Efecto de la densidad de las forestaciones y la intensidad de cosecha en
raleos mecanizados con *harvester*.Forest density and thinning intensity effect in mechanized thinning
with harvester.Eduardo Hildt^{1*}, Andrés Leszczuk¹, Tomás Schlichter², Patricio Mac Donagh¹**Resumen**

El objetivo de este estudio fue evaluar cómo la densidad de la forestación y la intensidad de los raleos afectan a la cosecha con *harvester*. Fueron evaluados siete *harvesters* diferentes, en nueve situaciones de segundo raleo de pino del noreste argentino. Los estudios de tiempos comprendieron el establecimiento de parcelas y la filmación de las operaciones. La densidad media de los rodales fue de 656 árboles.ha⁻¹, con un volumen medio de 0,53 m³. El raleo extrajo en promedio el 45% de los árboles. Fueron ajustados modelos mixtos a nivel de parcela para la duración de cada actividad, considerando a las características de la forestación y la operación como factores fijos y al sitio como factor aleatorio. La productividad de la cosecha en las distintas situaciones estuvo comprendida entre 11 y 46 m³.h⁻¹. El incremento en la densidad implicó una reducción en el tiempo de búsqueda de los árboles y un aumento en el tiempo de posicionamiento del cabezal, y de desrame y trozado. En cambio, el incremento de la intensidad de raleo redujo el tiempo de búsqueda de los árboles y favoreciendo la cosecha de árboles más grandes, aumentando la productividad. La elaboración de varios productos provocó una reducción del 21,6% en la productividad, respecto al trozado de un único producto triturable.

Palabras clave: Productividad; Estudio de tiempos; Modelos Mixtos.

Abstract

The objective of this study was to evaluate how forest density and thinning intensity affect the harvester work performance. Were studied seven different harvesters, in nine situations of second thinning of pine, from northeast Argentina. Time studies comprises the establish of plots and the filming of operations. Forests have an average density of 656 trees.ha⁻¹, with a mean volume of 0.53 m³. In thinning's, a 45% of the trees were removed. Mixed plot-level models were adjusted for each activity, incorporating the forestry and operation characteristics as fixed factors, and the site as a random factor. The effective productivity was between 11 and 46 m³.h⁻¹. A higher forestry density implied a reduction in time for reach the trees and an increase in the time required for head positioning, delimbing and bucking. In contrast, an increased in thinning intensity reduced the time for reach the trees and implied the harvesting of larger trees, with a positive impact on productivity. The elaboration of several products implied a reduction of 21.6% in productivity with respect to the any pulpwood assortment.

Keywords: Productivity; Time study; Mixed models.

INTRODUCCIÓN

La mecanización de las operaciones de raleo por medio de la incorporación de *harvesters*, tanto con neumáticos como con orugas, ha supuesto una disminución en el costo de cosecha y una mejora en las condiciones de trabajo. Sin embargo, la productividad de los *harvesters* puede verse reducida al cosecharse un bajo volumen por hectárea, al elaborar árboles con un bajo volumen individual, y al trozar varios productos diferentes (BRAMUCCI; SEIXAS, 2002). Por otra parte, es menos conocida la forma en que la densidad de las forestaciones y la intensidad de los raleos impactan sobre la productividad del *harvester*, los productos obtenidos y el costo de cosecha.

1. CONICET - FCF - Universidad Nacional de Misiones. Misiones, Argentina.

2. EPG - FAUBA - Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

* Autor Correspondiente: eduardohildt@gmail.com

El volumen de los árboles explica entre el 50% y el 70% de la variabilidad en la productividad del *harvester* (BRAMUCCI; SEIXAS, 2002; MEDERSKI et al., 2016; VISSER; SPINELLI, 2012). Aunque esta relación es aproximadamente lineal para árboles menores a 0,5 m³, la productividad puede decrecer cuando el tamaño de los árboles supera un umbral determinado por el tamaño y potencia del *harvester* (KÄRHÄ et al., 2004; NURMINEN et al., 2006; VISSER; SPINELLI, 2012). Esto se debe a que el tiempo requerido para el corte, desrame y trozado, también se incrementa con el tamaño de los árboles, representando entre el 45% y 75% del tiempo total del ciclo (NURMINEN et al., 2006; NIEMISTÖ et al., 2012).

La cosecha de forestaciones con densidades altas generalmente está asociada a una baja productividad del *harvester*. Mederski et al. (2016) observaron una reducción del 18% en la productividad al incrementarse la densidad inicial de la forestación de 800 a 1200 árboles.ha⁻¹. Esto en parte es explicado por el menor volumen medio de los árboles (FULVIO; BERGSTRÖM, 2013). Por otra parte, los movimientos del *harvester* pueden verse limitados por los árboles circundantes que el operario debe evitar dañar (MEDERSKI et al., 2016; SUADICANI; NORDFJELL, 2003).

