

1 **Efecto de la densidad de las forestaciones y la intensidad de cosecha en**
2 **raleos mecanizados con *harvester*.**

3 **Forest density and thinning intensity effect in mechanized thinning with**
4 ***harvester*.**

5 Eduardo Hildt¹; Andrés Leszczuk¹; Schlichter, Tomás²; Mac Donagh, Patricio³

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

8 ²-Profesor Titular (Dr.) de Dasonomía – Facultad de Agronomía – UBA – San Martín
9 4453 – Buenos Aires – Argentina – E-mail: tomasschlichter@gmail.com

10 ³-Profesor Asociado (Dr.) de Explotación Forestal - Facultad de Ciencias Forestales -
11 UNaM - Bertoni 124 - Eldorado - CP 3380 - Misiones - Argentina - E-mail:

12 patricio.macdonagh@gmail.com

13
14 **Resumen**

15 El objetivo de este estudio fue evaluar cómo la densidad de la forestación y la
16 intensidad de los raleos afectan a la cosecha con *harvester*. Fueron evaluados siete
17 *harvesters* diferentes, en nueve situaciones de segundo raleo de pino del noreste
18 argentino. Los estudios de tiempos comprendieron el establecimiento de parcelas y la
19 filmación de las operaciones. La densidad media de los rodales fue de 656 árboles.ha⁻¹,
20 con un volumen medio de 0,53 m³. El raleo extrajo en promedio el 45% de los árboles.
21 Fueron ajustados modelos mixtos a nivel de parcela para la duración de cada actividad,
22 considerando a las características de la forestación y la operación como factores fijos y
23 al sitio como factor aleatorio. La productividad de la cosecha en las distintas situaciones
24 estuvo comprendida entre 11 y 46 m³.h⁻¹. El incremento en la densidad implicó una

25 reducción en el tiempo de búsqueda de los árboles y un aumento en el tiempo de
26 posicionamiento del cabezal, y de desrame y trozado. En cambio, el incremento de la
27 intensidad de raleo redujo el tiempo de búsqueda de los árboles y favoreciendo la
28 cosecha de árboles más grandes, aumentando la productividad. La elaboración de varios
29 productos provocó una reducción del 21,6% en la productividad, respecto al trozado de
30 un único producto triturable.

31 **Palabras clave:** Productividad, Estudio de tiempos, Modelos Mixtos.

32

33 **Summary**

34 The objective of this study was to evaluate how forest density and thinning intensity
35 affect the harvester work performance. Were studied seven different harvesters, in nine
36 situations of second thinning of pine, from northeast Argentina. Time studies comprises
37 the establish of plots and the filming of operations. Forests have an average density of
38 656 trees.ha⁻¹, with a mean volume of 0.53 m³. In thinning's, a 45% of the trees were
39 removed. Mixed plot-level models were adjusted for each activity, incorporating the
40 forestry and operation characteristics as fixed factors, and the site as a random factor.
41 The effective productivity was between 11 and 46 m³.h⁻¹. A higher forestry density implied
42 a reduction in time for reach the trees and an increase in the time required for head
43 positioning, delimiting and bucking. In contrast, an increased in thinning intensity reduced
44 the time for reach the trees and implied the harvesting of larger trees, with a positive
45 impact on productivity. The elaboration of several products implied a reduction of 21.6%
46 in productivity with respect to the any pulpwood assortment.

47 **Keywords:** Productivity, Time study, Mixed models.

49 **Introducción**

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

58 El volumen de los árboles explica entre el 50% y el 70% de la variabilidad en la
59 productividad del *harvester* (BRAMUCCI y SEIXAS, 2002; VISSER y SPINELLI, 2012;
60 MEDERSKI et al., 2016). Aunque esta relación es aproximadamente lineal para árboles
61 menores a 0,5 m³, la productividad puede decrecer cuando el tamaño de los árboles
62 supera un umbral determinado por el tamaño y potencia del *harvester* (KÄRHÄ et al.,
63 2004; NURMINEN et al., 2006; VISSER y SPINELLI, 2012). Esto se debe a que el tiempo
64 requerido para el corte, desrame y trozado, también se incrementa con el tamaño de los
65 árboles, representando entre el 45% y 75% del tiempo total del ciclo (NURMINEN et al.,
66 2006; NIEMISTÖ et al., 2012).

67 La cosecha de forestaciones con densidades altas generalmente está asociada a
68 una baja productividad del *harvester*. Mederski et al., (2016) observaron una reducción
69 del 18% en la productividad al incrementarse la densidad inicial de la forestación de 800

70 a 1200 árboles.ha⁻¹. Esto en parte es explicado por el menor volumen medio de los
71 árboles (FULVIO y BERGSTRÖM, 2013). Por otra parte, los movimientos del *harvester*
72 pueden verse limitados por los árboles circundantes que el operario debe evitar dañar
73 (SUADICANI y NORDFJELL, 2003; MEDERSKI et al., 2016).

