



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

## **Evaluación técnica y modelamiento de procesador en cosecha de *Pinus radiata* en la X Región**

Patrocinante: Sr. Patricio Carey B.

Trabajo de Titulación presentado como parte de los requisitos para optar la Título de **Ingeniero Forestal**.

**CECILIA DEL PILAR ARROYO MARTÍNEZ**

VALDIVIA  
2005

*A mi madre María Ida, a mi hermana Cristina  
y a la memoria de mi padre Guillermo*

## CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		<b>Nota</b>
Patrocinante:	Sr. Patricio Carey Briones	<u>65</u>
Informante:	Sr. Gabriel Durán Miranda	<u>64</u>
Informante:	Sra. Rosa M. Alzamora Mallea	<u>66</u>

El patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y forma contemplados en el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

---

Sr. Patricio Carey B.

## ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Descripción del subsistema de desrame-trozado de <i>Pinus radiata</i>	3
2.2 Descripción del procesador	3
2.3 Estudio de tiempos	5
2.4 Estudio de rendimientos	5
2.5 Herramientas de simulación para evaluar el desempeño de faenas de cosecha	6
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	7
3.1 Descripción del área de estudio	7
3.2 Determinación de tiempos y volúmenes	8
3.3 Determinación de productividad y rendimiento	11
3.4 Modelamiento de la función de rendimiento para el subsistema de desrame-trozado	12
4. RESULTADOS	15
4.1 Análisis de los tiempos productivos	15
4.2 Análisis de los tiempos no productivos	17
4.2.1 Tiempos no productivos menores a 10 minutos	18
4.2.2 Tiempos no productivos mayores a 10 minutos	20
4.3 Productividad y rendimiento	24
4.4 Modelamiento del subsistema de desrame-trozado	25
5. CONCLUSIONES	29
6. BIBLIOGRAFÍA	31
ANEXOS	
1 Abstract and keywords	
2 Cuadros	
3 Figuras	

## RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo principal de este estudio fue determinar el rendimiento y productividad de un procesador HARATAH HTH 620 en una faena de cosecha de *Pinus radiata* D. Don en la X Región. Además, como objetivo complementario se desarrolló un modelo de rendimiento en metros cúbicos por hora que permita simular el tiempo de proceso en metros cúbicos por hora que permite simular el tiempo de proceso de un determinado volumen de madera en el subsistema de desrame-trozado.

Consecuente al desarrollo del objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos i) realizar un estudio de tiempos del subsistema de desrame-trozado mediante un procesador WARATAH HTH 620 ; ii) determinar y analizar la productividad y rendimiento obtenidos en el estudio de tiempos del procesador WARATAH HTH 620 y iii) desarrollar un modelo de rendimiento del proceso de desrame-trozado en metros cúbicos por hora y aplicar un programa de simulación para determinar el tiempo de proceso para un determinado *stock* de madera.

El área de estudio correspondió a faenas de cosecha ubicadas en las ciudades de Lanco y Osorno en donde corrientemente se opera con maquinaria altamente mecanizada como *Feller Buncher*, *Skidder Grapple* y *Harvester*. Los rodales en estudio corresponden a árboles con edades de 14, 21 y 23 años con densidades de 700 a 1.340 árboles por hectárea y con un volumen medio de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>/árbol.

Para la determinación de tiempos se identificó cada uno de los elementos que componen el ciclo de trabajo del procesador (tiempo productivo) y los elementos que conforman los tiempos no productivos o demoras. Estos últimos, fueron clasificados en demoras mecánicas y operacionales, agrupándolas en períodos menores a 10 minutos, que son consideradas como tiempos no productivos normales en el proceso, y en demoras mayores a 10 minutos, que son percibidas como tiempos no productivos ocasionales no normales en el proceso.

La productividad y rendimiento del *Harvester*, se determinó primero considerando el total del tiempo no productivo y posteriormente sin considerar las demoras mayores a 10 minutos.

Como resultados, se obtuvo que el ciclo productivo del *Harvester* ocupó un 57, 66 y 53% total de las horas planificadas en árboles con un volumen de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup> respectivamente, y la duración promedio del ciclo productivo del procesador varía de 28,2 segundos a 1 minuto 9 segundos en las tres áreas de estudio.

En los tres escenarios el mayor porcentaje del tiempo de no productivo menor a 10 minutos lo ocuparon las demoras operacionales. Así, en árboles con un volumen de 0,2 y 0,7 m<sup>3</sup> el *Harvester* empleó sobre un 60% del tiempo no productivo mayor a 10 minutos en demoras mecánicas, no obstante, cuando los árboles eran de 0,5 m<sup>3</sup> las demoras sobre 10 minutos ser 100% operacionales.

Otro resultado interesante fue que cuando el *Harvester* procesó árboles de 0,5 m<sup>3</sup> se obtuvo una mayor productividad (65,5%) y un mayor rendimiento (34,4 m<sup>3</sup>/hora planificada). Sin embargo, cuando se procede a eliminar las demoras mayores a 10 minutos, se experimenta un mayor aumento en la productividad, de 27,1% a un 77.1% con los individuos de 0,2 m<sup>3</sup>.

A continuación, en el estudio se modelaron dos funciones de rendimiento, una expresada en metros cúbicos por hora planificada y la otra en metros cúbicos por hora productiva, utilizando como variable dependiente los metros cúbicos por hora y como variable independiente el volumen por árbol. Estas funciones fueron ingresadas al *software Ithink* v. 7.03 para simular el proceso de desrame-trozado y determinar cuántas horas empleará el equipo en procesar determinadas cantidades de madera.

En cuanto a la simulación aplicada al proceso de desrame-trozado, se obtuvo que un volumen de 1.000 m<sup>3</sup> de madera en trozas es procesado en 29 horas, cuando no se presentan demoras. En cambio, cuando se incluyen los tiempos muertos el tiempo de proceso de los 1.000 m<sup>3</sup> aumenta a 50 horas. En cuanto al rendimiento del procesador, se obtuvo valores entre 28 y 41 m<sup>3</sup> por hora productiva y entre 17 y 22 m<sup>3</sup> por hora planificada. Los valores obtenidos mediante la simulación no presentaron diferencias significativas en cuanto a los metros cúbicos por hora productiva calculados (obtenidos del estudio de tiempos) y tabulados (obtenidos de la simulación). No obstante, al incorporar los tiempos de demoras si existen diferencias altamente significativas entre los metros cúbicos calculados y tabulados.

Palabras claves: *Harvester*, tiempo, rendimiento, productividad, simulación.

## 1. INTRODUCCIÓN

En materia de maquinaria para explotación forestal, el primer problema que se suscita al hablar de procesadores y cosechadoras es el de su propia denominación, un ejemplo claro de ello se da entre procesadores y cosechadoras. Así, siguiendo la terminología más aceptada por los países europeos, en inglés *processor*, es la máquina que desrama y troza el árbol después del volteo, pudiendo realizar alguna otra función como puede ser el clasificado o el apilado. La máquina que, además de estas funciones, realiza el volteo, se denomina cosechadora, en inglés *Harvester* (Tolosana *et al*, 2000 y Vignote *et al* 1993).

En los círculos forestales chilenos relativos a actividades de cosecha, a menudo se emplea el término procesador para la máquina que sigue al equipo de motoserristas que voltean los árboles o bien sigue a una cortadora-apiladora (Tolosana *et al*, 2000).

A inicios de la década del '90 se incorporan a las faenas de cosecha forestal de nuestro país los procesadores y pasan a constituirse en uno de los equipos de mayor tecnología empleados en este tipo de actividades. Su alta eficiencia viene dada principalmente, por la tecnología que permite procesos prácticamente simultáneos, de desrame y trozado en el árbol (Eeroheimo y Mäkinen, 1995).

Este equipo, dada su modernidad y eficiencia representa una alta inversión, por ello es indispensable efectuar estudios que apunten a evaluar los rendimientos y tiempos no productivos con la finalidad de adicionar información que apoye decisiones de inversión y de manejo en este tipo de equipos de modo de lograr una mayor productividad tanto de la maquinaria como del sistema y minimizar los costos de producción.

En este sentido, el conocimiento y aplicación de herramientas o algoritmos que permitan simular teóricamente un problema se hace cada día más indispensable. La simulación es el uso de un modelo para imitar, o describir paso a paso el comportamiento de un subsistema. Los modelos de simulación están compuestos de una serie de operaciones aritméticas y lógicas que, en conjunto, representan la estructura y el comportamiento del sistema de interés.

Bajo este marco de discusión, el objetivo general de este trabajo es determinar el rendimiento y productividad de un procesador en una faena de cosecha de *Pinus radiata* D. Don, con diferentes características dasométricas, en la X Región. Además se pretende desarrollar un modelo de rendimiento en metros cúbicos por hora que permita simular el tiempo de proceso de un determinado volumen de madera en el subsistema de desrame-trozado.

Con el propósito de desarrollar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- I. Realizar un estudio de tiempos del subsistema de desrame-trozado mediante un procesador WARATAH HTH 620.
- II. Determinar y analizar la productividad y rendimiento obtenidos en el estudio de tiempos del procesador WARATAH HTH 620.
- III. Desarrollar un modelo de rendimiento del proceso de desrame-trozado en metros cúbicos por hora y aplicar un programa de simulación para determinar el tiempo de proceso para un determinado *stock* de madera.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Descripción del subsistema de desrame-trozado de *Pinus radiata***

Previo a la descripción del subsistema de desrame-trozado es preciso señalar que existen distintos métodos de aprovechamiento del árbol, entendiéndose como tal, a la forma en la cual la madera es llevada a las canchas, orilla de camino o bien directamente a las plantas de aprovechamiento. El método va a depender de la cantidad de procesos que se realicen en los árboles a partir del momento en que son cortados. Dentro de estos métodos se pueden mencionar: el método de madera corta, de fuste entero y de árbol completo (Neuenschwander, 2001).

La descripción que se hará del subsistema, será en base al método de árbol completo, el que consiste en transportar los árboles enteros desde la zona de volteo hasta el lugar de procesamiento.

Una vez que los árboles son llevados hasta la cancha de madereo son desramados y trozados de acuerdo a un esquema de corte preestablecido. Esta labor puede ser llevada a cabo por hacha (desrame) y motosierra (trozado) o bien por equipos mecanizados como es el procesador (desrame y trozado). En las figuras 1 y 2 del anexo se muestran los equipos antes mencionados.

De acuerdo con estudios realizados por Apud (1989), se estima que el rendimiento del desrame con hacha varía entre 2,9 y 3,2 m<sup>3</sup>/hora y que el rendimiento del trozado con motosierra es de 11 a 12 m<sup>3</sup>/hora. Además se debe considerar que para realizar el subsistema con este tipo de cuadrillas se debe trabajar con dos obreros. A diferencia de lo que ocurre al utilizar un procesador, el cual sólo necesita de un operador por turno, alcanzando, según estudios canadienses y brasileños, un rendimiento en el desrame y trozado de árboles de *P. radiata* que varía entre 35,7 y 59,4 m<sup>3</sup>/hora, dependiendo principalmente de las características de la plantación (Araki, 1991; Moshenko, 1992; ANAIS, 2002).

### **2.2 Descripción del procesador**

El procesador, en el cual se basa este estudio, técnicamente es una cosechadora, ya que el cabezal WARATAH HTH 620 (figura 1, izquierda) puede realizar las operaciones de volteo, desrame y trozado, pero la máquina base, CAT 322 C<sub>L</sub> (figura 1, derecha), que sostiene este cabezal no cuenta con la estabilidad necesaria para ingresar al bosque y voltear los árboles, por lo que este equipo será considerado sólo como un procesador en cancha u orilla de camino, independiente de las funciones que pueda realizar.



Figura 1. Cabezal WARATAH HTH 620 (izquierda) y Excavadora CAT 322 C<sub>L</sub> (Derecha)

De acuerdo a la modalidad de procesamiento de los árboles los procesadores se pueden clasificar en equipos con: una unidad de proceso o con más de una unidad de proceso. En esta oportunidad sólo se definirá el primero (figura 2 anexos) puesto que es el utilizado para este estudio.

