



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

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

Modelos de productividad y costes de la corta de plantaciones jóvenes afectadas por incendios y plagas con la taladora-empacadora FIXTERI FX-15A

TOLOSANA ESTEBAN, E.¹ y LAINA RELAÑO, R.¹

¹ E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. C/José Antonio Novais, 10. 28040 Madrid. Eduardo.tolosana@upm.es

Resumen

Se ha estudiado la taladora-empacadora Fixteri FX-15a con cabezal acumulador Nisula280E+ cortando dos eucaliptares gallegos, uno afectado por gonióptero y otro incendiado año y medio antes. Los métodos de seguimiento fueron GPS, registro automático de pesos/tiempo y partes de trabajo, además del cronometraje continuo en periodos más cortos. Las ecuaciones de productividad, mediante ajuste no lineal de modelos logarítmicos, identificaron como principales factores el tipo de corta y el peso por árbol. Causas de menor productividad en la masa quemada fueron el difícil manejo y empacado, la recolección menos eficiente y la mayor heterogeneidad (había zonas ya aprovechadas y otras inaccesibles). El cronometraje concluyó que el enfardado provoca al cabezal de apeo tiempos de espera considerables, y que la masa quemada registró un enfardado más lento y desplazamientos mayores. En ningún caso se alcanzó el balance positivo ingresos-costes, aunque en la masa atacada por gonióptero se redujo a -125 €/ha-1. Según las curvas de costes por hectárea vs. peso seco por árbol, la autofinanciación en el caso de afección por gonióptero se alcanzaría para más de 33 kg de materia seca por pie, mientras que, en la masa quemada, para más de 80 kg secos, lejos del rango observado.

Palabras clave

Biomasa forestal, árboles completos, cortas sanitarias, mecanización forestal, *Eucalyptus globulus*.

1. Introducción

Los problemas de desastres naturales de naturaleza biótica o abiótica que afectan a plantaciones forestales suponen un problema económico para los propietarios, dado que a menudo los incendios, enfermedades o plagas afectan a masas jóvenes, cuyo aprovechamiento resulta especialmente costoso mientras que el valor de la producción es reducido nulo.

Concretamente, el eucalipto blanco (*Eucalyptus globulus*) es una de las principales especies plantadas en Galicia, ocupando junto con *E. nitens* una superficie estimada en 422.000 ha en Galicia, incluyendo masas mixtas (Xunta de Galicia, 2021).

Uno de los principales problemas sanitarios que ha sufrido esta especie son los ataques de gonióptero (*Gonipterus platensis*), citado por primera vez en Galicia en 1991 y que afectó entre 2012 y 2014 a 164.000 ha con fracción de cabida cubierta mayor del 70% en Galicia, 17.500 de ellas con grados de afectación severos (2 y 3), de acuerdo con el Grupo Operativo GOSSGE (2018). Los problemas sanitarios de esta especie son una de las principales causas de su sustitución por la más resistente *E. nitens*.

Por otro lado, los incendios forestales han sido un problema históricamente en Galicia. Concretamente, en 2017 hubo una situación crítica, sólo en unos pocos días de octubre ardieron más de 35.000 ha, alcanzándose en el conjunto del año una superficie quemada de más de 50.000 ha (Díaz-Fierro, 2020).

Uno de los principales destinos de los árboles de pequeño tamaño afectados de forma severa por estos problemas es la biomasa para uso energético. Existen tecnologías que permiten combinar el apeo y el empacado de árboles completos, que son una posible alternativa para estas situaciones, como es el caso de la taladora-empacadora Fixteri que se decidió ensayar en el seno del grupo operativo BIOFORE en primavera de 2019 en dos masas afectadas, respectivamente por un ataque severo de goniíptero y por los incendios de octubre de 2017.

De acuerdo con Bergström *et al.* (2015), el primer prototipo de taladora-empacadora de árboles completos para aprovechamiento de pies de pequeño tamaño fabricada por Fixteri OY fue probado en Finlandia en 2007 (Jylhä y Laitila 2007), este primer estudio mostró que la productividad del empacado se veía limitada por el hecho de que las fases de apeo y empacado sólo se producían de forma simultánea entre un 8 y un 18% del tiempo de trabajo efectivo. Se concluyó que el desarrollo estudiado no era competitivo con las máquinas y sistemas de aprovechamiento convencionales, si bien el concepto tenía un gran potencial de desarrollo futuro.

Se estudió un segundo prototipo en 2009 (Kärhä *et al.* 2009; Nuutinen *et al.* 2011); la productividad se había incrementado entre un 38 y un 77% comparado con el primero, gracias a la mayor capacidad de corta y acumulación en el cabezal y a las mejoras hidráulicas en la unidad de empacado, que aumentaron la posibilidad de ejecutar simultáneamente al apeo y el empacado.

Se lanzó al mercado una tercera versión del sistema de empacado “Fixteri”, La FX-15a, en 2013 y su eficiencia (tiempo por paca) tras su implementación en la máquina combinada (taladora-empacadora) creció entre un 90 y un 160% en comparación con las versiones anteriores (Björheden y Nuutinen, 2014).

Una de las ventajas de esta tecnología, que se considera preferible a las alternativas en los Países Nórdicos para tamaños de árbol de diámetro normal entre 7 y 14 cm (Kärhä *et al.*, 2011) o volúmenes entre 30 y 85 dm³ (Bergström y Di Fulvio, 2014; Ala-Varvi y Ovaskainen, 2013), es el abaratamiento del coste de extracción en autocargador (Laitila *et al.*, 2009; Kärhä *et al.*, 2009; Ala-Varvi y Ovaskainen, 2013) y de transporte a largas distancias (Fernández-La Cruz y Bergström, 2015), así como la elevada productividad media del astillado de pacas (Kons *et al.*, 2015; Nuutinen *et al.*, 2015); según Nuutinen *et al.* (2016) la productividad del astillado de pacas es entre 1.5 y 3.2 veces mayor que la de material no empacado.

El apeo y empacado mecanizados que han sido objeto de estudio se han producido en dos montes. En uno de ellos - Monte Coto Muiño, perteneciente a Zas (A Coruña) - se trataba de una masa de *Eucalyptus globulus* afectada por un ataque severo de goniíptero, en que se ha practicado una corta a hecho orientada a su posterior sustitución por una nueva plantación de *E. nitens*. Este monte se dividió en dos estratos de condiciones dasométricas ligeramente distintas (Coto Muiño 1 y 2). En el otro monte, La Ermida, perteneciente a Pazos de Borbén (Pontevedra), el tratamiento correspondía a una corta a hecho tras un incendio acaecido en octubre de 2017, afectando a una masa con predominio de *E. globulus*, pero con rodales de pino, por lo que inicialmente se decidió el estudio por separado del rendimiento en las masas incendiadas de ambas especies, definiendo por tanto un estrato de pino y otro de eucalipto. No obstante, el mal estado de los pinos un año y medio después del incendio hizo imposible la recolección de biomasa por el procedimiento ensayado, por lo que finalmente sólo se estudió el aprovechamiento de eucalipto en este segundo monte.

La tecnología ensayada fue una unidad empacadora de árboles completos Fixteri FX-15a y el cabezal talador acumulador Nisula280E+ (Nisula Forest Oy) que estaban montados en una máquina base de 125 kW Logman 811 FC con una grúa telescópica Logmer C140-11 que permite el apeo de varios pies sin desplazamiento de la citada máquina base.

