

# Study of the production in a custom-cut sawmill through the use of discrete event simulation and experimental design

## Estudio de la producción en un aserradero de corte cualitativo a través del uso de simulación de eventos discretos y diseño de experimentos

Francisco P. Vergara-González\*; Patricio E. González-Ríos;  
Gerson Rojas-Espinoza; Claudio A. Montero-Nahuelcura

<sup>1</sup>Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Maderas.  
Av. Collao 1202. Concepción, Región del Biobío, Chile.

\*Corresponding author: fvergara@ubiobio.cl, tel.: (56-41) 3111370.

### Abstract

**Introduction:** When sawing logs without diameter sorting, the cutting program generates decisions and routes depending on the log's appearance and machine load.

**Objective:** To optimize the production flow of a custom-cut *Pinus radiata* D. Don sawmill, through detection and analysis of critical machines, using discrete event simulation and experimental design.

**Materials and methods:** Two simulation models were developed for sawing logs with lengths of 2.5 and 5.0 m, and diameters between 34 and 44 cm to produce sawnwood with a thickness of 5/4" with variable width. The number of logs processed per shift was the response variable of the model. Heavily-used machines and transports with long queues were candidates for critical machines. The impact on production was determined by means of experimental design, where the factors assessed were: (A) delivery from bandsaw carriage 1 to band saw 3, (B) increased debarker capacity, (C) failures eliminated from bandsaw 1 and 2, and (D) direct delivery from bandsaw 2 to edger 2.

**Results and discussion:** Modifications to the production flow were proposed because factors B, C and D significantly increased ( $P = 0.1$ ) the production level (logs per shift); the increases over the sawmill's initial condition were 13 and 18 % for lengths of 2.5 and 5.0 m, respectively.

**Conclusion:** Simulation and experimental design can be applied in small and medium-sized sawmills to improve production when processing logs without diameter sorting.

**Keywords:** *Pinus radiata*; production flow; critical machine; simulation model; log length.

### Resumen

**Introducción:** Al aserrar trozos sin clasificación, el programa de corte genera decisiones y rutas dependiendo de la apariencia de la pieza y carga de máquinas.

**Objetivo:** Optimizar el flujo de producción de un aserradero de corte cualitativo de *Pinus radiata* D. Don, mediante la detección y análisis de máquinas críticas, utilizando la simulación de eventos discretos y diseño de experimentos.

**Materiales y métodos:** Se desarrollaron dos modelos de simulación para el aserrío de trozos con longitudes de 2.5 y 5.0 m, diámetro entre 34 y 44 cm y espesor de 5/4" con ancho variable. La cantidad de trozos procesados por turno fue la variable respuesta del modelo. Las máquinas de amplio uso y los transportes con largas colas fueron candidatos a máquinas críticas. El impacto sobre la producción se determinó mediante un diseño de experimentos, donde los factores evaluados fueron: (A) entrega desde el carro sierra cinta 1 a sierra cinta 3, (B) aumento de capacidad del descortezador, (C) fallas eliminadas de las sierras cintas carro 1 y 2, y (D) entrega directa de sierra cinta 2 a canteadora 2.

**Resultados y discusión:** Se propusieron modificaciones al flujo de producción debido a que los factores B, C y D aumentaron significativamente ( $P = 0.1$ ) el nivel de producción (trozos por turno); los incrementos con respecto a la condición inicial del aserradero fueron 13 y 18 % para las longitudes de 2.5 y 5.0 m, respectivamente.

**Conclusión:** La simulación y diseño de experimentos pueden aplicarse en aserraderos pequeños y medianos, para mejorar la producción cuando se procesan trozos sin clasificación.