Los procesadores con una unidad de proceso poseen un cabezal adosado al extremo de la pluma de una grúa que efectúa las operaciones de desrame y trozado en una sola manipulación de los árboles. El cabezal procesador es adicionado hidráulicamente, y sus componentes esenciales (figura 3, anexos) son una sierra de cadena, rodillos mecánicos de avance y desrame y un dispositivo que efectúa la medición del diámetro y del largo, al cual se le denomina codificador (Neuenschwander, 2001).

La función de movilizar el tronco por el cabezal es realizada por dos rodillos de alimentación, los que a la vez cumplen la labor del desrame. Estos rodillos giran en sentido opuesto trabajando a una velocidad de alimentación de 4,5 metros por segundo, en tanto que la abertura máxima de los rodillos alcanza aproximadamente 500 milímetros (Bajo, 2003).

La función de medición del largo y trozado es controlada por un microcomputador que permite que el operador pueda trabajar con un largo previamente definido o bien seleccionar distintos largos de trozos para la optimización del aprovechamiento de los árboles del rodal (Neuenschwander, 2001). La evaluación de los largos es efectuada por fotocélulas que efectúan las mediciones a partir del extremo mayor del árbol que está siendo procesado, por lo que normalmente se emplea la sierra de cadena como punto cero de la medición. La información es transmitida por medio de un codificador al computador (figura 3 anexos), el cual, empleando un programa preestablecido, puede entregar las instrucciones para el trozado (Bajo, 2003).

### 2.3 Estudio de tiempos

El estudio de tiempos, es un estudio detallado de la distribución del uso del tiempo en las diversas tareas que componen un determinado esquema de trabajo, incluyendo también el estudio del tiempo consumido por otros eventos ajenos en principio al objetivo como retrasos, pausas, incidentes, entre otros (Tolosana *et al.*, 2000).

El propósito de los estudios de tiempos en el aprovechamiento forestal, es mejorar los sistemas y métodos de trabajo, ensayar o comparar medios o técnicas de trabajo y valorar económicamente el propio trabajo en función de la evolución de la productividad, para fijación de salarios e incentivos.

Según Carey (1992), los tiempos medidos pueden clasificarse como: tiempo planificado, es decir, tiempo total del ciclo de trabajo incluyendo demoras; tiempo productivo, suma de los tiempos parciales de los elementos productivos del ciclo de trabajo de los subsistemas, excluyendo las demoras; y tiempo de demoras, entendiéndose como tal los tiempos ocasionales, ya sea indirectamente productivos o tiempos muertos. A la vez, los tiempos de demoras, se pueden clasificar en operacionales, mecánicos y personales.

### 2.4 Estudio de rendimientos

El estudio de rendimientos es la relación de los tiempos totales (productivos y no productivos) con los volúmenes extraídos, expresado en metros cúbicos por hora ( $m^3/hora$ ). En este tipo de estudios también es importante considerar las condiciones de trabajo, ya que esto lo hará comparable con estudios posteriores que se realicen en similares circunstancias (Eronheimo y Mäkinen, 1995).

De acuerdo a lo señalado por Vignote *et al.* (1993), los principales factores que afectan el rendimiento de los procesadores forestales son: factores geomorfológicos, geográficos, climáticos, de masa y humanos.

- Factores geomorfológicos: la pendiente del terreno, la escabrosidad y la adherencia afectan de forma importante a la movilidad de la máquina base, hasta el punto de que en muchos casos condicionan la posibilidad de su utilización.
- Factores geográficos: la latitud y altitud influyen de forma directa en el rendimiento de los equipos forestales, la primera como consecuencia de su influencia en las horas de luz natural, y la segunda por la pérdida de potencia que experimenta la máquina base.
- Factores climáticos: los fenómenos meteorológicos, influyen directamente, aunque no de forma muy notable, en las labores de los equipos, debido a la acción que ejerce sobre el rendimiento del trabajador. Indirectamente tienen una importancia mayor, pues influyen en factores tales como la adherencia.

- Factores de masa: la especie, la edad, la forma y tamaño de los árboles, la rugosidad, las características y cantidad de corteza, y de ramas y las características de la madera influyen de forma muy notable en el rendimiento de los procesadores.
- Factores humanos: la profesionalidad y la motivación influyen de forma directa en el rendimiento de la máquina. Los procesadores son equipos que necesitan un cierto período de aprendizaje para su correcta utilización, el que variará según lo complejo que sea el equipo.

## **2.5 Herramientas de simulación para evaluar el desempeño de faenas de cosecha**

El programa computacional *Ithink* v. 7.03 es una herramienta para apoyar decisiones financieras, que permite resolver problemas de estrategia e ingeniería, además de desarrollar modelos de optimización que permitan maximizar las utilidades de una empresa. Para el caso de este estudio, se aplica el programa para simular el proceso de desrame-trozado en una faena de cosecha forestal, con el fin de que el programa satisfaga las siguientes funcionalidades:

- Procesar la información y entregar resultados que permitan la proyección y simulación de rendimientos de los sistemas planificados en una determinada faena de cosecha forestal.
- Apoyar la toma de decisiones para determinar la tecnología de producción más adecuada en costo/eficiencia para una faena de cosecha.
- Apoyar el análisis comparativo en planes de cosecha ante cambios de factores principalmente de operación.
- Procesar las distintas variables de entrada con el fin de determinar la máxima productividad de los sistemas de cosecha.

### 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a faenas de cosecha altamente mecanizada donde se opera con la siguiente maquinaria:

- *Feller Buncher (Cortadora apiladora)* modelo TK 722 , el cual tiene la función de voltear los árboles por medio de un sistema de cabezal especializado de corta modelo HT 201 *Caterpillar*, además de apilar en rumas los árboles cosechados para el madereo.
- *Skidder Grapple (Skidder con garra)* modelo 545, es un tractor forestal que realiza la función de madereo.
- *Harvester*, excavadora modelo 322C<sub>L</sub> a la cual se le ha reemplazado la garra por un cabezal WARATAH HTH 620 con el propósito de llevar a cabo el desrame y trozado de los árboles en cancha u orilla de camino.

La etapa del pre-muestreo para este estudio, se realizó en la temporada de verano en los meses de enero y febrero del año 2005, donde se registró información en tres faenas de cosecha, todas con plantaciones de *P. radiata* ubicadas en la Décima Región pero con distintas características dasométricas. La información referente a los tres escenarios fue proporcionada por la empresa mandante y se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Descripción de las plantaciones de *P. radiata* localizadas en el área de estudio

Predio	Ubicación	Edad (años)	Densidad (árboles/ha)	DAP (cm)	Volumen (m <sup>3</sup> /árbol)
Rinconada de Leubert	Lanco	14	1.340	21	0,2
Vista Hermosa	Osorno	21	900	25	0,5
Curihue	Lanco	23	700	29	0,7

La plantación ubicada en el predio Rinconada de Leubert, no presentaba ningún tipo de manejo y la cosecha de los árboles se realizó con el objetivo de obtener un pronto retorno del capital invertido para poder cambiar el uso del suelo.

Aunque el objetivo para la plantación del predio Vista Hermosa era obtener productos de alta calidad, el inoportuno y escaso manejo que presentó el rodal no permitió cumplir con dicho objetivo.

Las plantaciones del predio Curihue tampoco presentó ningún tipo de manejo, a pesar de ello los productos obtenidos de esta plantación fueron de mejor calidad que

en los predios anteriores, debido a la mayor edad de las plantaciones y a un incendio que ocurrió algunos años atrás lo que actuó, en cierta medida, como una intervención.

Para el desarrollo de este estudio se observó que los factores geomorfológicos, geográficos y climáticos no tienen mayor influencia en el rendimiento del equipo en ninguno de los tres escenarios, puesto que la máquina trabajó en canchas construidas en terrenos planos, dentro de las cuales realizó un escaso desplazamiento. Además el sistema de auto-iluminación le permitió trabajar hasta altas horas de la noche. Las condiciones climáticas no fueron extremas y los operadores eran personas con capacitación y años de experiencia en la operación de procesadores.

Sólo el factor de masa tuvo incidencia en el desempeño del procesador, ya que los tres escenarios presentaron árboles con distinta edad, forma y tamaño.

Con respecto al tipo de productos obtenidos por el *Harvester*, estos fueron los mismos en las tres áreas de estudio. El esquema de corte del procesador consta de seis tipos de productos diferentes los que se especifican en el cuadro 2.

Cuadro 2. Esquema de corte empleado por el *Harvester*

Producto	Largo	Diámetro	Observaciones
2,50 aserrable	2,50 m	20 cm y más	
2,50 pulpable	2,50 m	8 cm y más	Troz as 2,50 aserrables que tienen algún defecto.
5 podado	5,00 m	28 a 44 cm	
2,65 podado	2,65 m	30 y más	
4,10 regular	4,10 m	18 a 44 cm	Troz as con una cantidad regular de nudos.
pulpa variable	4 a 7 m	8 a 18 cm	

A pesar de que en las tres áreas de estudio el *Harvester* tuvo el mismo esquema de corte, en árboles de 0,2 m<sup>3</sup> se obtuvieron únicamente los productos 2,50 pulpable y pulpa variable; en árboles de 0,5 m<sup>3</sup> se obtuvieron trozas de todas las categorías pero principalmente 2,50 aserrable y 2,65 podado; y en árboles de 0,7 m<sup>3</sup> la mayor cantidad de trozas corresponde a los productos 2,65 y 5 podado.

### 3.2 Determinación de tiempos y volúmenes

Para la determinación de tiempos, fue necesario primero identificar cada uno de los elementos que componen el ciclo de trabajo del procesador (tiempo productivo), además de incluir los elementos que conforman los tiempos no productivos o demoras.

Se consideró como tiempo productivo, a la parte total del tiempo medido del subsistema de producción, que está directamente implicado en la obtención de la tarea específica del trabajo, es decir, en el desrame y trozado, de esta manera se identificaron los siguientes elementos:

- Tomar árbol: desde que el cabezal del procesador suelta las ramas del árbol que estaba procesando y toma un nuevo árbol (figura 2).



Soltar ramas



Tomar árbol

Figura 2. Elemento tomar árbol

- Manipulación del árbol: desde que el cabezal toma el árbol, hasta que realiza el primer corte en la base de éste (figura 3). La manipulación, incluye todas las maniobras realizadas para soltar el árbol que está atrapado en la ruma y que a la vez puede o no incluir desrame.



Tomar árbol



Desrame  
(puede o no incluirlo)



Corte en la base

Figura 3. Elemento manipulación del árbol



- Procesar árbol: desde que el cabezal realiza el primer corte en la base del árbol (donde comienza la lectura del sensor), hasta que suelta las ramas del árbol que estaba procesando (figura 4). Esta actividad incluye el trozado de la madera de acuerdo a un esquema de corte preestablecido y puede o no incluir desrame.

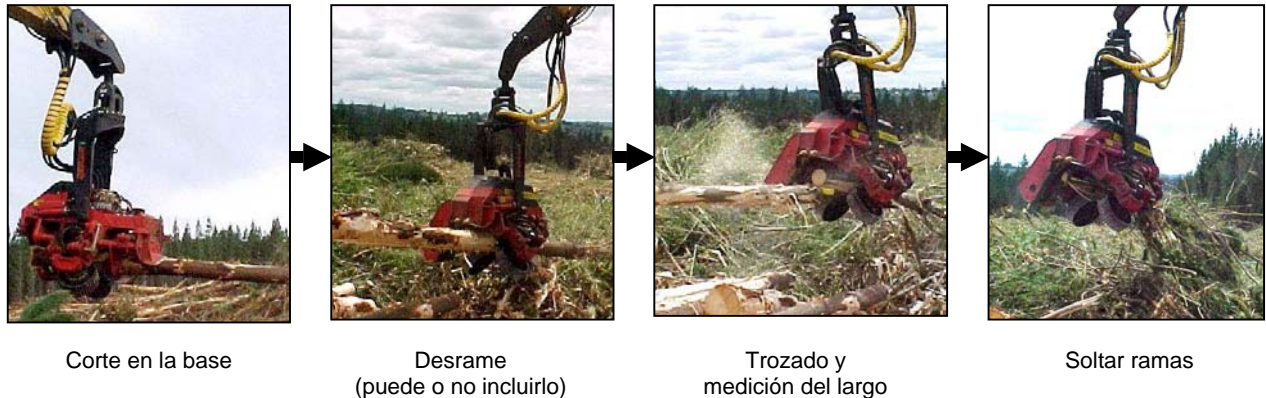


Figura 4. Elemento procesar árbol

Con respecto al tiempo no productivo, se designó como tal, a aquel tiempo ocasional que contribuye indirectamente al desarrollo del tiempo productivo y de los tiempos muertos, ya sean estos operacionales, mecánicos o personales. La clasificación y descripción de cada uno de los elementos que componen el tiempo no productivo se muestra el cuadro 1 de los anexos.

