

Modelos de productividad para procesadores
forestales en el noreste ArgentinoForestry processors productivity
models in northeastern ArgentinaEduardo Hildt¹ e Patricio Miguel Mac Donagh²

Resumo

O presente estudo analisou a performance de três processadores florestais operando em plantações de *Pinus taeda* no nordeste da Argentina e foi desenvolvido um modelo geral para determinar as características dos equipamentos e combinações de produtos processados que afetam a produtividade e os custos operacionais. Foram avaliados por meio de um estudo de tempos e movimentos, um processador florestal John Deere 2154 D equipado com cabeça Waratah HTH 622B, um processador florestal Caterpillar 320D FM equipado com cabeça Log Max 7000b e uma escavadora John Deere 200D LC equipada com cabeça Log Max 7000c. Os equipamentos operaram realizando corte raso em florestas de 13 anos, com volumes médios variando entre 0,42 e 0,57 m³. Foi analisada a potencia dos equipamentos e o desenvolvimento de combinações de productos: toras trituráveis e toras trituráveis e serráveis. Foi ajustado um modelo de misto de efeitos fixos alcançando um coeficiente de R² de 0,7. O delineamento florestal afetou positivamente a produtividade efetiva implicando também um aumento no custo de produção. A potência apresentou uma interação com o volume das árvores, afetando a produtividade para volumes a 0,5 m³. O desenvolvimento de varios productos afetou negativamente a produtividade.

Palavras-chave: *Pinus taeda*, Produção florestal, Modelos mistos de regressão.

Abstract

This study analyzed the performance of three forest processors working in *Pinus taeda* clear-cutting of plantations in the Northeast of Argentina and development a general model for determining how the characteristics of machines and the products sorting affected the productivity and cost of the operation. We evaluated, by a time and motion study, a John Deere 2154 D forestry processor equipped with a head Waratah HTH 622B, a Caterpillar 320D FM forestry processor equipped with a head Log Max 7000B and a John Deere 200D LC excavator hybrid processor equipped with a head Log Max 7000C. The machines clearcut a forest plantation of 13 years, with average volumes between 0.42 and 0.57 m³. Analyzed were the influence of the power of the equipment and the development of two product combinations: pulpwood, and pulpwood and saw timber. The general predictive model resulted in a coefficient of determination (R²) of 0.7. The forest design positively affected the productivity, also involving an increase in the cost of production. The power provided an interaction with the volume of trees, affecting productivity for larger volumes to 0.5 m³. The development of various products negatively affected productivity.

Keywords: *Pinus taeda*; Forest harvesting; Regression Mixed Models.

INTRODUCCIÓN

La cosecha forestal de bosques implantados en el Nordeste Argentino (NE) ha transitado en los últimos cinco años por un proceso de completa mecanización de todas sus etapas. La incorporación de maquinaria con altos costos de operación obliga a asumir un proceso de mejora constante en la productividad de los sistemas con el fin de conseguir una reducción en los costos de producción. (MAC DONAGH et al., 2014)

En las operaciones de cosecha realizadas con el sistema de árbol entero (*Full-Tree*), la actividad de desrame y trozado de los árboles a borde de camino determina las dimensiones y calidad de los productos finales, concentra gran parte de la biomasa residual y los impactos por compactación en la zona linder a los caminos e incide fuertemente en el costo final de elaboración. En general, se han realizado pocos estudios que ayuden a comprender los factores que afectan al desarrollo de esta actividad.

¹Becario Doctoral del Conicet. Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Misiones - Bertoni 124 - Eldorado - CP 3380 - Misiones - Argentina. E-mail: eduardohildt@gmail.com.

²Profesor de Explotación Forestal. Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Misiones - Bertoni 124 - Eldorado - CP 3380 - Misiones - Argentina - E-mail: patricio.macdonagh@gmail.com.

Actualmente en la región se ha generalizado la utilización de procesadores forestales a borde de camino, tanto máquinas sobre orugas diseñadas específicamente para el trabajo forestal como adaptaciones realizadas sobre excavadoras equipadas con un cabezal procesador. Ambas opciones presentan diferencias de diseño y constructivas que afectan a sus prestaciones y costos. (MAC DONAGH et al., 2013)

Estudios previos han determinado que la productividad del procesamiento se encuentra principalmente determinada por el volumen de los árboles elaborados (ARROYO MARTÍNEZ, 2005; EVANSON; MCCONCHIE, 1996; STRANDGARD et al., 2014). También se encuentra afectada por la longitud y estructura del fuste, la presencia de deformaciones, las características de las ramas, y la pendiente del lugar de trabajo (STRANDGARD et al., 2014). Por otra parte, Baker et al. (2009) ha determinado que el número y dimensiones de los productos elaborados afectan a la productividad debido a la necesaria clasificación de los distintos productos en pilas individuales a borde de camino.

En la actualidad las empresas precisan disponer de herramientas de apoyo a la planificación de las operaciones de cosecha, principalmente para la predicción de la productividad de los equipos forestales en diferentes situaciones de trabajo, contemplando variaciones en el volumen y características de los árboles, las características del terreno y los productos requeridos. Los modelos predictivos de la productividad son un componente principal de estos sistemas de simulación (MAC DONAGH et al., 2014). Sin embargo, la mayor parte de los estudios publicados han desarrollado modelos predictivos de la productividad para máquinas y situaciones individuales, sin determinar cómo las características de los equipos afectan a la productividad.

Por ejemplo, Arroyo Martínez (2005), analizando un procesador forestal conformado por una excavadora Caterpillar 322CL y un cabezal Waratah HTH 620 trabajando en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile, ajustó modelos predictivos de la productividad efectiva utilizando el volumen de los árboles como variable regresora, logrando explicar el 42% de la variabilidad observada. En esta situación el esquema de corte determinó 6 productos constantes en toda la operación, sin analizar su efecto en la productividad.

Strandgard et al., (2014), para un procesador Valmet 450 FXL equipado con un cabezal Southstar 585 trabajando en plantaciones de *Pinus*

radiata de Nueva Zelanda, ajustaron modelos predictivos de la productividad a partir del volumen de los árboles y determinaron que un aumento de la pendiente en el área de trabajo no reduce significativamente la productividad de la operación, debido principalmente a que la potencia del equipo es adecuada para el peso de los árboles manejados.