Las pacas fueron extraídas mediante un autocargador Valmet 840.3 de seis ruedas motrices, con un peso en vacío de 13,9 t y una capacidad de carga teórica de 12 t, con una potencia de 125 kW hasta los cargaderos donde se produjo su astillado y/o carga en camión. A efectos de cálculo de costes de desembosque, se ha estimado una distancia de desembosque máxima de 400 m.

2. Objetivos

El principal objetivo es la evaluación de esta tecnología mediante técnicas de estudios de tiempos y rendimientos, analizando el trabajo de la máquina y desarrollando modelos de productividad y costes en función de los parámetros de masa que se encuentren como factores explicativos de la productividad.

3. Metodología

Se diseñó un inventario previo para caracterizar las masas antes de la intervención en cuanto a sus parámetros dasométricos. En el monte Coto Muiño, dada la abundancia de matorral (tojo) y la inmediatez en la ejecución de los tratamientos, se optó por tomar dos submuestras de 30 pies en cada una de las dos zonas del monte en que se midió el diámetro en el tocón, el diámetro normal y la altura total, con el fin de definir relaciones dendrométricas que permitiesen, a partir de un inventario de tocones a posteriori, definir la distribución diamétrica inicial de la masa. Posteriormente a la intervención, se llevó a cabo un inventario de tocones en las zonas intervenidas de ese monte, midiéndolos en 70 parcelas de 4 m de radio situadas en los vértices de una malla cuadrada de 50 m de lado. En el Monte de La Ermida, también se ajustó una curva altura-diámetro, en este caso durante el inventario previo que permitió medir directamente alturas y diámetros normales en una muestra de 71 parcelas de 8 metros de radio.

Para la estimación de los pesos de biomasa por parcela, que servirían para estimar el peso medio por árbol y el peso por hectárea, se aplicaron sobre esas distribuciones de diámetros normales y alturas las curvas de peso para el eucalipto blanco ajustadas para masas de primer turno del norte de Galicia y Asturias sobre datos de Brañas *et al.* (2000), referidas en Diéguez Aranda *et al.* (2009). Se decidió aplicar las curvas para los distintos componentes de la biomasa excepto las hojas para el caso de las masas defoliadas por el goniíptero en Coto Muiño, y excluir como parte de la biomasa las hojas, ramillas y ramas de más de 2 cm de diámetro, dado que se observó que se habían perdido en su mayoría en las masas quemadas de La Ermida.

Durante los inventarios, se tomaron muestras de humedad y se secaron en estufa siguiendo la norma UNE-EN 14774-1:2010 en los Laboratorios de la Escuela de Ingeniería Forestal de Pontevedra (Universidad de Vigo).

El trabajo de la máquina se ha seguido a través de cuatro metodologías complementarias, tres de ellas continuas y (al menos en teoría) continuadas durante todo el funcionamiento de la máquina y otra intensiva, con una observación presencial mediante cronometraje por un miembro del equipo investigador durante una jornada completa de trabajo. Las tres metodologías de seguimiento continuo han sido las siguientes:

- Equipación de la máquina con un GPS Garmin Etrex para controlar las zonas de trabajo diarias (lo que permite asociar dichas zonas con parcelas de inventario y poder intentar relacionar variables dasométricas con la productividad).
- Seguimiento automático de la producción a través del programa WNexus, que sube las pesadas de cada paca a la nube junto con el momento exacto de cada pesada. Este procedimiento ha permitido un seguimiento bastante detallado en estudios previos sobre esta misma máquina (Tolosana y Laina, 2018). El resultado de esta estimación se denota como Rendimiento 1.

- Seguimiento mediante partes diarios de trabajo por el maquinista, que registraba, a partir del ordenador de a bordo de la máquina, la suma de las pesadas de las pacas producidas en cada jornada y el número de cortes producidos por el cabezal, que al ser masas de primera plantación, coincide de forma muy aproximada con el número de pies. El resultado de esta estimación se llamará Rendimiento 2.

El segundo de los métodos (Rendimiento 1) dio problemas relevantes especialmente en el estrato 1 de Coto Muiño, porque el programa no funcionó correctamente durante los días de trabajo y no se subieron todas las pacas producidas, si bien los datos subidos permiten obtener una estimación global del rendimiento sobre tiempo de trabajo efectivo E15 (incluyendo interrupciones o desplazamientos de menos de 15 minutos) en cada uno de los estratos considerados.

El rendimiento medio sobre tiempo de trabajo total (incluido tiempo de desplazamiento) se ha podido obtener para cada zona y para cada día de trabajo a partir de las notas del maquinista, Teemu Karkkainen, basadas a su vez en los sistemas de medición automática de la máquina y sus resúmenes diarios (Rendimiento 2).

Para el desarrollo de ecuaciones predictivas de productividad, se asumió, dada la importante diferencia de rendimiento a favor de la zona afectada por la plaga frente a la masa quemada, se adoptó como factor explicativo (variable “dummy”) el hecho de que se tratara de la zona quemada o no, y además se procedió a buscar otros factores que pudieran explicar la productividad: se analizaron como posibles variables explicativas la densidad de masa, el peso de corta (t de materia seca o m.s. por ha, de acuerdo con el inventario), el diámetro normal medio y la altura media, de acuerdo también con el inventario, el peso medio por pie – kg de m.s. por árbol, obtenido aplicando las ecuaciones de peso de biomasa mencionadas a los datos del inventario – y el peso medio por pie obtenido de dividir el peso total diario pesado por la máquina, quitándole la humedad, por el número de cortes contabilizados por la máquina por día, que se asimilaron al número de árboles, dado que se trataba de brinzales en su inmensa mayoría.

Hay que señalar que para este ajuste sólo se pudieron utilizar los datos de 23 días de trabajo. Se desecharon por ofrecer unos resultados anómalos los días 5 de abril (Coto Muiño) y 26 de abril (La Ermida) en que la máquina hizo largos recorridos sin trabajar – en el segundo caso, se limitó a repasar el perímetro –, haciendo muy pocos cortes en relación con el tiempo de trabajo, que fue básicamente de desplazamiento.

El estudio de tiempos detallado (por cronometraje *in situ*) incluyó la medición con estadillo y reloj del tiempo de trabajo de la máquina. Se empleó la técnica de cronometraje discontinuo, que consiste en anotar sobre un estadillo la tarea elemental que está ejecutando la máquina cada minuto.

Se consideró la taladora-empacadora Fixteri como 3 máquinas trabajando a la vez, esto es:

- Unidad de apeo, que es la grúa y cabezal cortador.
- Unidad de alimentación, que incluye la bandeja y rodillos de alimentación, más la guillotina.
- Unidad de enfardado que incluye el enfardado pesado y descarga de la paca.

El objeto de esta división es identificar si la capacidad de trabajo de cada unidad de trabajo está alineada con el resto y si existe algún cuello de botella. Otro objetivo de la aplicación de esta metodología es evaluar la distribución del tiempo productivo en sus tareas elementales e identificar tareas de alto coste de tiempo. Finalmente, este análisis, más preciso que los descritos antes, permite ver si las diferencias de productividad entre las zonas de trabajo son estadísticamente significativas y explorar algunos motivos de la posible diferencia.