En los raleos selectivos que extraen los árboles con menor vigor (*thinning from below*), la reducción de la intensidad de raleo implica la cosecha de árboles con un menor volumen individual (BERGSTRÖM et al., 2010). Además, la cosecha de un menor número de árboles incrementa el tiempo de desplazamiento por árbol cosechado (ELIASSON et al., 1999; PETTY; KÄRHÄ, 2014; SUADICANI; FJELD, 2001). Al mismo tiempo, los árboles remanentes restringen la visibilidad del operador y los movimientos de la grúa (OVASKAINEN et al., 2006). Por ejemplo, una disminución del 34% en la intensidad de raleo en bosques de *Pinus sylvestris* L. implica un incremento del 54% en el tiempo de movimiento del *harvester* (ELIASSON et al., 1999). En cambio, un incremento de la intensidad de raleo (del 25 al 45% del área basal) pone más árboles al alcance del *harvester* desde cada posición, reduciendo en un 21% el tiempo de movimiento entre árboles (SUADICANI; FJELD, 2001). Esto también ha sido observado por Laitila y Väätäinen (2013) en un raleo de *Pinus sylvestris*, donde el tiempo de movimiento durante la búsqueda disminuyó en un 17% al duplicarse la intensidad de raleo.

La productividad del *harvester* disminuye al incrementarse el número de productos cosechados (ERIKSSON; LINDROOS, 2014; HILDT et al., 2018; NURMINEN et al., 2006). En este sentido, el corte de un pequeño número de productos sin clasificación, y la elaboración del material triturable con largos variables, permite simplificar la operación de trozado e incrementar la productividad (FULVIO; BERGSTRÖM, 2013; LAZDIŅŠ et al., 2016; PETTY; KÄRHÄ, 2014). Por ejemplo, Hildt et al. (2018) y Nurminen et al. (2006) encontraron que el desrame y trozado requiere un tiempo entre un 4 y 10% mayor para la elaboración de dos productos en lugar de uno, debido a un incremento en la carga de trabajo del operario que debe cortar y clasificar cada producto en distintas pilas.

La estimación de la productividad de los raleos con *harvester* es fundamental para el cálculo de los costos de cosecha (LAITILA; VÄÄTÄINEN, 2013; LAZDIŅŠ et al., 2016; MEDERSKI et al., 2016). Sin embargo, son escasos los estudios que abordan el análisis de los factores que afectan a esta operación considerando un conjunto amplio de *harvesters* (ERIKSSON; LINDROOS, 2014; NURMINEN et al., 2006). El objetivo de este estudio es determinar cómo la densidad del bosque y la intensidad del raleo afectan a las distintas actividades del ciclo operacional y a la productividad, analizando diferentes operaciones de segundo raleo del noreste argentino.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Este estudio fue realizado en forestaciones de *Pinus taeda* y del pino híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* ubicadas en el noreste de la República Argentina. Se evaluaron cuatro operaciones de raleo en el departamento de Santo Tomé (Corrientes) y cinco en el departamento de Iguazú (Misiones), entre el 2015 y 2017 (Figura 1). Estas plantaciones están destinadas a la producción de trozas aserrables y triturables, y con una edad de entre 11 y 12 años ya han pasado por un primer raleo. Sin embargo, por pertenecer a distintas empresas forestales, estos rodales presentaron diferencias en su densidad, volumen medio, espaciamiento e historia de manejo (Figura 2). El sitio 8 fue el único rodal implantado con pino híbrido.

En este estudio se demarcaron un total de 155 parcelas de 375 m², buscando maximizar la variabilidad en la densidad e intensidad de raleo existente entre parcelas (BERGSTRÖM et al., 2010; MEDERSKI et al., 2016; OLIVERA; VISSER, 2016). Las parcelas fueron instaladas en la vía de ingreso del *harvester*, ubicadas de forma consecutiva y abarcando el número de líneas alcanzadas por la grúa

Figura 1: Área de distribución de los sitios evaluados.

Figure 1: Distribution area of the sites evaluated.

Figure 2: Características de los sitios antes del raleo y resultados de la intervención.

Figure 2: Characteristics of sites before thinning and results of the intervention.

(ERBER et al., 2016; LAITILA; VÄÄTÄINEN, 2013). El número de parcelas evaluadas fue distinto en cada sitio (Tabla 1). Antes de realizarse el raleo se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) de todos los árboles. Las alturas fueron estimadas por medio de una función hipsométrica ajustada para cada rodal (OLIVERA; VISSER, 2016).

Tabla 1: Características de los *harvester* evaluados.**Table 1:** Characteristics of the harvesters evaluated.

Características	Sitio 1	Sitio 2	Sitios 3, 4 y 9			Sitio 5	Sitio 6	Sitio 7	Sitio 8
Maquina base	John Deere 160 G LC	Doosan DX225LC-3	Caterpillar 312D			Logman 821H	Logman 801H	Hyundai 160LC-7	Doosan DX180LC
Potencia (kW)	90	124	94			166	125	94	98
Masa (kg)	17717	21900	13470			14900	12000	17400	18500
Alcance (m)	8,7	9,8	8,5			10,3	9,3	8,9	9,2
Cabezal	Waratah H414	Waratah HTH616C	Log Max 5000			Keto 450 E Supreme	Keto 150 Supreme	Kesla 25 RHS-II	Waratah H415
Masa (kg)	1030	1800	895			1100	810	840	1330
Diámetro desrame (cm)	43	51	41			60	45	40	46
Sistema de control	Timbermatic	Timbermatic	Log Mate			Technion xLogger	Motomit IT 6,5"	Timbermatic	Timbermatic
Parcelas Ajuste	10	--	20 20 --			10	--	20	20
Parcelas Validación	--	5	6 14 5			--	6	--	19
Distancia entre líneas (m)	3	3	4 4 4			3	3	3	3,25
Vías de extracción	Sin vías	Sin vías	Sin vías			Sin vías	Cada 21 m	Cada 15 m	Cada 15 m

Las operaciones de raleo fueron prescriptas y supervisadas por los propietarios de las forestaciones, indicando la extracción del 50% de los árboles. En aquellas situaciones que no contaban con vías de extracción se realizó la remoción sistemática de una línea cada 5 existentes, y la cosecha selectiva de los árboles de menores dimensiones o de forma deficiente en las líneas restantes. Los árboles seleccionados para su extracción fueron identificados mediante marcas de pintura en los sitios 6 a 9 y por una menor altura de poda en los sitios 1 a 5.

