



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-162

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Meta-análisis de 128 estudios de extracción de madera y biomasa de montes bajos en Europa: modelo de productividad general y cuantificación de la influencia de los cambios tecnológicos.

TOLOSANA, E.¹

¹ E.T.S.I. de Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid. eduardo.tolosana@upm.es

Resumen

Se ha analizado la productividad (m^3/hora de trabajo de máquina) en la extracción mecanizada de madera o leña de montes bajos “clásicos” de frondosas (quercíneas, haya y castaño), a partir de 128 estudios sobre aprovechamientos entre 1973 y 2015 en Italia (99), España (24) y el Reino Unido (5). No hay diferencias significativas entre especies, tipos de corta (a matarrasa o selectiva) ni entre sistemas de aprovechamiento, posiblemente por la gran variedad de medios utilizados y productos extraídos. No obstante, se ha ajustado una ecuación predictiva común para productividad de la saca por arrastre (tipo *skidder*), suspensión en remolque (tipo autocargador o tractor agrícola con remolque) y cable aéreo, mediante regresión no lineal con variables explicativas distancia máxima de desembosque, capacidad de carga del medio de extracción y peso de la corta, con R^2 ajustado del 65% y valor absoluto medio de residuos de $1,2 \text{ m}^3/\text{hora}$. Se han ajustado ecuaciones particularizadas con residuos inferiores para arrastre y saca con cable. Por último, se ha comparado la productividad y su relación con las variables explicativas en los estudios realizados en la última década frente a los anteriores, constatándose un incremento significativo de la productividad a igualdad de los valores de dichos parámetros.

Palabras clave

Estudio de tiempos, aprovechamiento, desembosque, montes bajos tradicionales.

1. Introducción

El método de beneficio de monte bajo es un sistema selvícola muy antiguo que se basa en la capacidad de ciertas especies arbóreas y arbustivas para rebrotar. Esta regeneración vegetativa tiene lugar a partir de las raíces, los tocones, los trasmochos y a partir de las ramas, ramillas y yemas (esquejes, acodos, microestaquillas, etc.). En Europa, solo las frondosas se han aprovechado tradicionalmente en monte bajo.

La mayor parte de los bosques europeos son objeto de intervención humana, o lo han sido hasta hace pocas décadas (KIRBY & WATKINS, 1998). Cerca de los pueblos, el régimen de monte bajo ha sido a menudo frecuente porque permite abastecer a la población concentrada de combustibles y materiales agrícolas y ganaderos (BUCKLEY, 1992). Los montes bajos han sido eficientes desde el punto de vista económico por los turnos cortos y las formas de gestión sencillas (corta a mata rasa al final del turno), por lo que este método de beneficio ha estado muy extendido en Europa hasta épocas recientes y es aún común en las regiones mediterráneas y balcánicas (JANSEN & KUIPER, 2004).

Estas prácticas tradicionales se han reducido en los países europeos industrializados en los últimas décadas, tanto por la competencia de nuevos materiales y combustibles fósiles como por la escasez de mano de obra rural debida a la inmigración y la mejora de las condiciones salariales (SPINELLI et al., 2016).

No obstante, hay un interés creciente en la restauración de los montes bajos tradicionales y su mantenimiento, por su importancia en relación con la biodiversidad, aportación de servicios ambientales, valor cultural e histórico y, recientemente, por su posible contribución al desarrollo rural a través de la producción de biocombustibles leñosos (biomasa forestal para uso energético).

De acuerdo con SPINELLI et al. (2016), es fundamental mejorar la eficiencia de las operaciones de aprovechamiento en los montes bajos, convirtiendo su gestión en una moderna actividad económica, una de cuyas componentes más claras sería la mecanización de las operaciones, a pesar de las dificultades que imponen el terreno complicado en que crecen los montes bajos, el pequeño tamaño de sus fustes y la frecuente multiplicidad de brotes (MAGAGNOTTI et al., 2012), factores todos ellos que condicionan básicamente el apeo y elaboración mecanizados.

Otro de los aspectos que condiciona la eficiencia de los aprovechamientos es la fase de extracción o desembosque de los productos, que se puede definir como aquella en la que son transportados a través del terreno forestal desde el lugar de corta y/o de procesado hasta un cargadero o el borde de una pista donde serán cargados en un medio de transporte.

En los montes bajos, esta función se ha desarrollado mediante muy diferentes medios, desde los no mecanizados (animales) hasta las máquinas forestales diseñadas para la extracción de madera, como los tractores forestales de arrastre (*skidders*), los tractores autocargadores forestales o los cables aéreos de desembosque. En una posición intermedia, se encuentran numerosos medios no específicamente forestales, pero adaptados para la extracción de madera o leña por arrastre o semiarrastre, suspensión en un remolque o semiarrastre y suspensión a través de un cable aéreo. Los medios de extracción forestales tienen ventajas como su mayor capacidad de carga, rendimiento y adaptación a las condiciones desfavorables de los terrenos forestales, y además han incorporado en su diseño mecanismos para mitigar los efectos desfavorables producidos por su tránsito en el terreno forestal. Los medios adaptados no alcanzan esa eficiencia económica o ambiental, pero requieren menor inversión y en ocasiones se pueden adaptar bien a las características de los productos de pequeñas dimensiones, aprovechamientos de tamaño reducido y pequeñas empresas que rodean a la mayoría de los aprovechamientos de montes bajos.