Una vez identificados cada uno de los elementos que componen el tiempo planificado, es decir tiempo productivo más tiempo no productivo, se registró, en formularios especialmente diseñados para esta labor (cuadro 2, anexos). El tiempo exacto en cada operación elemental se registró utilizando un sistema de cronometraje continuo.

Mediante el pre-muestreo se aplicó un método estadístico para determinar el número de muestras suficientes para poder cumplir con la condición de obtener un error del 5%, es decir, una confianza del 95% en el análisis de los datos (cuadro 3, anexos).

El método estadístico utilizado fue el determinación del tamaño muestral (ecuación 1), para lo cual se registraron 30 ciclos productivos en cada escenario, donde se midieron los elementos tomar árbol, manipulación y procesar árbol.

$$N = \frac{(CV^2 \times t)}{E^2} \quad [1]$$

Donde:

$N$  : Número mínimo de muestras considerando como tal a los ciclos productivos.

$CV$  : Coeficiente de variación.

$t$  : Desviación normal para una confianza del 95%.

$E$  : Error de muestreo.



Con respecto al volumen de los árboles procesados, éste se obtuvo a través de información proporcionada por los calibradores despachadores, los cuales son personal de la empresa que tienen la labor de medir toda la madera que se encuentra en las canchas.

### 3.3 Determinación de productividad y rendimiento

Se realizó un análisis estadístico descriptivo para la información de los ciclos productivos de cada uno de los distintos escenarios muestreados, donde se determinó el tiempo medio, el tiempo medio al 5%, el coeficiente de variación (CV), la asimetría, el tiempo mínimo y máximo, intervalo de confianza para el tiempo medio al 95% y los cuartiles.

Los elementos del tiempo no productivo se clasificaron en demoras menores a 10 minutos, que son consideradas como tiempos no productivos normales en el proceso, y demoras mayores a 10 minutos, que son percibidas como tiempos no productivos ocasionales no normales en el proceso. Para estos tiempos no productivos se realizó un análisis estadístico descriptivo de tendencia central y de distribución, obteniendo con esto el tiempo medio, el coeficiente de variación y el tiempo mínimo y máximo empleado en cada elemento.

Además de la estadística descriptiva, se determinó la productividad del equipo considerando el total del tiempo no productivo y posteriormente sin considerar las demoras mayores a 10 minutos, a través de las ecuaciones 2 y 3.

$$P_{total} = \frac{Hr.prod}{Hr.pl} \times 100 \quad [2]$$

$$P_{s/d} = \frac{Hr.prod}{(Hr.pl - Dem)} \times 100 \quad [3]$$

Donde:

*P<sub>total</sub>* : Productividad total (%), incluyendo todas las demoras.

*P<sub>s/d</sub>* : Productividad (%), sin incluir demoras mayores a 10 minutos.

*Hr.prod* : Horas productivas.

*Hr.pl* : Horas planificadas.

*Dem* : Demoras (operacionales, mecánicas y personales) mayores a 10 minutos

El rendimiento se calculó basado en horas productivas, planificadas y planificadas sin demoras mayores a 10 minutos (ecuaciones 4, 5 y 6).

$$R(m^3 / hrprod) = \frac{Vol}{Hr.prod} \quad [4]$$

$$R(m^3 / hrpl) = \frac{Vol}{Hr.pl} \quad [5]$$

$$R(m^3 / hrpl.s / d) = \frac{Vol}{(Hr.pl - Dem)} \quad [6]$$

Donde:

- $R(m^3 / hrprod)$  : Rendimiento en m<sup>3</sup> por hora productiva.  
 $R(m^3 / hrpl)$  : Rendimiento en m<sup>3</sup> por hora planificada.  
 $R(m^3 / hrpl.s / d)$  : Rendimiento en m<sup>3</sup> por hora planificada sin demoras (operacionales, mecánicas y personales) mayores a 10 minutos.  
 $Vol$  : Volumen procesado por el equipo (m<sup>3</sup>).

### 3.4 Modelamiento de la función de rendimiento para el subsistema de desrame-trozado

Para el subsistema de desrame-trozado se modelaron dos funciones de rendimiento, una expresada en metros cúbicos por hora planificada y la otra en metros cúbicos por hora productiva (ecuaciones 4 y 5), utilizando como variable dependiente los metros cúbicos por hora y como variable independiente el volumen por árbol.

Para el diseño de las funciones, en los tres escenarios, se agruparon los tiempos productivos y no productivos por día y se calcularon los metros cúbicos por hora. Una vez obtenidos estos valores se realizó una estimación curvilínea (cuadro 4 y 5, anexos), a través de regresión lineal, exponencial y potencial para determinar las funciones de rendimiento.

La elección del modelo de regresión que más se ajusta a los datos, se realizó en base al mayor coeficiente de correlación (asociación) y al menor error estándar.

Luego, a través del *software Ithink* v. 7.03, se simuló un proceso de desrame-trozado para determinar cuántas horas empleará el equipo en procesar determinadas cantidades de madera (del *stock* 1 al *stock* 2, figura 5). Para ello se utilizaron las funciones de rendimientos obtenidas de la regresión (descritas en los párrafos anteriores), las que fueron incorporadas al modelo mediante el *uniflow* y considerando un volumen de árbol medio de 0,5 m<sup>3</sup>/árbol. La variable independiente de la función (metros cúbicos por árbol) se detalló en el *converter* asociando números aleatorios a un rango de volumen que varió de

0,2 a 0,7 m<sup>3</sup>/árbol, y fue unida al *uniflow* mediante el *action conector*. En la figura 5 se presenta el esquema del modelo básico y la nomenclatura correspondiente utilizada por el programa.

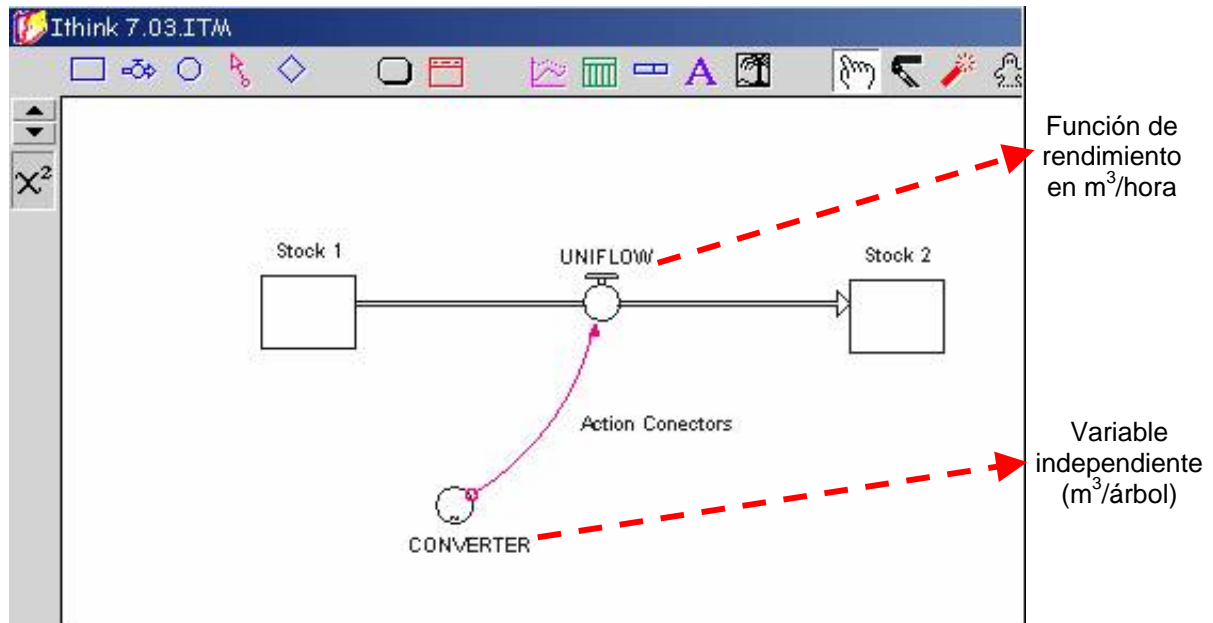


Figura 5. Nomenclatura utilizada por el programa *Ithink* para el modelamiento del proceso

Debido a que el *software Ithink* opera en base a funciones probabilísticas para la variable tamaño de árbol, el programa entrega distintos resultados cada vez que se hace correr, por este motivo se realizó un pre-muestreo de 10 corridas para determinar el tamaño de la muestra necesario para validar la simulación con un 95% de confianza y obtener un error de muestreo del 5% (ecuación 1).

La validación del modelo de simulación, es decir determinar si existen diferencias significativas entre los metros cúbicos por hora calculados (datos obtenidos del estudio de tiempo) y los metros cúbicos tabulados (datos obtenidos de la simulación), se realizó mediante estadística no paramétrica (Chi-cuadrado) para el caso de los metros cúbicos por horas productiva y con estadística paramétrica (anova de un factor) para los metros cúbicos por hora planificada.

Los distintos métodos utilizados para la validación del programa de deben a que los datos de los metros cúbicos por hora planificada son homogéneos y los datos de metros cúbicos por hora productiva heterogéneos. Esta situación se comprobó a través de la prueba de *Levene* para homogeneidad de varianza y se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Prueba de homogeneidad de varianza

Metros cúbicos por	Estadístico de <i>Levene</i>	Grados de Libertad 1	Grados de Libertad 2	Significancia
Hora Productiva	7,00729267	1	47	0,01101217
Hora Planificada	2,40288815	1	49	0,12754684

Como se observa en el cuadro 3, la significancia de los metros cúbicos por hora productiva es inferior a 0,05, por lo tanto se rechaza la hipótesis de que las varianzas de los datos son homogéneas. Por el contrario, los metros cúbicos por hora planificada presentan una significancia superior a 0,05 lo que indica que las varianzas de los datos no son heterogéneas.

## 4. RESULTADOS

El análisis del estudio de tiempo del procesador, se realizó clasificando los tiempos en productivos y no productivos. Como se presenta en la figura 6, en las tres áreas de estudio, el tiempo productivo ocupa sobre un 50% del total de las horas planificadas del procesador.