La eficiencia en la recogida sólo se pudo evaluar en el monte de La Ermita, dado que en Coto Muiño, en el momento de iniciar el inventario de restos y de daños, los gestores ya habían ejecutado el desbroce para la posterior plantación, por lo que no se pudo muestrear como estaba previsto.

En el monte de La Ermita, se recogieron los restos de corta de 7 parcelas de inventario de 4 m de radio en que se pesaron los materiales gruesos y finos existentes, tomándose muestras para estimación de humedad en estufa en todas ellas, por separado de los elementos gruesos y finos.

En cuanto a la evaluación de costes, dado que las máquinas cobraban por horas, se adoptaron esos costes de alquiler como costes horarios de supuestas máquinas subcontratadas. El cociente entre costes horarios y rendimientos horarios (sobre la base de horas de trabajo) permitió la estimación de costes unitarios y la conversión de las ecuaciones predictivas de productividad en ecuaciones de costes (o de balance económico unitario, si se consideran los ingresos por la venta de las pacas de biomasa y el resto de costes – transporte, costes generales y beneficio industrial -. El conocimiento del peso de biomasa por hectárea permitió desarrollar curvas de balance económico en €/ha, pudiendo analizar los límites de la posible autofinanciación de estos tratamientos sanitarios.

4. Resultados

Las características dasométricas de los tres estratos estudiados (Coto Muiño 1 y 2 y La Ermita) se muestran en la Tabla 1. En esta tabla se reflejan también las producciones totales, tanto las estimadas mediante el inventario y la aplicación de ecuaciones de peso como los valores reales pesados por la unidad empacadora de la propia máquina. Se puede apreciar que la estimación inventarial da lugar a una sobreestimación acusada del peso real, que en parte puede deberse a la pérdida de material – en La Ermita, se midió la eficiencia y se quedaba en el suelo el equivalente a un 14% del peso total de biomasa – pero también a la tendencia a sobreestimar por las ecuaciones utilizadas.

Tabla 1. Resumen de condiciones dasométricas, producciones y productividades de los estratos estudiados

Monte/variable	Superficie poblada equivalente	Diámetro normal, cm	Altura total, m	N, pies/ha poblada	Peso extraído estimado, t de m.s./ha	Peso seco estimado por pie, kg m.s.
Coto Muiño 1	7,75	9,1	10,9	1232	25,3	20,5
Coto Muiño 2	9,75	12,0	14,4	893	23,6	29,5
La Ermita	17,75	12,4	10,5	775	24,8	32,0
Monte /variable	Humedad biomasa, % base húmeda	Peso verde por pie, kg	Peso extraído, t verdes/ha estimadas	Peso estimado, t verdes total	Peso extraído, tv (pesadas por máquina)	Productividad media, tv/t de m.s. por Htrab
Coto Muiño 1	52,0	42,8	52,7	409	244	6,37/3,06
Coto Muiño 2	52,0	61,4	54,8	534	420	7,20/3,47
La Ermita	33,8	48,4	37,5	665	265	3,63/2,40

La diferencia de productividad entre la masa quemada y la afectada por la plaga, a favor de esta última, se puede achacar a la mayor dificultad de manejo y empacado del material quemado, más seco, que además se acompaña de una menor eficiencia en la recogida, pero también a una menor densidad y mayor heterogeneidad de la masa quemada, porque había sido parcialmente aprovechada (las zonas con madera utilizable por la industria) y porque tenía zonas cuya pendiente y pedregosidad impedían el acceso de la taladora-empacadora.

El seguimiento de la máquina se realizó por diversos métodos (GPS, registro automático por la máquina y partes de trabajo del maquinista), que condujeron a identificar, como principales variables que condicionan la productividad, la diferencia entre montes (entre una masa quemada y parcialmente aprovechada y una masa afectada por el gonióptero pero intacta, a favor de esta última en términos de productividad) y el peso por árbol. Para caracterizar esta última variable, se utilizó el peso medio diario aprovechado medido por la máquina (peso de las pacas/número de cortes) y el peso medio estimado por las parcelas correspondientes a cada día, aplicando las ecuaciones de peso de biomasa. Esta última forma de estimar el peso medio por pie dio peores resultados, sobreestimando en general los pesos medios medidos.

Las ecuaciones de productividad obtenidas, mediante ajuste no lineal de modelos logarítmicos, fueron las siguientes:

Para la zona afectada por el gonióptero:

$$\text{ProductividadPs (t de m.s./HTrab)} = -0,711 + 1,328 \log (\text{PsUnit, kg aprovechados de m.s./pie})$$

$$R^2 \text{ (ajustada por g.l.)} = 82,6 \text{ por ciento}$$

$$\text{Error medio absoluto} = 0,18 \text{ t de m.s./Htrab}$$

Para la masa quemada:

$$\text{ProductividadPs (t de m.s./HTrab)} = -1,573 + 1,218 \log (\text{PsUnit, kg aprovechados de m.s./pie})$$

$$R^2 \text{ (ajustada por g.l.)} = 16,7 \text{ por ciento}$$

$$\text{Error medio absoluto} = 0,26 \text{ t de m.s./Htrab}$$

Estas ecuaciones se representan en las Figuras 1 y 2.

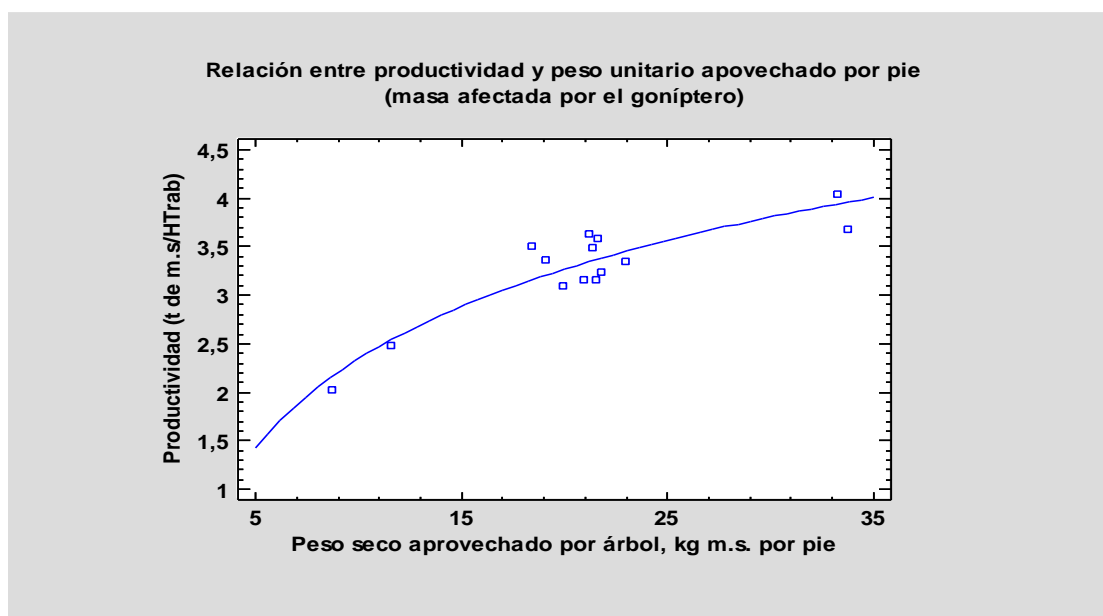


Figura 1. Modelo logarítmico de productividad para masas homogéneas y afectadas por plagas en función del peso seco aprovechado por árbol.

