

Accésit SECF 2022 en el apartado de Proyecto o Trabajo Fin de Carrera o de Grado

---

**Análisis de productividad, costes y efectos ambientales  
de las claras mecanizadas selectivas y sistemáticas  
sobre monte bajo de rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.) con  
el cabezal Bracke c16.c en Villar de Ciervos (León, España)**

**Productivity, costs and environmental effects analysis of mechanized  
selective and boom-corridor thinnings in Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica*  
Willd.) coppices with the accumulating-felling head (AFH) Bracke C16.  
in Villar de Ciervos (León, Spain)**

Herguido-Sevillano, Lucía \*

*ETSI Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid.  
Calle José Antonio Novais 10, 28040 - Madrid (España)*

\* Autor de correspondencia: [luciahersev@gmail.com](mailto:luciahersev@gmail.com)

## Resumen

Los montes bajos de *Quercus pyrenaica* Willd. en España son actualmente masas densas y de salud frágil por factores como la competición, plagas o incendios. La realización de claras es interesante por la salud de la masa y por reducir los incendios, a la vez que producen productos forestales. Sin embargo, estas apenas se realizan por la baja productividad, altos costes y precios bajos de biomasa. Se probaron dos métodos de claras, selectivo (S) y “boom-corridor” (BC), en un monte bajo de *Q. pyrenaica* denso y de pequeño diámetro con una taladora-apiladora multiárbol (TAM). El tiempo por árbol extraído no fue diferente entre métodos; sin embargo, BC muestra una productividad 48.6% mayor (BC = 4.43 ts-hp-1 vs. S = 2.99 ts-hp-1). Esto se debe principalmente al peso unitario medio extraído (psuextr), siendo un 42% mayor en BC debido a la menor selectividad. Cuando se compara la productividad dentro del rango común de psuextr, la productividad es un 16–23% mayor en BC. El consumo de combustible fue diferente debido a un mayor psuextr en BC y mayor número de pies extraídos en S. La masa restante fue diferente en densidad final (mayor en BC) y en el diámetro medio final (mayor en S), mientras que el peso de las claras fue el mismo. La frecuencia e intensidad de daños a la vegetación en pie tras la corta no fue diferente entre métodos, pero sí tras la saca. En principio el riesgo de incendio no aumentó recién realizadas las claras.

**Palabras clave:** biomasa, cabezal talador-acumulador, clareos, estudio de tiempos forestal, mecanización.

## Abstract

*Quercus pyrenaica* Willd. coppices in Spain have been abandoned in the xxth century, leading to stagnant high-density stands with fragile health. Thinnings are often required to ensure their stability, producing forest products, and avoiding forest fires. However, they are seldom performed due to the low productivity, high costs and low biomass prices. In this study, two thinning methods, selective (S) and boom-corridor (BC) were tested carrying out a time study in a high-density small-diameter *Q. pyrenaica* coppice in León (Castilla y León, Spain) with a forest harvester base machine mounting an accumulating-felling head Bracke C16.c. BC showed a significant increase (48.6%) in harvester productivity when compared to S, averaging 4.43 and 2.99 odt·pmh<sup>-1</sup> respectively. This was mainly due to the average weight per extracted tree, that was 42% greater in BC due to the method being less selective. When considering the productivity of both methods in a common range of unit tree weight, the productivity was 16–23% greater for BC. These results show the potential of BC in the studied conditions. The residual stands had different final density (greater in BC) and final average tree diameter (bigger in S), while thinning intensity was the same in basal area or in extracted oven-dried tons per hectare (odt·ha<sup>-1</sup>). The method did make a difference in the intensity and frequency of damages. In principle, an increase in the wildfire risk was not found but due to the species' high shoot capacity, further studies should analyse the future evolution of the treated stands.

**Keywords:** biomass, forest products, forest time study, mechanization.

---

## 1. Introducción

Muchas masas de *Quercus pyrenaica* Willd. (*Q. pyrenaica*), gestionadas tradicionalmente como montes bajos para obtener leñas y carbón (Moreno-Fernández *et al.*, 2021), fueron abandonadas tras las transformaciones socioeconómicas del s.XX. En un contexto de crisis climática, ha resurgido el interés por el monte bajo para producción de energía, debido al balance positivo en captura de CO<sub>2</sub> (Ford-Robertson, 1996). Además, se han revalorado como ecosistema y por su papel en una economía rural sostenible (Becker and Unrau, 2018). No obstante, existen obstáculos: altos costes, bajo precio de la biomasa, y bajas productividades (Cañellas *et al.*, 2004; Schweier *et al.*, 2015).

Aparte de la falta de mano de obra (Kärhä *et al.*, 2005), estos factores han conducido a la mecanización (González *et al.*, 2014; Spinelli *et al.*, 2016). En las claras mecanizadas, la productividad de la cosechadora depende del tamaño de árbol extraído, de la densidad, de la intensidad de la clara, y del método de trabajo. El más habitual es el selectivo por lo bajo (S). Otros métodos, como el de árbol entero, reducen costes, incrementan la productividad (p.e., Laina *et al.*, 2013), e incrementa la biomasa extraída en 1.5–3.5 veces, con mayor extracción relativa a menor tamaño de árbol (di Fulvio *et al.*, 2011). El método “boom-corridor” (BC) podría mejorar la productividad de la cosechadora, e incluso la del autocargador, ya que reduce el tiempo de selección por medio de la organización del apeo en corredores estrechos. Se ha llegado a comprobar una mejora en la productividad del apeo y amontonado del 16% respecto a métodos selectivos (Bergström *et al.*, 2010). Además, BC podría generar ventajas en cuanto a la biodiversidad al dejar manchas dispersas de la masa sin tratar (Witzell *et al.*, 2019). Sin embargo, el método BC sólo se ha estudiado fuera de la zona mediterránea y sin rebrote.