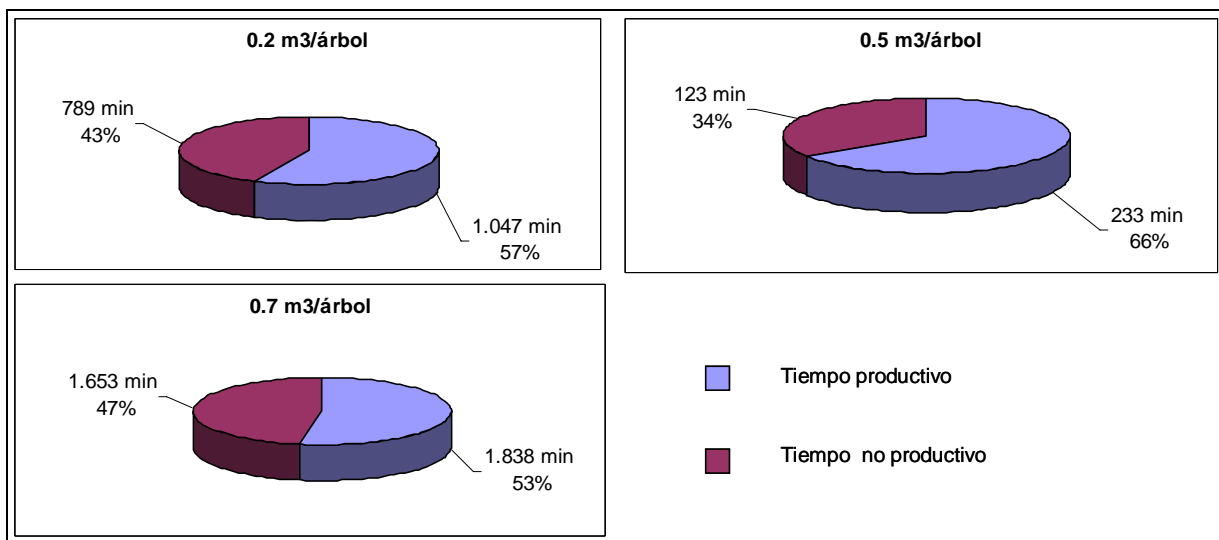


Figura 6. Tiempo productivo y no productivo empleado por el procesador en árboles de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>

A continuación se observará en detalle el análisis de los tiempos productivos y no productivos empleados por el procesador, a través de cuadros explicativos y gráficos, que exhiben parámetros de estadística descriptiva de tendencia central y de dispersión, para cada uno de los distintos escenarios.

### 4.1 Análisis de los tiempos productivos

El análisis estadístico descriptivo se realizó para el ciclo productivo en general y para cada uno de los elementos que componen este ciclo en particular, los resultados obtenidos se presentan en los cuadros se exhiben a continuación.

Cuadro 4. Indicadores de estadística descriptiva para el tiempo (minutos) empleado por ciclo productivo

Estadígrafos	0,2 m <sup>3</sup> /árbol	0,5 m <sup>3</sup> /árbol	0,7 m <sup>3</sup> /árbol
Número de ciclos	2.246	384	1.595
Media	0,47	0,61	1,15
Media recortada al 5%	0,44	0,56	1,04
Coeficiente de variación	51%	66%	79%
Coeficiente de asimetría	3,34	2,19	2,79
Mínimo	0,15	0,18	0,20
Máximo	3,58	3,27	8,13
Intervalo de confianza para la media al 95%	0,46;0,48	0,57;0,65	1,11;1,20
Cuartiles:			
25	0,32	0,32	0,58
50	0,40	0,50	0,88
75	0,55	0,76	1,40

Como se muestra en el cuadro 4, a medida que aumentan los metros cúbicos por árbol también crece el tiempo medio empleado por ciclo productivo. Además, en los tres escenarios la variación porcentual con respecto a la media es superior al 50%, lo que indica que existe una gran heterogeneidad en los minutos por ciclo productivo. Sin embargo, en ninguno de los tres escenarios existen ciclos que ocupen un tiempo extremo (ya sea superior o inferior), debido a que al excluir el 5% de los valores extremos se obtiene una media recortada al 5% similar al tiempo medio por ciclo productivo, el cual incluye al 100% de los valores.

Si bien, los minutos empleados por ciclo no son homogéneos, se puede decir, con un 95% de confianza, que el tiempo medio por ciclo productivo variará entre 0,46 - 0,48; 0,57 - 0,65 y 1,1 - 1,2 minutos en individuos de *P. radiata* de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>/árbol respectivamente.

Con respecto a la distribución de los datos, en las tres áreas de estudio se observa una asimetría positiva debido a que el coeficiente es superior a uno, es decir, existe un elevado número de observaciones que emplean un menor tiempo por ciclo productivo. Situación que se observa claramente con los cuartiles, ya que en los escenarios de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>/árbol, el 75% de las observaciones emplean sobre 0,6, 0,8 y 1,4 minutos por ciclo productivo respectivamente, valores que son muy inferiores al tiempo máximo por ciclo registrado.

Al analizar el tiempo productivo por elemento, es posible observar (cuadro 6, anexos) que estos presentan la misma tendencia, en cuanto a valores medios, heterogeneidad y distribución, que al considerarlos en conjunto. Sin embargo, a medida que aumenta el tamaño del árbol (0,7 m<sup>3</sup>/árbol), el *Harvester* emplea un mayor tiempo en tomar el árbol (9 segundos), pero disminuye el tiempo porcentual (12%) con respecto a los otros dos elementos.

En la figura 7 se muestra el tiempo medio, expresado en segundos, y la distribución porcentual por elemento del ciclo productivo en árboles de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>.

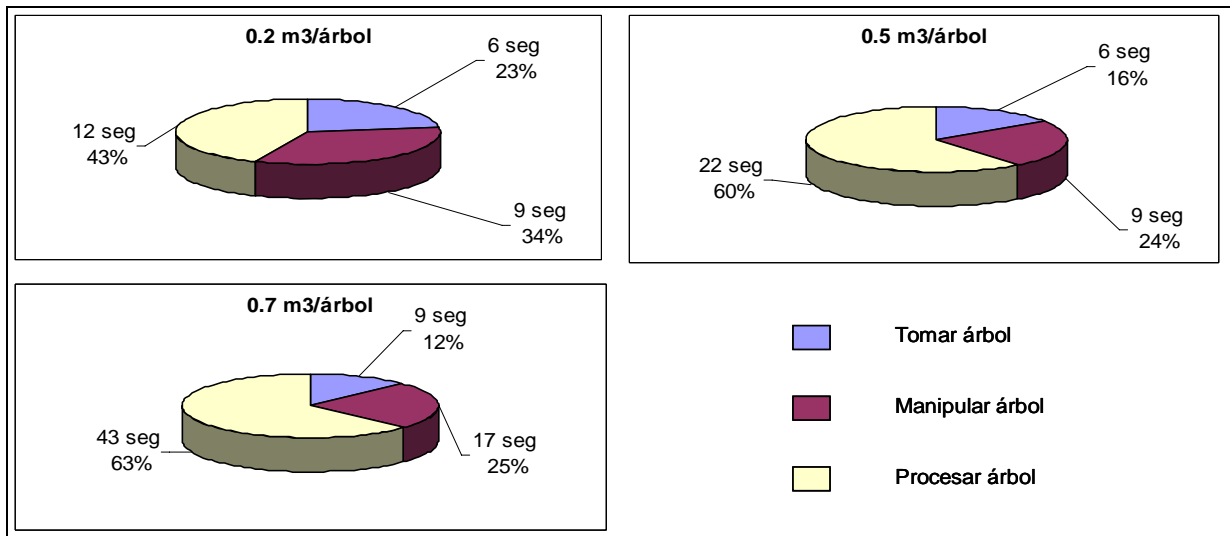


Figura 7. Tiempo medio (segundos) por elemento del ciclo productivo en árboles de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>

Con respecto a la manipulación del árbol, se observa un mayor tiempo en individuos de 0,7 m<sup>3</sup>, pero el porcentaje del tiempo empleado para desarrollar este elemento lo presentan los individuos de 0,2 m<sup>3</sup>.

Evidentemente, los individuos que presentan un mayor volumen (0,7 m<sup>3</sup>/árbol) ocupan más tiempo en procesar el árbol (43 segundos) y a la vez un mayor porcentaje del tiempo productivo en llevar a cabo este elemento.

#### 4.2 Análisis de los tiempos no productivos

Los tiempos no productivos o demoras, fueron analizados clasificándolos en menores a 10 minutos, ya que éstos representan las demoras que ocurren en el ritmo normal del ciclo productivo, y demoras mayores a 10 minutos que son tiempos ocasionales fuera del ciclo normal de trabajo.

Cuando el *Harvester* procesa árboles de tamaño extremo, como 0,2 y 0,7 m<sup>3</sup>, ocurre un elevado porcentaje de demoras mayores a 10 minutos (figura 8). Esta situación se debe a que los árboles de 0,2 m<sup>3</sup> presentaron una mayor cantidad de ramas y una forma curvada del fuste lo que provoca ciertos inconvenientes en el proceso. Para el caso de los individuos con una mayor volumen, el elevado porcentaje de demoras mayores a 10 minutos se explica por que algunos árboles excedían notablemente el volumen medio por árbol (0,7 m<sup>3</sup>/árbol) lo cual dificultó su procesamiento.

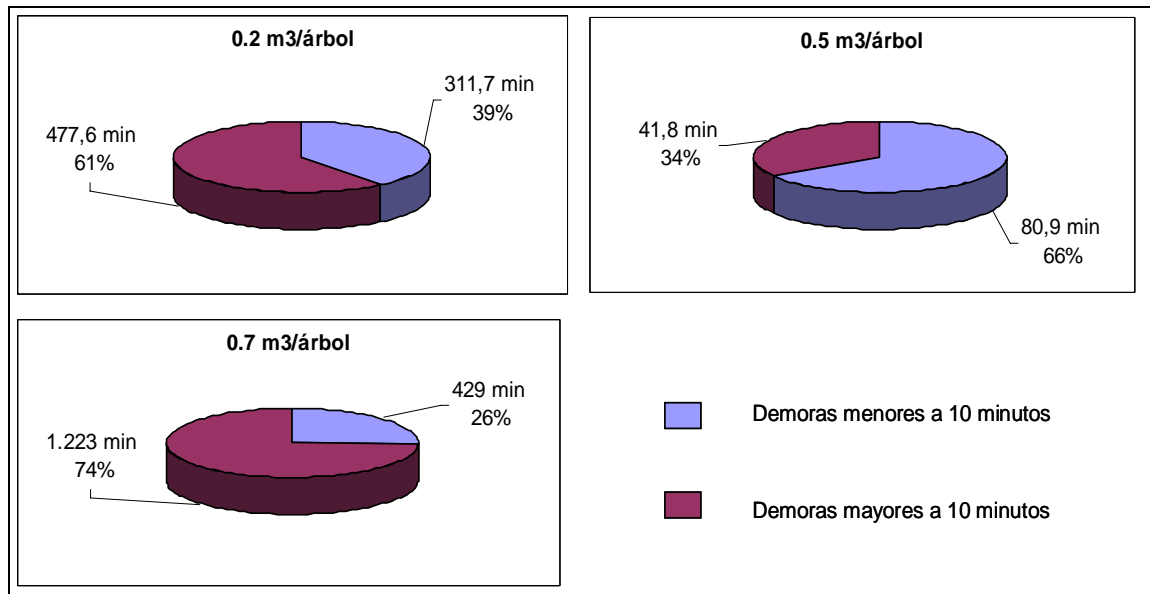


Figura 8. Demoras menores y mayores a 10 minutos en árboles de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>

El análisis de los tiempos no productivos se presenta a continuación además de la estadística descriptiva de tendencia central y de distribución por elementos.

#### 4.2.1 Tiempos no productivos menores a 10 minutos

Al igual que en el caso del tiempo productivo, cada elemento que conforma el tiempo no productivo menor a 10 minutos, presenta una gran heterogeneidad en cuanto a la duración de éste, en las tres situaciones (cuadro 7, anexos).

Al clasificar el tiempo no productivo en demoras mecánicas y no mecánicas, se observa en la figura 9, que en las tres áreas de estudio el mayor porcentaje del tiempo de no productivo menor a 10 minutos lo ocupan las demoras operacionales. El menor porcentaje en las demoras mecánicas se debe a que generalmente estas emplean sobre 10 minutos para su desarrollo.