Se carece de una herramienta de predicción de la productividad suficientemente flexible para adaptarse a ese abanico de medios y sistemas y que pueda proporcionar una referencia para su selección o para servir de base a políticas de apoyo público a la inversión en empresas dedicadas a estas actividades.

Para este fin, se requiere profundizar en los conocimientos sobre las prácticas actuales y recientes, para lo que una revisión multinacional de estudios sobre la materia sería de gran utilidad. De hecho, existen numerosos trabajos de investigación, especialmente europeos, sobre la materia, aunque la mayoría de ellos no ha alcanzado suficiente visibilidad internacional, por su carácter local (frecuentemente, se trata de estudios escritos en las lenguas nacionales de origen) y por el limitado interés en esta materia en los tiempos recientes.

Los datos en que se basa este trabajo forman parte de la base de datos desarrollada como parte del trabajo de la Acción COST FP1301 (EuroCoppice), que desarrolló un formato armonizado y cuyos componentes introdujeron los resultados de estudios sobre aprovechamientos desde 1975 a 2015, a partir de artículos en revistas nacionales e internacionales, informes de proyectos (publicados o no) y Tesis. Los resultados globales del meta-análisis se han recogido en SPINELLI et al. (2016).

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es profundizar en el estudio de la fase de extracción en los aprovechamientos forestales de montes bajos recopilados en la mencionada Acción COST europea, desarrollando modelos de productividad genéricos y para las diferentes formas de extracción, que permitan identificar los factores de que ésta depende, permitiendo la comparación entre medios

alternativos en distintas condiciones, su predicción en casos concretos y la identificación de aquellas áreas en que la investigación pueda ser más necesaria y/o potencialmente efectiva.

3. Metodología

Tras el análisis del contenido de la base de datos armonizada, se decidió que la variable de productividad más ampliamente representada era la productividad en m³ por hora de trabajo de máquina (*scheduled machine hour*). Para las operaciones de extracción, se encontró esta variable en 128 registros, siendo el principal déficit en el conjunto de la base de datos el hecho de que los estudios franceses sobre montes bajos se centraban en las fases de apeo y elaboración, por lo que no había registros sobre productividad de extracción en los abundantes estudios franceses.

Las variables recogidas en todos los registros y que se decidieron evaluar como posibles variables independientes fueron las distancias de desembosque (media y máxima, m), la carga media (m³ por ciclo), el volumen unitario medio (m³/pie) y el peso de la corta (m³/ha). Se consideraron estas variables por separado y en conjunto a través de técnicas de regresión lineal múltiple “paso a paso”. Entre las variables seleccionadas en cada caso para el modelo general, se ensayaron variables combinadas y transformaciones logarítmicas, acudiendo finalmente a técnicas de regresión no lineal para afinar los resultados.

Para identificar otros posibles factores explicativos, se llevaron a cabo diferentes análisis de varianza (ADEVA) uni y multifactoriales. Se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- Especie (haya, especies del género *Quercus*, castaño).
- Tipo de corta (selectiva o “a mata rasa”).
- Sistema de aprovechamiento (Leña, SL, para trozas de longitud inferior a 2 m; Madera tronzada, SMT, para trozas de longitud igual o superior a dos metros; Fustes enteros, SFE, extracción de fustes desramados sin tronzar; Árboles completos, SAC, extracción de árboles incluyendo ramas y copa, y Residuos de poda, SRP, extracción de ramas de poda en dehesas de encina españolas).
- Modalidad de extracción (Arrastre mecanizado AM, utilizando tractores forestales de arrastre o *skidders*, tractores agrícolas adaptados con cabrestante o mini-tractores de arrastre; Suspensión en remolque SR, usando tractores autocargadores forestales, tractores agrícolas adaptados con remolque y grúa o minitractores con un pequeño remolque para leña cargado manualmente; Saca con cable aéreo CAB, usando cables de desembosque o mini-cables de arrastre; Extracción con animales AN, y extracción en suspensión mediante palas o excavadoras SP).

Después del análisis de consistencia de los datos, se decidió rechazar parte de los estudios porque trataban un número pequeño de casos que mostraban un comportamiento muy diferente del resto (por ejemplo, un tipo de máquina con muy pocos estudios) y rechazar también un pequeño número de datos (3 casos), cuyos residuos con respecto a los modelos de regresión eran mucho mayores que el resto, haciendo pensar en posibles errores de medida.

Cuando, a través del ADEVA, se encontraron diferencias significativas entre los factores considerados, se trataron de ajustar diferentes modelos de regresión para cada valor del factor en cuestión, volviendo a ensayar el conjunto completo de posibles variables explicativas. Si los estadísticos de la nueva regresión mejorasen los de la original, más general, la nueva curva de regresión se pondría para ese caso particular.

Tras desarrollar estos modelos, otro objetivo del análisis era el estudio de la mejora debida a los avances tecnológicos y/o cambios socioeconómicos recientes, para lo que se compararon, a través del análisis de varianza y de la comparación de líneas de regresión, los estudios de la última década (75 casos entre 2005 y 2015) con los anteriores (50 casos anteriores a 2005).