Los objetivos fueron:

1. Cuantificar y comparar la productividad de la taladora-apiladora multiárbol (TAM) utilizando los métodos S y BC en monte bajo de *Q. pyrenaica*, y comprender cuáles son las variables influyentes en su productividad.
2. Desarrollar modelos predictivos de la productividad de la TAM.
3. Mediante los modelos, y según el método de corta, estimar los costes del tratamiento.
4. Evaluar el resultado de los tratamientos inventariando la masa antes y después de la clara.
5. Comparar el impacto del aprovechamiento según el método de corta sobre unas variables ambientales básicas.

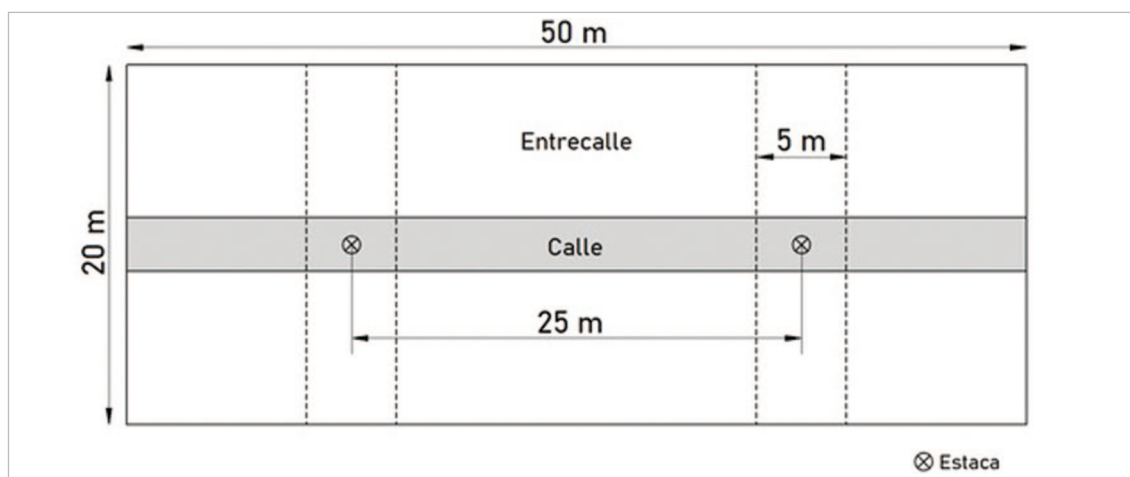
(Nota: por extensión, no se incluye el apartado de efectos ambientales en este artículo-resumen).

## 2. Metodología

El estudio se realizó en el MUP nº40 “Dehesa y Coso” en el municipio de Santa Colomba de Somoza (León). La vegetación era una masa monoespecífica en monte bajo de *Q. pyrenaica* con una edad estimada de 35 años y un 100% de cobertura. La densidad media era 9200 pies·ha<sup>-1</sup> con un diámetro normal (dn, a 1.3 m de altura) medio de 5.1 cm y un área basimétrica (G) de 23.93 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> (Tabla 2). Además, la zona tiene “alto riesgo” de incendio según los mapas de riesgo de Castilla y León.

Se proyectaron 20 unidades de estudio divididas equitativamente entre dos zonas del monte. En ellas, la altitud era 1280–1380 m, con una pendiente del 5–20% y orientación dominante de umbría. Los tratamientos (S o BC) fueron asignados alternativamente. Las pruebas se realizaron en septiembre–noviembre 2021.

Estas unidades tenían unas dimensiones teóricas de 50x20 m, con dos transectos de 5x20 m perpendiculares a la calle con sus centros marcados por estacas a 12.5 m y 37.5 m del comienzo de la unidad de estudio en los que se realizaron los inventarios (Figura 1).



**Figura 1.** Esquema de una unidad de estudio, con los transectos en línea discontinua.

La máquina base era una Komatsu 901.4 (Fotografía 1b). La grúa rota con la cabina, con alcance de 10 m. Tiene instalado un cabezal talador-acumulador Bracke C16.c, diseñado para dn<26cm. La combinación de ambas resulta en la TAM. El cabezal posee dos pares de garras, acumuladoras y de sujeción, para manejar varios árboles en cada ciclo, que corta con una cadena autotensante de 3/4” instalada en un disco circular (Fotografía 1a).

Se aplicaron dos tratamientos/métodos de corta: selectivo (S) y ‘boom-corridor’ (BC). El maquinista decidía visualmente qué árboles o corredores apear. En S, se apeaban los pies dominados hasta alcanzar un 50% del G inicial (clara por lo bajo). En BC, el maquinista realizaba corredores de 1–2 metros de ancho de manera oblicua a la calle, apeando todos los árboles en el corredor independientemente de su calidad. Para alcanzar la densidad final, los corredores estaban separados 1.7–3.2



Fotografía 1a y 1b. Cabezal Bracke C16.c y taladora-apiladora multiárbol.

metros, y se realizaban en diferentes direcciones para simular un resultado similar al de S (Figura 2). La biomasa apeada se apiló en los bordes de la calle en S y en los corredores en BC, y a la siguiente semana un autocargador llevó la biomasa a pista, separando los montones por unidad de estudio para poder astillarla y pesarla separadamente un mes después en un camión con balanza integrada. Se cogieron muestras para determinar la humedad.