El análisis por medio del ajuste de modelos lineales mixtos permite incorporar como elementos explicativos, además de las covariables utilizadas por otros autores, variables categóricas descriptivas de las características de los equipos (diseño forestal, potencia, características técnicas), situaciones evaluadas (productos elaborados, forma de trabajo), y variables aleatorias sobre las que no se tiene control. En este sentido, Seixas y Batista (2014) emplearon esta técnica en el análisis de *harvesters* sobre ruedas y sobre orugas para la cosecha del híbrido *Eucalyptus urophylla X Eucalyptus grandis* en Brasil, consiguiendo una mayor precisión al incorporar el modelo de la máquina base como variable aleatoria.

En este contexto es importante mencionar que de acuerdo a Visser et al. (2009) los modelos matemáticos son útiles en el análisis de las condiciones de trabajo, clases de productos y tamaño óptimo de los árboles con el objetivo de lograr que los equipos operen en un rango de productividad máxima. Estos autores postulan que el tamaño óptimo de los árboles es generalmente inferior al tamaño máximo para el que fueron diseñados los cabezales procesadores.

El objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo general para describir el desempeño de tres procesadores forestales en el procesamiento de *Pinus taeda* a borde de camino y analizar como las características de los equipos y las combinaciones de productos elaborados inciden en la productividad y costos de la operación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron estudios de tiempos y rendimientos en tres sitios del Nordeste Argentino (NE) para analizar la productividad de tres procesadores forestales con configuraciones diferentes realizando procesamiento a borde de camino en forestaciones de *Pinus taeda*, elaborando principalmente madera para trituración y aserrío.

El trabajo fue desarrollado en la zona norte de la provincia de Misiones, en plantaciones cercanas a las localidades de Colonia Victoria (26° 20' Sur; 54° 39' Oeste), Puerto Libertad (26° 10'

Sur; 54° 20' Oeste) y Wanda (26° 04' Sur; 54° 20' Oeste). Estos sitios presentaron terrenos suavemente ondulados con pendientes entre el 0 y 5%. El clima subtropical húmedo fue definido como "Caf" según la clasificación climática de Köppen, con una temperatura media anual de 20°C, una amplitud de 11°C, y una precipitación de 2000 mm anuales, sin estación seca. Los suelos pertenecen al gran grupo de los Kandudultes, conocidos como "tierras coloradas" (PEÑA; PINEDO, 1990), variando sus características dependiendo de su posición topográfica.

Los tres sitios evaluados se encuentran comprendidos en el rango de situaciones típicas en la región, correspondiendo a talas rasas de forestaciones de *Pinus taeda* de 13 años de edad, sin la realización de raleos previos. Los detalles de cada sitio y máquina evaluada se presentan en la Tabla 1. Los equipos del Sitio 1 (S1) y el Sitio 2 (S2) son máquinas forestales con sistema rodante sobre orugas específicamente diseñadas para el trabajo forestal. El equipo del Sitio 3 (S3) es una excavadora vial sobre orugas equipada con un cabezal procesador y con las adaptaciones necesarias para el trabajo forestal (protección de la cabina con una reja, instalación de conductos eléctricos en la grúa y mejoras en el sistema de refrigeración del aceite hidráulico).

Dependiendo de los requerimientos particulares de las industrias los equipos elaboraron diferentes combinaciones de productos. El equipo de S1 operó en dos turnos diarios de 7 h y realizó la elaboración de: a) Trozas exclusivamente destinadas a trituración con diámetro en punta fina (DPF) mínimo de 5 cm y largo variable. b) Un conjunto de tres productos conformado por trozas aserrables de 4,87 m de largo con DPF mí-

mo de 22 cm, trozas aserrables de 3,05 m con DPF mínimo de 18 cm y trozas de largo variable con destino a trituración con un DPF mínimo de 5 cm.

El equipo de S2 operó un turno diario de 10 h y realizó la elaboración de: a) Trozas de largo variable y DPF mínimo de 5 cm exclusivamente destinadas a trituración. b) Un conjunto de dos productos conformado por trozas aserrables con un DPF mínimo de 18 cm y trozas de largo variable con DPF mínimo de 5 cm destinadas a trituración.

El equipo de S3 operó un turno diario de 10 h y elaboró únicamente un conjunto de dos productos conformado por trozas aserrables con un DPF mínimo de 18 cm, y rollizos de largo variable con DPF mínimo de 5 cm con destino a trituración.

Recolección de datos

Los estudios de tiempos y movimientos se realizaron utilizando un cronómetro sexagesimal y según la metodología de toma de tiempos continuos, bajo condiciones de trabajo normales y sin que el observador interfiriera en ellas (PARRA; CAREY, 2000).

La unidad experimental fue el ciclo operacional definido como el procesamiento completo de un árbol. Fueron evaluados todos los ciclos operacionales ocurridos durante el tiempo de observación, determinándose para cada uno el tiempo total de actividad efectiva transcurrido desde la captura del árbol en planchada hasta la liberación final de las ramas y captura de un nuevo árbol, sin discriminar etapas intermedias. Además se determinaron los tiempos de actividades complementarias (TAC: movimiento adicional de trozas, movimiento de ramas, desplazamiento de la máquina sobre la planchada) y actividades no productivas (TNP: desplazamiento de la máqui-

Tabla 1. Características de la maquinaria analizada.

Table 1. Machinery characteristics analyzed.

	Sitio 1 (S1)	Sitio 2 (S2)	Sitio 3 (S3)
DAP medio (cm)	24	23	24
Altura media (m)	19,9	19,1	22,5
Volumen medio (m ³ cc)	0,47 (SD: 0,26)	0,42 (SD: 0,23)	0,57 (SD: 0,34)
Máquina Base	John Deere 2154D	Caterpillar 320D FM	John Deere 200D LC
Cabezal procesador	Waratah HTH 622B	Log Max 7000b	Log Max 7000c
Potencia nominal (kW)	119	110	119
Consumo combustible (l.h ⁻¹)	25	18	25
Suministro fluido hidráulico (l.min ⁻¹)	236	205	212
Presión fluido hidráulico (kPa)	34336	35000	34336
Alcance máximo grúa (m)	8,5	8	9,92
Masa total (kg)	26660	26900	22650
Masa cabezal (kg)	2120	1620	1620
Diámetro máximo desrame (cm)	64,7	56	56
Velocidad máxima alimentación (m.s ⁻¹)	5,7	5,2	5,2

SD= Desvío estándar.

na sobre camino, paradas por charlas operativas o cruce de vehículos, paradas técnicas para mantenimiento, descanso del operador). El número mínimo de observaciones necesarias, fue calculado mediante la siguiente expresión (1), para proporcionar un error relativo de muestreo máximo del 5% (LEVY; LEMESHOW, 2008).

$$n = \left(\frac{t*s}{\frac{E}{100}*\bar{x}} \right)^2 \quad (1)$$

Dónde:

t: Valor de la distribución *t Student*, con un nivel de confianza del 95%;

s: Desvío estándar de la muestra;

E: Error de muestro relativo máximo (5%);

\bar{x} : Media de la muestra;

n: Tamaño de la muestra.