Para el análisis estadístico, se empleó el programa STATGRAPHIC Centurion XVI.II X64®, mientras que para algunas representaciones gráficas se empleó el programa MicroSoft Excell 2007®.

4. Resultados

El número de puntos (datos) para el meta-análisis de la fase de extracción fue de 128, la variable dependiente (productividad en metros cúbicos por hora de trabajo de máquina). El valor medio de los datos registrados, tras la exclusión de tres puntos anómalos con probables errores de medida o transcripción, fue de 3,7 m³/h_{Trab}, oscilando entre 0,3 y 11,9, lo que denota un elevado coeficiente de variación (73%). En cuanto a las candidatas a posibles variables explicativas, sus valores medios, rangos y coeficientes de variación se muestran en la Tabla 1. La distribución de los puntos de datos disponibles entre las categorías de los factores considerados como de posible influencia sobre la productividad se reflejan la Tabla 2.

Tabla 1: Valores medios, rangos y coeficientes de variación de las variables explicativas (candidatas) para los puntos de datos de extracción, excluidos tres valores anómalos.

Variable explicativa (candidata)	Valor medio	Mínimo	Máximo	Coeficiente de variación
Distancia máxima de extracción, m	395	25	1500	96%
Capacidad de carga media (m ³ /ciclo)	2,1	0,06	10,6	138%
Volumen de fuste medio (m ³ /pie)	0,14	0,002	2,03	167%
Peso medio de la corta (m ³ /ha)	107,3	8	314	69%

Tabla 2: Distribución de los puntos de datos de extracción entre las categorías factoriales consideradas (tipo de corta, sistema de aprovechamiento y medio de extracción).

Factor	Valor	Número	Frecuencia (%)
Tipo de corta	Selectiva	61	49
	Mata Rasa	64	51
Sistema de Aprovechamiento	Leña (SL)	19	15
	Madera Tronzada (CTL)	26	21
	Fuste entero (SFE)	21	17
	Árbol Completo (SAC)	54	43
	Residuos de Poda (SRP)	5	4
Medio de extracción	Arrastre mecanizado (AM)	49	39
	Suspensión en remolque (SR)	31	25
	Cable aéreo (CAB)	33	27
	Animales (AN)	8	6
	Suspensión con palas o excavadoras (SP)	4	3

La productividad ($Y = m^3/h_{Trab}$) se analizó para todo el conjunto de los datos buscando correlaciones con cada una de las posibles variables explicativas por separado, resultado una correlación muy débil para cada una de ellas. Cuando se analizó la correlación entre la productividad y combinaciones de las variables propuestas como explicativas, la mayor relación se encontró con el cociente $X = (\text{Distancia máxima de extracción, m} / \text{Capacidad de carga media, m}^3/\text{ciclo})$, siendo la relación ajustada la siguiente:

$$Y = 46,39 \cdot X^{-0,49}$$

con $R^2 = 0,42$.

[1]

El análisis de los residuos atípicos condujo a excluir del análisis varios casos, un par de estudios españoles en que se combinaba el cableo desde pista con la saca con autocargador, y los casos de limpieza de lechos de ríos descritos en algunos estudios italianos.

Para identificar otros posibles factores explicativos, se llevaron a cabo ADEVAs, y no se encontraron diferencias significativas entre especies ni entre cortas a mata rasa y selectivas. El ADEVA del factor Sistema de Aprovechamiento mostró diferencias significativas entre SL (Sistema de Leña) y, respectivamente, los sistemas de Madera Tronzada (SMT) y residuos de poda (SRP), que se interpretaron como debidos a la diferencia entre los medios de extracción (en los dos últimos sistemas, predominaban los autocargadores forestales, mientras que para la extracción de leñas se usaban todo tipo de medios adaptados, menos potentes, e incluso animales). De este modo, el factor Sistema de Aprovechamiento se rechazó inicialmente como tal, en espera del análisis de los medios de extracción.

El ADEVA para los medios de extracción halló diferencias significativas entre suspensión en remolque (SR) y en pala o excavadora (SP), por un lado, y el conjunto de arrastre mecanizado (AM), Cables (CAB) y animales (AN), por otro. El análisis del ajuste del modelo base de productividad $Y = A X^{-0,5}$ arrojó diferencias significativas en la línea de regresión para cada uno de los medios de extracción, lo que podría conducir a ensayar modelos independientes.

No obstante, el análisis detallado de esas líneas de regresión condujo a rechazar los análisis de regresión de los casos de extracción con animales y suspensión en palas o retroexcavadoras, casos en que coincidieron unos malos parámetros de la bondad del ajuste con un número de casos bastante pequeño (8 casos para la extracción con animales y 4 para la suspensión con pala o excavadora). Por ese motivo, se decidió excluir del análisis esos medios de extracción, y se proporcionan únicamente sus estadísticos descriptivos, junto a los de los casos italianos de limpieza de lechos de ríos, en la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen estadístico de la productividad en operaciones italianas de limpieza de lechos de ríos, extracción de montes bajos con animales y extracción de montes bajos por suspensión en palas o retroexcavadoras.