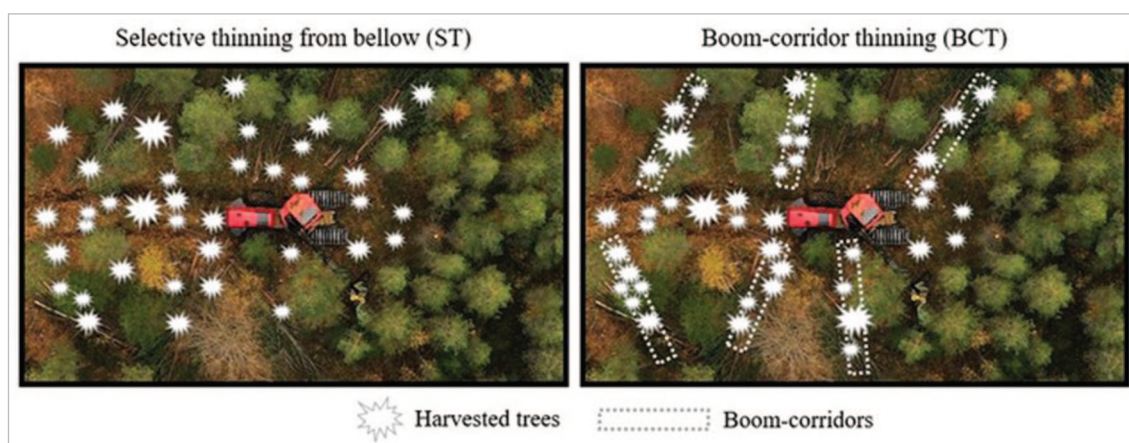


Figura 2. Foto aérea de la taladora-apiladora multiárbol y esquemas del funcionamiento de ambos métodos.

Fuente: (Bergström *et al.*, 2022).

El estudio de tiempos fue realizado, por unidad de estudio, por un observador dentro de la cabina de la TAM. El ciclo se dividió en 8 tareas (Tabla 1), y cada 7 segundos se registraba la tarea en curso. El tiempo productivo ( $t_p$ ) se definió como la suma del tiempo de trabajo efectivo registrado por el ordenador, excluyendo retrasos y mantenimientos. Para la productividad del autocargador y de la astilladora se



anotaron los tiempos en las unidades de estudio 1–10 siguiendo estudios de tiempo convencionales (Magagnotti *et al.*, 2012).

**Tabla 1.** Relación de tareas en un ciclo de trabajo de la TAM. Traducido de: (Bergström *et al.*, 2022).

Tarea	Descripción	Prioridad
Extensión del brazo	Extensión del brazo para corta o descope. Comienza cuando el brazo, en vacío, se extiende. Finaliza cuando el brazo se ralentiza para posicionarse en un árbol.	1
Corta en calle	Corta en la calle. Comienza cuando el brazo se ralentiza para posicionarse en un árbol. Finaliza cuando se corta y separa del tocón el último árbol del ciclo.	1
Corta en entrecalle	Corta en la entrecalle. Comienza cuando el brazo se ralentiza para posicionarse en un árbol. Finaliza cuando se corta y separa del tocón el último árbol del ciclo.	1
Descope	Corta de un árbol en pie a 4-5 m de altura por tener una altura excesiva para tomarlo entero. Comienza cuando el brazo se ralentiza para posicionarse y finaliza cuando se realiza el último descope, separándose la parte superior del último árbol de su tronco.	1
Recogida del brazo y depósito de pila	Comienza cuando se corta y separa del tocón el último árbol del ciclo y se empieza a retraer el brazo. Finaliza cuando se deposita la pila.	1
Tronzado de la pila	Corta por la mitad del montón y reamontarlo. Comienza cuando el montón ha sido soltado en el suelo. Finaliza cuando la parte del montón cortada se coloca sobre la otra.	1
Desplazamiento	Comienza cuando las ruedas de la TAM comienzan a girar. Finaliza cuando estas se detienen.	2
Miscelánea	Otras tareas como: cortar raíces de árboles descuajados, caída de un árbol que tiene que volver a recogerse, etc.	1
Retrasos	Tiempo sin trabajo productivo (averías, descansos, ...)	3

\*Si las tareas fueron realizadas simultáneamente, se registra la tarea con mayor prioridad (= menor número).

Se estimaron los costes unitarios y por hectárea para cada método dependiendo de las toneladas verdes (tv) extraídas al 34% de humedad, con un precio de referencia de 42.96 €·tv<sup>-1</sup> (comunicación personal de la encargada de suministro de SOMACYL en FORESTALIA (Cubillos del Sil), noviembre 2021). Los costes unitarios y las productividades medias medidas del autocargador y la astilladora se muestran en la *Tabla 7*. Los costes indirectos se estimaron como el 13% de los costes directos, y el beneficio industrial como el 6% de la suma de estos.

### 3. Resultados y discusión

Los estados inicial y final de la masa se pueden ver en las *Tablas 2* y *3*. Tras el tratamiento, ésta sólo fue significativamente diferente entre métodos en la densidad

final, pues en S se necesitan extraer más número de pies a un mismo peso de clara, y en el dn final, que es un resultado esperable al comparar un método selectivo vs. no-selectivo.

**Tabla 2.** [Extracto de tabla]: Valores medios del estado inicial de la masa (pretratamiento), con el método y la zona como factores. Superíndices diferentes y (\*) señalan una diferencia significativa entre medias al 95% de probabilidad fiducial entre columnas adyacentes. Valores mínimos y máximos entre paréntesis, desviación estándar entre corchetes. BC = 'boom-corridor', S = selectivo.