El trozado comprendió la elaboración de entre uno y tres productos aserrables, y un producto triturable. La instrucción de trozado fue definida por la empresa propietaria de cada forestación. En los sitios 1 a 3 se cosecharon trozas triturables de 2,4 m de longitud. En cambio, en los sitios 5 a 9, estas tuvieron longitudes variables comprendidas entre 2,4 y 4,5 m. En el sitio 4 se trozaron únicamente dos productos aserrables, aprovechándose el fuste hasta un diámetro en punta fina (DPFmin) de 18 cm.

Características de las máquinas evaluadas.

Se estudiaron siete modelos de *harvester* diferentes, cuyas características pueden observarse en la Tabla 1. Los sitios 3 y 4 fueron cosechados por la misma máquina, con operarios diferentes. En el sitio 9 se utilizó una máquina de similares características a la utilizada en los sitios 3 y 4, pero correspondiente a otro contratista.

Relevamiento de la información.

Los estudios de tiempos y rendimientos fueron realizados mediante la metodología de tiempos continuos minimizando la intervención en la operación de cosecha (PETTY; KÄRHÄ, 2014). Por medio de filmaciones se registraron las actividades realizadas por el *harvester*, las características de los árboles cosechados y los productos elaborados. Para ello se utilizó una cámara digital Genius DVR-FHD590 instalada a bordo del *harvester*, la cual grabó simultáneamente y sin interrupciones los movimientos efectuados por el cabezal cosechador y la información presentada por su sistema de control (ERBER et al., 2016; OVASKAINEN et al., 2006). Estas grabaciones fueron analizadas con un software desarrollado a tal efecto, determinando la duración de las actividades identificadas y transcribiendo la información suministrada por el sistema de control: diámetros, largos y tipos de producto (NIEMISTÖ et al., 2012).

Los *harvesters* realizaron la cosecha de los árboles marcados para su extracción, siguiendo una secuencia operativa de trabajo conformada por las siguientes actividades:

- Búsqueda del árbol (Tbusq): Comprende el desplazamiento del *harvester* y los movimientos de la grúa necesarios para alcanzar el árbol a cortar.

- Ubicación del cabezal cosechador (Tpos): Abarca los movimientos de la grúa y el cabezal necesarios para capturar el árbol y orientar el volteo.
- Corte y volteo (Tcorte): Comprende el accionamiento de la sierra del cabezal al realizar el corte del fuste, el direccionamiento de la caída del árbol y los movimientos de la grúa necesarios para desplazar el fuste hasta la vía de saca.
- Desrame y trozado (Tproc): Incluye el desplazamiento del cabezal sobre el fuste, el desrame, la medición, corte y clasificación de cada troza elaborada.
- Liberación de las ramas (Tlib): Comprende los movimientos de la grúa y el cabezal necesarios para descartar el ápice al finalizar el trozado del fuste.

Las paradas fueron identificadas y discriminadas del ciclo operacional (MEDERSKI et al., 2016). El tiempo total de actividades efectivas (TAE) requerido para cosechar un árbol fue calculado según la ecuación [1] (NURMINEN et al., 2006).

$$TAE = Tbusq + Tpos + Tcorte + Tproc + TLib \quad [1]$$

Para cada parcela evaluada se calculó la densidad (N_i arb.ha⁻¹), el área basal (G_i m².ha⁻¹), el volumen de árbol medio (V_{mi} m³) y el volumen total (V_i m³.ha⁻¹) previos al raleo. Luego del raleo se determinaron la densidad (N_{ap} arb.ha⁻¹), el área basal (G_{ap} m².ha⁻¹), el volumen de árbol medio (V_{mAP} m³) y el volumen total (V_{ap} m³.ha⁻¹) cosechados. Se calcularon diferentes índices para la intensidad de raleo: $I_n = N_{ap}/N_i$; $I_g = G_{ap} / G_i$; $I_v = V_{ap} / V_i$ (BERGSTRÖM, 2010).