Resumen de estadísticos descriptivos para la Productividad (m^3/h_{Trab})			
	Limpieza de lechos	Extracción con animales AN	Suspensión en palas o excavadoras SP
Número de puntos	4	8	4
Valor medio	3,17	1,79	3,82
Desviación típica	3,57	0,40	1,19
Coefficiente de variación	112,8%	22,6%	31,1%
Valor mínimo	1,04	1,3	2,8
Valor máximo	8,5	2,7	5,38
Rango	7,46	1,40	2,58
Sesgo estandarizado	1,60	2,06	0,72
Curtosis estandarizada	1,58	2,70	-0,39
Los valores del sesgo y la curtosis muestran que las distribuciones no se corresponden con una normal.			

El resto de los datos de extracción se analizaron, de forma conjunta y separando los medios de extracción AM, SR y CAB, utilizando la técnica de regresión no lineal, con el modelo base:

$$\text{Productividad} = A \cdot \text{Carga}^B \cdot \text{DistMax}^C + K$$

Las otras posibles variables numéricas, como el volumen medio del fuste o el peso medio de la corta, se consideraron como términos aditivos lineales.

El mejor resultado, sin considerar los mencionados tres puntos anómalos con residuos muy elevados, fue, para todos los datos con medios de extracción AM, SR y CAB, el siguiente:

$$\text{Productividad (m}^3/\text{h}_{\text{Trab}}) = 18,9 \cdot [\text{Carga(m}^3\text{)}^{0,584}] \cdot [\text{DistMax(m)}^{-0,348}] + 0,0072 \cdot \text{PesoCorta(m}^3/\text{ha)} \quad [2]$$

Con un R^2 ajustado por los grados de libertad del 64,5% y un valor absoluto medio de los residuos de 1,2 $\text{m}^3/\text{h}_{\text{Trab}}$. Las variables seleccionadas explicaban más del 64% de la variabilidad en la productividad de la extracción para los 108 casos de monte bajo considerados, siendo los coeficientes de la constante K y del volumen medio del fuste no significativos, por lo que no se incluyeron en el modelo. Además, el volumen unitario presentaba correlación positiva con el peso de la corta, y su inclusión hubiera dado lugar a problemas de autocorrelación entre las variables.

Cuando se trató de ajustar ecuaciones distintas a los diferentes medios de extracción por separado (arrastre mecanizado, suspensión en remolque y cable aéreo), empleando un procedimiento similar, las ecuaciones predictivas sólo mejoraron los resultados globales – en término de reducción del valor absoluto medio de los residuos – en los casos de arrastre mecanizado (AM) y saca con cable aéreo (CAB), donde se ajustaron ecuaciones similares.

Sin embargo, en el caso de la saca por suspensión sobre remolque, la ecuación particularizada no dio mejores resultados que la general, lo que se atribuyó a la gran variedad de vehículos analizados bajo este concepto. Dado que un intento de particularizar las ecuaciones predictivas separando los vehículos de tipo autocargador con capacidad inferior a 4,5 m^3 de los de mayor capacidad tampoco dio resultados significativos, se optó por mantener la ecuación general [2] para los vehículos de saca mediante suspensión sobre remolque.

Las nuevas regresiones para arrastre mecanizado y saca con cable aéreo resultaron mejores que la general en términos del valor absoluto medio de los residuos, por lo que se recomienda su uso preferente sobre la ecuación general [2] en dichos casos.

La ecuación para arrastre mecanizado (vehículos tipo *skidder* y adaptados) fue:

$$\text{Productividad (m}^3/\text{h}_{\text{Trab}}) = 49,0 \cdot [\text{Carga(m}^3\text{)}^{1,14}] \cdot [\text{DistMax(m)}^{-0,574}] + 0,0094 \cdot \text{PesoCorta(m}^3/\text{ha)} \quad [3]$$

R^2 (ajustado por g.l.) = 51,9 %

Valor absoluto medio de los residuos = 0,87 $\text{m}^3/\text{h}_{\text{Trab}}$.

La ecuación correspondiente a la extracción mediante cable aéreo fue:

$$\text{Productividad (m}^3/\text{h}_{\text{Trab}}) = 16,3 \cdot [\text{Carga(m}^3\text{)}^{0,699}] \cdot [\text{DistMax(m)}^{-0,304}] + 0,0113 \cdot \text{PesoCorta(m}^3/\text{ha)} \quad [4]$$

R^2 (ajustado por g.l.) = 50,3 %

Valor absoluto medio de los residuos = 0,80 $\text{m}^3/\text{h}_{\text{Trab}}$.

Los valores medios, rango y coeficientes de variación para la productividad y para las variables explicativas seleccionadas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores medios y rangos de variación para la productividad en la extracción de montes bajos y sus variables explicativas (para arrastre con *skidder*, suspensión en remolque y saca con cable aéreo).

