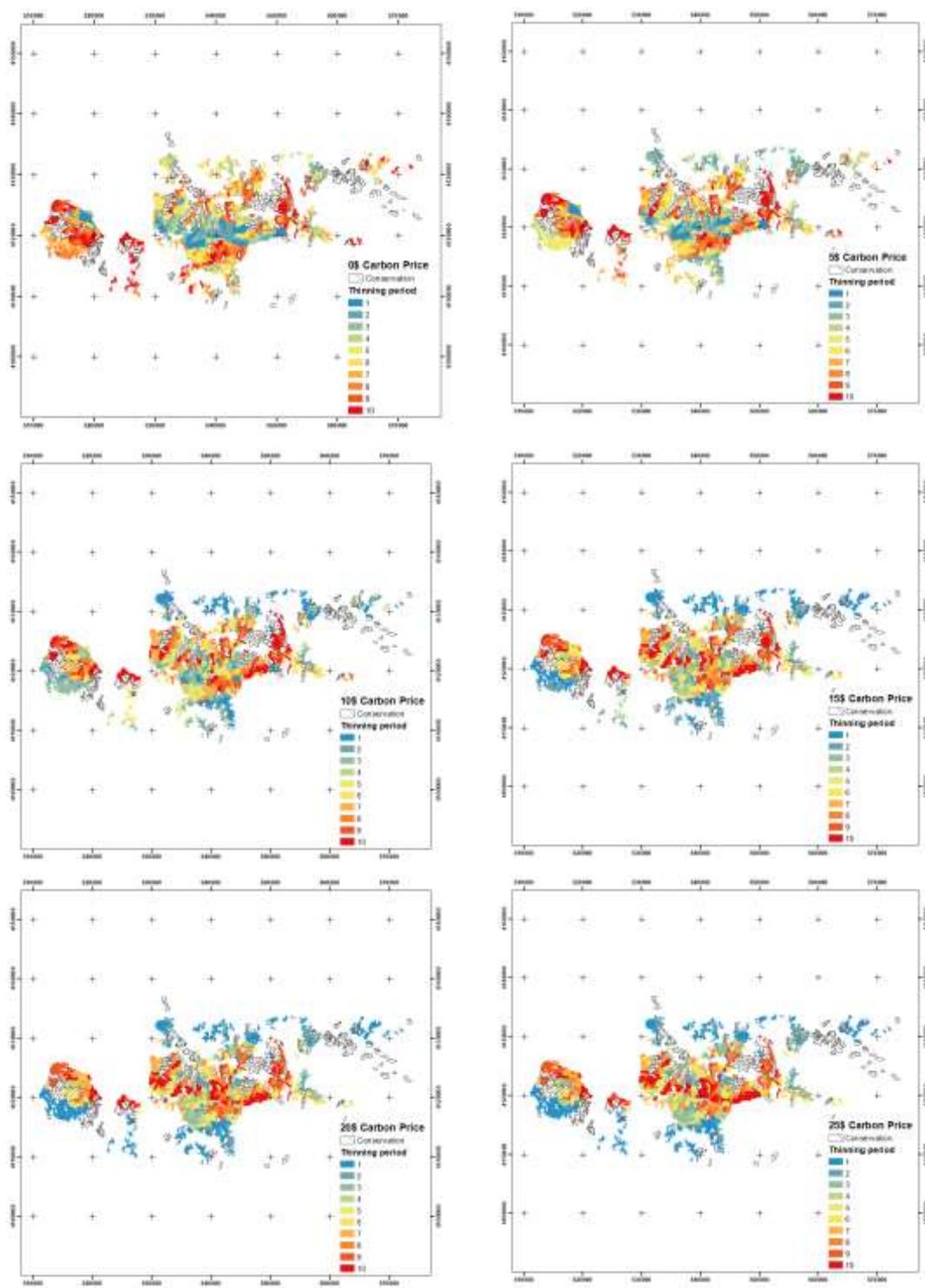


Figura 3. Arreglo espacial de los rodales aclarados durante el horizonte de planificación para los distintos precios de carbono (desde 0 a 25 € Mg<sup>-1</sup> de carbono).

## 5 Discusión

La metodología de optimización utilizada en nuestro estudio ha demostrado ser un enfoque práctico para determinar cómo el precio del carbono afecta los programas óptimos de claras y el VAN en plantaciones de pino mediterráneo de bajo rendimiento. El estudio mostró que pagar por las reservas de carbono conduce a mayores ingresos en las condiciones de la masa forestal, de aprovechamiento y de mercado utilizadas en el estudio. Por lo tanto, el aumento de los precios del carbono resultó en un VAN más alto para los dos escenarios que incluían créditos de carbono como fuente de ingresos (solo ingresos de créditos de carbono (SC2) e ingresos de créditos de carbono y de madera aserrada y biomasa (SC3)). Los resultados de VAN obtenidos en el estudio demostraron ser sensibles al rango de precios del carbono evaluados en el estudio. Para cualquier precio del carbono, los mejores resultados se obtuvieron en S3, es decir, cuando se combinó el ingreso de los créditos de carbono con el de la madera aserrada y la biomasa. En este escenario, un aumento en los precios del carbono condujo a una reducción en la contribución proporcional de las trozas de aserrío y la biomasa al VAN. Por lo tanto, en línea con los resultados informados en estudios previos (BOURQUE ET AL., 2007; BRAVO ET AL., 2008; PUKKALA, 2020), nuestros resultados confirman que existe una clara compensación entre maximizar el VPN y maximizar la captura de carbono cuando se optimiza la gestión con pagos por carbono.