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

89 La productividad del *harvester* disminuye al incrementarse el número de productos
90 cosechados (NURMINEN et al., 2006; ERIKSSON y LINDROOS, 2014; HILDT et al.,
91 2018). En este sentido, el corte de un pequeño número de productos sin clasificación, y
92 la elaboración del material triturable con largos variables, permite simplificar la operación

93 de trozado e incrementar la productividad (FULVIO y BERGSTRÖM, 2013; PETTY y
94 KÄRHÄ, 2014; LAZDIŃŠ et al., 2016). Por ejemplo, Nurminen et al., (2006) y Hildt et al.,
95 (2018) encontraron que el desrame y trozado requiere un tiempo entre un 4 y 10% mayor
96 para la elaboración de dos productos en lugar de uno, debido a un incremento en la carga
97 de trabajo del operario que debe cortar y clasificar cada producto en distintas pilas.

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

106 **Materiales y métodos**

107 **Descripción del área de estudio**

108 Este estudio fue realizado en forestaciones de *Pinus taeda* y del pino híbrido *Pinus*
109 *elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* ubicadas en el noreste de la
110 República Argentina. Se evaluaron cuatro operaciones de raleo en el departamento de
111 Santo Tomé (Corrientes) y cinco en el departamento de Iguazú (Misiones), entre el 2015
112 y 2017 (Figura 1). Estas plantaciones están destinadas a la producción de trozas
113 aserrables y triturables, y con una edad de entre 11 y 12 años ya han pasado por un
114 primer raleo. Sin embargo, por pertenecer a distintas empresas forestales, estos rodales

115 presentaron diferencias en su densidad, volumen medio, espaciamiento e historia de
116 manejo (Figura 2). El sitio 8 fue el único rodal implantado con pino híbrido.

117 Entra Figura 1.

118 En este estudio se demarcaron un total de 155 parcelas de 375 m², buscando
119 maximizar la variabilidad en la densidad e intensidad de raleo existente entre parcelas
120 (BERGSTRÖM et al., 2010; MEDERSKI et al., 2016; OLIVERA y VISSER, 2016). Las
121 parcelas fueron instaladas en la vía de ingreso del *harvester*, ubicadas de forma
122 consecutiva y abarcando el número de líneas alcanzadas por la grúa (LAITILA y
123 VÄÄTÄINEN, 2013; ERBER et al., 2016). El número de parcelas evaluadas fue distinto
124 en cada sitio (Tabla 1). Antes de realizarse el raleo se midió el diámetro a la altura del
125 pecho (DAP) de todos los árboles. Las alturas fueron estimadas por medio de una función
126 hipsométrica ajustada para cada rodal (OLIVERA y VISSER, 2016).

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

134 El trozado comprendió la elaboración de entre uno y tres productos aserrables, y
135 un producto triturable. La instrucción de trozado fue definida por la empresa propietaria
136 de cada forestación. En los sitios 1 a 3 se cosecharon trozas triturables de 2,4 m de

137 longitud. En cambio, en los sitios 5 a 9, estas tuvieron longitudes variables comprendidas
138 entre 2,4 y 4,5 m. En el sitio 4 se trozaron únicamente dos productos aserrables,
139 aprovechándose el fuste hasta un diámetro en punta fina (DPFmin) de 18 cm.

140 **Características de las máquinas evaluadas.**

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

145 Entra Tabla 1.

146 **Relevamiento de la información.**

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

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

- 160 - Búsqueda del árbol (T_{busq}): Comprende el desplazamiento del *harvester* y los
161 movimientos de la grúa necesarios para alcanzar el árbol a cortar.
- 162 - Ubicación del cabezal cosechador (T_{pos}): Abarca los movimientos de la grúa
163 y el cabezal necesarios para capturar el árbol y orientar el volteo.
- 164 - Corte y volteo (T_{corte}): Comprende el accionamiento de la sierra del cabezal
165 al realizar el corte del fuste, el direccionamiento de la caída del árbol y los
166 movimientos de la grúa necesarios para desplazar el fuste hasta la vía de saca.
- 167 - Desrame y trozado (T_{proc}): Incluye el desplazamiento del cabezal sobre el
168 fuste, el desrame, la medición, corte y clasificación de cada troza elaborada.
- 169 - Liberación de las ramas (T_{lib}): Comprende los movimientos de la grúa y el
170 cabezal necesarios para descartar el ápice al finalizar el trozado del fuste.

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

$$174 \quad TAE = T_{busq} + T_{pos} + T_{corte} + T_{proc} + T_{Lib} \quad [1]$$

175 Para cada parcela evaluada se calculó la densidad ($N_i \text{ arb. ha}^{-1}$), el área basal (G_i
176 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), el volumen de árbol medio ($V_{mi} \text{ m}^3$) y el volumen total ($V_i \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) previos al
177 raleo. Luego del raleo se determinaron la densidad ($N_{ap} \text{ árb. ha}^{-1}$), el área basal (G_{ap}
178 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), el volumen de árbol medio ($V_{mAP} \text{ m}^3$) y el volumen total ($V_{ap} \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)

179 cosechados. Se calcularon diferentes índices para la intensidad de raleo: $I_n = N_{ap}/N_i$; I_g
180 $= G_{ap} / G_i$; $I_v = V_{ap} / V_i$ (BERGSTRÖM, 2010).