Medio de extracción	Productividad, m^3/h_{Trab}			Distancia máxima, m			Carga media, $m^3/ciclo$			Peso de la corta, m^3/ha		
	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max
AM	2,8	0,54	8,5	302	30	1000	0,75	0,08	3,0	111	9	314
SR	6,4	1,8	11,9	672	50	1500	5,96	1,9	10,6	85	12	243
CAB	3,2	0,3	7,0	236	50	500	0,50	0,06	0,95	118	8	274

En las Figuras 1, 2 y 3 se representan curvas para las ecuaciones [2] (global para suspensión en remolques – tipo autocargador -), [3] (específica para extracción por arrastre mecanizado – tipo *skidder* -) y [4] (específica para extracción por cable aéreo). Se muestran curvas en trazo continuo para peso de la corta elevado ($150 m^3/ha$) y en trazos discontinuos para bajos pesos de la corta ($25 m^3/ha$). Las líneas grises corresponden con cargas reducidas ($0,5 m^3/ciclo$ para el conjunto de medios y $0,1 m^3/ciclo$ para el arrastre y la saca con cable) y las negras a cargas más elevadas ($6 m^3/ciclo$ para el conjunto de medios, $2,0 m^3/ciclo$ para arrastre y $0,7 m^3/ciclo$ para saca con cable).

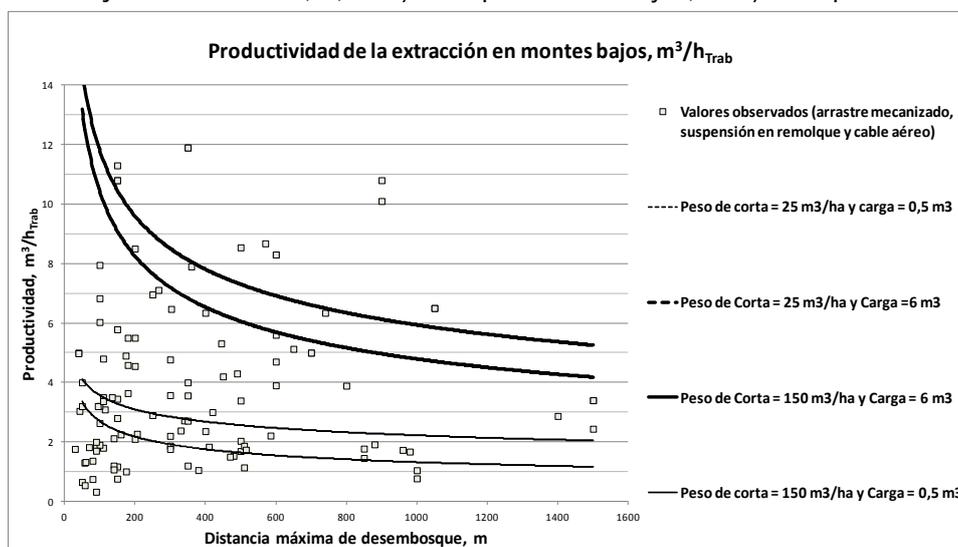


Figura 1: Productividad de la extracción en montes bajos para los medios de extracción por arrastre mecanizado (*skidder*), suspensión en remolque (autocargador) y cable aéreo de desembosque (ecuación [2]).

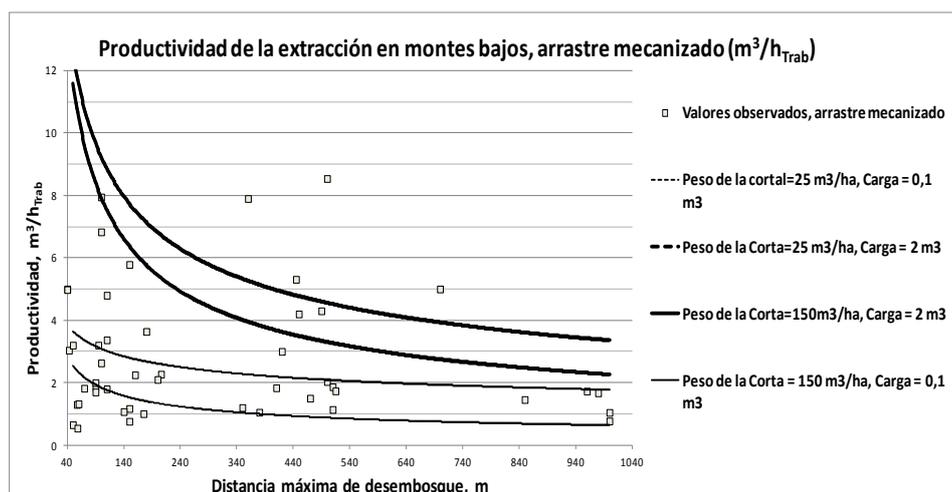


Figura 2: Productividad en la extracción de montes bajos, medios de extracción por arrastre mecanizado (*skidder* y medios adaptados), ecuación [3].