Pre Tratamiento	Zona 1	Zona 2	p-valor	S		BC		p-valor	Inter.
Densidad total (pies·ha <sup>-1</sup> )	11590 <sup>a</sup> (8300 – 14550) [2308]	13185 <sup>a</sup> (5200 – 17550) [3273]	0.2436	12445 <sup>a</sup> (5200 – 16150) [3221]		12330 <sup>a</sup> (8300 – 17550) [2659]		0.932	No
Dn (cm)	5.18 <sup>a</sup> (4.25 – 6.05) [0.56]	5.39 <sup>a</sup> (4.00 – 9.00) [1.35]	0.6561	5.51 <sup>a</sup> (4.50 – 9.00) [1.29]		5.05 <sup>a</sup> (4.00 – 5.95) [0.62]		0.335	No
Peso seco total [Estimado] (ts·ha <sup>-1</sup> )	<b>48.04<sup>a</sup></b> (35.77 – 58.29) [8.77]	<b>60.17<sup>a</sup></b> (44.82 – 76.85) [10.53]	0.0126*	<i>Stand 1:</i> 62.79 <sup>a</sup> (43.24 – 83.48) [14.92]	<i>Stand 2:</i> 87.54 <sup>a</sup> (75.11 – 106.72) [12.76]	<i>Stand 1:</i> 59.02 <sup>a</sup> (42.55 – 74.83) [15.12]	<i>Stand 2:</i> 85.98 <sup>a</sup> (59.59 – 133.29) [28.60]	<i>Stand 1:</i> 0.702 <i>Stand 2:</i> 0.914	No
Área basimétrica (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	<b>22.36<sup>a</sup></b> (17.95 – 27.25) [3.34]	<b>26.24<sup>a</sup></b> (21.77 – 31.75) [3.31]	0.0117*	<i>Stand 1:</i> 22.84 <sup>a</sup> (18.98 – 25.96) [2.86]	<i>Stand 2:</i> 28.45 <sup>b</sup> (24.90 – 31.75) [2.72]	<i>Stand 1:</i> 21.89 <sup>a</sup> (17.95 – 27.25) [4.05]	<i>Stand 2:</i> 24.03 <sup>b</sup> (21.77 – 27.01) [2.25]	<i>Stand 1:</i> 0.678 <i>Stand 2:</i> 0.023*	No

**Tabla 3.** [Extracto de tabla]: Propiedades de la masa en pie tras la corta según el método y la zona: medias, valores máximos y mínimos (entre paréntesis) con la desviación estándar (entre corchetes). BC = ‘boom-corridor’, S = selectivo. Diferentes letras en la misma fila del mismo factor apuntan una diferencia significativa al 95% probabilidad fiducial.

Post Tratamiento	Zona 1	Zona 2	p-valor	S	BC	p-valor	Inter
Densidad en pie (pies·ha <sup>-1</sup> )	3555 <sup>a</sup> (2050 – 5200) [863]	3365 <sup>a</sup> (1300 – 6500) [1503]	0.653	<b>2695<sup>a</sup></b> (1300 – 3600) [722]	<b>4225<sup>b</sup></b> (2550 – 6500) [1096]	0.002*	No
Dn (cm)	6.3 <sup>a</sup> (4.8 – 7.5) [0.8]	6.8 <sup>a</sup> (4.3 – 12.2) [2.2]	0.474	7.4 <sup>a</sup> (5.9 – 12.2) [1.8]	<b>5.8<sup>b</sup></b> (1.25 – 7.2) [0.94]	0.019*	No
Área basimétrica en pie (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	12.7 <sup>a</sup> (8.91 – 15.37) [2.12]	13.4 <sup>a</sup> (8.67 – 17.03) [2.6]	0.534	13.3 <sup>a</sup> (8.67 – 16.27) [2.66]	12.8 <sup>a</sup> (10.34 – 17.03) [2.09]	0.715	No
Peso seco unitario [Estimado] (ts·ha <sup>-1</sup> )	8.6 <sup>a</sup> (4.8 – 11.8) [2.0]	12.7 <sup>a</sup> (4.2 – 35.6) [8.9]	0.132	<b>13.4<sup>a</sup></b> (7.0 – 35.6) [8.2]	7.8 <sup>b</sup> (4.2 – 14.0) [3.0]	0.048*	No

### 3.1. Distribución de tiempos

Aunque el tiempo total por unidad de estudio era significativamente mayor en S ( $p < 0.001$ ), cuando se divide el tiempo entre el número de pies extraídos, el tiempo por árbol no es significativamente distinto entre métodos ( $p = 0.617$ ).

Analizando la proporción de tiempo invertida en cada tarea (Tabla 4), en S se dedica más tiempo a la corta en la entrecalle por la selección de pies, pero el tiempo total de corta toma la misma proporción. Comparando el tiempo por árbol extraído (s·pie<sup>-1</sup>) con Bergström *et al.* (2022), el tiempo dedicado a cada tarea fue consistentemente menor en este estudio. Esto podría deberse a que los pies de *Q. pyrenaica* en monte bajo tienden a crecer próximos entre sí, lo que permitió cortar varios pies a la vez. Esto no impide que los valores de productividad sean menores respecto al citado estudio, pues los pies en este estudio eran más pequeños.

El número de acumulaciones describe mejor la eficiencia cuando se comparan S y BC. Una acumulación se define como la apertura de las garras acumuladoras tras realizar un corte sin depositar la pila. La media de acumulaciones por parcela es significativamente diferente (305.6 en BC vs. 438.0 en S), lo que resulta en una mayor eficiencia de BC.



**Tabla 4.** Tiempo medio invertido en cada tarea, en segundos por árbol, y proporción del tiempo total por tarea. Valores mínimos y máximos entre paréntesis, y los p-valores considerados significantes están señalados con un asterisco (\*).