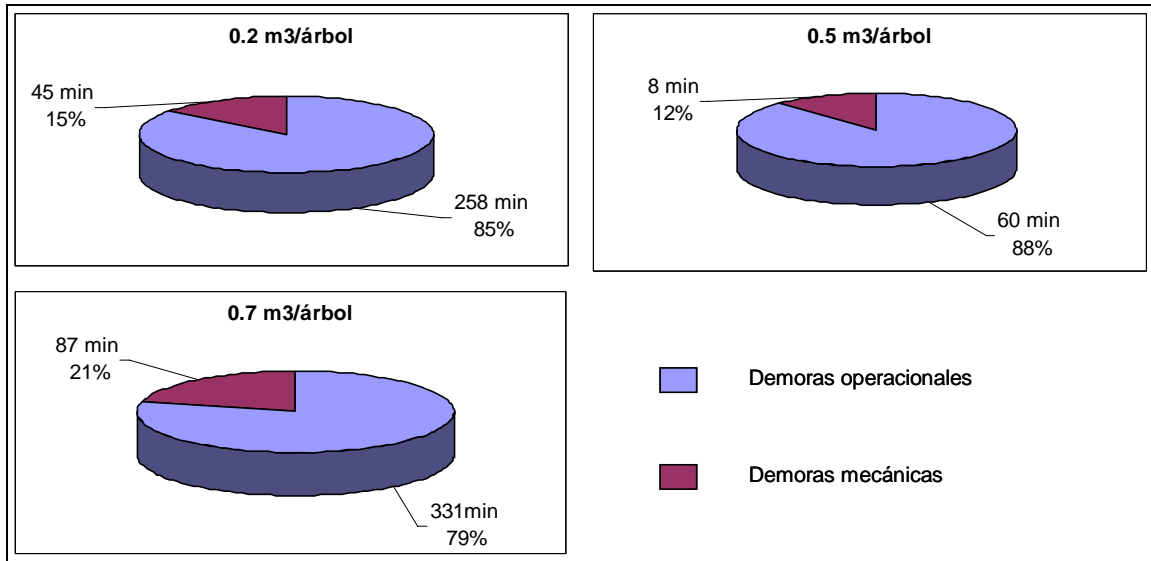


Figura 9. Demoras mecánicas y no mecánicas menores a 10 minutos en árboles de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>

Al analizar los elementos que componen los tiempos no productivos, se observa en la figura 10, que los elementos que tienen una mayor participación en el tiempo total de demoras, en los tres escenarios son: desplazamiento corto, despeje de cancha y detención para indicaciones.

El desplazamiento corto se refiere al movimiento que realiza el *Harvester* de una ruma de árboles a otra, pero siempre dentro de la misma cancha. Este elemento ocupa un tiempo medio para su ejecución de que varía de 42 segundos a 1,9 minutos dependiendo de los metros cúbicos por árbol (cuadro 7, anexos), aunque este es un factor que no tiene mucha incidencia sobre esta labor, más bien ésta se ve afectada por la manera en que el operador del *Skidder* ubique los árboles en la cancha.

Cuando el procesador realiza la labor de limpiar la cancha de desechos como trozas que no califican, ramas y hojas, se denomina despeje de cancha. El tiempo medio que emplea el procesador para llevar a cabo este elemento se incrementa a medida que aumenta el tamaño de los árboles (cuadro 7, anexos). Sin embargo, esta tendencia no indica que en árboles de 0,7 m<sup>3</sup> el *Harvester* emplee más tiempo en despejar la cancha y menos en individuos de 0,2 m<sup>3</sup>, ya que la variación porcentual con respecto al tiempo medio de este elemento, en las tres áreas de estudio, es superior a un 80%, lo que evidencia la gran heterogeneidad que experimenta el tiempo de duración de este elemento.

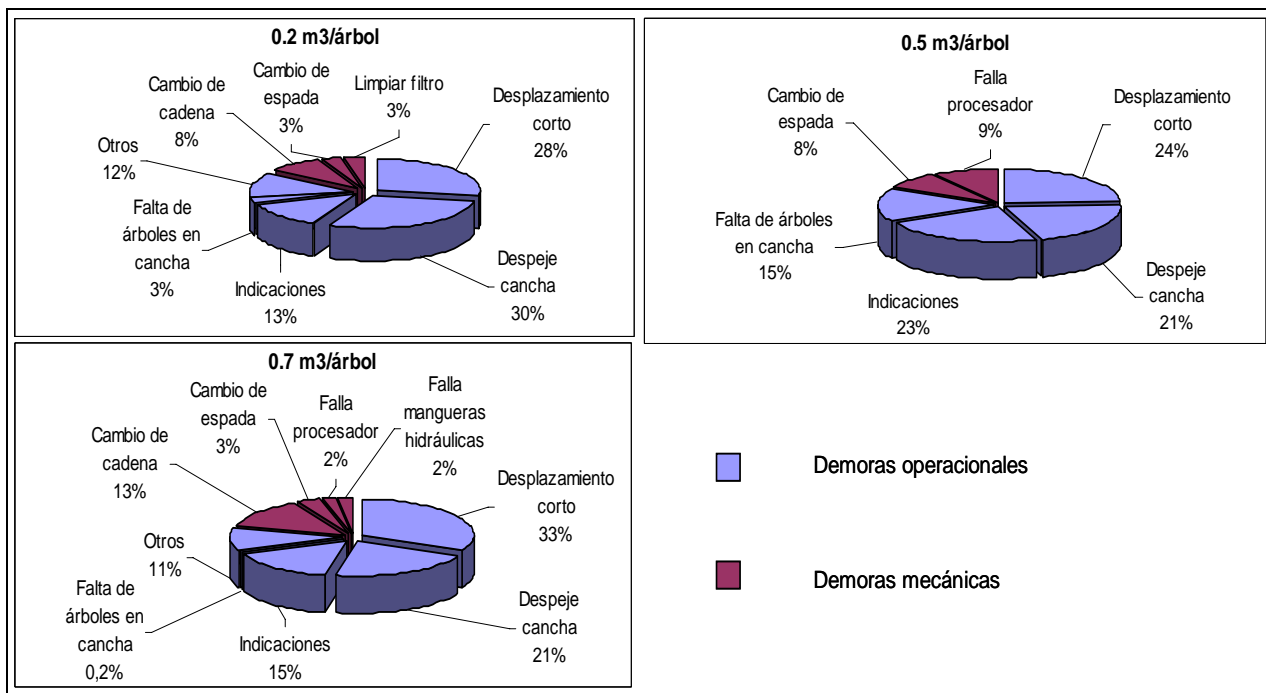


Figura 10. Elementos que componen el tiempo no productivo menor a 10 minutos en árboles de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>

Con respecto al elemento detención para indicaciones, se entiende como tal, al tiempo ocupado por el operador en recibir instrucciones por parte del jefe de faena o por algún superior. El tiempo empleado por este elemento varía de 2,8 a 6,3 minutos (cuadro 7, anexos) y al igual que el elemento “despeje de cancha”, a medida que aumenta el tamaño de los árboles también lo hace el tiempo de ejecución. Sin embargo, este tiempo no productivo se puede reducir al máximo e incluso eliminar con una adecuada planificación y organización de la faena, de tal manera que el operador del *Harvester* reciba las instrucciones del día a primera hora de su jornada laboral.

#### 4.2.2 Tiempos no productivos mayores a 10 minutos

La clasificación del tiempo no productivo en demoras menores y mayores a 10 minutos, tiene por objetivo identificar aquellos elementos que forzosamente necesitan más de 10 minutos para su desarrollo y aquellos elementos en que se está empleando un tiempo excesivo, los cuales con una correcta organización y planificación pueden ser reducidos.

Como se exhibe en la figura 11, cuando los individuos tienen un volumen extremo, ya sea inferior (0,2 m<sup>3</sup>/árbol) o superior (0,7 m<sup>3</sup>/árbol), el *Harvester* emplea sobre un 60% del tiempo no productivo mayor a 10 minutos en demoras mecánicas y cuando

los árboles son de un tamaño intermedio ( $0,5 \text{ m}^3/\text{árbol}$ ) las demoras sobre 10 minutos sólo son operacionales.

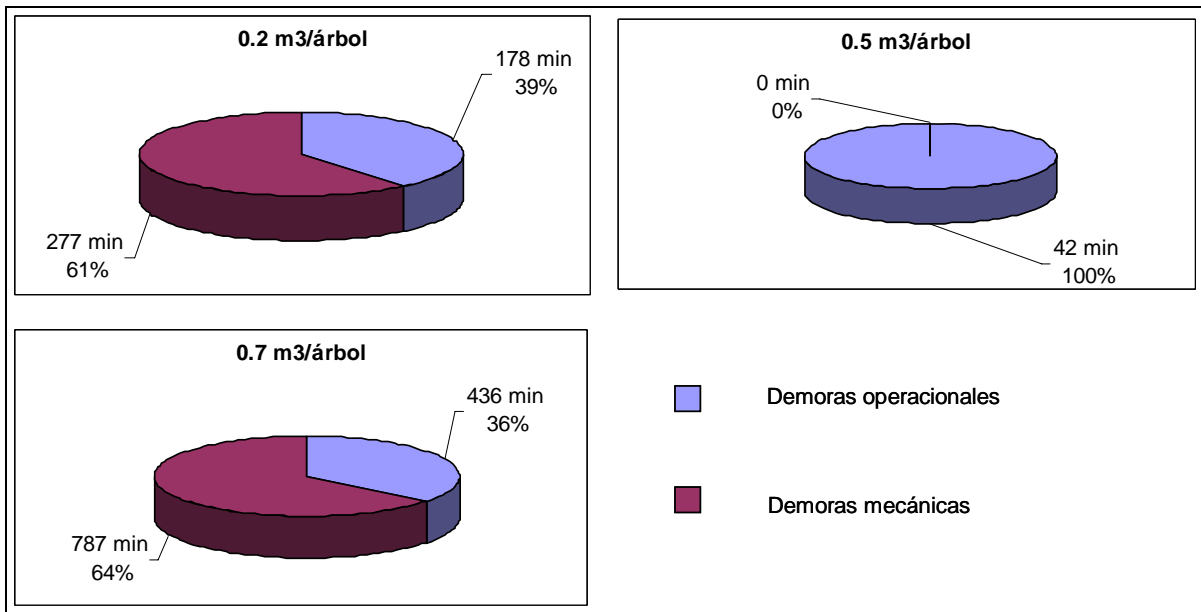


Figura 11. Demoras mecánicas y no mecánicas mayores a 10 minutos en árboles de  $0,2, 0,5$  y  $0,7 \text{ m}^3$

Los elementos que ocupan un mayor porcentaje del tiempo no productivo mayor a 10 minutos, en ambas áreas de estudio son fallas en el procesador y fallas en las mangueras hidráulicas (figura 12).

El exceso de ramas, las curvaturas en el fuste y el escaso volumen de los árboles de  $0,2 \text{ m}^3$ , se traduce en un mayor número de árboles procesados por hora y en un mayor desgaste mecánico del cabezal, por lo que en este escenario el elemento fallas del procesador ocupa un 34% de las demoras mayores a 10 minutos.

Si bien el número de árboles procesados por hora es menor cuando estos tienen un volumen medio de  $0,7 \text{ m}^3$ , algunos individuos excedían notablemente el volumen medio, lo que dificultó el proceso y produjo fallas en el cabezal que ocuparon un 45% de las demoras mayores a 10 minutos.

En ambos escenarios, un factor clave en las fallas del procesador fue el exiguo mantenimiento que recibía el *Harvester* en general, lo que no permitía detectar las fallas a tiempo, si no una vez que el cabezal prácticamente ya no podía funcionar.

Las fallas mecánicas en las mangueras hidráulicas se producen debido que estas no cuentan con ningún tipo de protección, es decir el equipo no es forestizado, por lo que fueron dañadas al recibir golpes de los árboles procesados. Este elemento es el que presenta una mayor dificultad para reducir su tiempo de ejecución, debido a que está

influenciado por otros factores como el tipo de falla y la habilidad del mecánico en detectar el desperfecto.