181 La productividad efectiva de los *harvesters* fue calculada según la ecuación [2],
182 donde PEF es la productividad horaria sin considerar las paradas ($m^3 \cdot h^{-1}$), V_{mRec} es el
183 volumen total de madera obtenida de cada árbol (m^3) y TAE es el tiempo medio de
184 actividades efectivas empleado en la cosecha (s).

$$185 \quad PEF = V_{mRec} / (TAE * 3600) \quad [2]$$

186 **Análisis estadístico**

187 Se ajustaron modelos mixtos al nivel de parcela para la duración de cada
188 actividad, considerando como predictoras fijas a las características de los árboles
189 cosechados (V_{mAP}), las características de las parcelas (N_i , G_i , V_i), la intensidad de raleo
190 (I_n , I_g , I_v) y otras características de la operación (DPF_{min} , número de productos). El sitio
191 fue incorporado como un factor aleatorio, representado el efecto combinado de cada
192 *harvester* y su operador, y aportando además la estructura de anidamiento de las
193 observaciones (NIEMISTÖ et al., 2012). El modelo correspondiente al Tproc fue ajustado
194 al nivel de ciclo operacional para captar la variabilidad en el número de productos
195 elaborados existente dentro de cada parcela (NIEMISTÖ et al., 2012). Los modelos
196 fueron ajustados por medio del método de máxima verosimilitud (ML) utilizando la función
197 “lme” del software R (R CORE TEAM, 2016). Se consideró una estructura de varianza
198 diferente entre sitios (varIdent). Los mejores modelos fueron seleccionados según el
199 Criterio de Información de Akaike (AIC) y el R^2 marginal (R^2M), disponibles en el paquete
200 “piecewiseSEM” (LEFCHECK, 2016). Estos incorporaron únicamente las variables cuyos

201 efectos fueron significativos para una probabilidad $p < 0,05$, sin presentar
202 multicolinealidad.

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

210 **Resultados y Discusión**

211 Los estudios de tiempos registraron la cosecha de 2076 árboles, totalizando 707
212 m^3 de madera cosechada en 24 h efectivas de trabajo, con 537 m^3 concentrados en
213 trozas aserrables y 170 m^3 en trozas triturables. La Figura 2 presenta las características
214 de la masa extraída en el raleo. Las parcelas cosechadas tuvieron una densidad inicial
215 media de 656 árb. ha^{-1} con un área basal media de 36,1 $m^2.ha^{-1}$, de los que se cosecharon
216 299 árboles. ha^{-1} , extrayendo 13,4 $m^2.ha^{-1}$ de área basal (Gap) (Cuadros A y B – Figura
217 2). Las situaciones evaluadas tuvieron un V_{mi} promedio de 0,53 m^3 con un desvío
218 estándar (SD) de 0,10 m^3 . Sin embargo, la aplicación del raleo selectivo a los árboles de
219 menores dimensiones implicó un V_{mAP} promedio de 0,40 m^3 (SD: 0,11 m^3),
220 significativamente menor y similar a otros raleos estudiados en la región (HILDT et al.,
221 2018) (Cuadro C – Figura 2). El V_{mAP} estuvo relacionado al V_{mi} , aumentando también
222 en 0,03 m^3 con cada incremento de 0,1 en la proporción I_v , explicando esto el 52% de la
223 variabilidad observada (Modelo 1 – Tabla 2). El volumen de madera elaborada en cada

224 árbol (VmRec) estuvo determinado por el VmAP ($R^2M = 0,7$), disminuyendo además en
225 $0,01 \text{ m}^3$ con cada centímetro de incremento en el diámetro final de la última troza cortada
226 (DPFmin) (Modelo 2 – Tabla 2).

227 La PEF media alcanzada a nivel global fue de $30,27 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (SD: $7,96 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). El
228 Cuadro D – Figura 2 presenta la productividad media y su variación en cada situación,
229 donde se destacaron significativamente los sitios 6 y 7 como los menos productivos y el
230 sitio 2 como el de mayor productividad. Los demás sitios no presentaron diferencias
231 significativas entre sí. Sin embargo, no es posible atribuir estas diferencias en la
232 productividad a las características de los *harvesters* evaluados, debido a las diferencias
233 en el VmAP de cada sitio, reflejadas en el Cuadro C – Figura 2.

234 Entra Figura 2.

235 La intensidad de raleo media compendió la cosecha del 45% de los árboles (In
236 $0,45$ SD: $0,09$) variando entre el 20% y 73% para distintas parcelas. El área basal media
237 fue de $36,1 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, variando entre 22 y $45,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$. La intensidad de raleo y el área
238 basal cosechadas fueron significativamente mayores ($p < 0,001$), cuando se realizó un
239 raleo mixto, con la cosecha sistemática de una línea para abrir una vía de extracción, (In
240 Mixto = $0,5$; In Selectivo = $0,39$), (Gap Mixto = $16,32 \text{ m}^2$; Gap Selectivo = $9,07 \text{ m}^2$).

241 La proporción de trozas triturables obtenida estuvo inversamente relacionada
242 con el VmAP. Esta tendencia no fue lineal, superando el 40% para árboles menores a
243 $0,3 \text{ m}^3$ y disminuyendo rápidamente al aumentar el tamaño de los árboles, hasta alcanzar
244 una proporción inferior al 25% para árboles mayores a $0,5 \text{ m}^3$. También estuvo
245 relacionada con el DPFmin, reduciéndose en un 12% por cada 10 cm de incremento en

246 el DPFmin. Esto se debió a que al finalizar el trozado con un diámetro mayor no se
247 aprovechó el material triturable ubicado en el extremo del fuste (Modelo 3 – Tabla 2).