Se determinó el diámetro en punta gruesa (DPG) de los fustes en planchada. El diámetro a la altura del pecho (DAP) fue estimado con una función ajustada previamente [DAP = *f* DPG]. Para estimar la altura de los árboles se ajustaron funciones hipsométricas para cada sitio en particular. El volumen con corteza de cada árbol (VOL) fue estimado mediante el modelo desarrollado para la región por Crechi et al. (2006).

La productividad de los procesadores fue determinada en metros cúbicos con corteza por hora de trabajo efectiva, tanto para un fuste individual como para el periodo total de operación (2). La eficiencia operacional fue calculada como la proporción del tiempo en que la máquina realiza las actividades de procesamiento efectivas, respecto del tiempo total de operación (3).

$$PEF = VT/TAE \quad (2)$$

$$EF\% = (TAE/TT) * 100 \quad (3)$$

Dónde:

PEF = Productividad del procesador por hora de trabajo efectivo ($m^3 \cdot h^{-1}$);

VT = Volumen total cosechado (m^3);

TAE = Tiempo total efectivo de procesamiento, en horas efectivas,

TT = Tiempo total de operación incluyendo paradas y mantenimiento.

Desarrollo del modelo.

El análisis estadístico consideró al procesamiento de cada fuste como un dato individual, aprovechando la variabilidad del volumen individual de los árboles para explicar mejor su correlación con la productividad efectiva y su interacción con otras variables.

Para el análisis de la productividad efectiva de los equipos se desarrollaron modelos lineales mixtos considerando variables categóricas (tipo de máquina, potencia de los equipos, número de productos), covariables (volumen del árbol y logaritmo natural del volumen) e interacciones entre estas. Las covariables fueron seleccionadas en base a publicaciones anteriores (BRAMUCCI; SEIXAS, 2002; ERBETTA et al., 2006; MAC DONAGH et al., 2013). De esta forma se ajustaron y evaluaron cinco modelos diferentes, considerando en todos los casos como variable respuesta al logaritmo natural de la productividad efectiva (ln(PEF)) como forma de compensar la heterocedasticidad en los residuos:

- *Modelo 1* - Modelo lineal simple:

$$\ln(PEF) = b_0 + b_1 * Vol$$

- *Modelo 2* - Modelo logarítmico:

$$\ln(PEF) = b_0 + b_1 * Vol + b_2 * \ln(Vol)$$

- *Modelo 3* - Modelo con variables categóricas:

$$\ln(PEF) = b_0 + b_1 * Vol + b_1 * \ln(Vol) + \text{Coef. Máquina} + \text{Coef. Potencia} + \text{Coef. Productos}$$

- *Modelo 4* - Modelo completo:

$$\ln(PEF) = b_0 + b_1 * Vol + b_1 * \ln(Vol) + \text{Coef. Máquina} + \text{Coef. Potencia} + \text{Coef. Productos} + \text{Int. Máquina} * Vol + \text{Int. Potencia} * Vol + \text{Int. Productos} * Vol$$

- *Modelo 5* - Modelo completo excluyendo términos no significativos.

En el ajuste de los modelos se incorporó una compensación de la heterogeneidad de la varianza por medio de un modelo potencial (varPower). El ajuste fue realizado con el módulo de "Modelos lineales, generales y mixtos" disponible en la combinación del software R e Infostat (DI RIENZO et al. 2013), según la metodología establecida por Zuur et al., 2009 y Cayuela, 2012.

La selección del mejor modelo buscó minimizar los valores del Criterio de Información de Akaike (AIC), el Criterio Bayesiano de Información (BIC), y aumentar el coeficiente de determinación (R^2).

Para analizar los costos de producción de las distintas situaciones, se calcularon costos horarios de operación mediante la metodología propuesta por FAO (STÖHR, 1977; SOUZA et al, 2008), con valores estimados de adquisición, implementos e insumos, y gastos administrativos; pero considerando valores reales provistos por las empresas para los consumos de combustible, lubricantes y los costos laborales. Para las tres situaciones se consideraron equipos nuevos, con una vida útil estimada de 15000 h. Los costos productivos por metro cubico de madera elaborada, sin considerar im-

puestos, fueron obtenidos a partir de la productividad calculada para cada equipo según las expresiones (4) y (5). Estos costos se presentan en dólares estadounidenses según la cotización promedio para septiembre del 2013 establecida por el Banco Central de la República Argentina (1 USD = 5,7 ARS):

$$\text{Costo de Producción Efectivo (US$.m}^{-3}\text{)} = \frac{\text{Costo horario (US$.h}^{-1}\text{)}}{\text{PEF (m}^3\text{.h}^{-1}\text{)}} \quad (4)$$

$$\text{Costo de Producción Total (US$.m}^{-3}\text{)} = \frac{\text{Costo horario (US$.h}^{-1}\text{)}}{\text{PEF (m}^3\text{.h}^{-1}\text{)} * \text{EF}\%} \quad (5)$$

Dónde:

PEF = Productividad del procesador por hora de trabajo efectivo (m³.h⁻¹);

EF% es la eficiencia porcentual del equipo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de los estudios de tiempos y rendimientos se evaluaron un total de 1363 ciclos para S1, 1045 ciclos para S2 y 397 ciclos para S3, siendo este último caso menor debido a un menor periodo de tiempo de estudio. Los valores medios de productividad efectiva fueron respectivamente 50,65 m³.h⁻¹, 41,3 m³.h⁻¹ y 49,94 m³.h⁻¹. Las forestaciones presentaron distribuciones de volúmenes ligeramente asimétricas, con un 60% de los árboles ubicados por debajo del volumen medio debido a la ausencia de raleos previos a la cosecha pero teniendo hasta un 5% de los árboles con el doble del volumen medio.