Tarea	Tratamiento				p-valor
	S (n = 10)		BC (n = 10)		
	$s \cdot pie^{-1}$	Proporción del tiempo total (%)	$s \cdot pie^{-1}$	Proporción del tiempo total (%)	
Extensión del brazo	1.00 (0.49 – 1.59)	13	0.78 (0.28 – 1.11)	10	0.146
Corta en calle	<b>1.76</b> (1.28 – 2.19)	23	<b>2.14</b> (1.28 – 2.19)	29	0.019 *
Corta en entrecalle	<b>2.92</b> (2.36 – 3.78)	38	<b>2.39</b> (1.47 – 3.13)	32	0.015 *
Descope	0.34 (0 – 1.81)	4	0.31 (0 – 1.38)	4	0.889
Recogida del brazo y depósito de pila	1.21 (0.86 – 2.10)	15	1.18 (0.83 – 2.02)	16	0.801
Tronzado de la pila	0.03 (0 – 0.11)	0	0.05 (0 – 0.27)	1	0.427
Desplazamiento	<b>0.35</b> (0.20 – 0.48)	4	<b>0.47</b> (0.33 – 0.74)	6	0.016 *
Miscelánea	0.06 (0 – 0.15)	1	0.08 (0 – 0.22)	1	0.474
Retrasos	0.16 (0 – 1.06)	2	0.06 (0 – 0.41)	1	0.351
Tiempo por árbol	7.66 (6.71 – 10.05)	–	7.39 (5.51 – 10.05)	–	0.617
Tiempo total	<b>51.14 min·unidad de estudio<sup>-1</sup></b>		<b>33.50 min·unidad de estudio<sup>-1</sup></b>		<0.001*

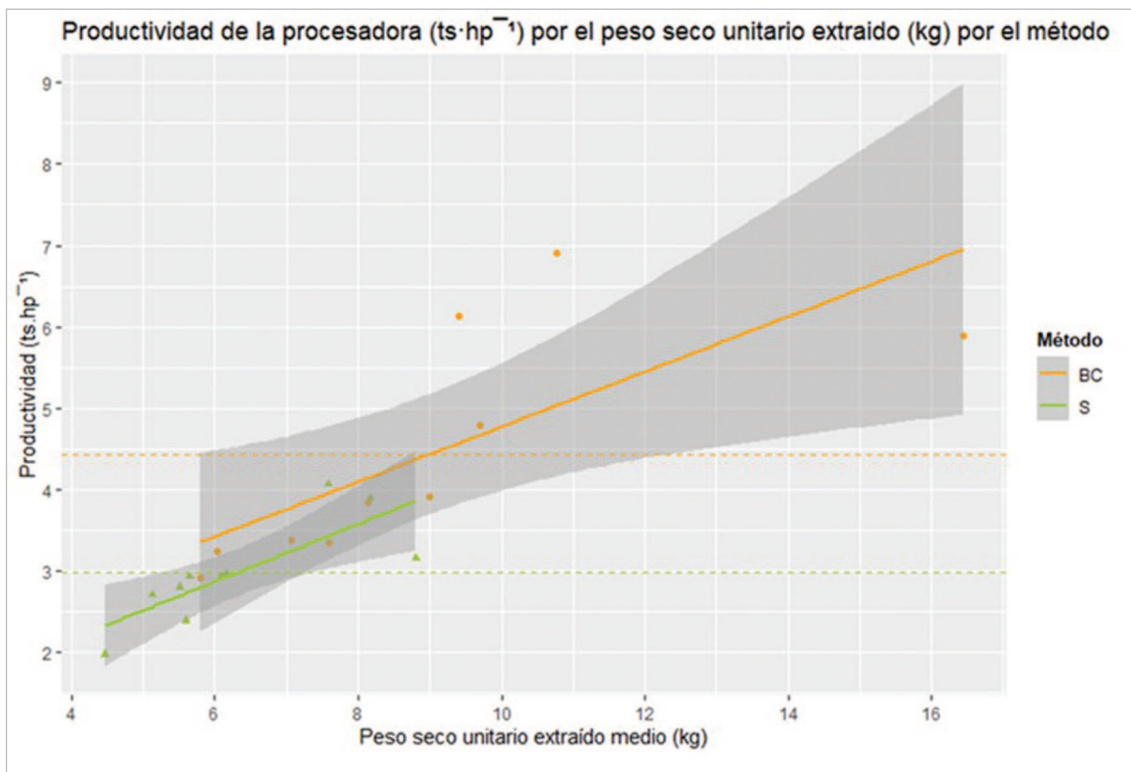
### 3.2. Productividad de la taladora-apiladora multiárbol (TAM)

La productividad es significativamente diferente entre métodos, siendo la media un 48.6% mayor en BC. La productividad media fue 2.99  $ts \cdot hp^{-1}$  (S) y 4.43  $ts \cdot hp^{-1}$  (BC).

Se realizó una regresión lineal por método entre la productividad de la TAM y el peso seco unitario extraído ( $psu_{Ext}$ ) medio, que era la mejor variable explicativa en común (Figura 3, Tabla 5). Asumiendo un rango común de  $psu_{Ext}$  (6-8  $kg \cdot pie^{-1}$ ), la diferencia de productividad sería de +16–23% a favor de BC, un incremento más moderado respecto al de las medias. El incremento de productividad entre ambos métodos aumenta a menor  $psu_{Ext}$ , siendo BC más eficiente que S cortando diámetros más pequeños. Así, lo que explica tanta variación en la productividad es el rango y media de  $psu_{Ext}$  en cada método. Por la menor selección de BC, el  $psu_{Ext}$  fue de media 42% mayor en éste (8.99  $kg \cdot pie^{-1}$  vs. 6.32  $kg \cdot pie^{-1}$ ).

**Tabla 5.** Curvas de regresión lineal productividad ( $\text{ts}\cdot\text{hp}^{-1}$ ) vs. peso seco unitario de los pies extraídos ( $\text{kg}\cdot\text{pie}^{-1}$ ).