248 Entra la Tabla 2.

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

261 Entra Figura 3

262 El tiempo requerido para ubicar el cabezal alrededor de la base del fuste,
263 orientándolo en la dirección de volteo, representó en promedio el 9,4% del TAE, con una
264 duración media de 4 segundos (SD: 1,08 s). El T_{pos} estuvo relacionado con el volumen
265 medio de los árboles cosechados (V_{mAP}) y con el recíproco de la densidad de la
266 forestación (G_i^{-1}) (Modelo 5 – Tabla 2). Como se observa en la curva B de la Figura 3, el
267 T_{pos} se incrementó en un 17,4% al aumentar el V_{mAP} de 0,3 a 0,5 m^3 debido a la

268 dificultad de la ubicación del cabezal en los árboles más grandes. Además, aumentó en
269 un 7% al incrementarse el Gi de 30 a 40 m².ha⁻¹, debido a que la mayor densidad requiere
270 una planificación cuidadosa de la dirección volteo en base a la observación de los árboles
271 circundantes. Estos factores explicaron el 14,4% de la variabilidad observada. El registro
272 independiente del Tbusq y el Tpos permitió determinar que el VmAP afectó únicamente
273 al posicionamiento del cabezal alrededor del fuste, sin impactar en la búsqueda del árbol,
274 tal como sugerían otros estudios que no diferenciaban estas actividades (SUADICANI y
275 FJELD, 2001; SUADICANI y NORDFJELL, 2003; HILDT et al., 2018).

276 El corte y volteo de los árboles (Tcorte) representó un 13% del TAE, con una
277 duración media de 5,5 segundos (SD: 2,2 s). Este se incrementó en un 32% al aumentar
278 el VmAP de 0,3 a 0,5 m³, con una pendiente un 60% superior a la observada por otros
279 autores para diferentes *harvesters* de ruedas de medianas dimensiones (NURMINEN et
280 al., 2006; NIEMISTÖ et al., 2012; HILDT et al., 2018). Debido a la gran variabilidad
281 existente entre el tiempo medio requerido por cada situación evaluada, la parte fija del
282 modelo alcanzó un R²M de 0,1. Sin embargo, el efecto aleatorio del sitio sobre el
283 intercepto aportó un desvío estándar de 1,92 segundos, alcanzándose un R² Condicional
284 de 0,71, lo que indica que la mayor parte de la variabilidad en el Tcorte tuvo su origen en
285 las diferencias entre los *harvesters* estudiados (Modelo 6 - Tabla 2).

286 El desrame y trozado del fuste (Tproc) fue la actividad más importante del ciclo,
287 representando el 45,4% del TAE, con una duración media de 19,6 segundos (SD: 6,2 s).
288 El Tproc se incrementó en un 46% al aumentar el VmAP de 0,3 a 0,5 m³ (Curva C –
289 Figura 3), con una pendiente un 33% mayor a la observada por Niemistö et al., (2012) y
290 Hildt et al., (2018), pero 40% inferior a la observada por Nurminen et al., (2006). La

291 densidad afectó en menor medida a esta actividad, incrementando su duración en 1,25
292 segundos al aumentar en 10 m² el Gi, debido a la restricción impuesta a los movimientos
293 de la grúa por los árboles existentes, durante el trozado y la ubicación de las trozas
294 cortadas (NIEMISTÖ et al., 2012). En promedio, la elaboración de un nuevo producto
295 implicó un incremento de 5,32 segundos en el Tproc (29% de incremento), debido a los
296 movimientos adicionales de la grúa requeridos para desplazar el cabezal entre las
297 distintas pilas correspondientes a cada producto. En este sentido Nurminen et al., (2006)
298 y Hildt et al., (2018) observaron un incremento del 10% en el Tproc al realizar el trozado
299 de dos productos en lugar de uno solo. No se observaron diferencias en la relación entre
300 VmAP y el Tproc para distintos números de productos.

301 El incremento en 1 cm en el DPFmin provocó una reducción de 0,77 segundos en
302 el Tproc. El aumento del DPFmin desde los 6 cm hasta los 18 cm implicó, para un
303 volumen medio de 0,4 m³, una reducción del 33,5% en el Tproc. En este sentido el sitio
304 4, donde únicamente se elaboraron productos aserrables hasta un DPFmin de 18 cm,
305 presentó un Tproc medio significativamente menor (14,4 s). El Modelo 7 (Tabla 2),
306 alcanzó a explicar el 82 % de la variabilidad observada, una proporción superior a la
307 alcanzada en otros estudios (NURMINEN et al., 2006; LAITILA y VÄÄTÄINEN, 2013). La
308 proporción del Tproc destinada a la elaboración de trozas triturables se incrementó al
309 disminuir el VmAP y el DPFmin, superando el 50% con árboles menores a 0,4 m³ o
310 cuando se aprovechó el fuste hasta los 6 cm. Independientemente del volumen de los
311 árboles, la elaboración de trozas triturables siempre requirió una mayor proporción del
312 Tproc en comparación con la proporción de volumen aportada por este producto.