A diferencia de estudios anteriores, el problema de planificación de claras en nuestro estudio se modeló utilizando datos forestales industriales y espaciales reales. Se incluyeron todas las actividades de aprovechamiento y transporte involucradas en la cadena de suministro, sujetas a restricciones de conservación, silvicultura y aprovechamiento uniforme. Los resultados revelaron que tanto la disposición espacial como el número de rodales a clarear en cada período fueron sensibles a los precios del carbono. Con precios de carbono bajos (0 y 5 € Mg<sup>-1</sup>), el modelo apuntaba a maximizar el VAN y los retornos de la venta de trozas y biomasa. Esto resultó en el clareo de algunos rodales con árboles de mayor diámetro y costos bajos de clareo bajos durante los primeros 1-2 años del período de planificación, con una proporción significativa de rodales en los cuales las claras fueron realizadas en períodos posteriores. Por el contrario, con precios de carbono altos (20 y 25 € Mg<sup>-1</sup>), el modelo maximizó el VAN mediante el incremento de las reservas de carbono existentes al final del período de planificación. Esto resultó en el clareo de una gran proporción de rodales con árboles de mayor diámetro y bajos costos de clareo en los primeros 1-2 años del período de planificación.

Nuestra propuesta de modelización de optimización es el primer esfuerzo por incluir el secuestro de carbono en la planificación de la gestión forestal de las plantaciones de pino en el sur de España. Si bien el foco de nuestro estudio estuvo en el impacto económico de la tarificación del carbono en la programación de las claras, se espera que las estrategias propuestas en nuestro estudio puedan utilizarse para mejorar la adaptación de estos bosques al cambio climático. Creemos que la planificación forestal que considere el carbono podría ser uno de los factores críticos para la planificación forestal sostenible en bosques plantados con pino en áreas mediterráneas. Esto también puede resultar en bosques más resistentes a las perturbaciones (por ejemplo, incendios forestales o plagas), reduciendo así el riesgo de emisiones de carbono (WILLIAMS ET AL., 2016; NAVARRO-CERRILLO ET AL., 2019).

## 6 Conclusiones

En este estudio se ha demostrado que el precio del carbono tiene un impacto en los programas óptimos de claras y el VAN en plantaciones de pino mediterráneo de bajo rendimiento. Para cualquier precio del carbono, los mejores resultados se obtuvieron cuando se combinaron los ingresos de los créditos de carbono con los de la madera aserrada y la biomasa, con un aumento del VAN, el cual osciló entre 4,8 y 24,9 millones de euros. Los precios del carbono también impactaron en la disposición espacial, así como en la cantidad de rodales a clarear en cada período, así como en el flujo de madera aserrada y biomasa entregada a los clientes finales. En promedio, en escenarios con precios del carbono, el flujo de troncos para aserrar aumentó de unas 29.700 toneladas en el año 1 a unas 38.200 toneladas en el año 10. Estos resultados revelan que el programa de claras y el VAN son muy sensibles a los precios del carbono y que los mejores rendimientos económicos se obtienen

cuando se agregan existencias de C a las fuentes de ingresos ya existentes producto de la venta de madera aserrada y biomasa.

## 7 Agradecimientos

Los autores agradecen a la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de Andalucía, la cual facilitó el acceso y los antecedentes del sitio de campo. También agradecemos a Miguel Navarrete por su valiosa ayuda durante la adquisición y procesamiento de datos; Esta investigación fue financiada por ISO-Pine (UCO-1265298), ESPECTRAMED (CGL2017-86161-R) y los proyectos ECOPOTENTIAL Horizon 2020 de la Unión Europea (acuerdo de subvención No.641762). También agradecemos el apoyo institucional de la Universidad de Córdoba-Campus de Excelencia CeiA3.

## 8 Bibliografía

ACUNA, M.; CANGA, E.; SÁNCHEZ-GARCÍA, S.; 2017. Aplicación de la herramienta de optimización logística MCPLAN para la planificación del transporte de madera rolliza y biomasa: Un caso de estudio en Asturias. En: 7º Congreso Forestal Español. Plasencia, Cáceres, Extremadura. 26-30 June, 2017. 10 p.

ACUNA, M.; MA NAVARRO-CERRILLO, R.; RUIZ-GÓMEZ, F.; LARA-GÓMEZ, M.; PÉREZ-ROMERO, J.; VARO-MARTÍNEZ, M.Á.; PALACIOS-RODRÍGUEZ, G.; 2021. How does carbon pricing impact optimal thinning schedules and net present value in Mediterranean pine plantations? *For. Ecol. Manag.* 2021, 482, 118847.