Método	Nº obs	Ecuación para la productividad ( $\text{ts}\cdot\text{hp}^{-1}$ )	R <sup>2</sup> aj (%)	p-valor	$\sigma$ ( $\text{ts}\cdot\text{hp}^{-1}$ )
S	10	$0.752 + 0.35 \cdot \text{psu}_{\text{Ext}}$	59	0.006*	0.50
BC	10	$1.4 + 0.34 \cdot \text{psu}_{\text{Ext}}$	48	0.015*	1.04



**Figura 3.** Productividad de la TAM en toneladas secas por hora productiva ( $\text{ts}\cdot\text{hp}^{-1}$ ) por el peso seco unitario extraído (kg) según el método. En naranja y puntos, BC; en verde y triángulos, S. Las líneas de tendencia son modelos lineales.

### 3.3. Modelos predictivos para la productividad de la TAM

Para predecir la productividad de la TAM, se elaboraron modelos predictivos con resultados de variables medidas en campo tras la aplicación del tratamiento (modelos 1, 3 y 5) o con valores estimados y/o decididos por los objetivos selvícolas (modelos 2, 4 y 6) (Tabla 6).

**Tabla 6.** Modelos predictivos para la productividad de la TAM dependiendo del método.

Modelo	Método	Nº obs <sup>a</sup>	Ecuación de productividad (ts·hp <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup> aj (%)	p-valor	MAE (ts·hp <sup>-1</sup> )
<i>Con variables medidas tras el tratamiento</i>						
1	Ambos	20	$-1.678 + 0.154 \cdot psu_{Ext} (kg \cdot pie^{-1}) + 0.148 \cdot ps_{Ext} (ts \cdot ha^{-1}) + 1.146 \cdot BC$	87.0	<0.001	0.35
3 <sup>b</sup>	S	9	$0.238 \cdot G_{Ext} (\%)^{0.213} \cdot psu_{Ext}^{0.949}$	96.5	---	0.19
5	BC	10	$\sqrt{-33.91 + 2.29 \cdot psu_{Ext} (ts \cdot ha^{-1})}$	93.3	---	0.25
<i>Con variables estimadas o decididas de antemano</i>						
2 <sup>b</sup>	Ambos	17	$0.950 + 0.0071 \cdot G_{Ext} (\%) \cdot psu_0 (kg \cdot pie^{-1}) + 1.035 \cdot BC$	76.7	<0.001	0.31
4	S	10	$0.418 + 0.0071 \cdot G_{Ext} (\%)^{0.44} \cdot psu_0 (kg \cdot pie^{-1})^{0.153}$	27.7	---	0.38
6 <sup>b</sup>	BC	8	$e^{(1.26+0.46 \cdot \sqrt{psu_0 (kg \cdot pie^{-1})})}$	88.2	<0.001	0.27

<sup>a</sup> psuext = peso seco unitario extraído, psex = peso seco extraído ó peso de la clara. Gext = Área basimétrica extraída en %, psu<sub>0</sub> = peso seco unitario inicial, BC = variable “dummy” para el método (BC=1, S=0).

<sup>b</sup> En el modelo 2, las unidades de estudio 11 (S), 14 y 20 (BC) se quitaron del modelo. En el modelo 3, la unidad 11 se excluyó debido a un residuo estudentizado alto (-4.52). En el modelo 6, las unidades 14 y 20 se excluyeron por tener también un residuo estudentizado alto.

Las mejores variables explicativas fueron, para S, la G extraída (GExt, %) junto con el psu (kg·pie<sup>-1</sup>), especialmente el psuExt frente al psu inicial estimado (psu<sub>0</sub>); mientras que, para BC, fueron el peso seco extraído (psExt, ts·ha<sup>-1</sup>) y psu<sub>0</sub> (kg·pie<sup>-1</sup>). Esto depende del funcionamiento de cada método: en S, el psu influye en el movimiento del cabezal, ya que es más fácil trabajar con una densidad menor y árboles más grandes, y la G extraída afecta a cuántos árboles deberán sortearse. Estas no afectan tanto en BC. Además, en BC por la misma cantidad de biomasa extraída se apean menos árboles, dejando una mayor densidad en pie que podría ser útil para disminuir el impacto del rebrote de *Q. pyrenaica* (Vericat *et al.*, 2012).

Los modelos 3, 4 y 5 son regresiones no lineales. El resto de modelos fueron ajustados por linealización y cambio de variable. Para los modelos 1 y 2, BC es una variable ‘dummy’, siendo 1 cuando se utiliza BC y 0 cuando S. Así, en estos dos modelos la productividad es 34–37 % mayor utilizando BC (fijando el resto de variables).

### 3.4. Costes y balance económico

Para calcular la productividad de la TAM en BC se utilizó el modelo 5, y para la de S se ajustó una nueva ecuación para comparar la productividad de la TAM y el coste entre métodos utilizando una misma variable explicativa:

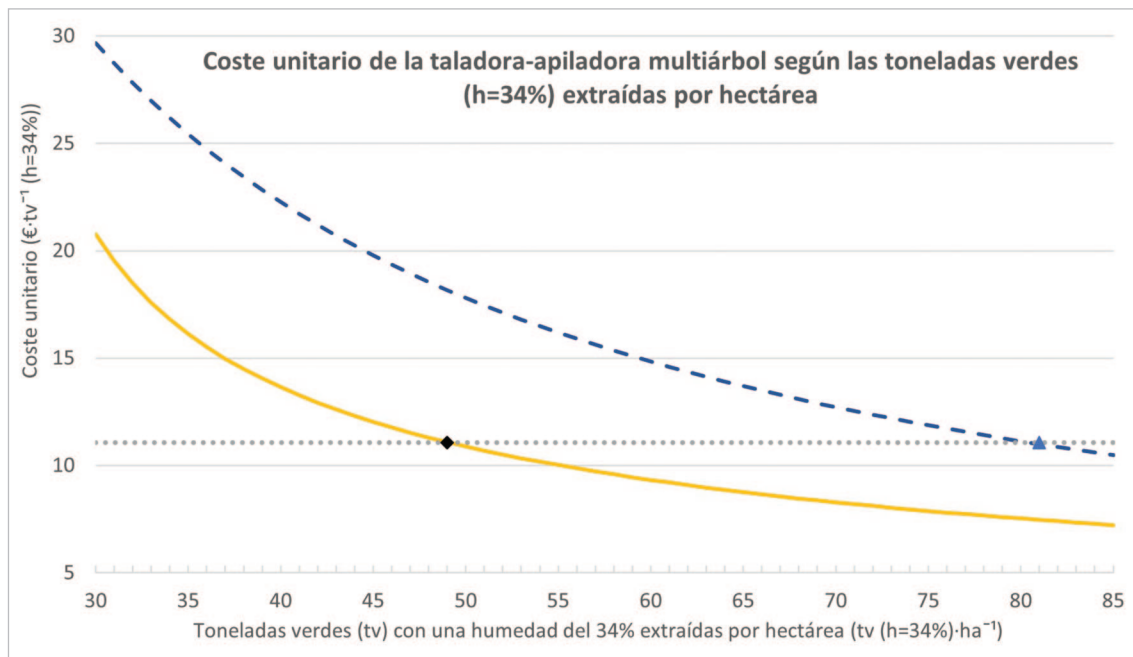
$$\text{Productividad de la TAM (ts} \cdot \text{hp}^{-1}) = 0.1196 \cdot ps_{Ext} (ts \cdot ha^{-1})$$

$$R^2(aj.) = 97.5\%; MAE (ts \cdot hp^{-1}) = 0.40$$

Atendiendo a los costes unitarios del autocargador, la astilladora y el transporte, los costes indirectos (13%) y el beneficio industrial (6%), el coste de la TAM debería ser  $11.07 \text{ €}\cdot\text{tv}^{-1}$  ( $h=34\%$ ) para que el balance económico sea cero (Figura 4). El balance económico comienza a ser positivo cuando se extraen  $49.13 \text{ tv}\cdot\text{ha}^{-1}$  en BC y  $81 \text{ tv}\cdot\text{ha}^{-1}$  en S.

**Tabla 7.** Precio y productividad de los diferentes elementos del proceso de obtención de biomasa. Valores medios. Toneladas verdes (tv) al 34% humedad.

Elemento	Coste horario ( $\text{€}\cdot\text{ht}^{-1}$ ) (Tolosana, 2007)	Productividad ( $\text{tv}\cdot\text{ht}^{-1}$ )	Coste unitario ( $\text{€}\cdot\text{tv}^{-1}$ )
TAM	90	Ver modelos	Ver Figura 4
Autocargador	60	7.9	7.6
Astilladora	120	16.7	7.2
Transporte (40 - 50 km)	-	-	10



**Figura 4.** Coste unitario ( $\text{€}\cdot\text{tv}^{-1}$  ( $h=34\%$ )) de la TAM según las toneladas verdes extraídas por hectárea (humedad del 34%). La línea sólida amarilla representa el coste unitario del método BC y la línea discontinua azul los del método S. La línea de puntos gris muestra el balance económico cero.

#### 4. Conclusiones

El método BC mostró un incremento de la productividad de la TAM del 48.6% respecto a S en monte bajo de *Q. pyrenaica* en las condiciones estudiadas, debido principalmente a un peso unitario medio de los pies extraídos 42% mayor en BC.

**Tabla 8.** Diferencias significativas entre métodos en el número de pies dañados antes y después de la saca. Medias con su mínimo y máximo en paréntesis y su desviación estándar en corchetes. (\*) indican una diferencia significativa entre medias al 95% probabilidad fiducial.

		Zona 1	Zona 2	p-valor	S	BC	p-valor	Inter.
Antes de la saca	Nº pies dañados por 100 m de calle	2 (0 – 6) [2]	3 (0 – 8) [3]	0.397	2.6 (0 – 8) [2.7]	2.4 (0 – 6) [2.3]	0.864	No
	Nº heridas por 100 metros de calle	3.0 (0 – 10) [3.6]	3.4 (0 – 10) [3.3]	0.808	3.2 (0 – 10) [3.2]	3.2 (0 – 10) [3.3]	1	No
Después de la saca	Nº pies·ha <sup>-1</sup> dañados	17 (0 – 40) [13]	32 (10 – 70) [19]	0.023*	34 (10 – 70) [19]	15 (0 – 30) [10]	0.006	No
	Nº heridas·ha <sup>-1</sup>	26 (0 – 70) [24]	38 (10 – 110) [30]	0.291	45 (10 – 110) [31]	19 (0 – 50) [15]	0.031*	No

Considerando el rango común para ambos métodos del peso seco unitario extraído, el incremento de se reduce a un 16–23% a favor de BC. Las mejores variables explicativas para la productividad de la TAM fueron, en S, el área basimétrica extraída ( $G_{Ext}$ , %) y el peso seco unitario extraído ( $psu_{Ext}$ ,  $kg \cdot pie^{-1}$ ); y en BC, el peso de la clara ( $ps_{Ext}$ ,  $ts \cdot ha^{-1}$ ).