313 La liberación del ápice y las ramas (Tlib) requirió en promedio 4,46 segundos (SD:
314 1,81 s), representando el 10,4% del TAE. El Modelo 8 (Tabla 2) alcanzó a explicar el
315 55% de la variabilidad observada. El Tlib se incrementó en 3,44 segundos por cada 10
316 cm de aumento en el DPFmin. Esto afectó especialmente al sitio 4, que tuvo un Tlib
317 significativamente superior a los demás (6,6 s), debido a que al aprovechar el fuste hasta
318 los 18 cm se incrementó el volumen de ramas y ápice que el *harvester* debió desechar
319 para liberar el cabezal. A su vez el Tlib disminuyó un 15% al incrementarse el VmAP de
320 0,3 a 0,5 m³. Esto puede deberse a la frecuente rotura del fuste en los árboles más
321 pequeños, incrementándose la cantidad de ramas que se deben descartar.

322 El tiempo total efectivo fue estimado mediante la expresión [3], resultado de la
323 suma de los modelos parciales ajustados, según la ecuación [1]. El Cuadro A de la Figura
324 4 presenta las productividades efectivas estimadas reemplazando en la ecuación [2] el
325 TAE calculado con este modelo general. Estas son consistentes con las productividades
326 observadas en la muestra principal, y las diferencias existentes se deben al efecto
327 aleatorio de cada sitio, no considerado en el modelo [3]. El Cuadro B de la Figura 4
328 presenta una comparación de las productividades predichas respecto de las observadas
329 en la muestra de validación independiente. Esta comparación alcanza un coeficiente de
330 determinación de 0,72, con una pendiente cercana a 1, indicando que las predicciones
331 del modelo son válidas para situaciones distintas a la muestra de ajuste, sin presentar
332 fuertes tendencias.

$$333 \quad TAE (s) = 10,4324 + 47,4499 * V_{medioap} + 0.1254 * Gi + 78.0617 * Gi^{-1} +$$
$$334 \quad 1.3976 * In^{-1} + 5.3213 * N.Prod - 0.4277 * DPFmin \quad [3]$$

335 Entra Figura 4

336 La productividad efectiva estuvo principalmente determinada por el VmAP,
337 siguiendo la relación establecida por Visser y Spinelli (2012), caracterizada por un
338 crecimiento aproximadamente lineal para volúmenes menores a 0,3 m³ y luego
339 decreciente hasta alcanzar un máximo por sobre 0,5 m³ (Cuadro A – Figura 4). El sitio 5
340 tuvo una productividad de 36,8 m³.h⁻¹., un 2,5% superior a la predicha por Hildt et al.,
341 (2018) para un *harvester* similar, pero de menor potencia, realizando segundo raleo de
342 *Pinus taeda*. Los sitios 3, 4 y 9 fueron cosechados por el mismo modelo de *harvester*,
343 presentando una productividad media de 32,4 m³.h⁻¹, sin diferencias significativas entre
344 sitios ($p = 0,24$) y un 15% inferiores a las predichas para ese modelo de *harvester*
345 trabajando en raleos (MAC DONAGH et al., 2013). La productividad observada en el sitio
346 6 fue un 62,3% inferior a la predicha para un *harvester* similar con un operario más
347 experimentado (HILDT et al., 2018) (Cuadro D – Figura 2).

348 La densidad de la forestación (G_i), impactó negativamente en la productividad
349 provocando una reducción media del 4% al variar entre 22 y 53 m².ha⁻¹,
350 independientemente del VmAP. Esto fue resultado de su efecto contrapuesto sobre las
351 actividades (Figura 3), reduciendo el T_{busq} , e incrementando el T_{pos} y el T_{proc} al
352 dificultar los movimientos de la grúa y requerir una mayor atención para evitar daños a
353 la masa remanente (FULVIO y BERGSTRÖM, 2013). Debido a que estos efectos se
354 contraponen entre actividades, no han sido identificados por los estudios que realizaron
355 ajustes directos para la productividad efectiva (KÄRHÄ et al., 2004; MEDERSKI et al.,
356 2016). Por otra parte, el volumen medio de las parcelas estuvo relacionado con la N_i ($r =$
357 $-0,57$), lo que implica que, en forestaciones densas, el menor volumen de los árboles
358 aprovechados limita la productividad (MEDERSKI et al., 2016).

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

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

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

391 **Conclusiones**

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

404 impactó principalmente sobre el volumen de madera recuperado, reduciendo en menor
405 medida el tiempo de trozado.

406 **Referencias**

407 BERGSTRÖM, D.; BERGSTEN, U.; NORDFJELL, T. Comparison of Boom-
408 Corridor Thinning and Thinning From Below Harvesting Methods in Young Dense Scots
409 Pine Stands. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 44, n. 4, p. 669-679, 2010.

410 BRAMUCCI, M.; SEIXAS, F. Determinação e quantificação de fatores de
411 influência sobre a produtividade de “harvesters” na colheita florestal. **Scientia**
412 **Forestalis**, Piracicaba, v. 30, n. 62, p. 62-74, 2002.

413 ELIASSON L.; BENGTSSON, J.; CEDERGREN, J.; LAGESON, H. Comparison
414 of Single-Grip Harvester Productivity in Clear and Shelterwood Cutting. **Journal of**
415 **Forest Engineering**. v. 10, n. 1, p. 43-48, 1999.