La productividad efectiva de los *harvesters* fue calculada según la ecuación [2], donde PEF es la productividad horaria sin considerar las paradas (m³.h⁻¹), V_{mRec} es el volumen total de madera obtenida de cada árbol (m³) y TAE es el tiempo medio de actividades efectivas empleado en la cosecha (s).

$$PEF = V_{mRec} / (TAE * 3600) \quad [2]$$

Análisis estadístico

Se ajustaron modelos mixtos al nivel de parcela para la duración de cada actividad, considerando como predictoras fijas a las características de los árboles cosechados (V_{mAP}), las características de las parcelas (N_i , G_i , V_i), la intensidad de raleo (I_n , I_g , I_v) y otras características de la operación (DPFmin, número de productos). El sitio fue incorporado como un factor aleatorio, representado el efecto combinado de cada *harvester* y su operador, y aportando además la estructura de anidamiento de las observaciones (NIEMISTÖ et al., 2012). El modelo correspondiente al Tproc fue ajustado al nivel de ciclo operacional para captar la variabilidad en el número de productos elaborados existente dentro de cada parcela (NIEMISTÖ et al., 2012). Los modelos fueron ajustados por medio del método de máxima verosimilitud (ML) utilizando la función "lme" del software R (R CORE TEAM, 2016). Se consideró una estructura de varianza diferente entre sitios (varIdent). Los mejores modelos fueron seleccionados según el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el R² marginal (R²M), disponibles en el paquete "piecewiseSEM" (LEFCHECK, 2016). Estos incorporaron únicamente las variables cuyos efectos fueron significativos para una probabilidad $p < 0,05$, sin presentar multicolinealidad.

Las situaciones que presentaron menos de 10 parcelas fueron destinadas a conformar una muestra de validación independiente. De esta forma el conjunto con el que se ajustaron todos los modelos estuvo conformado por 100 parcelas de 3 sitios de Misiones y 3 sitios de Corrientes. Por otra parte, el conjunto utilizado como muestra de validación estuvo formado por 55 parcelas de 6 sitios, 3 de ellos independientes respecto de conjunto de ajuste y los restantes conformados una muestra aleatoria de parcelas de los sitios mejor representados que no formaron parte de la muestra de ajuste (Tabla 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estudios de tiempos registraron la cosecha de 2076 árboles, totalizando 707 m³ de madera cosechada en 24 h efectivas de trabajo, con 537 m³ concentrados en trozas aserrables y 170 m³ en trozas triturables. La Figura 2 presenta las características de la masa extraída en el raleo. Las parcelas cosechadas tuvieron una densidad inicial media de 656 arb.ha⁻¹ con un área basal media de 36,1 m².ha⁻¹, de los que se cosecharon 299 árboles.ha⁻¹, extrayendo 13,4 m².ha⁻¹ de área basal

(Gap) (Cuadros A y B – Figura 2). Las situaciones evaluadas tuvieron un Vmi promedio de 0,53 m³ con un desvío estándar (SD) de 0,10 m³. Sin embargo, la aplicación del raleo selectivo a los árboles de menores dimensiones implicó un VmAP promedio de 0,40 m³ (SD: 0,11 m³), significativamente menor y similar a otros raleos estudiados en la región (HILDT et al., 2018) (Cuadro C – Figura 2). El VmAP estuvo relacionado al Vmi, aumentando también en 0,03 m³ con cada incremento de 0,1 en la proporción Iv, explicando esto el 52% de la variabilidad observada (Modelo 1 – Tabla 2). El volumen de madera elaborada en cada árbol (VmRec) estuvo determinado por el VmAP (R²M = 0,7),

Tabla 2: Coeficientes para los modelos ajustados para el volumen y los tiempos parciales.

Table 2: Coefficients for models adjusted for volume and partial times.

Modelo	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 4	Mod. 5	Mod. 6	Mod. 7	Mod. 8
Variable	VmAP (m ³)	VmRec (m ³)	Volumen triturable (decimal)	Tbusq (s.árbol ⁻¹)	Tpos (s.árbol ⁻¹)	Tcorte (s.árbol ⁻¹)	Tproc (s.árbol ⁻¹)	Tlib (s.árbol ⁻¹)
Intercepto	-0,1257 (0,0379)	0,8419 (0,042)	-0,4752 (0,3269)	2,6227* (1,755)	3,4889 (0,5075)	2,4081* (1,1667)	1,0043* (2,3772)	0,9083 (0,8464)
VmAP			0,9098 (0,4166)		3,1018 (0,9399)	7,4971 (2,1695)	40,3006 (1,5712)	-3,4496 (1,2237)
ln(VmAP)		0,345 (0,0194)	-0,6177 (0,1616)					
Gi							0,1254 (0,0451)	
Gi ⁻¹				109,1102 (44,1318)	-31,0485 (11,4861)			
ln ⁻¹				1,3976 (0,4985)				
Iv	0,2922 (0,043)							
N.Prod							5,3213 (0,4618)	
DPFmin		-0,0114 (0,0021)	-0,0119 (0,0052)				-0,772 (0,0704)	0,3443 (0,0463)
Vmi	0,7966 (0,0609)							
Sitio (SD)	0,038	0,050	0,096	1,346	0,761	1,920	3,240	0,837
Res. (SD)	0,069	0,033	0,056	1,270	0,477	1,320	2,492	0,536
R ² M	0,52	0,70	0,39	0,22	0,14	0,10	0,82	0,55
R ² C	0,63	0,91	0,85	0,63	0,76	0,71	0,93	0,87
AIC	-379,79	-391,67	-230,01	426,21	230,20	389,58	8397,69	273,62
BIC	-353,74	-365,62	-198,05	452,26	256,25	413,02	8464,20	299,67
n	100	100	100	100	100	100	1232	100

(*) Coeficiente no significativo a una probabilidad $p < 0,05$. Los valores entre paréntesis corresponden al error estándar del parámetro estimado.
N.Prod = Número de productos. Sitio (SD) = Desvío estándar del intercepto explicado por el sitio. Res. (SD) = Desvío estándar residual.
R²C = R² Condicional (LEFCheck, 2016)

disminuyendo además en 0,01 m³ con cada centímetro de incremento en el diámetro final de la última troza cortada (DPFmin) (Modelo 2 – Tabla 2).