**Palabras clave:** *Pinus radiata*; flujo de producción; máquina crítica; modelo de simulación; longitud de trozo.

## Introduction

According to the Forestry Institute (INFOR, 2016), the Chilean forestry industry produced 8.7 million m<sup>3</sup> of sawn timber in 2015. In Chile, 1270 sawmills currently operate; the number of units classified as small increased 12 % (<5000 m<sup>3</sup>·month<sup>-1</sup>) and medium-sized units increased 2 % (5000 to 10000 m<sup>3</sup>·month<sup>-1</sup>) (INFOR, 2016). Sawmills transform logs into finished pieces by applying successive cuts. Raw material yield depends on how the logs are processed (Álvarez-Lazo, Andrade-Fernando, Quintín-Cuador, & Domínguez-Goizueta, 2004); according to Walker (2006), it is the main factor influencing operational performance and profitability. For Flores-Velásquez, Serrano-Gálvez, Palacio-Muñoz, and Chapela (2007), low-productivity sawmills have low-tech machinery and equipment, which makes them inefficient in converting raw materials. These plants have limited mechanization, process low-quality logs, are labor-intensive, and exhibit unbalanced production flows (Álvarez-Lazo et al., 2004; Flores-Velásquez et al., 2007).

Discrete event simulation (DES) allows designing load capacities and eliminating critical machines in various supply scenarios (Wolfsmayr, Merenda, Rauch, Longo, & Gronalt, 2016). On production lines, analysis has been performed using analytical and simulation models. The former exhibits unrealistic assumptions; for example, reliable machines, processing distribution, continuous feeding and no blockages in the machines, while, according to Heshmat, El-Sharief, and El-Sebaie (2013), simulation models allow the identification of flow restrictions and optimization for line redesign in a reliable way. DES has also been used in value stream mapping in order to find improvement opportunities without the need to alter the system under study (Parthanadee & Buddhakulsomsiri, 2014) the system under study (Parthanadee & Buddhakulsomsiri, 2014). Simulation allows mimicking a process and analyzing configurations without the need to intervene in it (Meimban, Mendoza, Araman, & Luppold, 1991; Quintero & Rosso, 2001). DES has been applied in forest harvest planning and its logistics (Di Gironimo et al., 2015; Hogg, Pulkki, & Ackerman, 2010; Marques, De Souza, Rönnqvist, & Jafe, 2014; Memari, Zahraee, Anjomanshoae, & Rahim, 2013; Spinelli, Di Gironimo, Esposito, & Magagnotti, 2014). In particular, there is research focused on location decisions, size of temporary storage stations (Meimban et al., 1991), equipment evaluation, production flow and critical machines (Baesler, Araya, Ramis, & Sepúlveda, 2004; Grigolato, Bietresato, Asson, & Cavalli, 2011; Opacic & Sowlati, 2017; Opacic, Sowlati, & Mobini, 2018). DES is implemented in programs based on structured programming language to formulate models in any application area (Heshmat et al., 2013); however, it

## Introducción

De acuerdo con el Instituto Forestal (INFOR, 2016), la industria forestal chilena produjo 8.7 millones de m<sup>3</sup> de madera aserrada durante el año 2015. En Chile operan 1270 aserraderos; el número de unidades clasificadas como pequeñas aumentó 12 % (<5000 m<sup>3</sup>·mes<sup>-1</sup>) y las unidades medianas aumentaron 2% (5000 a 10000 m<sup>3</sup>·mes<sup>-1</sup>) (INFOR, 2016). Los aserraderos transforman trozos en piezas terminadas mediante la aplicación de cortes sucesivos. El rendimiento de la materia prima depende de la forma en que los trozos se procesan (Álvarez-Lazo, Andrade-Fernando, Quintín-Cuador, & Domínguez-Goizueta, 2004); de acuerdo con Walker (2006), es el principal factor que influye sobre el desempeño de las operaciones y la rentabilidad. Para Flores-Velásquez, Serrano-Gálvez, Palacio-Muñoz, y Chapela (2007), los aserraderos de baja productividad cuentan con maquinaria y equipo de bajo nivel tecnológico, que los hace poco eficientes para la conversión de la materia prima. Dichas plantas presentan mecanización limitada, procesan trozos de baja calidad, son intensivas en uso de mano de obra y exhiben flujos de producción desbalanceados (Álvarez-Lazo et al., 2004; Flores-Velásquez et al., 2007).