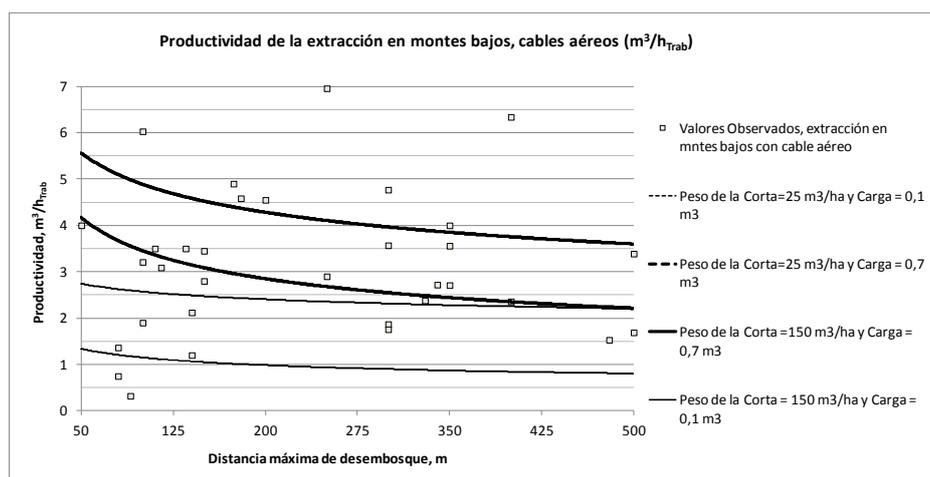


Figura 3: Productividad de la extracción en montes bajos (medio de extracción tipo cable aéreo), ecuación [4].

En la comparación de los resultados de los estudios de tiempo más recientes (desde 2005 hasta 2015, 75 estudios) con los anteriores (50 estudios hasta 2004 incluido), el ADEVA mostró que la diferencia de productividad para todos los medios de extracción (excluyendo animales, suspensión en palas y operaciones de limpieza de lechos de ríos) es estadísticamente significativa. La cifra media de los estudios recientes ($5,3 \text{ m}^3/\text{hTrab}$) es más del doble que la media de productividad de los estudios anteriores a 2005 ($2,4 \text{ m}^3/\text{hTrab}$).

Aunque las curvas de regresión son significativamente distintas, son similares, y si bien la dependencia de la productividad desde 2005 es más consistente (Figura 4), si solo se considerase la regresión de los estudios más recientes se perderían los datos de las alternativas más simples de medios de extracción, por lo que se ha optado por mantener como referencia las ecuaciones [2], [3] y [4]. En cualquier caso, parece claro que los avances tecnológicos y en cuanto a capacidad empresarial de inversión han hecho crecer sensiblemente la productividad en la última década.

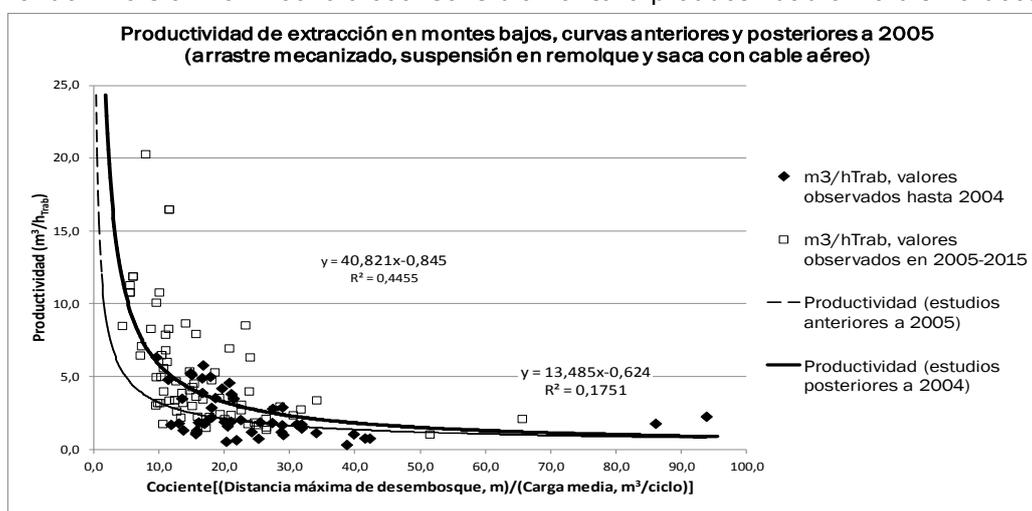


Figura 4: Curvas que muestran el incremento en la productividad en la última década frente a los estudios anteriores.

5. Discusión

A pesar de la gran diversidad de medios de extracción analizados y del largo periodo que cubren los estudios, se han encontrado ecuaciones predictivas partiendo de un pequeño número de variables explicativas y con una buena calidad del ajuste, como testimonian los estadísticos de las

regresiones. Las variables explicativas seleccionadas (distancia de desembosque y capacidad de carga de los medios de extracción) son habituales en modelos de extracción, en particular en el análisis de productividad de sistemas de aprovechamiento de madera tronzada (*Cut-To-Length* ó CTL) (KUITO et al., 1994; BRUNBERG, 2004; NURMINEN et al., 2006; JIROUSEK et al., 2007; SÄNGSTUVALL, 2010; STANKIC et al., 2011; ERIKSON & LINDROOS, 2014), pero también en estudios de desembosque por arrastre (AKAY et al., 2004; HIESL, 2013; HIESL & BENJAMIN, 2013).

La variable que mejor se ha comportado como predictora ha sido la distancia máxima de desembosque, mientras en muchos de los estudios la elegida ha sido la distancia media de desembosque o incluso la distancia mínima – la distancia a la primera carga, como en HIESL (2013) -.