416 ERBER, G.; HOLZLEITNER, F.; KASTNER, M.; STAMPFER, K. Effect of multi-
417 tree handling and tree-size on harvester performance in small-diameter hardwood
418 thinnings. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 50, n. 1, p. 1-17, 2016.

419 FULVIO, D.F.; BERGSTRÖM, D. Analyses of a single-machine system for
420 harvesting pulpwood and/or energy-wood in early thinnings, **International Journal of**
421 **Forest Engineering**, v. 24, n. 1, p. 2-15, 2013.

422 HILDT, E.; MAC DONAGH, P. M.; SOMMA, F. F.; ALEGRANZA, D.; DURÁN, D.
423 Productividad de un harvester en raleos de plantaciones de pinos en el noreste argentino.
424 **Ciência Florestal**, Santa María, aceptado para publicación, 2018.

425 KÄRHÄ, K.; RÖNKKÖ, E.; GUMSE, S-I. Productivity and cutting costs of thinning
426 harvesters. **International Journal of Forest Engineering**, v. 15, n. 2, p. 43-56, 2004.

427 LAITILA, J.; VÄÄTÄINEN, K. The cutting productivity of the excavator-based
428 harvester in integrated harvesting of pulpwood and energy wood. **Baltic Forestry**,
429 Kaunas, v. 19, n. 2, p. 289-300, 2013.

430 LAZDIŅŠ, A.; PRINDULIS, U.; KALĒJA, S.; DAUGAVIETE, M.; ZIMELIS, A.
431 Productivity of Vimek 404 T5 harvester and Vimek 610 forwarder in early thinning.
432 **Agronomy Research**, Tartu, v. 14, 2. x, p. 475-484, 2016.

433 LEFCHECK, J. PiecewiseSEM: Piecewise structural equation modeling in R for
434 ecology, evolution, and systematics. **Methods in Ecology and Evolution**, London, v. 7,
435 n. 5, p. 573-579, 2016.

436 MAC DONAGH, P. M.; MULAWKA, J. A.; FRIEDL, R. A.; ZADERENKO, C.
437 Productividad y costos de pequeños harvester con oruga operando en plantaciones de
438 *Pinus spp.* en el noreste argentino. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 425-
439 434, 2013.

440 MEDERSKI, P. S.; BEMBENEK, M.; KARASZEWSKI, Z.; ŁACKA, A.;
441 SZCZEPAŃSKA-ÁLVAREZ, A.; ROSIŃSKA, M. Estimating and Modelling Harvester
442 Productivity in Pine Stands of Different Ages, Densities and Thinning Intensities, **Croatian**
443 **Journal of Forest Engineering**, Zagreb, v. 37, n. 1, p.27-36, 2016.

444 NIEMISTÖ, P.; KORPUNEN, H.; LAURÉN, A.; SALOMÄKI, M.; UUSITALO, J.
445 Impact and Productivity of Harvesting while Retaining Young Understorey Spruces in
446 Final Cutting of Downy Birch. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 46, n. 1, p. 81-97, 2012.

447 NURMINEN, T.; KORPUNEN, H.; UUSITALO, J. Time Consumption Analysis of
448 the Mechanized Cut-to-length Harvesting System. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 40, n. 2, p.
449 335-363, 2006.

450 OLIVERA, A.; VISSER, R. Development of forest-yield maps generated from
451 Global Navigation Satellite System (GNSS) - enabled harvester StanForD files:
452 preliminary concepts. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 46, n. 3, p.1-10,
453 2016.

454 OVASKAINEN, H.; UUSITALO, J.; SASSI, T. Effect of edge trees on harvester
455 positioning in thinning. **Forest Science**, Oxford, v. 52, n. 6, p. 659-669, 2006.

456 PETTY, A.; KÄRHÄ, K. Productivity and cost evaluations of energy-wood and
457 pulpwood harvesting systems in first thinnings, **International Journal of Forest**
458 **Engineering**, v. 25, n. 1, p. 37-50, 2014.

459 R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing.
 460 Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponible en: <
 461 <http://R.project.org/>>. Accesos en: 1 mar. 2018.

462 SUADICANI, K.; FJELD, D. Single-tree and Group Selection in Montane Norway
 463 Spruce Stands: Factors Influencing Operational Efficiency. **Scandinavian Journal of**
 464 **Forest Research**, v. 16, n. 1, p. 79-87, 2001.

465 SUADICANI, K.; NORDFJELL, T. Operational aspects of row and selective
 466 thinning in the establishing of a shelterwood in a 50-year-old Norway spruce stand.
 467 **International Journal of Forest Engineering**, v. 14, n. 1, p. 25-37, 2003.

468 VISSER, R.; SPINELLI, R. Determining the shape of the productivity function for
 469 mechanized felling and felling-processing. **Journal of Forest Research**, Tokio, v. 17, n.
 470 5, p. 397-402, 2012.