La PEF media alcanzada a nivel global fue de 30,27 m³.h⁻¹ (SD: 7,96 m³.h⁻¹). El Cuadro D – Figura 2 presenta la productividad media y su variación en cada situación, donde se destacaron significativamente los sitios 6 y 7 como los menos productivos y el sitio 2 como el de mayor productividad. Los demás sitios no presentaron diferencias significativas entre sí. Sin embargo, no es posible atribuir estas diferencias en la productividad a las características de los *harvesters* evaluados, debido a las diferencias en el VmAP de cada sitio, reflejadas en el Cuadro C – Figura 2.

La intensidad de raleo media compendió la cosecha del 45% de los árboles (In 0,45 SD: 0,09) variando entre el 20% y 73% para distintas parcelas. El área basal media fue de 36,1 m².ha⁻¹, variando

entre 22 y 45,5 m².ha⁻¹. La intensidad de raleo y el área basal cosechadas fueron significativamente mayores ($p < 0,001$), cuando se realizó un raleo mixto, con la cosecha sistemática de una línea para abrir una vía de extracción, (In Mixto = 0,5; In Selectivo = 0,39), (Gap Mixto = 16,32 m²; Gap Selectivo = 9,07 m²).

La proporción de trozas triturables obtenida estuvo inversamente relacionada con el VmAP. Esta tendencia no fue lineal, superando el 40% para árboles menores a 0,3 m³ y disminuyendo rápidamente al aumentar el tamaño de los árboles, hasta alcanzar una proporción inferior al 25% para árboles mayores a 0,5 m³. También estuvo relacionada con el DPFmin, reduciéndose en un 12% por cada 10 cm de incremento en el DPFmin. Esto se debió a que al finalizar el trozado con un diámetro mayor no se aprovechó el material triturable ubicado en el extremo del fuste (Modelo 3 – Tabla 2).

El movimiento del *harvester* y la grúa durante la búsqueda del árbol (Tbusq) representó el 21,7% del tiempo total del ciclo, requiriendo un promedio de 9,2 segundos por árbol (SD: 2,9 s). El Tbusq estuvo afectado por el área basal de la forestación y la intensidad de raleo, disminuyendo al incrementarse ambas (Modelo 4 – Tabla 2). La incorporación de los recíprocos de estas variables en el modelo (G_i^{-1} , In^{-1}) indica que este cambio en el Tbusq fue mayor para densidades o intensidades bajas, como puede observarse en la curva A de la Figura 3 (LAITILA; VÄÄTÄINEN, 2013). Una reducción del 20% en In implicó un incremento del 16% en el Tbusq, debido a la presencia de un menor número de árboles disponibles para la cosecha (ELIASSON et al., 1999; SUADICANI; FJELD, 2001). El modelo ajustado explicó el 22% de la variabilidad observada, superando al nivel de explicación logrado en

Figura 3: Efecto del área basal sobre las actividades de búsqueda, posicionamiento, desrame y trozado.

Figure 3: Effect of the basal area on the activities of tree search, positioning, delimbing and bucking.

otros estudios que relacionaron esta actividad con el Nap (LAITILA; VÄÄTÄINEN, 2013; SUADICANI; FJELD, 2001).

El tiempo requerido para ubicar el cabezal alrededor de la base del fuste, orientándolo en la dirección de volteo, representó en promedio el 9,4% del TAE, con una duración media de 4 segundos (SD: 1,08 s). El Tpos estuvo relacionado con el volumen medio de los árboles cosechados (VmAP) y con el recíproco de la densidad de la forestación (G_i^{-1}) (Modelo 5 – Tabla 2). Como se observa en la curva B de la Figura 3, el Tpos se incrementó en un 17,4% al aumentar el VmAP de 0,3 a 0,5 m³ debido a la dificultad de la ubicación del cabezal en los árboles más grandes. Además, aumentó en un 7% al incrementarse el G_i de 30 a 40 m².ha⁻¹, debido a que la mayor densidad requiere una planificación cuidadosa de la dirección volteo en base a la observación de los árboles circundantes. Estos factores explicaron el 14,4% de la variabilidad observada. El registro independiente del Tbusq y el Tpos permitió determinar que el VmAP afectó únicamente al posicionamiento del cabezal alrededor del fuste, sin impactar en la búsqueda del árbol, tal como sugerían otros estudios que no diferenciaban estas actividades (HILDT et al., 2018; SUADICANI; FJELD, 2001; SUADICANI; NORDFJELL, 2003).

El corte y volteo de los árboles (Tcorte) representó un 13% del TAE, con una duración media de 5,5 segundos (SD: 2,2 s). Este se incrementó en un 32% al aumentar el VmAP de 0,3 a 0,5 m³, con una pendiente un 60% superior a la observada por otros autores para diferentes *harvesters* de ruedas de medianas dimensiones (HILDT et al., 2018; NIEMISTÖ et al., 2012; NURMINEN et al., 2006). Debido a la gran variabilidad existente entre el tiempo medio requerido por cada situación evaluada, la parte fija del modelo alcanzó un R²M de 0,1. Sin embargo, el efecto aleatorio del sitio sobre el

intercepto aportó un desvío estándar de 1,92 segundos, alcanzándose un R^2 Condicional de 0,71, lo que indica que la mayor parte de la variabilidad en el Tcorte tuvo su origen en las diferencias entre los *harvesters* estudiados (Modelo 6 - Tabla 2).