La Tabla 2 presenta los resultados del ajuste para los cinco modelos desarrollados, siendo en todos los casos ln(PEF) la variable respuesta. La incorporación de un término logarítmico en el Modelo 2 resultó útil para representar mejor la correlación positiva entre la productividad y el volumen de los árboles, obteniéndose una curva con pendiente decreciente al aumentar el volumen de estos. La incorporación del diseño de

las máquinas, potencia y número de productos como variables categóricas en el Modelo 3 resultó significativa para todas ellas. Sin embargo en el Modelo 4, al incorporar las interacciones entre estas variables y el volumen de los árboles, la potencia de los equipos y la interacción entre el diseño forestal y el volumen de los árboles no resultaron significativas a una probabilidad P<0,05. El Modelo 5 consideró únicamente las variables e interacciones significativas, obteniendo el menor AIC y un R² de 0,704.

La ecuación (6) presenta el modelo final seleccionado con sus coeficientes ajustados. Las variables categóricas toman el valor 1 para el nivel indicado. En el caso de equipos forestizados, potencia de 110 kW o procesamiento de un único producto estas toman el valor 0.

$$\begin{aligned} \ln(\text{PEF}) = & 4,59 - 0,512 * \text{VOL} + 0,733 * \\ & \ln(\text{VOL}) + 0,094 * [\text{Máq.Forestal}] \\ & - 0,123 * [\text{Varios.Prod}] + 0,495 * \\ & [\text{Pot 119kW}] * \text{Vol} - 0,193 * \\ & [\text{Varios.Prod}] * \text{Vol} \quad (6) \end{aligned}$$

Por medio del gráfico QQ-Plot (Figura 1) puede observarse que el modelo elegido cumple el supuesto general de normalidad de los residuos, mientras que en el gráfico de dispersión entre los residuos estandarizados y los valores predichos no se observan una evidente heterocedasticidad o una inadecuada especificación del modelo. La realización de un Test de medias de Student entre los valores observados a campo y las predicciones obtenidas por el modelo no indica diferencias estadísticamente significativas (p-valor = 0,79).

El nivel de ajuste logrado por el modelo elegido fue similar a los obtenidos en regresiones lineales múltiples por Arroyo Martínez (2005) en Chile, superior al obtenido por Evanson y McConchie, (1996) en Nueva Zelanda, y ligeramente inferior al 0,82 obtenido por Strandgard et al. (2014) en Nueva Zelanda, todos analizando el procesamiento de *Pinus radiata* para equipos individuales.

Tabla 2. Indicadores de ajuste y coeficientes de efectos fijos para los modelos ajustados.

Table 2. Indicators of adjustment and coefficients of fixed effects for the fitted models.

Mod.	AIC	R ²	Intercepto	Covariables		Factores			Interacciones		
				Vol	ln(Vol)	Máquina [Forestal]	Potencia [119 kW]	Productos [Varios]	Máq*Vol [Forestal]	Pot*Vol [119 kW]	Prod*Vol [Varios]
1	1559	0,528	3,1961	1,2285	----	----	----	----	----	----	----
2	743	0,659	4,6382	-0,3749	0,7605	----	----	----	----	----	----
3	512	0,691	4,439	-0,2526	0,6912	0,0866	0,2236	-0,201	----	----	----
4	409	0,705	4,5454	-0,4276	0,7396	0,1484	0,014 *	-0,1197	-0,0946*	0,4686	-0,1992
5	398	0,704	4,59	-0,5126	0,7332	0,0939	----	-0,1229	----	0,4954	-0,1936

(*) Coeficiente no significativo a una probabilidad P < 0,05

Mod. = Modelos. Vol = Volumen de árbol medio (m³). Máq*Vol= Interacción entre el volumen y el diseño forestal. Pot*Vol= Interacción entre el volumen y una potencia de 119 kW. Prod*Vol= Interacción entre el volumen y la elaboración de varios productos.

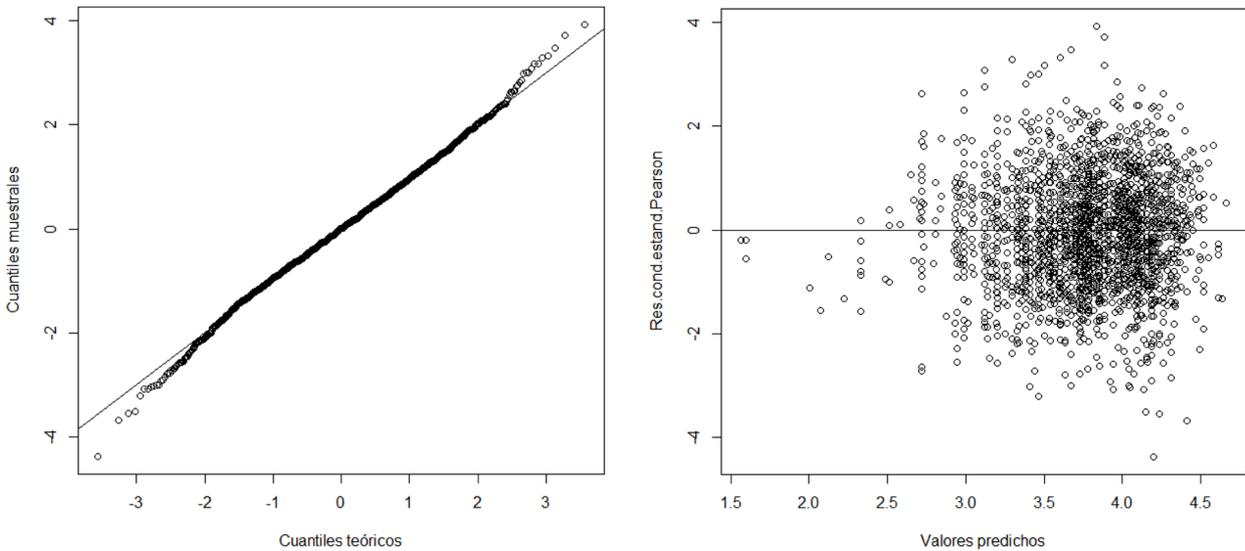


Figura 1. Gráfico QQ-Plot y gráfico de residuos estandarizados respecto a los valores predichos.
Figure 1. QQ-Plot graphic and graphic of standardized residuals vs predicted values.