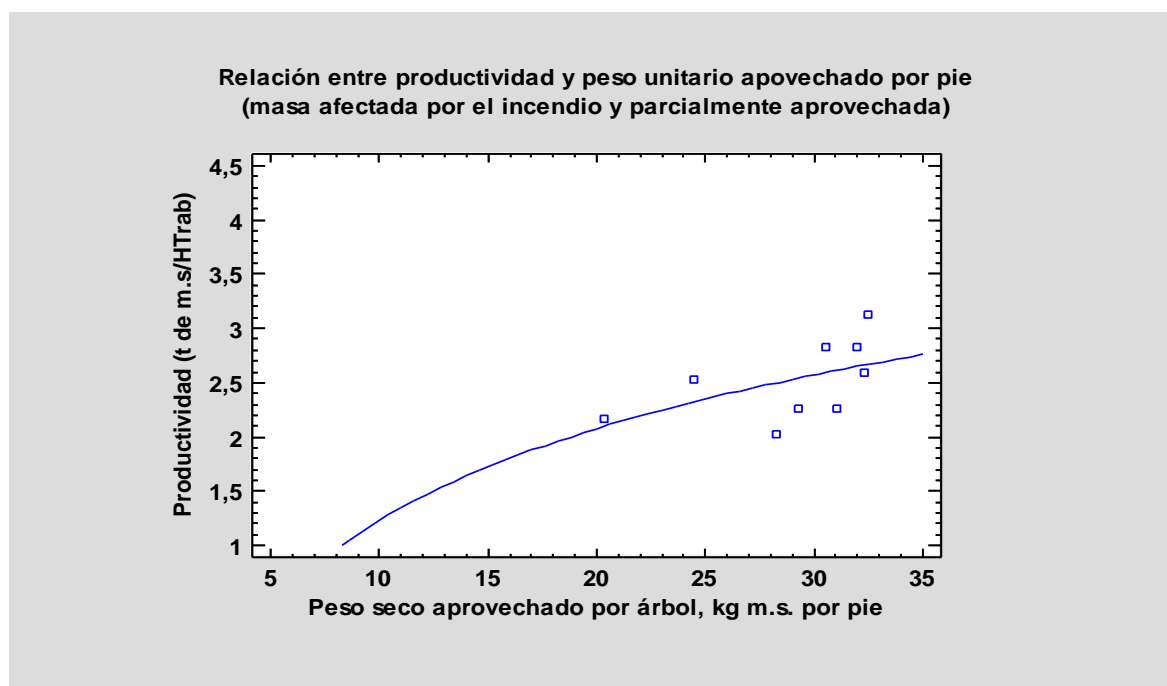


Figura 2. Modelo logarítmico de productividad para masas heterogéneas incendiadas y parcialmente aprovechadas en función del peso seco aprovechado por árbol.

Aunque las ecuaciones predictivas descritas se pueden considerar satisfactorias en cuanto a sus parámetros de ajuste, tienen el inconveniente de que la variable explicativa no es fácilmente previsible con antelación usando las herramientas habituales (datos de inventario y ecuaciones de cubicación o de peso de biomasa).

Por ese motivo, se optó por intentar el ajuste empleando los datos de peso por árbol estimados con las ecuaciones mencionadas aplicadas sobre los datos de inventario. Como se recordará, se aplicaron estas ecuaciones excluyendo las de peso de hojas en la masa afectada por el gonióptero, y excluyendo también las ramas finas en la masa quemada, dado que muchas de ellas se habían desprendido.

El peso medio estimado por el inventario, aun así, era claramente mayor al conseguido realmente por la máquina. Esto puede deberse a la pérdida de parte de la biomasa por su manipulación, aunque tampoco se pueden excluir errores en la estimación por las ecuaciones utilizadas, que no se ajustaron en la zona geográfica de los montes estudiados – al menos en el caso de Pontevedra –.

El ajuste de curvas de regresión lineales sin término independiente entre los pesos medidos por la máquina y los estimados por el inventario arrojó que los primeros fueron, en Coto Muiño, como media un 86% de los segundos, frente a un 84% en La Ermida.

En todo caso, los resultados de la regresión de la productividad en función del peso seco unitario arrojado por el inventario y la aplicación a sus resultados de las ecuaciones de peso utilizadas se refleja en la Figura 3. La comparación de los gráficos de los modelos obtenidos parece indicar una menor sensibilidad de la productividad al peso seco unitario estimado mediante el inventario y las ecuaciones de peso frente al peso unitario medio realmente medido por la máquina, por la menor pendiente de las rectas en el primer caso.

Las ecuaciones resultantes para cada caso son, cuando Quemado=0 (masa afectada por el gonióptero):

Productividad (t m.s./Htrab) = $2,812 + 0,0177 \cdot \text{PsUnitario}$ (inventario), kg m.s./pie

Cuando Quemado=1 (masa quemada y parcialmente aprovechada), el modelo es:

Productividad (t m.s./Htrab) = $2,082 + 0,0116 \cdot \text{PsUnitario}$ (inventario), kg m.s./pie

R-Cuadrada = 50,0 porciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 41,1 porciento

Error estándar del est. = 0,45

Error medio absoluto = 0,30 t de m.s./Htrab

Estadístico Durbin-Watson = 1,64 (P=0,16)

Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,147

Los resultados del estudio de tiempos detallado (por cronometraje) se reflejan en la Tabla 2.

En cuanto al análisis detallado del trabajo por cronometraje, condujo a las siguientes conclusiones:

- La unidad de alimentación supone un cuello de botella para la unidad más productiva, que es la grúa equipada con el cabezal de apeo acumulador. Los tiempos de espera del cabezal oscilaron entre el 30% en la masa afectada por la plaga y el 34% en la masa quemada.

- El enfardado resultó mucho más complicado en la masa quemada que en la afectada por la plaga. De hecho, el tiempo de inactividad de la unidad de enfardado fue del 49% en la masa atacada por el góniptero, y sólo del 30% en la masa quemada.