El desrame y trozado del fuste (Tproc) fue la actividad más importante del ciclo, representando el 45,4% del TAE, con una duración media de 19,6 segundos (SD: 6,2 s). El Tproc se incrementó en un 46% al aumentar el VmAP de 0,3 a 0,5 m³ (Curva C – Figura 3), con una pendiente un 33% mayor a la observada por Hildt et al. (2018), y Niemistö et al. (2012), pero 40% inferior a la observada por Nurminen et al. (2006). La densidad afectó en menor medida a esta actividad, incrementando su duración en 1,25 segundos al aumentar en 10 m² el Gi, debido a la restricción impuesta a los movimientos de la grúa por los árboles existentes, durante el trozado y la ubicación de las trozas cortadas (NIEMISTÖ et al., 2012). En promedio, la elaboración de un nuevo producto implicó un incremento de 5,32 segundos en el Tproc (29% de incremento), debido a los movimientos adicionales de la grúa requeridos para desplazar el cabezal entre las distintas pilas correspondientes a cada producto. En este sentido Hildt et al. (2018) y Nurminen et al. (2006) observaron un incremento del 10% en el Tproc al realizar el trozado de dos productos en lugar de uno solo. No se observaron diferencias en la relación entre VmAP y el Tproc para distintos números de productos.

El incremento en 1 cm en el DPFmin provocó una reducción de 0,77 segundos en el Tproc. El aumento del DPFmin desde los 6 cm hasta los 18 cm implicó, para un volumen medio de 0,4 m³, una reducción del 33,5% en el Tproc. En este sentido el sitio 4, donde únicamente se elaboraron productos aserrables hasta un DPFmin de 18 cm, presentó un Tproc medio significativamente menor (14,4 s). El Modelo 7 (Tabla 2), alcanzó a explicar el 82% de la variabilidad observada, una proporción superior a la alcanzada en otros estudios (LAITILA; VÄÄTÄINEN, 2013; NURMINEN et al., 2006). La proporción del Tproc destinada a la elaboración de trozas triturables se incrementó al disminuir el VmAP y el DPFmin, superando el 50% con árboles menores a 0,4 m³ o cuando se aprovechó el fuste hasta los 6 cm. Independientemente del volumen de los árboles, la elaboración de trozas triturables siempre requirió una mayor proporción del Tproc en comparación con la proporción de volumen aportada por este producto.

La liberación del ápice y las ramas (Tlib) requirió en promedio 4,46 segundos (SD: 1,81 s), representando el 10,4% del TAE. El Modelo 8 (Tabla 2) alcanzó a explicar el 55% de la variabilidad observada. El Tlib se incrementó en 3,44 segundos por cada 10 cm de aumento en el DPFmin. Esto afectó especialmente al sitio 4, que tuvo un Tlib significativamente superior a los demás (6,6 s), debido a que al aprovechar el fuste hasta los 18 cm se incrementó el volumen de ramas y ápice que el *harvester* debió desechar para liberar el cabezal. A su vez el Tlib disminuyó un 15% al incrementarse el VmAP de 0,3 a 0,5 m³. Esto puede deberse a la frecuente rotura del fuste en los árboles más pequeños, incrementándose la cantidad de ramas que se deben descartar.

El tiempo total efectivo fue estimado mediante la expresión [3], resultado de la suma de los modelos parciales ajustados, según la ecuación [1]. El Cuadro A de la Figura 4 presenta las productividades efectivas estimadas reemplazando en la ecuación [2] el TAE calculado con este modelo general. Estas son consistentes con las productividades observadas en la muestra principal, y las diferencias existentes se deben al efecto aleatorio de cada sitio, no considerado en el modelo [3]. El Cuadro B de la Figura 4 presenta una comparación de las productividades predichas respecto de las observadas en

Figura 4: Predicciones del modelo de productividad y comparación con la muestra de validación.

Figure 4: Predictions of the productivity model and comparison with the validation sample.

la muestra de validación independiente. Esta comparación alcanza un coeficiente de determinación de 0,72, con una pendiente cercana a 1, indicando que las predicciones del modelo son válidas para situaciones distintas a la muestra de ajuste, sin presentar fuertes tendencias.

$$TAE(s) = 10,4324 + 47,4499 * V_{medioap} + 0,1254 * Gi + 78,0617 * Gi^{-1} + 1,3976 * In^{-1} + 5,3213 * N.Prod - 0,4277 * DPFmin \quad [3]$$

La productividad efectiva estuvo principalmente determinada por el VmAP, siguiendo la relación establecida por Visser y Spinelli (2012), caracterizada por un crecimiento aproximadamente lineal para volúmenes menores a 0,3 m³ y luego decreciente hasta alcanzar un máximo por sobre 0,5 m³ (Cuadro A – Figura 4). El sitio 5 tuvo una productividad de 36,8 m³.h⁻¹, un 2,5% superior a la predicha por Hildt et al., (2018) para un *harvester* similar, pero de menor potencia, realizando segundo raleo de *Pinus taeda*. Los sitios 3, 4 y 9 fueron cosechados por el mismo modelo de *harvester*, presentando una productividad media de 32,4 m³.h⁻¹, sin diferencias significativas entre sitios ($p = 0,24$) y un 15% inferiores a las predichas para ese modelo de *harvester* trabajando en raleos (MAC DONAGH et al., 2013). La productividad observada en el sitio 6 fue un 62,3% inferior a la predicha para un *harvester* similar con un operario más experimentado (HILDT et al., 2018) (Cuadro D – Figura 2).