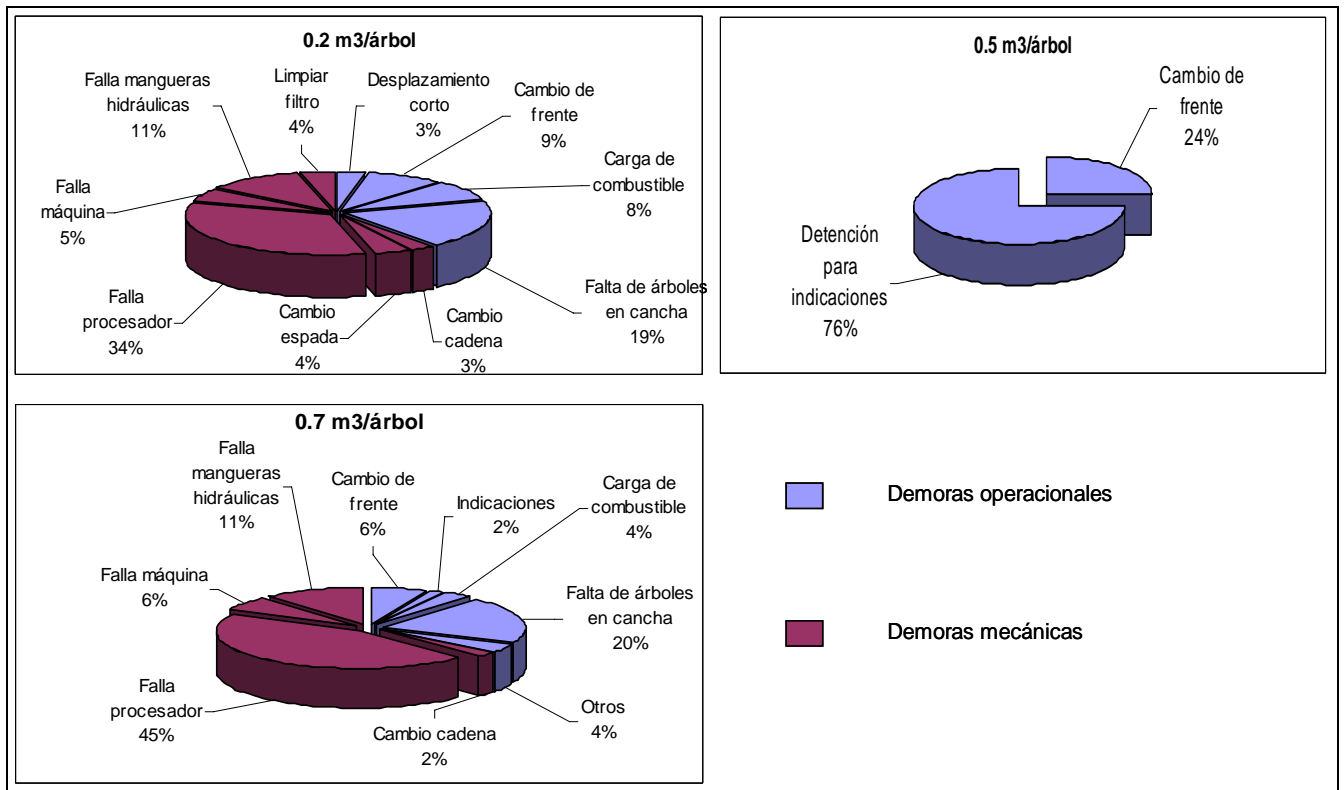


Figura 12. Elementos que componen el tiempo no productivo mayor a 10 minutos en árboles de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>

Elementos no productivos como cambio de frente, es decir movimiento del procesador de una cancha a otra, y carga de combustible tienen una baja participación en las tres áreas de estudio y necesariamente requieren de un tiempo superior a 10 minutos para su ejecución, sin embargo ambos elementos presentan un tiempo de duración medio inferior a 22 minutos (cuadro 8, anexos) y una variación porcentual con respecto a éste bajo el 19%, lo que indica que la distribución de los tiempos es homogénea, es decir que no existe mucha variabilidad entre el tiempo de ejecución menor y mayor.

Por el contrario, demoras como desplazamiento corto, falta de árboles en cancha, detención para indicaciones, cambio de cadena, cambio de espada y limpiar filtro, son elementos que pueden disminuir su tiempo de ejecución a través de una adecuada planificación y organización de la faena.

Aunque el elemento desplazamiento corto tiene una baja participación en las demoras mayores a 10 minutos, la disminución del tiempo se obtiene básicamente con una apropiada organización en el apilado de madera tanto por parte del *Skidder*

(árbol completo) como del procesador (trozas), ya que al mantener ordenada y despejada la cache de madereo el equipo puede desplazarse expeditamente en ésta.

Con respecto al tiempo empleado por el operador del equipo en recibir indicaciones del jefe de faena, éste se podría disminuir o incluso eliminar si el operador recibiera al inicio de su jornada laboral una guía donde se detallen todos los aspectos del día.

Si bien, la falta de árboles en cancha es un tiempo no productivo ocasionado por fallas del *Skidder* tiene una participación sobre el 19% en las demoras mayores a 10 minutos del procesador. Tanto este elemento como las fallas en las mangueras hidráulicas, fallas en máquina base, cambio de cadena, cambio de espada y limpiar filtro, pueden disminuir su tiempo realizando una mantención oportuna al equipo base y al cabezal, además de mantener un amplio *stock* de repuestos en la faena.

### 4.3 Productividad y rendimiento

En el cuadro 5 se muestra la productividad y rendimiento del procesador en estudio relacionando el tiempo productivo y planificado con el número de árboles y el volumen procesado en árboles de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>. Además, muestra el rendimiento y productividad considerando todas las demoras y excluyendo aquellas superiores a 10 minutos.

Cuadro 5. Productividad y rendimiento del *Harvester* en árboles de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>

Parámetro	0,2 m <sup>3</sup> /arb		0,5 m <sup>3</sup> /arb		0,7 m <sup>3</sup> /arb	
	Total (horas)	%	Total (horas)	%	Total (horas)	%
Hora productivas del <i>Harvester</i>	17,5	57,1	3,9	65,5	30,6	52,6
Hora de retrasos mecánicos						
Demoras mecánicas menores a 10 minutos	0,7		0,2		1,5	
* Demoras mecánicas mayores a 10 minutos	4,6		0,0		13,1	
Subtotal	5,4	17,5	0,2	3,5	14,6	25,0
Hora de retrasos no mecánicos						
Demoras operacionales menores a 10 minutos	4,5		1,1		5,7	
** Demoras operacionales mayores a 10 minutos	3,4		0,7		7,3	
Subtotal	7,8	25,4	1,8	31,0	13,0	22,3
Horas planificadas del <i>Harvester</i>	30,7	100	5,9	100	58,2	100
Productividad (%) (con todas las demoras)		57,1		65,5		52,6
Productividad (%) (sin demoras mayores a 10 min.)		77,1		74,2		60,0
Nº total de árboles	2.246		384		1.596	
Volumen producido (m <sup>3</sup> )	449,2		192		1.117,2	
árboles/hora planificada (nº)	128,3		99,0		52,1	
árboles/hora planificada (nº)	73,3		64,8		27,4	
Rendimiento (m <sup>3</sup> /horas productivas)	25,7		49,5		36,5	
Rendimiento (m <sup>3</sup> /horas planificadas)	14,7		32,4		19,2	
Rendimiento (m <sup>3</sup> /hrpl) (sin demoras mayores a 10min)	19,8		36,7		21,9	
m <sup>3</sup> /turno 8 hrs	117,2		259,3		153,6	

\* Demoras mecánicas: Duración entre 10 y 173 minutos en árboles de 0,7 m<sup>3</sup>  
 Duración entre 10 y 125 minutos en árboles de 0,2 y 0,5 m<sup>3</sup>  
 \*\* Demoras operacionales: Duración entre 10 y 160 minutos en árboles de 0,7 m<sup>3</sup>  
 Duración entre 10 y 32 minutos en árboles de 0,2 y 0,5 m<sup>3</sup>

Como se mencionó anteriormente, en los tres escenarios sobre el 50% del total de las horas planificadas corresponden a horas productivas. Pero cuando el *Harvester* procesa árboles de 0,5 m<sup>3</sup>, se obtiene una mayor proporción de horas productivas (65,5%), debido principalmente a las características de los individuos. Es por esta misma razón que en esta área de estudio se obtiene una mayor productividad (65,5%) y un mayor rendimiento (34,4 m<sup>3</sup>/hora planificada).

No obstante, al eliminar las demoras mayores a 10 minutos, las cuales presentan una alta participación en las demoras mecánicas y operaciones del procesador, se obtiene una mayor productividad en árboles de 0,2 m<sup>3</sup>.

Al excluir el tiempo no productivo superior a 10 minutos, la productividad promedio de los tres escenarios aumenta de un 58,4% a un 70,4%. Es decir, si consideramos una jornada laboral de 8 horas, el procesador incrementaría su productividad de 4 horas 38 minutos a 5 horas 36 minutos en el mismo turno.

Con respecto al rendimiento medio de las tres áreas de estudio, obviamente este tiene la misma tendencia que la productividad, ya que al eliminar las demoras superiores a 10 minutos aumenta de 22,1 m<sup>3</sup>/hora planificada a 26,1 m<sup>3</sup>/hora planificada, es decir la producción promedio diaria, en una jornada laboral de 8 horas, acrecienta de 102,4 m<sup>3</sup> a 146,2 m<sup>3</sup>.

#### 4.4 Modelamiento del subsistema de desrame-trozado

De acuerdo al análisis de la estimación curvilínea para la estimación de los metros cúbicos por hora productiva y por hora planificada, en ambos casos, el modelo que mejor se ajusta a los datos es la regresión potencial, ya que presenta el mayor coeficiente de correlación de 65 y 32% y el menor error estándar 0,23 y 0,36 respectivamente (cuadros 6).

Cuadro 6. Modelos de estimación curvilínea

Modelo	m <sup>3</sup> /hora productiva			m <sup>3</sup> /hora planificada		
	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación	Error estándar	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación	Error estándar
Lineal	0,52	0,27	9,44	0,22	0,05	7,78
Exponencial	0,56	0,31	0,25	0,23	0,05	0,36
Potencial	0,65	0,42	0,23	0,32	0,10	0,36

En base al modelo elegido, las funciones ingresadas al programa *lthink* fueron las que se muestran a continuación.

$$m^3 / \text{Hora\_Productiva} = 48,516663 * \text{Tamaño}^{0,353771} \quad [1]$$

$$m^3 / \text{Hora\_Planificada} = 24,147813 * \text{Tamaño}^{0,213115} \quad [2]$$

En base a las funciones de rendimiento 1 y 2, se simularon las horas (planificadas y productivas) que requerirá el equipo para procesar un determinado *stock* de madera, por efectos prácticos de consideraron 1.000 m<sup>3</sup>,

lo que se presenta en las figuras 13 y 14. Cabe mencionar que las salidas gráficas expuestas en estas figuras fueron elegidas al azar, ya que el *software*, al trabajar con variables aleatorias, genera distintos resultados cada vez que el usuario hace correr el programa.