En cuanto a los costes, BC es más económico y se vuelve rentable a un peso de clara menor que S ( $49 \text{ tv} \cdot ha^{-1}$  vs.  $81 \text{ tv} \cdot ha^{-1}$ ). No obstante, la productividad de BC podría aún no ser óptima para obtener una sostenibilidad económica en el actual mercado español.

Finalmente, sería interesante hacer el seguimiento del rebrote en las parcelas tratadas y observar la evolución de la masa con el objetivo de seguir investigando posibles tratamientos alternativos.

## 5. Bibliografía

- Becker, G.; Unrau, A.; 2018. Coppice Forests in Europe - A Traditional Landuse with New Perspectives. In A. Unrau, G. Becker, R. Spinelli, D. Lazdina, N. Magagnotti, V.-N. Nicolescu, P. Buckley, D. Bartlett, and P. D. Kofman (Eds.), *Coppice Forests in Europe* (pp. 18–21). Albert Ludwig University Freiburg.
- Bergström, D.; Bergsten, U.; Nordfjell, T.; Lundmark, T.; 2007. Simulation of geometric thinning systems and their time requirements for young forests. *Silva Fennica*, 41(1), 137–147. <https://doi.org/10.14214/sf.311>
- Bergström, D.; Bergsten, U.; Nordfjell, T.; 2010. Comparison of Boom-Corridor Thinning and Thinning From Below Harvesting Methods in Young Dense Scots Pine Stands. *Silva Fennica*, 44(4), 669–679. <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf444669.pdf>. <https://doi.org/10.14214/sf.134>
- Bergström, D.; Fernandez-Lacruz, R.; de la Fuente, T.; Höök, C.; Krajnc, N.; Malinen, J.; Nuutinen, Y.; Triplat, M.; Nordfjell, T.; 2022. Effects of boom-corridor thinning on harvester productivity and residual stand structure. *International Journal of Forest Engineering*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2058258>



- Cañellas, I.; del Río, M.; Roig, S.; Montero, G.; 2004. Growth response to thinning in *Quercus pyrenaica* Willd. coppice stands in Spanish central mountain. *Annals of Science*, 61, 243–250. <https://doi.org/10.1051/forest:2004017>
- di Fulvio, F.; Kroon, A.; Bergström, D.; Nordfjell, T.; 2011. Comparison of energy-wood and pulpwood thinning systems in young birch stands. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26(4), 339–349. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.568951>
- Ford-Robertson, J.B.; 1996. Estimating the net carbon balance of the plantation forest industry in New Zealand. *Biomass and Bioenergy*, 10(1), 7–10. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00047-X](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00047-X)
- González, V.; Tolosana, E.; Ambrosio, Y.; Laina, R.; Vignote, S.; 2014. *Manual de Mecanización de los Aprovechamientos Forestales*. Ed. Mundiprensa.
- Kärhä, K.; Jouhiaho, A.; Mutikainen, A.; Mattila, S.; 2005. Mechanized Energy Wood Harvesting from Early Thinnings. *International Journal of Forest Engineering*, 16(1), 15–25. <https://doi.org/10.1080/14942119.2005.10702504>
- Laina, R.; Tolosana, E.; Ambrosio, Y.; 2013. Productivity and cost of biomass harvesting for energy production in coppice natural stands of *Quercus pyrenaica* Willd. in central Spain. *Biomass and Bioenergy*, 56, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.016>
- Magagnotti, N.; Pari, L.; Spinelli, R.; 2012. Re-engineering firewood extraction in traditional Mediterranean coppice stands. *Ecological Engineering*, 38(1), 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.10.006>
- Moreno-Fernández, D.; Aldea, J.; Gea-Izquierdo, G.; Cañellas, I.; Martín-Benito, D.; (2021). Influence of climate and thinning on *Quercus pyrenaica* Willd. coppices growth dynamics. *European Journal of Forest Research*, 140(1), 187–197. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01322-3>
- Sängstuvall, L.; Bergström, D.; Lämås, T.; Nordfjell, T.; 2012. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27(1), 56–73. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>
- Schweier, J.; Spinelli, R.; Magagnotti, N.; Becker, G.; 2015. Mechanized coppice harvesting with new small-scale feller-bunchers: Results from harvesting trials with newly manufactured felling heads in Italy. *Biomass and Bioenergy*, 72, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.11.013>
- Spinelli, R.; Cacot, E.; Mihelic, M.; Nestorovski, L.; Mederski, P.; Tolosana, E.; 2016. Techniques and productivity of coppice harvesting operations in Europe: a meta-analysis of available data. *Annals of Forest Science*, 73(4), 1125–1139. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0578-x>
- Tolosana, E.; 2007. Informe técnico para la Junta de Castilla y León sobre comparación de aprovechamientos mecanizados y no mecanizados en Santa Colomba de Somoza. 68 págs.
- Tolosana, E.; Spinelli, R.; Aminti, G.; Laina, R.; López-Vicens, I.; 2018. Productivity, Efficiency and Environmental Effects of Whole-Tree Harvesting in Spanish Coppice Stands Using a Drive-to-Tree Disc Saw Feller-Buncher. *Croatian Journal of Forest Engineering Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 39(2), 163–172.
- Tolosana, E.; 2021. Madera en rollo (Roundwood). En “*La estructura económica del sector forestal en España 2000-2020*” (Economic Structure of Spanish Forest Sector 2000-2020) (pp. 27–41). Ed. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.
- Vericat, P.; Pique, M.; Serrada, R.; 2012. *Gestión adaptativa al cambio global en masas de Quercus mediterráneas* (Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Ed.).

Witzell, J.; Bergström, D.; Bergsten, U.; 2019. Variable corridor thinning – a cost-effective key to provision of multiple ecosystem services from young boreal conifer forests? *Scandinavian Journal of Forest Research*, 34(6), 497–507. <https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1596304>