La densidad de la forestación (Gi), impactó negativamente en la productividad provocando una reducción media del 4% al variar entre 22 y 53 m².ha⁻¹, independientemente del VmAP. Esto fue resultado de su efecto contrapuesto sobre las actividades (Figura 3), reduciendo el T_{busq} , e incrementando el T_{pos} y el T_{proc} al dificultar los movimientos de la grúa y requerir una mayor atención para evitar daños a la masa remanente (FULVIO; BERGSTRÖM, 2013). Debido a que estos efectos se contraponen entre actividades, no han sido identificados por los estudios que realizaron ajustes directos para la productividad efectiva (KÄRHÄ et al., 2004; MEDERSKI et al., 2016). Por otra parte, el volumen medio de las parcelas estuvo relacionado con la Ni ($r = -0,57$), lo que implica que, en forestaciones densas, el menor volumen de los árboles aprovechados limita la productividad (MEDERSKI et al., 2016).

La intensidad de raleo impactó positivamente en la productividad, generando un incremento medio del 12% al variar entre el 20 y 70% la proporción de los árboles cosechados, con una variación de 3,23 m³.h⁻¹ para 0,4 m³ de VmAP. Este efecto estuvo relacionado con la reducción del tiempo de búsqueda (Curva A – Figura 3) al aumentar la intensidad de raleo. En este sentido, Laitila y Väättäinen (2013) reportaron para bosques con una alta densidad y un V_{mi} de entre 0,023 y 0,089 m³, un incremento de la productividad de 1 m³.h⁻¹ al aumentar la intensidad de raleo de 800 a 2400 árb.ha⁻¹. En cambio, Mederski et al. (2016) advierten que el incremento en la productividad al aumentar el volumen total aprovechado únicamente se da en aquellos sitios donde esto implica la cosecha de árboles más grandes. En este sentido, parte del impacto de la intensidad de raleo sobre la productividad se debió a su efecto sobre el VmAP, 0,11 m³ mayor al variar la intensidad de raleo (Iv) entre 0,4 y 0,7 (Modelo 1 – Tabla 2).

El número de productos elaborados tuvo un fuerte impacto sobre la productividad. Para un volumen medio de 0,4 m³ la incorporación de un producto al esquema de trozado redujo la productividad en un 11,5% (3,71 m³.h⁻¹), debido al tiempo requerido para la clasificación de las trozas. En este sentido, Hildt et al. (2018) y Nurminen et al. (2006) observaron que la elaboración de un nuevo producto en raleos puede causar una disminución de la productividad de entre 2 y 4%. El diámetro hasta el que se aprovechó el fuste también afectó a la productividad. Pese a que, para un volumen medio de 0,4 m³, el tiempo total del ciclo solo se incrementó en un 12,2% al realizarse el despunte en 18 cm en lugar de en 6 cm, la productividad efectiva cayó en un 20,1% debido al descarte del material triturable con diámetros menores al DPFmin (Modelo 2 – Tabla 2).

Este estudio se destaca por incorporar un amplio conjunto de *harvesters* con grandes diferencias de productividad, donde la variación explicada por la combinación *harvester*-operador fue representada por el efecto aleatorio del sitio (Tabla 2). De esta forma los efectos significativos observados corresponden a tendencias comunes para todas las situaciones evaluadas, más generales que los resultados de estudios de tiempos realizados sobre *harvesters* individuales. Por otra parte, la medición de parcelas resultó un complemento adecuado de los estudios de tiempos, logrando capturar la variabilidad existente en la densidad de las forestaciones y en la intensidad de los raleos, permitiendo el ajuste de modelos con un conjunto de variables predictoras mayor que los utilizados hasta el momento (NIEMISTÖ et al., 2012; NURMINEN et al., 2006).

CONCLUSIONES

La productividad de los *harvesters* dependió principalmente del volumen medio de los árboles cosechados. Este factor definió cual fue la situación más productiva (sitio 2) y la menos productiva (sitio 6). El volumen medio se incrementó al aumentar la intensidad de raleo, disminuyendo, en cambio, al aumentar la densidad de la forestación. La disminución en la intensidad de raleo implicó una menor productividad causada por el incremento en el tiempo de búsqueda y por la cosecha de árboles con un menor volumen individual. Por otra parte, el incremento en el área basal tuvo efectos contrapuestos sobre las distintas actividades del *harvester*, reduciendo el tiempo de búsqueda de los árboles e incrementando el tiempo de posicionamiento del cabezal, desrame y trozado, con un impacto menor sobre la productividad para un mismo volumen medio. La elaboración de un mayor número de productos requirió un mayor tiempo de desrame y trozado, reduciendo la productividad. El diámetro en punta fina hasta el que se aprovechó el fuste impactó principalmente sobre el volumen de madera recuperado, reduciendo en menor medida el tiempo de trozado.