La Figura 2 presenta las estimaciones de productividad del modelo general y su ajuste respecto a los pares de valores observados en las situaciones evaluadas. El modelo resultó adecuado para estimar el valor de productividad media y su variación respec-

to del volumen de los árboles, independientemente de las características de los equipos analizados. El comportamiento general del modelo está regido principalmente por la correlación positiva entre el volumen de los árboles y la productividad efectiva.

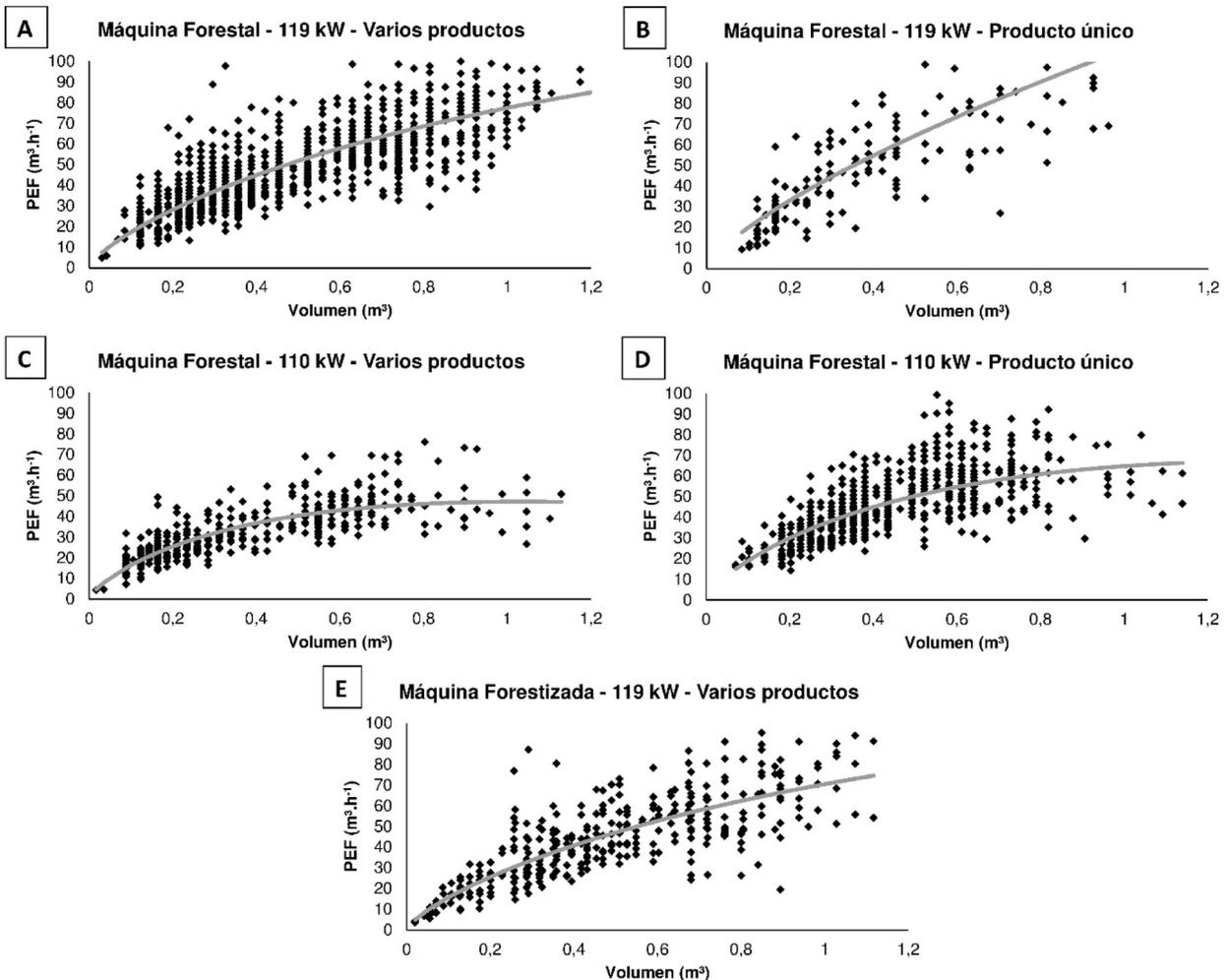


Figura 2. Comportamiento del modelo predictivo para las distintas situaciones evaluadas con respecto a los valores observados.

Figure 2. Predictive model behavior for different situations evaluated with respect to the observed values.

El análisis de los coeficientes ajustados para el modelo evidencia que el diseño de los equipos específicos para el trabajo forestal afecta significativamente al nivel de la curva de producción, contribuyendo en promedio con $4,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ respecto a un equipo forestizado, lo que representa un aumento de un 9,8% en la productividad (a igualdad de otras variables). Sin embargo, esta mayor productividad está acompañada por un aumento del 2,2% en el costo unitario efectivo de producción, lo que destaca las ventajas competitivas de los equipos forestizados. Por otra parte, no resultó significativa la interacción entre el diseño forestal y el volumen de los árboles.

La elaboración de varios productos implicó una reducción media de la productividad de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, respecto a un escenario en el que únicamente se producen trozas destinadas a trituración. Además, se observó una interacción negativa entre la elaboración de varios productos y el volumen de los árboles procesados. Esto se debe a que un mayor volumen implica la obtención de una mayor cantidad de trozas, que deben ser clasificadas en distintas pilas, aumentando el tiempo insumido en el procesamiento (BAKER et al., 2009).

En este sentido, para un volumen de $0,7 \text{ m}^3$ la elaboración de varios productos implica un aumento de 11,8 segundos en el tiempo medio de procesamiento, con una caída en la productividad efectiva de $16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (-22,8%) y un aumento en el costo unitario efectivo del 29,4%. En cambio, para el procesamiento de árboles con un volumen de $0,3 \text{ m}^3$, la elaboración de varios productos implica un aumento de 5 segundos y una reducción de la productividad de $6,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (-16,6%) con un aumento del 19,8% en el costo unitario efectivo. Dado que la tendencia actual lleva a las empresas forestales a cosechar árboles cada vez más pequeños, el impacto de la elaboración de varios productos sobre la productividad y los costos sugiere la necesidad de determinar un umbral por debajo del cual sea conveniente elaborar únicamente trozas destinadas a trituración.