471

472 Tabla 1: Características de los *harvester* evaluados.

473 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

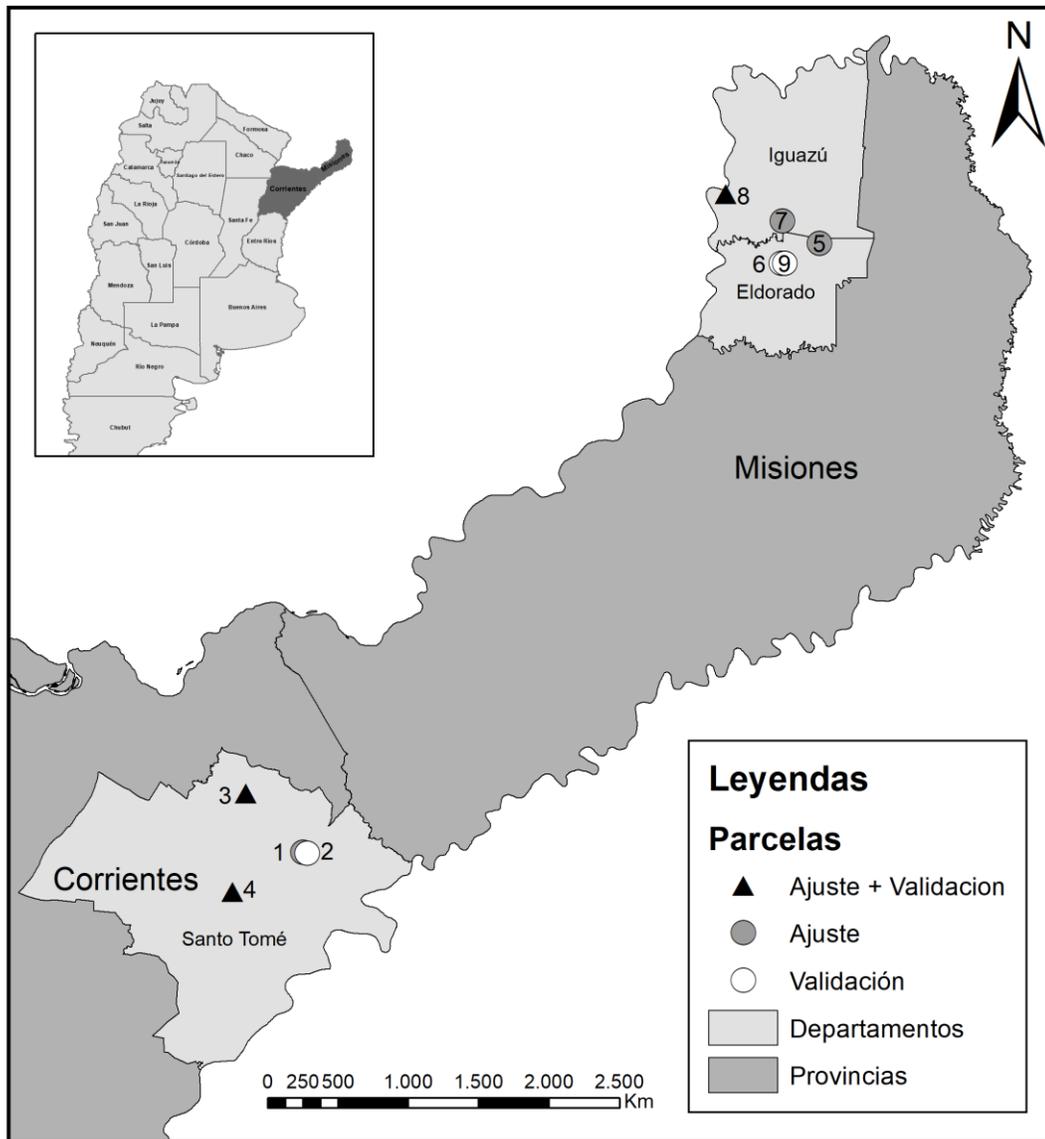
474

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

477 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)
In(VmAP)		0,345 (0,0194)	-0,6177 (0,1616)					
Gi							0,1254 (0,0451)	
Gi⁻¹				109,1102 (44,1318)	-31,0485 (11,4861)			
In⁻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
R²M	0,52	0,70	0,39	0,22	0,14	0,10	0,82	0,55
R²C	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