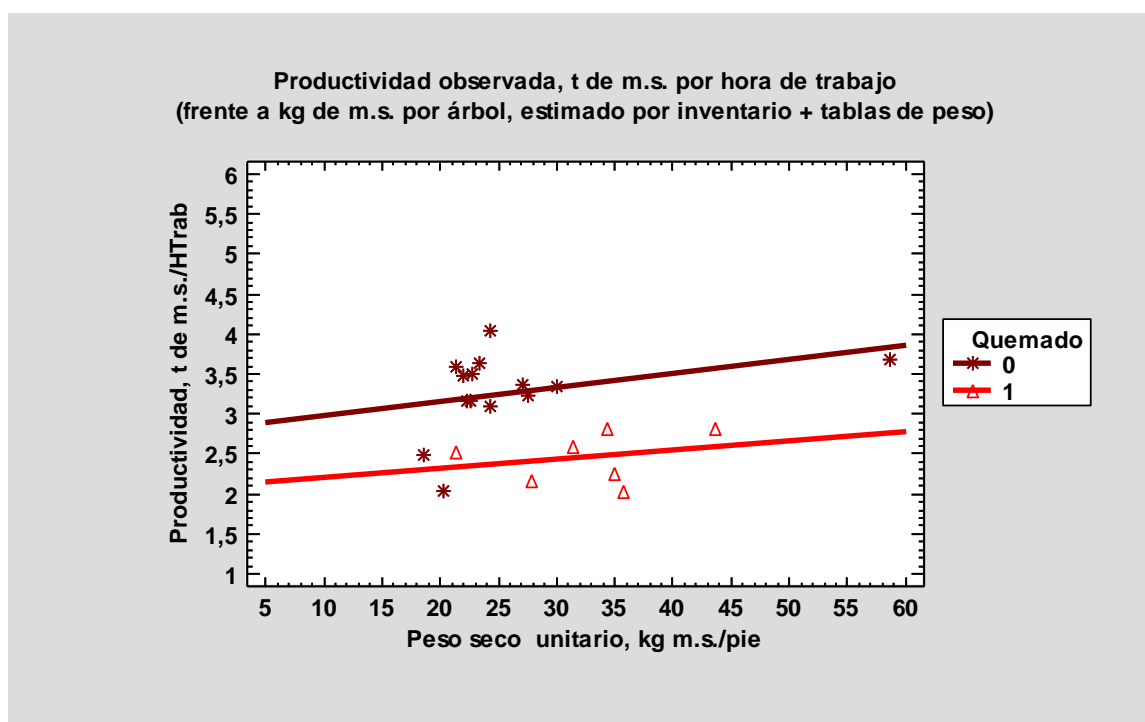


Figura 3. Modelos lineales de productividad para masas homogéneas y afectadas por plagas (línea marrón) y para masas incendiadas (línea roja) en función del peso seco por árbol estimado por inventariación y aplicación de ecuaciones de peso de biomasa.

Tabla 2. Distribución de tiempos de las tres sub-unidades en ambos montes.

Suma total por intervalos		COTO MUIÑO	LA ERMIDA
		Distribución (%)	
Desplazamiento de la máquina		12%	N.D.
Unidad Cabezal cortador	En vacío hacia el árbol	13%	13%
	Apeo	33%	28%
	Alimentación	19%	21%
	Colocación pacas	3%	3%
	Espera	30%	34%
	Otros productivos	2%	1%
	No productivo	0%	1%
	Otros	0%	1%
Unidad Alimentación	Alimentación (*)	51%	48%
Unidad Compactado enfardado	Enfardado (*)	51%	70%
	No productivo	2%	4%
	Total Pacas	182	84
	Tiempo productivo por paca (min/paca)	3,1	4,7
Tiempo total cronometrado (HH:MM:SS)		11:52:56	6:38:00

(*) El tiempo que esta unidad productiva está parada, esperado a las demás es el % complementario a 100.

- El tiempo productivo por paca fue significativamente mayor en la masa quemada, reflejando esta complicación de manejo, alcanzando una media de 4,7 minutos de tiempo productivo por paca, frente a medias de 3,06 y 3,10 minutos por paca en los dos estratos afectados por el goniptero.

- Además, la heterogeneidad de la masa quemada, con zonas inaccesibles o ya aprovechadas, condujo probablemente a mayores desplazamientos, lo que se refleja parcialmente en que los tiempos de trabajo no productivos fueron dobles en la masa quemada (del 4% frente a sólo el 2% en la masa afectada por la plaga) y en el peso por metro recorrido, significativamente menor que en la zona afectada por la plaga.

En cuanto al análisis de costes, se partió de los siguientes supuestos:

- Coste horario de alquiler de la taladora-empacadora: 120 €/hora de trabajo
- Coste horario del autocargador Valmet 840.3 de seis ruedas motrices: 55 €/hora de trabajo
- Capacidad de carga de pacas (tv/viaje) del autocargador: 12 t/ciclo (ENCE, 2019)
- Distancia máxima de desembosque: 400 m
- Peso medio de la corta: 50 tv/ha
- Rendimiento estimado del desembosque (Tolosana, 2017): 10,38 tv/hora de trabajo (5,19 t de m.s./hora de trabajo para una humedad del 50% en base húmeda)
- Costes generales (% de los costes directos del aprovechamiento): 10%
- Coste de transporte de pacas a distancia moderada (<50 km): 6 €/t verde
- Beneficio industrial de la empresa suministradora: 12,5%

- Coste de astillado de las pacas en fábrica (astilladora eléctrica fija): 3 €/t verde - al 30% de humedad, base húmeda -
- Precio de la astilla al 30% de humedad, base húmeda: 48 €/tonelada

Bajo estos supuestos, se construyeron curvas de costes unitarios de apeo y empacado, por separado para las masas afectadas por el goniptero y para las masas quemadas y parcialmente aprovechadas, utilizando como variables el peso seco aprovechado por árbol y el peso seco estimado mediante inventario y aplicación de las mencionadas ecuaciones de peso (Figuras 4 y 5). Estos costes se sumaron al resto de costes de aprovechamiento, transporte, astillado, costes generales y beneficios de la empresa de suministro, y se compararon con los ingresos por venta de la astilla.

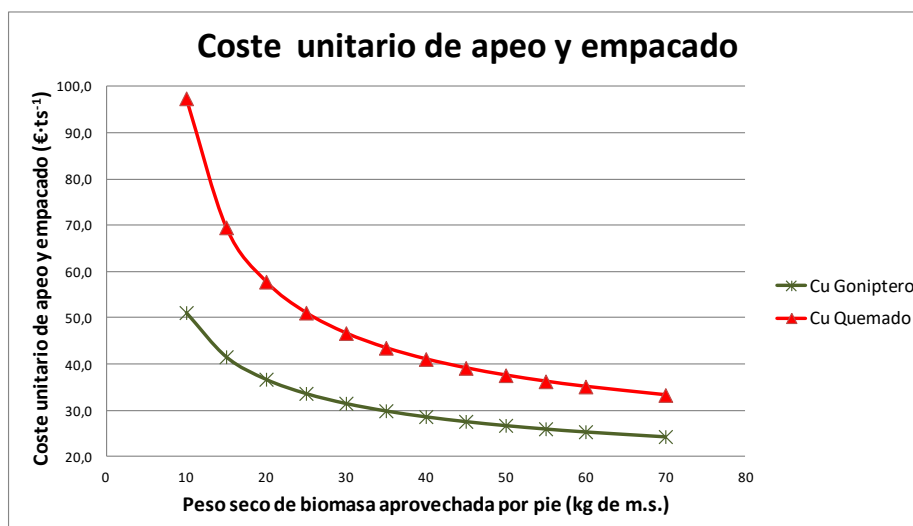


Figura 4: Costes unitarios de apeo y enfardado en función del peso real aprovechado por pie.

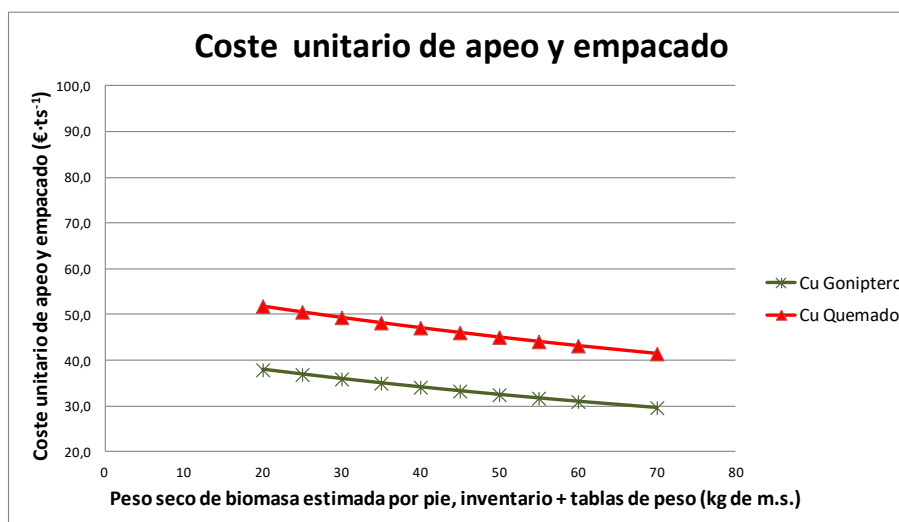


Figura 5: costes unitarios de apeo y empacado en función de los pesos estimados por inventariación y aplicación de tablas de peso.