Se observó una fuerte interacción entre la potencia de los equipos y el volumen de los árboles. Los equipos de mayor potencia (119 kW) presentaron una mayor pendiente de la curva de productividad. Esta implica un mayor caudal de suministro hidráulico mejorando la posibilidad de satisfacer las necesidades del cabezal en situaciones de movimientos múltiples y procesamiento de árboles de gran diámetro o con ramas gruesas. Sin embargo, la potencia como variable

resultó más explicativa que los valores teóricos de presión y caudal de trabajo. En este sentido, para forestaciones con un volumen medio de $0,3 \text{ m}^3$ la utilización de un equipo de 119 kW implica un aumento de productividad del 16% y una reducción de los costos del 3%. En cambio, al operar en una forestación con un volumen medio de $0,7 \text{ m}^3$, la mayor potencia genera un aumento del 41% en la productividad, con una reducción del 20% en el costo unitario efectivo. Como puede observarse en la Figura 2, las curvas de productividad C y D, con menor potencia, presentan una rápida reducción de la pendiente al aumentar el volumen de los árboles y con ello la dificultad y el tiempo insumido en el procesamiento. Por esta razón este equipo presentaría una limitación de la productividad al trabajar con forestaciones de volumen medio superior a $0,5 \text{ m}^3$ y gran variabilidad del volumen.

Es importante señalar, que aunque los equipos tuvieron un tamaño similar, un ligero aumento de potencia posibilita aumentos significativos en la productividad efectiva, especialmente al trabajar con árboles grandes. Esto indica la importancia de que tiene la elección de un procesador suficientemente potente y adecuado para el tamaño medio de los árboles a cosechar, para lo cual hay que considerar que en las forestaciones analizadas hasta un 45% de los fustes son más grandes que la media, y cerca del 5% duplican el volumen medio.

Para facilitar la comparación entre los distintos equipos analizados se consideró una situación estándar con un volumen de árbol medio de $0,4 \text{ m}^3$. Las productividades estimadas mediante el modelo para estas situaciones se presentan en la Tabla 3. Al analizar los costos se observó que el equipo forestal de mayor potencia (S1) presentó el mayor costo horario de operación, mientras que el equipo forestal de menor potencia (S2) y el equipo forestizado (S3) presentaron costos similares, debido al menor consumo de combustible del primero y al menor valor de adquisición del segundo. Puede señalarse que el consumo de combustible tuvo una fuerte incidencia en los costos, representando en promedio un 37,4% del costo horario en los equipos de 119 kW y un 28,5% en el equipo de 110 kW. Por otra parte, el equipo forestizado presentó una gran ventaja debido a su menor costo de adquisición, representando los costos fijos únicamente un 25,7% frente al 31% de S1 y al 37% de S2.

Para la elaboración de varios productos el menor costo lo obtuvo la máquina forestizada

(S3), teniendo el equipo forestal (S1) un costo intermedio. Cuando se elaboró un único producto el menor costo unitario efectivo lo presentó el equipo forestal de 119 kW (S1). Por otra parte, si se utiliza el modelo desarrollado para predecir la productividad del equipo forestizado en la elaboración de un único producto (Situación no analizada en la realidad), este obtendría también el menor costo unitario. En todos los casos el equipo forestal de 110 kW (S2) presentó el mayor costo unitario debido a su menor productividad. Seixas y Batista (2014) alcanzaron conclusiones similares al analizar la productividad y costos de harvesters sobre ruedas y excavadoras forestizadas realizando volteo y procesamiento de eucaliptus en Brasil, los cuales presentaron productividades equivalentes y menores costos de los equipos forestizados.

La eficiencia operacional de las distintas situaciones distorsionó los costos unitarios totales, teniendo S2 el menor costo para la elaboración de un único producto. En cambio, S3 sigue siendo la mejor opción para la elaboración de varios productos, quedando S2 en segundo lugar.

En las Figuras 3, 4, 5 se presentan las estimaciones de productividad efectiva y comportamiento de los costos respecto a la variación del volumen de los árboles. En la Figura 3 se observa una tendencia decreciente de la productividad con la reducción del volumen, con un correspondiente aumento de los costos de producción. Se aprecia además la diferencia entre curvas debida a la interacción existente entre el volumen de los árboles y el procesamiento de varios productos. En la Figura 5 la tendencia es similar.

Tabela 3. Costos medios de producción para un volumen de árbol medio de 0,4 m³.

Table 3. Average production costs for a volume of average tree of 0.4 m³.

Operación	Productividad efectiva (m ³ .h ⁻¹)	Costo operacional (US\$.h ⁻¹)	Costo Unitario Efectivo (US\$.m ⁻³)	Costo Unitario Total (US\$.m ⁻³)
S1 Máquina Forestal 119 kW Producto único	58,84	77,13	1,31	1,93
S1 Máquina Forestal 119 kW Varios productos	47,79	77,13	1,61	2,37
S2 Máquina Forestal 110 kW Producto único	47,32	68,76	1,45	1,79
S2 Máquina Forestal 110 kW Varios productos	38,44	68,76	1,79	2,21
S3 Máquina Forestizada 119 kW Varios productos	43,50	68,65	1,58	2,10