AN, H.; SEOK, H.D.; LEE, S.M.; CHOI, J.; 2019. Forest management practice for enhancing carbon sequestration in national forests of Korea. *Forest Sci. Techn.* 15(2), 80-91.

ASSMUTH, A.; TAHVONEN, O.; 2018 Optimal carbon storage in even- and uneven-aged forestry. *For. Policy Economics* 87:93–100

AUGUSTYNZIK, A.L.; ARCE, J.E.; SILVA, A.; 2016. Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through integer linear programming and goal programming. *J. For. Econ.* 24, 72-81.

BADILLO, V.; BARTOL, G.; CASTRO, R.; CABALLERO, M.; FUENTENE BRO, E.; GONZÁLEZ, J.; Biomasa forestal en Andalucía. 2. Procesos de extracción y costes. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla.

BRAVO, F.; BRAVO-OVIEDO, A.; DIAZ-BALTEIRO, L.; 2008. Carbon sequestration in Spanish Mediterranean forests under two management alternatives: a modeling approach. *Eur. J. Forest. Res.* 127:225–234.

BOUCHARD, M.; D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M.; AZOUZI, R.; GUNN, E.; 2017. Integrated optimization of strategic and tactical planning decisions in forestry. *Eur. J. Oper. Res.* 259(3), 1132-1143.

ENE, L.T.; GOBAKKEN, T.; ANDERSEN, H. E.; NÆSSET, E.; COOK, B.D.; MORTON, D.C.; NELSON, R.; 2018. Large-area hybrid estimation of aboveground biomass in interior Alaska using airborne laser scanning data. *Remote Sens. Environ.* 204:741-755.

ESRI; 2011. ArcGIS Desktop. "Release 10." Documentation Manual. Redlands, CA, Environmental Systems Research Institute.

JANDL, R.; BAUHUS, J.; BOLTE, A.; SCHINDLBACHER, A.; SCHÜLER, S.; 2015. Effect of climate-adapted forest management on carbon pools and greenhouse gas emissions. *Curr. For. Rep.* 1(1), 1-7.

MOKHIREV, P.A.; OLEGOVNA-POZDNYAKOVA, M.; MEDVEDEV, O.S.; MAMMATOV, O.V.; 2018. Assessment of availability of wood resources using geographic information and analytical systems (the Krasnoyarsk territory as a case study). *J. Appl. Eng. Sci.* 16(3):313-319.

MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M.; 2005. Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid.

NAVARRETE-POYATOS, M.A.; NAVARRO-CERRILLO, R.M.; LARA-GÓMEZ, M.A.; DUQUE-LAZO, J.; VARO, M.A.; PALACIOS RODRIGUEZ, G.; 2019. Assessment of the Carbon Stock in Pine Plantations in Southern Spain through ALS Data and K-Nearest Neighbor Algorithm Based Models. *Geosciences* 9(10):442.

NAVARRO-CERRILLO, R.M.; SÁNCHEZ-SALGUERO, R.; RODRIGUEZ, C.; LAZO, J.D.; MORENO-ROJAS, J.M.; PALACIOS-RODRIGUEZ, G.; CAMARERO, J.J.; 2019. Is thinning an alternative when trees could die in response to drought? The case of planted *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* stands in southern Spain. *Forest Ecol. Manag.* 433:313-324.

NAVARRO-CERRILLO, R.M.; DUQUE-LAZO, J.; RODRÍGUEZ-VALLEJO, C.; VARO-MARTÍNEZ, M.; PALACIOS-RODRÍGUEZ, G.; 2018. Airborne Laser Scanning Cartography of On-Site Carbon Stocks as a Basis for the Silviculture of *Pinus halepensis* Plantations. *Remote Sensing*, 10(10):1660.

POUDEL, B.C.; SATHRE, R.; BERGH, J.; GUSTAVSSON, L.; LUNDSTRÖM, A.; HYVÖNEN, R.; 2012. Potential effects of intensive forestry on biomass production and total carbon balance in north-central Sweden. *Environ. Sci. Policy*, 15(1):106-124.

PUKKALA, T.; 2018. Carbon forestry is surprising. *For. Ecosyst.* 5(1):11.

PUKKALA, T.; 2020. At what carbon price forest cutting should stop. *J. For. Res.* 31:713-727.

TRIVIÑO, M.; JUUTINEN, A.; MAZZIOTTA, A.; MIETTINEN, K.; PODKOPAEV, D.; REUNANEN, P.; MÖNKKÖNEN, M.; 2015. Managing a boreal forest landscape for providing timber, storing and sequestering carbon. *Ecosyst. Serv.* 14:179-189.

WILLIAMS, M.; ZALASIEWICZ, J.; WATERS, C. N.; EDGEWORTH, M.; BENNETT, C.; BARNOSKY, A. D.; DO SUL, J.A.; 2016. The Anthropocene: a conspicuous stratigraphical signal of anthropogenic changes in production and consumption across the biosphere. *Earth's Future* 4(3):34-53.