En ninguno de los dos casos estudiados resultó un balance positivo en términos unitarios. Teniendo en cuenta los pesos de corta observados (18,2 t de m.s. por ha en la masa afectada por el goniptero y 9,9 t de m.s. por ha poblada en la zona incendiada), los costes de los tratamientos se estimaron en 125 €/ha en la zona afectada por la plaga y 255 €/ha en la zona incendiada.

Se construyeron curvas de costes por hectárea para ambas circunstancias (Figuras 6 y 7). Si se emplea como variable el peso seco aprovechado por árbol (medido por la máquina), el equilibrio de costes – autofinanciación – en masas afectadas por el goníptero se alcanza para 33 kg de m.s. aprovechada por pie, unos 66 kg de biomasa aérea aprovechada, mientras que la autofinanciación se alcanzaría en masas quemadas para pesos superiores a los 80 kg de m.s. por pie.

Si se emplea como variable el peso seco por pie estimado por los inventarios seguidos de la aplicación de las curvas de peso, se obtienen límites más elevados. La autofinanciación en masas afectadas por el goníptero se alcanza para un peso seco unitario de 63 kg/pie (un peso verde de biomasa aérea de 126 kg/pie) y la autofinanciación no se alcanzaría para las masas quemadas y parcialmente aprovechadas dentro del rango de pesos considerado.

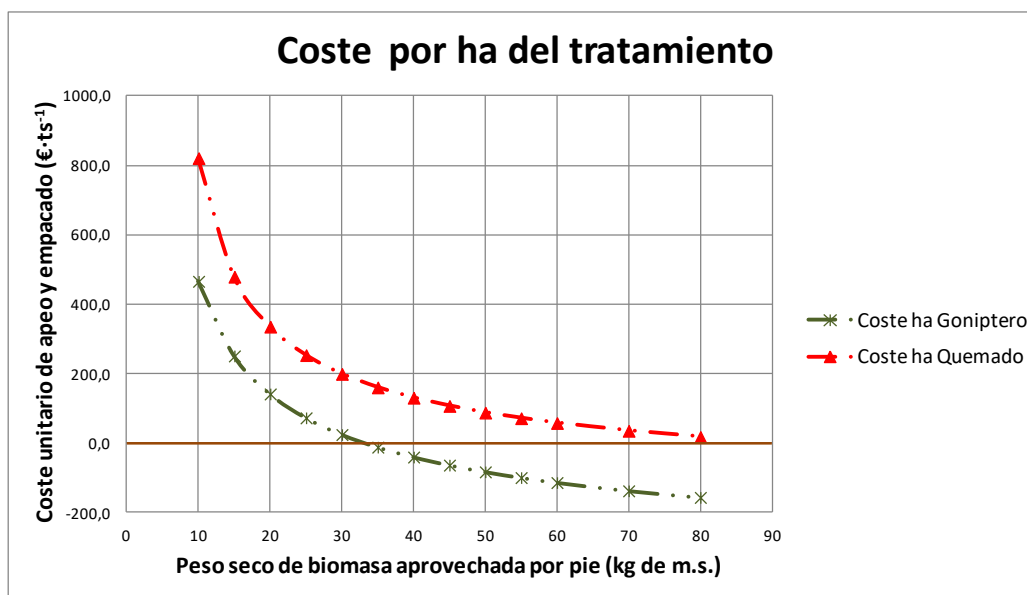


Figura 6. Coste por ha del tratamiento en función del peso seco realmente aprovechado por pie.

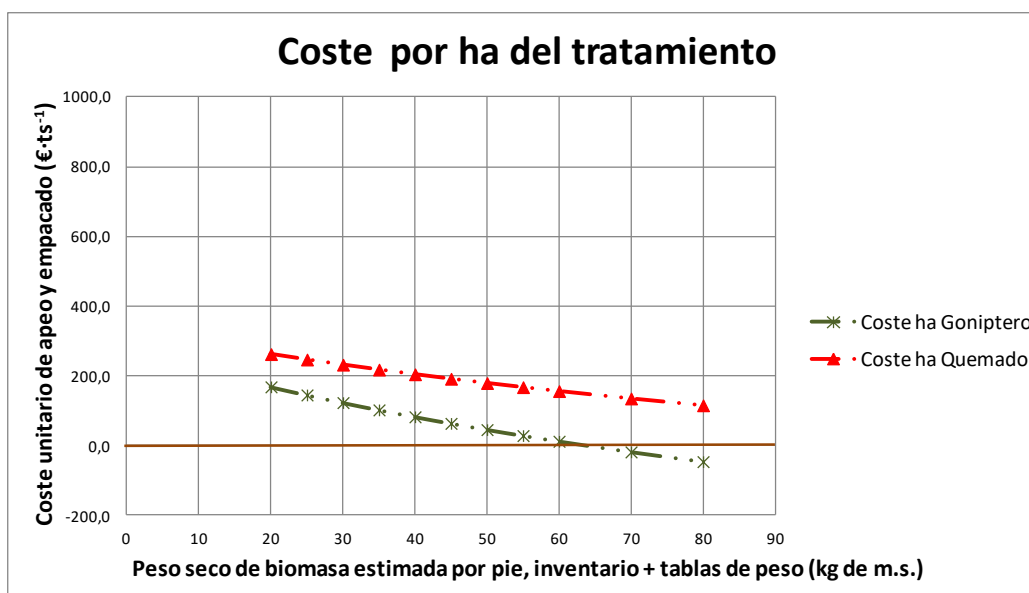


Figura 7. Coste por ha del tratamiento en función de los pesos secos estimados por árbol en base a los datos de inventario y la aplicación de las tablas de peso seco de biomasa.

5. Discusión

El tamaño de los árboles (diámetro normal, volumen o peso unitarios) es la variable explicativa más común en las ecuaciones de productividad de apeo y apilado (Spinelli *et al.* 2016; Schweier *et al.* 2015; Spinelli *et al.* 2007; Visser and Spinelli, 2012; Erber *et al.* 2017; Chakroun *et al.* 2016; Ghaffariyan *et al.* 2019). En el presente estudio se ha encontrado también relación significativa con el peso de la extracción (peso por hectárea o área basimétrica extraídos, en este caso expresada en porcentaje), como en otros estudios (Spinelli *et al.* 2016; Tolosana *et al.* 2018).

Para discutir los resultados obtenidos, se ha comparado los modelos de productividad ajustados con otros, ajustados por el mismo equipo con la misma máquina en Riudarenes (Girona) en 2018 en el tratamiento de plantaciones (aproximadamente un 75% de pino y 25% de eucalipto) en un entorno de masas mixtas de frondosas mediterráneas con matorral y un 16% de pendiente media (Tolosana y Laina, 2018).