En los casos estudiados de extracción en montes bajos, ni la especie, ni el volumen unitario medio de los pies, ni el tipo de corta (a mata rasa frente a corta selectiva o resalveo), se han mostrado significativos como factores influyentes sobre la productividad, a pesar del hecho de que el tamaño de troza explica la productividad en algunos estudios sobre extracción de madera en rollo, como GALLIS & SPYROGLOU (2012) o ERIKSON & LINDROOS (2014), entre otros. El carácter de las cortas tiene influencia en la productividad de la extracción en algunos estudios, especialmente mediante cables aéreos (HARTLEY, 2003; HOFFMANN et al., 2016).

El peso de la corta se ha mostrado relevante como variable explicativa de la productividad de la extracción, de forma directa o indirecta (a través de variables relacionadas, como la densidad de madera por metro lineal de pista de desembosque o calle, en m³/metro lineal), en numerosos estudios sobre desembosque de madera en rollo (KUITTO et al., 1994; NURMINEN et al., 2006; MAGAUD & BOUVET, 2014, entre otros).

Probablemente por el amplio rango de máquinas estudiadas y la gran diversidad de especies y productos obtenidos en los aprovechamientos en un área geográfica extensa y a lo largo de un lapso de tiempo muy dilatado, otros factores relevantes, como el número y tipo de productos, que resulta muy relevante, entre otros, para NURMINEN et al. (2006), no ha resultado significativo en este meta-análisis. La capacidad portante del terreno y el uso de semi-orugas en autocargadores, consideradas como factores explicativos relevantes por STANKIC et al. (2011), no fueron registrados sistemáticamente en los estudios analizados.

Es interesante reseñar que, en el presente análisis de extracción, la influencia del tamaño de la carga sobre la productividad parece reducirse cuando aumenta la distancia de extracción, como en el estudio basado en grandes bases de datos de ERIKSON & LINDROOS (2014), mientras las expectativas teóricas serían las contrarias – cuanto mayor sea la distancia, sería más conveniente transportar grandes cargas, como en KUITO et al. (1994) o NURMINEN et al. (2006) -.

La mayor productividad observada de las operaciones más recientes se reconoce generalmente como efecto de las mejoras tecnológicas, de formación o de organización de las operaciones, aunque la mejora se considera mucho mayor en apeo y elaboración mecanizados que en operaciones de desembosque (NURMINEN et al., 2006; SÄNGSTUVALL, 2010). En el presente caso, podrían influir factores socioeconómicos relacionados con la tipología de empresas que ejecutan aprovechamientos en montes bajos del ámbito mediterráneo, con frecuencia de carácter familiar y con una capacidad de inversión históricamente reducida, que ha podido aumentar en épocas recientes, permitiendo el acceso a medios de más coste y productividad.

Incluso si se utilizan las cifras de productividad más recientes, son bastante más reducidas que las reportadas en operaciones de desembosque de madera en montes altos, tanto para suspensión en remolques de autocargador o similares (por ejemplo, en ERIKSON & LINDROOS, 2014), en arrastre mecanizado (HIESL, 2013; HIESL & BENJAMIN, 2013) o en extracción con cable aéreo (DEVLIN & KLVAC, 2014; SPINELLI et al., 2015). Estas diferencias se pueden deber a la escasa adecuación de la

mayor parte de la maquinaria de extracción observada a las difíciles condiciones de los montes bajos (máquinas adaptadas, con capacidad de carga, potencia y movilidad reducidas) y también a los pequeños volúmenes y frecuente forma irregular de los productos de los montes bajos, que pueden dificultar su manipulación para las operaciones de carga y descarga.

6. Conclusiones

Se han obtenido ecuaciones predictivas de la productividad de la extracción de árboles completos, madera o leña de montes bajos, a partir de más de cien estudios de tiempo europeos, en su mayoría del ámbito mediterráneo, realizados durante un periodo largo, entre 1975 y 2015.

El principal modelo se refiere a la extracción mediante arrastre mecanizado, suspensión sobre remolque y con cables aéreos de desembosque, con un coeficiente de determinación $R^2 = 64,5\%$ y un valor absoluto medio de los residuos de $1,2 \text{ m}^3/\text{h}_{\text{Trab}}$. Se han obtenido modelos particularizados para la saca por arrastre mecanizado (*skidders* y vehículos adaptados similares) y para la saca mediante cables aéreos, en general de pequeño tamaño. En todos los casos, las variables explicativas han sido la distancia máxima de desembosque (m), la capacidad de carga de los medios de extracción (m^3/ciclo) y el peso de la corta (m^3/ha).

No se han mostrado como factores estadísticamente significativos la especie objeto de aprovechamiento, el tipo de corta (selectiva o “a mata rasa”), el sistema de aprovechamiento (árboles completos, fustes enteros, madera tronzada o leña) ni el volumen unitario medio de los pies extraídos.

Finalmente, se ha constatado un incremento muy relevante en la productividad media de la última década frente a la de las operaciones anteriores, que se debe a la mejora tecnológica pero sobre todo al uso de medios de mayor capacidad y potencia. Las curvas que relacionan la productividad con los principales factores explicativos para la última década y para el periodo anterior son distintas y producen, a igualdad de dichos valores, mayor productividad en los aprovechamientos recientes, pero estas diferencias son muy inferiores a las que se registran entre la productividad media de las operaciones, que más que se duplica en la última década frente a la productividad media de las operaciones anteriores.