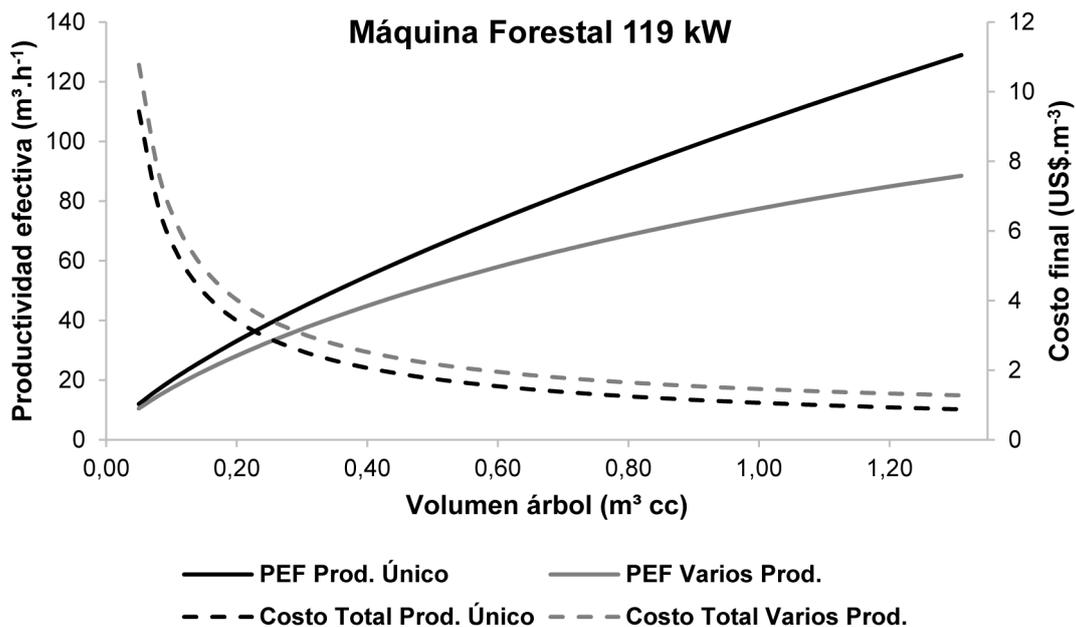


Figura 3. Variación de la productividad y el costo de producción respecto del volumen para un procesador forestal de 119 kW y dos conjuntos de productos.

Figure 3. Variation in productivity and production cost with the tree volume for a forest processor with 119 kW engine and two sets of products.

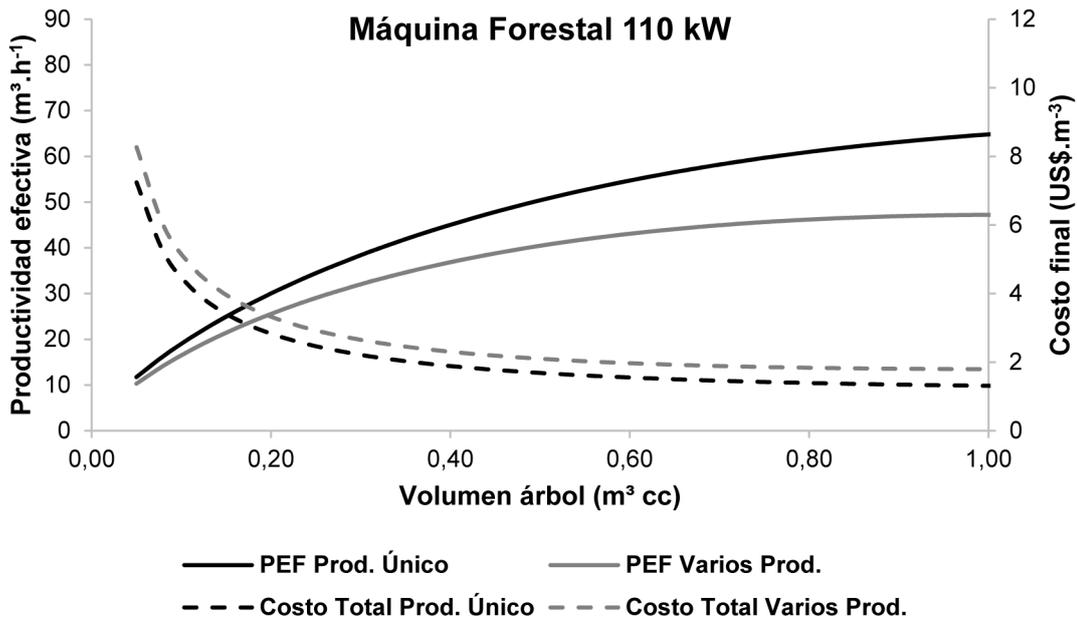


Figura 4. Variación de la productividad y el costo de producción respecto del volumen para un procesador forestal de 110 kW y dos conjuntos de productos.

Figure 4. Variation in productivity and production cost with the tree volume for a forest processor with 110 kW engine and two sets of products.

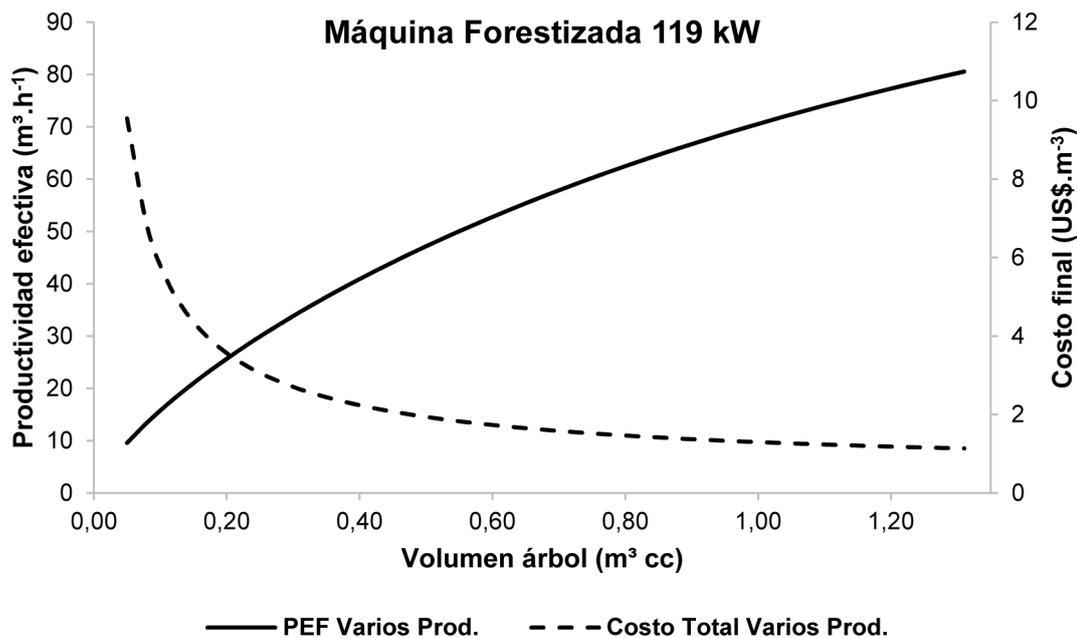


Figura 5. Variación de la productividad y el costo de producción respecto del volumen para un procesador forestizado de 119 kW y dos conjuntos de productos.

Figure 5. Variation in productivity and production cost with the tree volume for a hybrid processor with 119 kW engine and only a set of products.