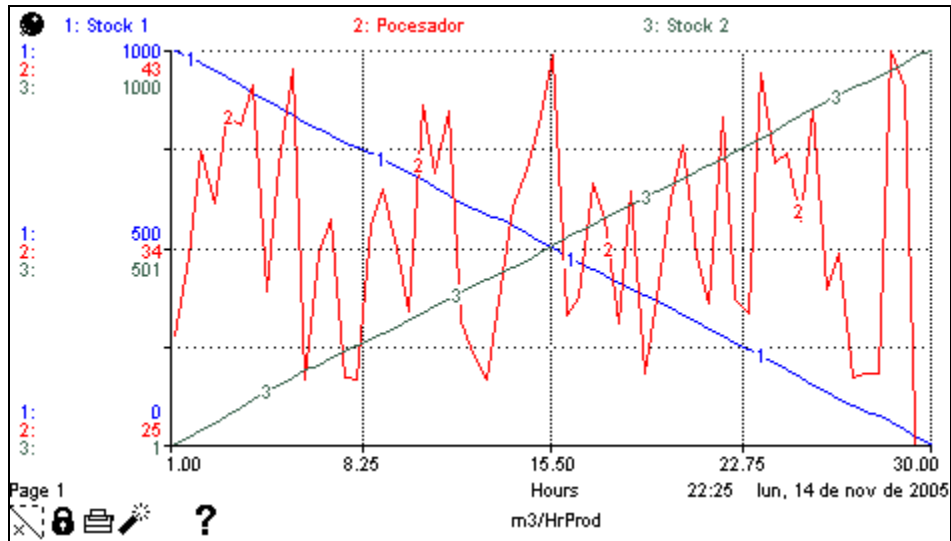


Figura 13. Horas productivas empleadas por el equipo para procesar un *stock* de 1.000 m<sup>3</sup> de madera

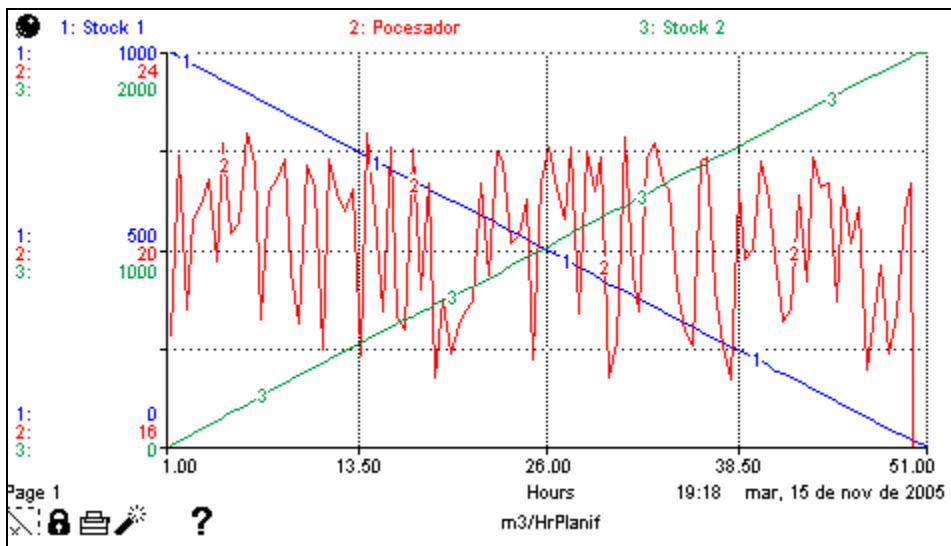


Figura 14. Horas planificadas empleadas por el equipo para procesar un *stock* de 1.000 m<sup>3</sup> de madera

El *software Ithink v.7.03* genera dos tipos de formatos para entregar los resultados de la simulación. Una de las salidas es en forma de cuadros las que se muestran en las figuras 21 y 22 de los anexos y la otra en forma gráfica como se exhibe en las figuras 13 y 14. En este último formato se presenta en el eje de las X el número de horas y



en el eje de las Y los metros cúbicos. Es posible observar en ambas situaciones que a medida que la madera es trozada y desramada por el *Harvester* el *stock 1* disminuye y el *stock 2* aumenta, además de las variaciones en los metros cúbicos que procesa el equipo.

Al comparar el rendimiento del *Harvester* en horas productivas y planificadas, es posible observar que una misma cantidad de madera (1.000 m<sup>3</sup>) es procesada en 29 horas cuando no se presentan demoras (horas productivas) y en 50 horas cuando se incluyen los tiempos muertos (horas planificadas). Además de que el rendimiento del equipo varía entre 28 y 41 m<sup>3</sup>/hora productiva y entre 17 y 22 m<sup>3</sup>/hora planificada, situación que muy similar a la presentada en el estudio de rendimiento discutido en el apartado 4.3. Aunque cabe destacar que en el caso de la función de rendimiento en metros cúbicos por hora planificada, las demoras no fueron incluidas como una constante por lo que no fue posible aplicar en el *software* una distribución de frecuencia para éstas.

Es de esperar que cuando se simulan los metros cúbicos por hora planificada, exista una mayor variación en el tiempo de proceso, ya que se incluyen las demoras. Por el contrario, debería existir una menor variación en el tipo de proceso cuando se simulan los metros cúbicos por hora productiva. Pero, en ambos casos no se presenta esta tendencia, ya que, como se mencionó en el párrafo anterior, las demoras no fueron incluidas como una constante en la función de rendimiento en metros cúbicos por horas planificada.

Al analizar estadísticamente los datos, se obtiene que no existen diferencias significativas entre los metros cúbicos por horas productivas calculados y tabulados, ya que la significancia es superior a un 5% (cuadro 7)

Cuadro 7. Chi-cuadrado para metros cúbicos por hora productiva

Estadísticos de contraste		
	m <sup>3</sup> /Hora Productiva	Tratamiento
Chi-cuadrado	10,7142857	1
grados de libertad	37	1
Significancia asintótica	0,99999287	0,31731051

Si bien los metros cúbicos por hora planificada simulados por el *software* son relativamente similares a los obtenidos en el estudio de rendimientos, estadísticamente existen diferencias altamente significativas entre los datos de metros cúbicos calculados y tabulados, debido a que la significancia es menor a un 1%. En el cuadro 8 se muestra la tabla ANOVA que valida estos resultados.

Cuadro 8. Análisis de varianza (tabla ANOVA) para los metros cúbicos por hora planificada

ANOVA		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
m <sup>3</sup> /HrPlanf	Inter-grupos	513,231	1	513,231	49,847	0,000
	Intra-grupos	504,513	49	10,296		
	Total	1017,744	50			

Esta inconsistencia entre los metros cúbicos calculados y tabulados por hora planificada, se explica por la baja correlación que se obtuvo del ajuste potencial (32%). Esta situación evidencia que hay otras variables que influyen en el rendimiento del procesador, las cuales no fueron incluidas en este estudio, ya que cuando se validan los metros cúbicos por hora productiva, es decir no se incluyen demoras, estadísticamente no hay diferencias significativas entre los datos calculados y tabulados.

## 5. CONCLUSIONES

Si bien invertir en un sistema de cosecha altamente mecanizado, en donde se trabaja con maquinaria como *Feller Buncher*, *Skidder* y *Harvester*, implica una elevada inversión, los altos rendimientos que se obtienen con estos equipos justifican su implementación. Sin embargo, es fundamental una adecuada organización y coordinación entre los subsistemas para evitar o reducir al máximo los tiempos no productivos que puedan ocurrir.

Con respecto al ciclo productivo del *Harvester*, éste ocupa un 57, 66 y 53% del total de las horas planificadas cuando se procesan árboles de *P. radiata* con un volumen de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup> respectivamente. Con una duración promedio del ciclo productivo, que varía de 28 segundos a 1 minutos 9 segundos dependiendo del tamaño de los individuos.

Por lo tanto, se puede decir con un 95% de confianza, que el tiempo medio por ciclo productivo del *Harvester* variará entre 0,46 - 0,48; 0,57 - 0,65 y 1,1 - 1,2 minutos en individuos de *P. radiata* de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup>/árbol respectivamente.

El elemento “procesar árbol” es el que emplea un mayor porcentaje del tiempo productivo en árboles de 0,2, 0,5 y 0,7 m<sup>3</sup> y la duración de este se incrementa a medida que aumenta el tamaño de los individuos.

En relación al tiempo no productivo, se advierte una elevada participación con respecto a las horas planificadas en las tres áreas de estudio, por lo que es necesario identificar y analizar cada uno de los elementos que componen estas demoras para poder reducir o eliminar su tiempo de ejecución.

Los elementos del tiempo no productivo menor a 10 minutos que tienen una mayor participación porcentual en el tiempo total de demoras en las tres áreas de estudio son: desplazamiento corto (> 24%), despeje de cancha (> 21%) y detención para indicaciones (> 13%).

Dentro de las demoras menores a 10 minutos el elemento desplazamiento corto ocupa un tiempo medio para su ejecución de que varía de 42 segundos a 1 minuto 54 segundos dependiendo de los metros cúbicos por árbol, aunque el volumen de los individuos no es una factor que tenga mucha incidencia sobre esta labor, más bien ésta se ve afectada por la manera en que el operador del *Skidder* ubique los árboles en la cancha.

El tiempo medio que emplea el procesador para ejecutar el elemento no productivo menor a 10 minutos como es el despeje de la cancha se incrementa a medida que aumenta el tamaño de los árboles. Sin embargo, la gran variación porcentual (superior a un 80%) con respecto al tiempo medio evidencia que el volumen de los árboles no tiene demasiada influencia en este elemento.

En árboles con un volumen medio de 0,2 y 0,7 m<sup>3</sup>, el *Harvester* emplea sobre un 60% del tiempo no productivo mayor a 10 minutos en demoras mecánicas y cuando los árboles son de 0,5 m<sup>3</sup> las demoras sobre 10 minutos son 100% operacionales.

Los elementos que ocupan un mayor porcentaje del tiempo no productivo mayor a 10 minutos en árboles de 0,2 y 0,7 m<sup>3</sup> son: fallas mecánicas en el procesador (> 34%) y fallas mecánicas en las mangueras hidráulicas (11%).

Existen algunas demoras que no dependen del *Harvester* como es el caso de los elementos no productivos “cambio de frente” y “carga de combustible”, los cuales tienen una pequeña participación en las tres áreas de estudio (< 9%) y necesariamente requieren de un tiempo superior a 10 minutos para su ejecución.

Otra demora independiente al *Harvester* es la falta de árboles en cancha, el cual es un tiempo no productivo ocasionado por fallas del *Skidder* y tiene una participación sobre el 19% en las demoras mayores a 10 minutos del procesador.

Con respecto a la productividad del *Harvester*, ésta es mayor (65,6%) cuando se procesan árboles de 0,5 m<sup>3</sup>. No obstante, cuando se eliminan las demoras mayores a 10 minutos, el área de estudio de 0,2 m<sup>3</sup> es la que experimenta una mayor a aumento de la productividad de un 57,1% a un 77,1%. Una situación similar ocurre con el rendimiento, ya que éste es mayor (32,4 m<sup>3</sup>/hora planificada) cuando se procesan árboles de 0,5 m<sup>3</sup> y menor (14,7 m<sup>3</sup>/hora planificada) cuando los individuos tienen 0,2 m<sup>3</sup>. Sin embargo, al eliminar los tiempos no productivos mayores a 10 minutos es este último escenario el que presenta una mayor variación aumentando su rendimiento a 19,8 m<sup>3</sup>/hora planificada.

El modelo de regresión que mejor se ajusta a los datos de rendimiento tanto en metros cúbicos por hora planificada como por hora productiva, es el modelo potencial con un coeficiente de correlación de 32 y 65% respectivamente. La baja correlación entre el volumen de los árboles y los metros cúbicos por hora planificada evidencia que existen otros factores que influyen en el rendimiento y que, para el caso de este estudio, no fueron incluidos.

De acuerdo con la simulación realizada a través del *software Ithink* se obtiene que 1.000 m<sup>3</sup> de madera son procesados en 29 horas cuando no se presentan demoras (horas productivas) y en 50 horas cuando se incluyen los tiempos muertos (horas planificadas). Además, el rendimiento del equipo varía entre 28 y 41 m<sup>3</sup>/hora productiva y entre 17 y 22 m<sup>3</sup>/hora planificada, situación que muy similar a la obtenida en el estudio de rendimiento. No obstante, al analizar estadísticamente los resultados de la simulación, se obtiene que no existen diferencias significativas entre los metros cúbicos por horas productivas calculados y tabulados. Pero que si existen diferencias altamente sigificativas entre los metros cúbicos por horas planificadas calculados y tabulados.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ANAIS. 2002. XII Seminário de atualização sobre sistemas de colheita de madeira e transporte florestal. Curitiba-Paraná-Brasil, Septiembre 08-10 de 2002. 186 p.
- Araki, D. 1991. Evaluation of a Denis DP550 Log Processor. FERIC, Vancouver. Field Note Processing TN-178. 7p.
- Araki, D. 1991. Evaluation of a Lin-Mit LM2200 Log Processor. FERIC, Vancouver. Field Note Processing TN-168. 7p.
- Bajo, V. 2003. Cosechadora-Harvester y Feller Buncher. INTERNET: <http://usuarios.lycos.es/maquinariaforestal/MF/Cos1.htm> (Marzo 25, 2005)
- Carey, P. 1997. Metodología y diseño de un sistema para el apoyo en la planificación de operaciones forestales. Bosque (Chile) 18(1): 83-88
- Carey, P.; R. Gallardo. En prensa. Metodología de modelo de simulación como apoyo a la Logística de faenas de cosecha forestal mecanizadas. Bosque (Chile).
- Carey, P.; M. Parra. 2000. Consideraciones metodológicas para la evaluación de la cortadora-procesadora (Harvester) en operaciones forestales. Bosque (Chile) 21 (2): 137-146
- Eeronheimo, O.; P. Mäkinen. 1995. Desarrollo de Cosecha Forestal en plantaciones de Pino radiata en Chile. Serie informativa del Instituto de Investigaciones Forestales de Finlandia. Helsinki, Finlandia. 79p.
- Moshenko, D. 1992. Evaluation of a Harricana Cantrack HM-1760 Log Processor. FERIC, Vancouver. Field Note Processing TN-178. 6p.
- Neuenschwander, R. 2001. Maquinaria de explotación forestal. Facultad de Cs Forestales Universidad de Talca. 150p.
- Tolosana, E.; V. González; S. Vignote. 2000. El aprovechamiento maderero. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa. 575p.
- Vignote, S.; J. Martos; M. González. 1993. Los tractores en la explotación forestal. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa. 150p.