REFERENCIAS

- BERGSTROM, D.; BERGSTEN, U.; NORDFJELL, T. Comparison of Boom-Corridor Thinning and Thinning From Below Harvesting Methods in Young Dense Scots Pine Stands. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 44, n. 4, p. 669-679, 2010.
- BRAMUCCI, M.; SEIXAS, F. Determinação e quantificação de fatores de influência sobre a produtividade de "harvesters" na colheita florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 30, n. 62, p. 62-74, 2002.
- ELIASSON L.; BENGTTSSON, J.; CEDERGREN, J.; LAGESON, H. Comparison of Single-Grip Harvester Productivity in Clear and Shelterwood Cutting. **Journal of Forest Engineering**, v. 10, n. 1, p. 43-48, 1999.
- ERBER, G.; HOLZLEITNER, F.; KASTNER, M.; STAMPFER, K. Effect of multi-tree handling and tree-size on harvester performance in small-diameter hardwood thinnings. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 50, n. 1, p. 1-17, 2016.
- ERICSSON, M.; LINDROOS, O. Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets. **International Journal of Forest Engineering**, v. 25, n. 3, p. 179-200, 2014.
- FULVIO, D. F.; BERGSTROM, D. Analyses of a single-machine system for harvesting pulpwood and/or energy-wood in early thinnings, **International Journal of Forest Engineering**, v. 24, n. 1, p. 2-15, 2013.
- HILDT, E.; MAC DONAGH, P. M.; SOMMA, F. F.; ALEGRANZA, D.; DURÁN, D. Productividad de un harvester en raleos de plantaciones de pinos en el noreste argentino. **Ciência Florestal**, Santa María, v. 28, n. 4, 2018.
- KÄRHÄ, K.; RÖNNKÖ, E.; GUMSE, S-I. Productivity and cutting costs of thinning harvesters. **International Journal of Forest Engineering**, v. 15, n. 2, p. 43-56, 2004.
- LAITILA, J.; VÄÄTÄINEN, K. The cutting productivity of the excavator-based harvester in integrated harvesting of pulpwood and energy wood. **Baltic Forestry**, Kaunas, v. 19, n. 2, p. 289-300, 2013.
- LAZDIŅŠ, A.; PRINDULIS, U.; KALĒJA, S.; DAUGAVIETE, M.; ZIMELIS, A. Productivity of Vimek 404 T5 harvester and Vimek 610 forwarder in early thinning. **Agronomy Research**, Tartu, v. 14, p. 475-484, 2016.
- LEFCHECK, J. PiecewiseSEM: Piecewise structural equation modeling in R for ecology, evolution, and systematics. **Methods in Ecology and Evolution**, London, v. 7, n. 5, p. 573-579, 2016.
- MAC DONAGH, P. M.; MULAWKA, J. A.; FRIEDL, R. A.; ZADERENKO, C. Productividad y costos de pequeños harvester con oruga operando en plantaciones de *Pinus spp.* en el noreste argentino. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 425-434, 2013.
- MEDERSKI, P. S.; BEMBENEK, M.; KARASZEWSKI, Z.; ŁACKA, A.; SZCZEPAŃSKA-ÁLVAREZ, A.; ROSIŃSKA, M. Estimating and Modelling Harvester Productivity in Pine Stands of Different Ages, Densities and Thinning Intensities, **Croatian Journal of Forest Engineering**, Zagreb, v. 37, n. 1, p.27-36, 2016.
- NIEMISTÖ, P.; KORPUNEN, H.; LAURÉN, A.; SALOMÄKI, M.; UUSITALO, J. Impact and Productivity of Harvesting while Retaining Young Understorey Spruces in Final Cutting of Downy Birch. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 46, n. 1, p. 81-97, 2012.

- NURMINEN, T.; KORPUNEN, H.; UUSITALO, J. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-length Harvesting System. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 40, n. 2, p. 335-363, 2006.
- OLIVERA, A.; VISSER, R. Development of forest-yield maps generated from Global Navigation Satellite System (GNSS) - enabled harvester StanForD files: preliminary concepts. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 46, n. 3, p.1-10, 2016.
- OVASKAINEN, H.; UUSITALO, J.; SASSI, T. Effect of edge trees on harvester positioning in thinning. **Forest Science**, Oxford, v. 52, n. 6, p. 659-669, 2006.
- PETTY, A.; KÄRHÄ, K. Productivity and cost evaluations of energy-wood and pulpwood harvesting systems in first thinnings, **International Journal of Forest Engineering**, v. 25, n. 1, p. 37-50, 2014.
- R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponible en: < <http://R.project.org/>>. Accesos en: 1 mar. 2018.
- SUADICANI, K.; FJELD, D. Single-tree and Group Selection in Montane Norway Spruce Stands: Factors Influencing Operational Efficiency. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 16, n. 1, p. 79-87, 2001.
- SUADICANI, K.; NORDFJELL, T. Operational aspects of row and selective thinning in the establishing of a shelterwood in a 50-year-old Norway spruce stand. **International Journal of Forest Engineering**, v. 14, n. 1, p. 25-37, 2003.
- VISSER, R.; SPINELLI, R. Determining the shape of the productivity function for mechanized felling and felling-processing. **Journal of Forest Research**, Tokio, v. 17, n. 5, p. 397-402, 2012.

Recibido en: 02/05/2018

Aceptado en: 05/11/2018