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

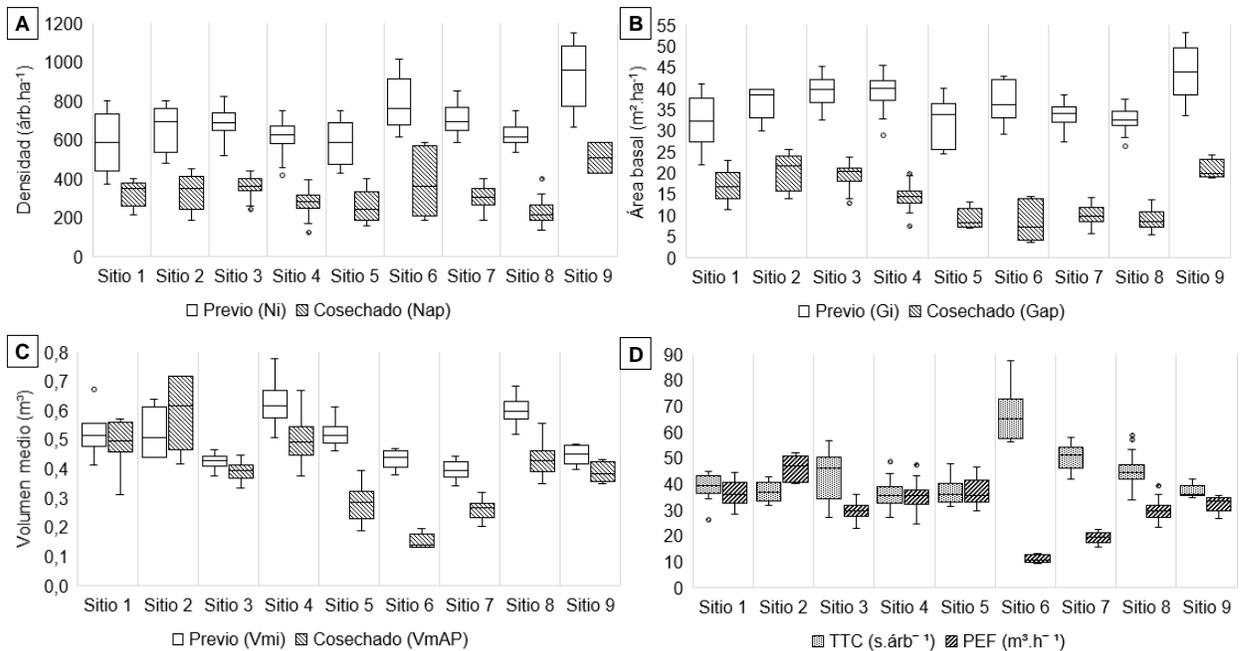


482

483 Figura 1: Área de distribución de los sitios evaluados.

484 Figure 1: Distribution area of the sites evaluated.

485

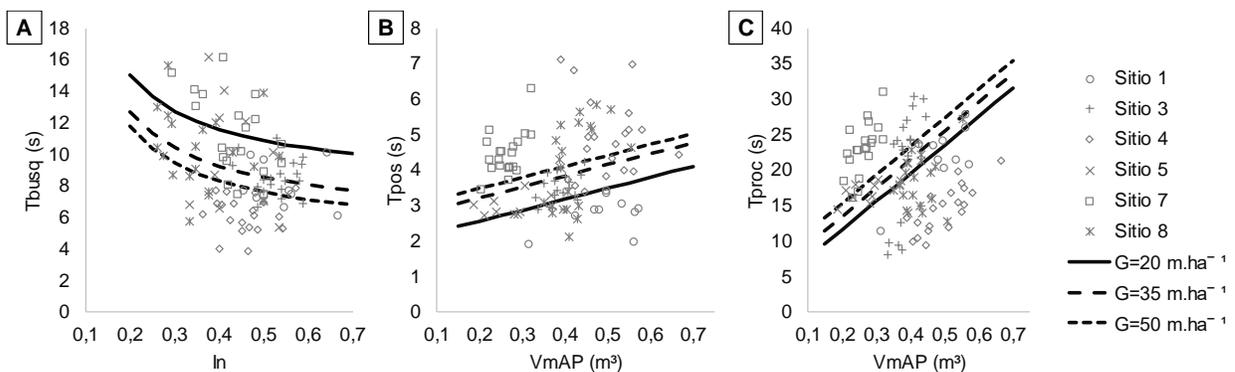


486

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

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

489

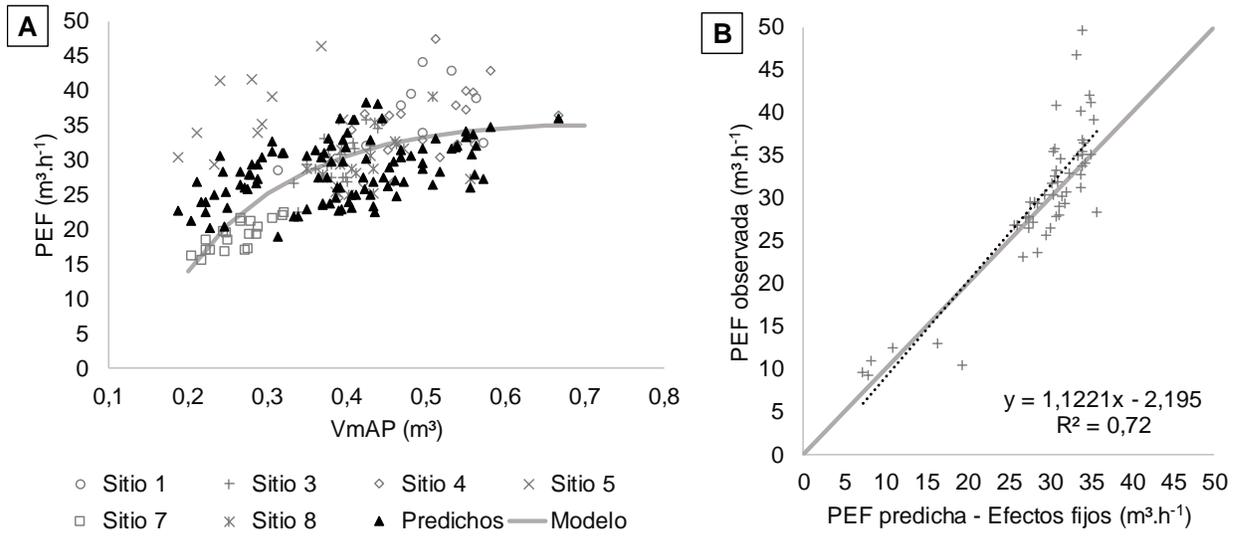


490

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

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

495



496

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

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