**ANEXOS**

**ANEXO 1**  
Abstract and Keywords

## Abstract and keywords

The objective of this study was to measure the productivity and the performance of a WARATHA HTH 620 head processor, working in clearcutting in three *Pinus radiata* stands at the Region X in Chile.

A detailed times study to the processor working cycle was developed including productive times and delays. Production rates in m<sup>3</sup>/hr and % machine utilization were determined of the delimiting and bucking processing system at the landing.

A simulation model of the processing system was developed using the "I think" software. It allows the user to determine machine productivity under different stems size.



**ANEXO 2**  
Cuadros

Cuadro 1. Clasificación y descripción de los elementos que componen el tiempo no productivo.

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
<i>Demoras Operacionales</i>	
Desplazamiento corto	Mover el equipo de una ruma de árboles a otra pero dentro de la misma cancha.
Despeje cancha	Quitar desechos de la cancha como trozas que no califican, ramas y hojas.
Cambio de frente	Mover el equipo de una cancha a otra.
Detención para indicaciones	Tiempo empleado en recibir instrucciones por parte del jefe de faena o por algún superior.
Carga de combustible	Tiempo ocupado en abastecerse la máquina con petróleo.
Falta de árboles en cancha	Falta de árboles en la cancha de trozado, ya sea por demora o por falla del skidder.
Otros	Cualquier demora operacional que no se encuentre en los elementos antes descritos.
<i>Demoras mecánicas</i>	
Cambio de cadena	Tiempo empleado en cambiar la cadena del cabezal.
Cambio de espada	Tiempo empleado en cambiar la espada del cabezal.
Falla mecánica procesador	Falla o avería mecánica del cabezal.
Falla mecánica máquina	Falla o avería mecánica de la excavadora.
Falla mecánica mangueras hidráulicas	Cambio o arreglo de las mangueras hidráulicas por falla o avería.
Limpiar filtro	Quitar el polvo acumulado en el filtro de aceite.
Otros	Cualquier demora mecánica que no se encuentre en los elementos antes descritos.
<i>Demoras personales</i>	
Demoras personales	Cualquier demora producto de necesidades del operario.



Cuadro 3. Número de muestras registradas y mínimas requeridas (ciclos).

Escenario	Nº de muestras	
	Registradas	Mínimas
0,2 m <sup>3</sup> /árbol	2.246	333
0,5 m <sup>3</sup> /árbol	384	220
0,7 m <sup>3</sup> /árbol	1.595	287

Cuadro 4. Estimación curvilínea (m<sup>3</sup>/Hora productiva)

Parámetros	Modelo		
	Lineal	Exponencial	Potencial
Coefficiente de correlación	0,516160	0,556480	0,649730
Coefficiente de determinación	0,266430	0,309670	0,422150
Error estándar	9,440240	0,251780	0,230350
Intercepto	24,656077	24,631555	48,516663
Pendiente	26,335735	0,780620	0,353771

Cuadro 5. Estimación curvilínea (m<sup>3</sup>/Hora planificada)

Parámetros	Modelo		
	Lineal	Exponencial	Potencial
Coefficiente de correlación	0,222210	0,230240	0,316850
Coefficiente de determinación	0,049380	0,053010	0,100390
Error estándar	7,783200	0,364280	0,355050
Intercepto	17,466139	16,595008	24,147813
Pendiente	8,211528	0,398963	0,213115

Cuadro 6. Estadística descriptiva del tiempo (segundos) empleado por elemento productivo

Estadísticos Descriptivos	0,2 m <sup>3</sup> /árb			0,5 m <sup>3</sup> /árb			0,7 m <sup>3</sup> /árb			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Número de elementos	2.246	2.246	2.246	384	384	384	1.595	1.595	1.595	
Media	6	9	12	6	9	22	9	17	43	
Media recortada al 5%	6	8	11	5	8	20	7	13	39	
Coefficiente de variación	76%	85%	72%	175%	74%	89%	135%	140%	88%	
Coefficiente de asimetría	6	7	4	17	3	2	11	5	2	
Mínimo	1	2	2	1	2	1	1	2	2	
Máximo	67	132	132	188	50	128	230	256	286	
Cuartiles	25	4	6	7	3	5	8	5	6	19
	50	5	8	9	5	6	1	6	9	31
	75	7	11	14	6	10	30	9	16	54

- 1= Tomar árbol
- 2= Manipulación del árbol
- 3= Procesar árbol

Cuadro 7. Estadística descriptiva del tiempo empleado por elemento no productivo menor a 10 minutos

Elemento No Productivo	0,2 m <sup>3</sup> /árbol				0,5 m <sup>3</sup> /árbol				0,7 m <sup>3</sup> /árbol			
	Frec (n)	Media (min)	CV %	%	Frec (n)	Media (min)	CV %	%	Frec (n)	Media (min)	CV %	%
<i>Demoras Operacionales</i>												
Desplazamiento corto	85	1,0	120	28	25	0,7	154	23	71	1,9	117	32
Despeje cancha	165	0,5	132	29	18	0,9	140	21	81	1,1	82	21
Indicaciones	14	2,8	81	13	4	4,1	44	23	10	6,3	41	15
Falta de árboles en cancha	4	2,4	111	3	4	2,8	93	15	1	0,7	-	0,2
Otros	14	2,7	67	12	0	0,0	0	0	12	3,8	41	11
<i>Demoras Mecánicas</i>												
Cambio de cadena	5	5,0	50	8	0	0,0	0	0	9	6,2	48	13
Cambio de espada	1	9,8	-	3	1	5,9	-	8	3	4,5	81	3
Falla mecánica procesador	0	0,0	0	0	1	6,7	-	9	1	7,9	-	2
Falla mangueras hidráulicas	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	1	9,6	-	2
Limpiar filtro	1	9,9	-	3	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0
Total				100				100				100

CV : Coeficiente de variación

% : Porcentaje con respecto al tiempo total

- : Cuando la frecuencia del elemento es 1 no es posible determinar el coeficiente de variación

Cuadro 8. Estadística descriptiva del tiempo empleado por elemento no productivo mayor a 10 minutos

Elemento No productivo	0,2 m <sup>3</sup> /árbol				0,5 m <sup>3</sup> /árbol				0,7 m <sup>3</sup> /árbol			
	Frec. (n)	Media (min)	CV %	%	Frec. (n)	Media (min)	CV %	%	Frec. (n)	Media (min)	CV %	%
<i>Demoras Operacionales</i>												
Desplazamiento corto	1	13,8	-	3	0	0	0	0	0	0,0	0	0
Cambio de frente	2	19,5	16	9	1	10,2	-	24	4	19,8	18	6
Detención para indicaciones	0	0,0	0	0	1	31,6	-	76	1	18,6	-	2
Carga de combustible	2	18,8	5	8	0	0	0	0	2	21,5	18	4
Falta de árboles en cancha	3	29,1	12	19	0	0	0	0	5	49,5	125	20
Otros	0	0,0	0	0	0	0	0	0	3	16,0	50	4
<i>Demoras Mecánicas</i>												
Cambio de cadena	1	12,5	-	3	0	0	0	0	1	26,8	0	2
Cambio de espada	1	19,8	-	4	0	0	0	0	0	0,0	0	0
Falla mecánica procesador	2	77,4	86	34	0	0	0	0	8	68,9	80	45
Falla mecánica máquina	1	23,1	-	5	0	0	0	0	4	17,3	16	6
Falla mangueras hidráulicas	1	49,6	-	11	0	0	0	0	4	35,0	55	11
Limpiar filtro	1	17,1	-	4	0	0	0	0	0	0,0	0	0
Total				100				100				100

CV : Coeficiente de variación

% : Porcentaje con respecto al tiempo total

- : Cuando la frecuencia del elemento es 1 no es posible determinar el coeficiente de variación

**ANEXO 3**  
Figuras



Figura 1. Desrame con hacha (izquierda) y Trozado con motosierra (derecha).



Figura 2. Desrame y trozado con procesador.



Figura 3. Sierra de cadena (izquierda), Decodificador (centro) y Rodillo mecánico (derecha)

Hours	Stock 1	Pocesador	Stock 2
Initial	1.000,0		1,00
1	968,4	31,6	32,64
2	931,4	37,0	69,65
3	891,7	39,6	109,27
4	855,2	36,5	145,79
5	815,5	39,8	185,55
6	784,7	30,7	216,27
7	753,2	31,5	247,80
8	721,9	31,3	279,14
9	686,8	35,1	314,24
10	651,1	35,6	349,88
11	612,5	38,6	388,47
12	582,9	29,7	418,14
13	552,9	29,9	448,07
14	516,4	36,5	484,60
15	475,5	41,0	525,55

Hours	Stock 1	Pocesador	Stock 2
16	444,3	31,2	556,72
17	408,4	35,9	592,62
18	375,0	33,4	626,02
19	345,1	29,8	655,87
20	307,9	37,3	693,12
21	275,5	32,4	725,50
22	239,9	35,6	761,11
23	203,6	36,3	797,40
24	165,8	37,8	835,24
25	128,2	37,5	872,79
26	95,4	32,8	905,56
27	67,4	28,0	933,61
28	31,9	35,5	969,07
29	0,0	31,9	1.001,00

Figura 4. Horas productivas empleadas por el equipo para procesar un stock de 1.000 m<sup>3</sup> de madera



Hours	Stock 1	Pocesador	Stock 2
Initial	1.000,0		1,00
1	979,9	20,1	21,08
2	960,2	19,7	40,75
3	939,1	21,1	61,90
4	918,2	21,0	82,85
5	897,7	20,4	103,26
6	875,7	22,1	125,33
7	855,8	19,9	145,19
8	834,2	21,6	166,81
9	815,2	19,0	185,81
10	793,7	21,5	207,29
11	773,8	19,9	227,19
12	752,8	21,0	248,16
13	733,3	19,5	267,68
14	711,8	21,5	289,22
15	691,4	20,4	309,62
16	672,9	18,5	328,10
17	652,3	20,6	348,70
18	633,0	19,3	368,05
19	614,6	18,4	386,45
20	596,0	18,6	405,03
21	575,8	20,1	425,16
22	555,1	20,7	445,88
23	534,2	20,9	466,82
24	513,5	20,6	487,45
25	494,0	19,5	507,00

Hours	Stock 1	Pocesador	Stock 2
25	494,0	19,5	507,00
26	472,4	21,6	528,64
27	451,0	21,4	549,99
28	430,7	20,3	570,32
29	409,2	21,5	591,84
30	391,4	17,7	609,58
31	370,5	20,9	630,47
32	350,2	20,3	650,76
33	328,5	21,8	672,53
34	308,3	20,2	692,75
35	290,1	18,2	710,91
36	268,3	21,8	732,75
37	249,6	18,6	751,35
38	230,4	19,3	770,61
39	210,5	19,9	790,50
40	189,1	21,4	811,92
41	169,9	19,2	831,09
42	150,0	19,9	851,02
43	129,4	20,6	871,62
44	108,1	21,3	892,91
45	88,0	20,1	913,00
46	67,5	20,5	933,49
47	49,4	18,1	951,63
48	30,6	18,8	970,39
49	10,9	19,7	990,12
50	0,0	10,9	1.001,00

Figura 5. Horas planificadas empleadas por el equipo para procesar un stock de 1.000 m<sup>3</sup> de madera