Se han incorporado referencias de dos estudios recientes sobre la misma máquina, en Suecia y Finlandia, en ambos casos sobre pinares con cierta proporción de abedul en Suecia (Bergström *et al.*, 2015) y distintas proporciones de sotobosque en Finlandia (Nuutinen y Björherden, 2016).

Para unificar unidades se ha supuesto que la densidad de los fardos de pino es de 385 kg de materia seca por metro cúbico sólido de biomasa (relación entre el peso de las pacas y el volumen sólido de pacas de pino producidas en el estudio de Nuutinen y Björherden), que el coeficiente de utilización (tiempo productivo sobre tiempo de trabajo) es de un 89,0 % (Tolosana y Laina, 2018), que el coeficiente de utilización (tiempo de trabajo sobre tiempo de actividad) es del 83,7 % (Tolosana y Laina, *Op. cit.*). En la ecuación de Girona, que se refiere a cortas selectivas, se ha supuesto que el porcentaje de área basimétrica extraída es del 100% - para comparar con las cortas a hecho de Galicia -.

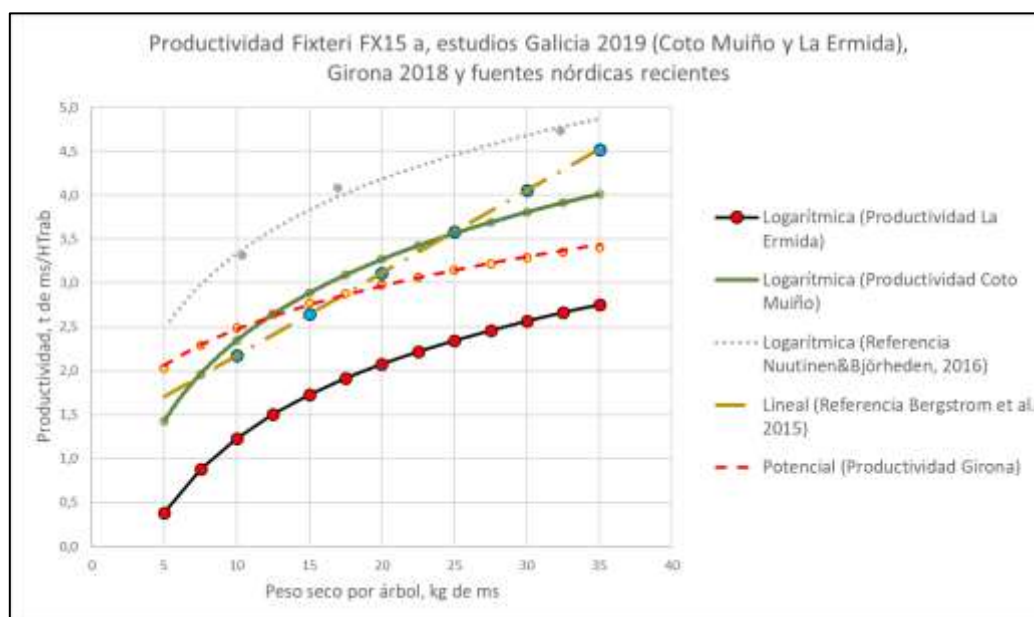


Figura 8. Comparación de los modelos de productividad ajustados con otros estudios.

Los resultados de productividad en t de m.s. por hora de trabajo en Coto Muiño son muy próximos a los del estudio de Bergström *et al.* (2015). Sin embargo, resultan inferiores a los del estudio de Nuutinen y Björherden (2016), entre 0,86 y 1,05 t de m.s. menos por hora de trabajo (Figura 8).

La productividad en esta masa afectada por goníptero, al menos para pesos de más de 13 kg secos por pie, son superiores a los obtenidos en Girona. Es normal que los resultados de Girona fueran inferiores a los de Coto Muiño, dado que la masa era mucho más heterogénea y la intervención tuvo un patrón poco sistemático (sin calles de desembosque). También tiene sentido que la productividad en Girona sea mayor para diámetros pequeños, puesto que las masas con tamaños de árbol inferior eran regenerados post-incendio de pinos de mucha mayor densidad que el eucaliptar de Coto Muiño.

Los resultados en la Ermida, sin embargo, son consistentemente inferiores a los de Coto Muiño y a los de todas las referencias estudiadas, debido como se ha indicado al estado de la masa quemada hace más de un año, a su heterogeneidad y escaso peso de corta – ya que la fracción maderable había sido ya extraída -. El resultado en La Ermida es, pues, inferior al de Coto Muiño, entre 1,04 y 1,25 t de m.s. menos por hora de trabajo.

6. Conclusiones

Como conclusiones generales, cabe señalar la conveniencia de utilización de esta tecnología, especialmente en masas uniformes como las afectadas por el goníptero que han sido estudiadas, para reducir los costes que supondría la corta, acumulación y tratamiento de los pies no comerciales en este tipo de masas mediante su aprovechamiento y valorización.

Aunque los límites de autofinanciación no quedan claros por los errores de estimación al aplicar las ecuaciones de peso a los datos de inventario, se podría aventurar que la autofinanciación en montes homogéneos afectados por el goníptero de características similares a los estudiados se alcanza para pesos secos de biomasa aérea cercanos entre los 40 y 50 kg de m.s.

El caso de las masas incendiadas y parcialmente aprovechadas es más complejo. En todo caso, es de señalar la conveniencia de no dejar pasar tanto tiempo desde el incendio, para reducir el tiempo productivo necesario por paca e incrementar la eficiencia en la recogida de la biomasa. En el caso del pinar quemado, cuyo estudio era otro de los objetivos iniciales de este trabajo, ni siquiera se pudo llegar a medir el rendimiento, dado que los pinos se deshacían al ser manipulados con el cabezal de apeo y no pudieron ser empacados.

La tecnología estudiada tiene muchas ventajas, como la aparente sencillez de mantenimiento por la tecnología simple de empaçado, la automatización de diversas funciones y la rapidez y alta productividad de la grúa y cabezal de talado. No obstante, sus dos principales inconvenientes serían 1) la relativa lentitud del sistema de alimentación y empaçado, que fuerza a tiempos de espera de más del 30% a la grúa taladora y 2) la altura de la unidad de empaçado, que perjudica el equilibrio de la máquina y dificulta su uso en terrenos pendientes e irregulares. Ambos problemas son susceptibles de posibles mejoras en la tecnología y/o en los métodos de trabajo y deberían ser objeto de análisis por los diseñadores de la máquina.

7. Agradecimientos

Los autores agradecemos como impulsora de este estudio, en el seno del Grupo Operativo BIOFORE a Dña. Érika Martínez Carreira, Directora - Gerente de LETME Soluciones S.L., empresa coordinadora de dicho grupo. Asimismo, hemos de agradecer su colaboración a los profesores de la Universidad de Vigo Prof. Luis Ortiz y Prof. Óscar González Prieto, así como al estudiante del Grado de Ingeniería Forestal D. Isidro Martín Rey, por su apoyo en los análisis de laboratorio y trabajos de campo. También debemos agradecer su colaboración en el inventario a D. Jesús Fernández y su aporte de información sobre costes al personal de ENCE que realizó pruebas de aprovechamiento mecanizado de forma paralela a nuestro estudio en el estrato Coto Muiño 1.