En la Figura 4 se observa que la tasa de incremento de la productividad se vuelve decreciente al aumentar el tamaño de los árboles, con un buen comportamiento del equipo a volúmenes bajos, mientras que con volúmenes mayores a 0,5 m³ se ingresa en el rango de máxima productividad, denominado por Visser et al. (2009) como "Sweet-Spot". En todas las situaciones la productividad de los equipos disminuye fuertemente al trabajar con volúmenes menores a 0,3 m³.

CONCLUSIONES

Se consiguió el desarrollo de un modelo mixto de efectos fijos para predecir la productividad por hora de trabajo efectiva de procesadores a borde de camino, analizándose tanto equipos forestales como excavadoras forestizadas, con 110 y 119 kW de potencia, y con esquemas de trabajo que comprendieron la elaboración de un único producto y una combinación de varios

productos, lográndose explicar el 70 % de la variabilidad observada, con independencia de las situaciones originales.

El volumen individual de los árboles fue la principal variable que afectó a la productividad de los procesadores a borde de camino. El diseño específico para el trabajo forestal afectó de forma positiva a la productividad, implicando también un mayor costo de operación. Por otra parte la potencia tuvo un importante impacto en la productividad vinculado al tamaño de los árboles, con lo cual aunque una mayor potencia conllevó un mayor consumo de combustible, se evitaron limitaciones en el procesamiento de árboles de volúmenes superiores a 0,5 m³. Por otra parte, la elaboración de varios productos implicó una reducción en la productividad acentuada por el aumento en el volumen de los árboles.

Para una misma situación de referencia el equipo forestizado se destacó como la mejor opción debido a su alto rendimiento y bajo costo de operación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por el Programa Cluster del PROSAP, Área de Competitividad.

BIBLIOGRAFÍA

ARROYO MARTÍNEZ, C. D. P. *Evaluación técnica y modelamiento de procesador en cosecha de Pinus radiata en la X Región*. 2005. 31 p. Monografía (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Florestal), Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2005.

BAKER, S.; CASS, R.; GREENE, D. Product sorting impacts on cost and productivity of tree-length logging operations. In: ANNUAL MEETING OF THE COUNCIL ON FOREST ENGINEERING, 32, 2009, Lake Tahoe. *Proceedings...* Lake Tahoe, 2009.

BRAMUCCI, M.; SEIXAS, F. Determinação e quantificação de fatores de influência sobre a produtividade de harvester na colheita florestal. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 62, p. 62-74, 2002.

CAYUELA, L. Modelos lineales mixtos (LMM) y modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) en R. *Universidad Rey Juan Carlos*. n. 2. p.65. 2012.

CRECHI, E.; FASSOLA, H.; KELLER, A.; BARTH, S. Modelos de estimación del volumen individual de árboles con y sin corteza de *Pinus taeda* L. para la zona de Norte de Misiones, Argentina. In: JORNADAS TÉCNICAS FORESTALES Y AMBIENTALES, 12., 2006, Eldorado. *Anais...* Eldorado, 2006. p. 14.

DI RIENZO, J. A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M. G.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. *InfoStat versión 2013*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Disponible em: <<http://www.infostat.com.ar>>. Acceso em: Ago. 2013.

ERBETTA, D.; COSTA, R.; GONZÁLEZ, J.; MAC DONAGH, P.; DURAN, D. Modelos predictivos en la productividad de Feller Buncher Bell Ultra C. In: CONGRESO LATINOAMERICANO IUFRO, 2., 2006, La Serena, *Anais...* La Serena, 2006. p. 6.

EVANSON, T.; MCCONCHIE, M.; Productivity Measurements of Two Waratah 234 Hydraulic Tree Harvesters in Radiata Pine in New Zealand. *International Journal of Forest Engineering*, v. 7, n. 3, p. 41-52, 1996.

LEVY, P. S.; LEMESHOW, S. *Sampling of populations: methods and applications*. 4.ed. New York: John Wiley & Sons, p. 578, 2008.

MAC DONAGH, P. M.; HILDT, E.; MARTÍNEZ, M. S.; MULAWKA, J.; VALDES, M.; FERTIL, L. Sistema de apoyo a la planificación de la cosecha forestal. In: JORNADAS TÉCNICAS FORESTALES Y AMBIENTALES, 16, 2014, Eldorado. *Anais...* Eldorado, 2014. p. 639.

MAC DONAGH, P. M.; MULAWKA, J. A.; FRIEDL, R. A.; ZADERENKO, C.; ALEGRANZA, D. A. Productividad y costos de pequeños "harvester" con oruga, operando en plantaciones de *Pinus spp.* en el noreste argentino. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 42, n. 99, p. 425-434, set. 2013.

PARRA, M. O.; CAREY, P. B. Consideraciones metodológicas para la evaluación de la cortadora - procesadora (harvester) en operaciones forestales. *Bosque*, Valdivia, v. 21, n. 2, p. 137-146, 2000.

PEÑA ZUBIATE, C. A.; PINEDO, D. M.; *Atlas de suelos de la República Argentina*. Buenos Aires: SAGyP/INTA. 1990. v. 2, 600 p.

- SEIXAS, F.; BATISTA, J. L. F. Comparação técnica e econômica entre harvesters de pneus e com máquina base de esteiras. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 185-191, 2014.
- SOUZA, M. A.; PIRES, C. B.; SILVEIRA, F. C. Colheita florestal: Mensuração e análise dos efeitos das variáveis controláveis e não controláveis no custo das atividades de corte e descasque mecanizado. *Revista de Contabilidade e Organizações*, v. 3, n. 2, p. 73-99, 2008.
- STÖHR, G. W. D. Cálculo de custos de máquinas florestais. *Floresta*, Curitiba, v. 8, n. 2, p. 23-30, 1977.
- STRANDGARD, M.; ALAM, M.; MITCHELL, R. Impact of Slope on Productivity of a Self-levelling Processor. *Croatian Journal of Forest Engineering*, Zagreb, v. 35, n. 2, p. 193-200, 2014.
- VISSER, R.; SPINELLI, R.; SAATHOF, J.; FAIRBROTHER, S. Finding the 'Sweet-Spot' of Mechanised Felling Machines. ANNUAL MEETING OF THE COUNCIL ON FOREST ENGINEERING, 32, 2009, Lake Tahoe. *Proceedings...* Lake Tahoe, 2009. p. 10.
- ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; WALKER, N. J.; SAVELIEV, A. A.; SMITH, G. M. *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. New York: Springer, 2009. 574 p.

Recebido em 19/08/2014

Aceito para publicação em 25/02/2015