7. Agradecimientos

Agradezco al equipo coordinador y al resto de los miembros de la Acción COST FP1301 (EuroCoppice), a la Unión Europea como su organismo financiador, así como a los integrantes de su Grupo de Trabajo 3, que proporcionaron los datos para la base armonizada sobre productividad, los doctores Spinelli, Cacot, Mihelic, Nestrrovski y Mederski. Las referencias completas a todos los estudios de donde se extrajeron los datos pueden consultarse en SPINELLI et al. (2016).

8. Bibliografía

AKAY, A.E.; O. ERDAS; J. SESSIONS; 2004. Determining productivity of Mechanized harvesting Machines. Journal of applied Sciences 4(1): 100-105.

BRUNBERG, T.; 2004. Productivity norm data for forwarders. SkogForks: Uppsala. Redogörelse 8. In Swedish with English summary.

BUCKLEY, G. P.; 1992. Ecology and management of coppice woodlands. Chapman & Hall, London. 339 pág.

DEVLIN, G.; KVLAC, R.; 2014. How technology can improve the Efficiency of Excavator-Based Cable harvesting for Potential Biomass Extraction – A Woody Productivity Resource and Cost Analysis for Ireland. *Energies* 7, 8374-8395.

ERIKSSON, M.; LINDROOS, O.; 2014. productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets. *Int. J. For. Eng.* 25(3) 179-200.

GALLIS, C.; SPYROGLOU, G.; 2012. Productivity Linear Regression Models of Tree-Length Harvesting System in Natural Coastal Aleppo Pine (*Pinus halepensis* L.) Forests in the Chalkidiki Area of Greece. *Croat. J. For. Eng.* 33 (1) 115-123.

HARTLEY, D. S.; 2003. A Case-Study on the Effects of Four Silvicultural Prescriptions on Cable Harvesting Productivity and Cost in Western Washington. Msc. Thesis. Idaho University. Available in: www.uidaho.edu.

HIESL, P.; 2013. Productivity Standards for Whole-Tree and Cut-To-Length Harvesting Systems in Maine. *Electronic Theses and Dissertations. Paper 2252.* University of Maine. 150 pág.

HIESL, P.; J.G. BENJAMIN; 2013. Harvesting Equipment Cycle Time and Productivity Guide for Logging Operations in Maine. Maine Agricultural and Forest Experiment Station Miscellaneous Publication 762. 56 pág. + notas.

HOFFMANN, S.; JAEGER, D.; SCHOENHERR, S.; LINGENFELDER, M.; SUN, D.; ZENG, J.; 2016. The effect of forest management systems on productivity and costs of cable yarding operations in southern China. *For. Lett.* 109: 11-24

JANSEN P.; KUIPER, L.; 2004. Double green energy from traditional coppice stands in the Netherlands. *Biomass Bioenergy* 26: 401–402.

JIROUSEK, R.; KLVAC, R.; SKOUPY, A.; 2007. Productivity and cost of the mechanized cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *J. For. Sci.* 53, 2007 (10): 476-482.

KIRBY, K.; WATKINS, C.; 1998. The ecological history of European forests. CAB International, Oxford 373 pág.

KUITTO, P.J.; KESKINEN, S.; LINDROOS, J.; OIJALA, T.; RAJAMÄKI, J.; RÄSÄNEN, T.; TERÄVÄ, J.; 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. *Metsäteho. Metsätehon tiedotus* 410.

MAGAUD, P.; BOUVET, A.; 2014. Productivity analysis of current cable yarding operations in the French Alps. FEC- FORMEC 2014 Conference.

MAGAGNOTTI, N.; PARI, L.; SPINELLI, R.; 2012. Re-engineering firewood extraction in traditional Mediterranean coppice stands. *Ecol Eng* 38: 45-50

NURMINEN, T.; KORPUNEN, H.; UUSITALO, J.; 2006. Time consumption analysis of the Mechanized Cut-to-length Harvesting System. *Silva Fennica* 40 (2) 335-363.

SÄNGSTUVALL, L.; 2010. Estimates of the productivity of logging operations with a focus on forest fuel extraction. *SLU Arbetsrapport* 297. 36 pág.

SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N.; VISSER, R.; 2015. Productivity models for cable yarding in Alpine forests. *Eur. J. For. Eng.* 1(1): 9-14.

SPINELLI, R.; CACOT, E.; MIHELIC, M.; NESTOROVSKI, L.; MEDERSKI, P. S.; TOLOSANA, E.; 2016. Techniques and productivity of coppice harvesting operations in Europe: a meta-analysis of available data. *Ann. For. Sci.* DOI 10.1007/s13595-016-0578-x. Published Online 21.09.2016.

STANKIC, I.; PORSINSKI, T.; TONKOVIC, I.; FRNTIC, M.; 2011. Development and implementation of productivity norms for forwarders in Croatia. *FORMEC Conference*. Graz, Octubre 2011. 16 pág. Disponible en https://www.formec.org/images/proceedings/2011/formec2011_paper_stankic_et al.pdf