8. Bibliografía

ALA-VARVI, T.; OVASKAINEN, H.; 2013. Kokopuun paalauksen kilpailukyky [Competitiveness of whole-tree bundling]. *Metsäteho Report* 225. ISSN 1796-2374; 77 pág. En finés. Disponible en: <http://www.metsateho.fi/wpcontent/uploads/>

BERGSTRÖM, D.; DI FULVIO, F.; NUUTINEN, Y.; 2015. Effects of harvested tree size and density of undergrowth on the operational efficiency of a bundle-harvester system in early fuelwood thinnings. Proceedings of the 48th FORMEC Symposium Oct4-8 2015, Linz (Austria): Pág. 165-168. Ed. BOKU. 530 pag. Viena, Austria. Disponible en https://www.formec.org/images/proceedings/2015/formec_proceedings_2015_web.pdf.

BERGSTRÖM, D.; DI FULVIO, F.; 2014. Comparison of the cost and energy efficiencies of present and future biomass supply systems for young dense forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* 29:8 793-812.

BJÖRHEDEN, R.; NUUTINEN, Y.; 2014. Study of Fixteri FX15a small-tree bundling unit. *Swedish Forest Research Institute, Report* 819. 20 pág. En sueco con resumen en inglés.

BRAÑAS, J.; GONZÁLEZ-RÍO, F.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R.; MERINO, A.; 2000. Biomasa maderable y no maderable en plantaciones de eucalipto. Estimación y cuantificación. *CIS-Madera* 4 72-75.

CHAKROUN, M.; BOUVET, A.; RUCH, P., MONTAGNY, X.; 2016. Performance of two shear heads for harvesting biomass in hardwood stands in France. *Biomass Bioenergy* 91 227-233.

DÍAZ-FIERROS, F.; 2019. Incendios Forestales en Galicia y Portugal: una perspectiva histórica. *Territorium* 26(1) 97-114

DIÉGUEZ-ARANDA, U. et al., 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Ed. Dirección Xeral de Montes, Consellería de Medio Rural, Xunta de Galicia. 259 pág. Santiago de Compostela, España.

ENCE (Energía & Celulosa); 2019. Prueba de productividad de aprovechamiento de biomasa. Informe interno no publicado.

ERBER, G.; KÜHMAIER M.; 2017. Research Trends in European Forest Fuel Supply Chains: a Review of the Last Ten Years (2007–2017) – Part One: Harvesting and Storage. *Croat. j. for. eng.* 38 (2) 269-278.

GHAFFARIYAN, M.R.; ACUÑA, M.; BROWN, M.; 2019. Machine productivity evaluation for harvesters and forwarders in thinning operations in Australia. *Silva Balcanica* 20(2) 13-25.

GOSSGE (Grupo Operativo Goníptero); 2018. Dossier del Proyecto de Innovación del Grupo Operativo Supra-autonómico de sanidad sobre *Gonipterus* en eucalipto – GOSSGE (disponible en <https://www.profoas.com/pdf/proyectos/Gossge-Dossier.pdf>)

JYLHÄ, P.; LAITILA, J.; 2007. Energy wood and pulpwood harvesting from young stands using a prototype whole-tree bundler. *Silva Fennica* 41(4) 763–779.

KÄRHÄ, K.; LAITILA, J.; JYLHÄ, P.; NUUTINEN, Y.; KESKINEN, S.; 2009. Kokopuun paalaus-tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset [Productivity and costs of the whole-tree bundling supply chain]. *Metsäteho Report* 211. ISSN 1459-773X. En finés.

KÄRHÄ, K.; JYLHÄ, P.; LAITILA, J.; 2011. Integrated procurement of pulpwood and energy wood from early thinnings using whole-tree bundling. *Biomass Bioenergy* 35(8) 3389-3396.

KONS, K.; BERGSTRÖM, D.; DI FULVIO, F.; 2015. Effects of sieve size and assortment on wood fuel quality during chipping operations. *Int JFor Eng.* 26 114–123.

LAITILA, G.; KÄRHÄ, K.; JYLHA, P.; 2009. Time consumption model and parameters for Off- and On-road transportation of whole-tree bundles. *Baltic Forestry* 15(1) 105-114.

MERILAINEN, T.; 2019. Comunicación personal del representante de Fixteri OY en España.

NUUTINEN, Y.; KÄRHÄ, K.; LAITILA, J.; JYLHÄ, P.; KESKINEN, S.; 2011. Productivity of whole tree bundler in energy wood and pulpwood harvesting from early thinnings, *Scandinavian Journal of Forest Research* 26:4 329-338.

NUUTINEN, Y.; RYTKÖNEN, M.; BERGSTRÖM, D.; DI FULVIO, F.; DAHLIN, B.; TIIHONEN, I.; PETTY, A.; 2015. Quality and productivity in comminution of small-diameter tree bundles. Pag. 203-209. In: Abstracts and Proceedings of the 48th Symposium on Forest Mechanization "Forest Engineering: Making a positive contribution" Linz (Austria). Ed. BOKU. 512 pág. Viena, Austria.

NUUTINEN, Y.; PETTY, A.; BERGSTRÖM, D.; RYTKÖNEN, M.; DI FULVIO, F.; TIIHONEN, I.; LAUREN, A.; DAHLIN, B.; 2016. Quality and productivity in comminution of small-diameter tree bundles. *International Journal of Forest Engineering*, 2016. 10 pág. DOI:10.1080/14942119.2016.1223926

NUUTINEN, Y.; BJÖRHEDEN, R.; 2016. Productivity and work processes of small-tree bundler Fixteri FX15a in energy wood harvesting from early pine dominated thinnings. *International Journal of Forest Engineering*, 27(1) 29-42.

SCHWEIER, J.; SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N.; BECKER, G.; 2015. Mechanized coppice harvesting with new smallscale feller-bunchers: Results from harvesting trials with newly manufactured felling heads in Italy. *Biomass Bioenergy* 72 85-94.

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. *Ann. For. Sci.* 73 1125–1139.

SPINELLI, R.; CUCHET, E.; ROUX, P.; 2007. A new feller-buncher for harvesting energy wood: Results from a European test programme. *Biomass Bioenergy* 31(4) 205-210.

TOLOSANA, E.; SPINELLI, R.; CACOT, E.; MIHELIC, M.; NESTOROVSKI, L.; MEDERSKI, P.; 2017. Factors affecting biomass and wood extraction from coppices in Europe: Productivity

models and influence of technological changes.Europe. Conference: IUFRO 125th Anniversary Congress. 18-22 September 2017. Friburgo, Alemania.

TOLOSANA, E.; LAINA, R.; 2018. Productivity and cost factors, silvicultural and environmental performance of the treatment performed with the Feller-Bundler FIXTERI in a post-fire regenerated Mediterranean stand in Riudarenes (Girona, Spain). Informe final de estudio financiado por Fixteri OY. Inédito, 8 pág. Madrid, España.

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. *Croat. j. for. eng.* 39(2) 163-172.

VISSER, R.; SPINELLI, R.; 2012. Determining the shape of the productivity function for mechanized felling and felling-processing. *J. For. Res.* 17(5) 397–402.

XUNTA DE GALICIA; 2021. DECRETO 140/2021, do 30 de setembro, polo que se aproba a primeira revisión do Plan forestal de Galicia 2021-2040, Cara á neutralidade carbónica. DOG nº 205. Pax. 51636.