La simulación de eventos discretos (SED) permite diseñar capacidades de carga y eliminar las máquinas críticas en varios escenarios de abastecimiento (Wolfsmayr, Merenda, Rauch, Longo, & Gronalt, 2016). En las líneas de producción, el análisis se ha realizado utilizando modelos analíticos y de simulación. El primero exhibe supuestos poco realistas; por ejemplo, máquinas confiables, distribución de procesamiento, alimentación continua e inexistencia de bloqueos en las máquinas, mientras que, según Heshmat, El-Sharief, y El-Sebaie (2013), los modelos de simulación permiten la identificación de restricciones del flujo y optimización para el rediseño de la línea de forma confiable. La SED también se ha empleado en el mapeo de la cadena de valor con el propósito de encontrar oportunidades de mejora sin necesidad de alterar el sistema en estudio (Parthanadee & Buddhakulsomsiri, 2014) el sistema en estudio (Parthanadee & Buddhakulsomsiri, 2014). La simulación permite imitar un proceso y analizar configuraciones sin necesidad de intervenirlo (Meimban, Mendoza, Araman, & Luppold, 1991; Quintero & Rosso, 2001). La SED se ha aplicado en la planificación de cosechas forestales y su logística (Di Gironimo et al., 2015; Hogg, Pulkki, & Ackerman, 2010; Marques, De Souza, Rönnqvist, & Jafe, 2014; Memari, Zahraee, Anjomanshoae, & Rahim, 2013; Spinelli, Di Gironimo, Esposito, & Magagnotti, 2014). Particularmente, existen investigaciones enfocadas en decisiones de localización, tamaño de estaciones de almacenamiento temporal (Meimban et al., 1991), evaluación de equipos, flujo de producción y máquinas

has not yet been applied to study worker-machine behavior nor has it been extensively combined with optimization (Opacic & Sowlati, 2017).

Optimization is used in the development of forest production plans, although these do not explicitly consider stochastic factors (Lohmander, 2007). By combining optimization and DES, dynamic events can be anticipated, producing realistic and useful solutions for decision support systems (Marques et al., 2014). In this sense, Azadeh and Maghsoudi (2010) and Baesler et al. (2004) verified the results delivered by the DES model by applying the *t*-test, integrated them with experimental design (ED) by defining decision factors (*k*-factors) and evaluated the effects on the response variable using factorial experiments.

Quintero and Rosso (2001), Baesler et al. (2004) and Grigolato et al. (2011) used DES and developed flow studies in bulk-cut sawmills. In such studies, homogeneous-grade logs were sorted by diameter and processed in batches, applying a predetermined cutting plan. These authors applied DES to explore flow restrictions and through ED evaluated equipment substitution and plant and raw material distribution scenarios, allowing for increased flow and productivity in the sawmill process.

In the case study of custom-cut sawmills, heterogeneous-grade logs are processed individually without diameter sorting. Therefore, a flexible cutting plan is applied to each log depending on its grade and size, the appearance of the piece obtained and the production order. In this scenario, flow analysis considers the dynamic adjustment of machines and transports, which is complex to address with analytical approaches (Meimban et al., 1991). So far, only Thoews, Maness, and Ristea (2008) have studied, in part, the case of bulk and custom sawing in various wood species using DES and ED. Therefore, the objective of this research was to optimize the production flow in a high-production, custom-cut sawmill that processes *Pinus radiata* D. Don logs without diameter sorting (1 489 to 1 663 logs per shift) using DES and ED.

## Materials and methods

The study was carried out in a custom-cut sawmill that processes *P. radiata* logs with diameters between 33 cm and 44 cm, whose sawn timber production line has a capacity of 180 000 m<sup>3</sup> per year. The industrial plant is located in the city of Los Angeles, VIII Region of Biobío, Chile.

### Sawmilling process

The sawmill's production flow began with the debarking process (Figure 1), which is intended to

críticas (Baesler, Araya, Ramis, & Sepúlveda, 2004; Grigolato, Bietresato, Asson, & Cavalli, 2011; Opacic & Sowlati, 2017; Opacic, Sowlati, & Mobini, 2018). La SED se implementa en programas basados en lenguaje de programación estructurado, para formular modelos en cualquier área de aplicación (Heshmat et al., 2013); sin embargo, aún no ha sido aplicada para estudiar el comportamiento trabajador-máquina ni se ha combinado extensamente con la optimización (Opacic & Sowlati, 2017).

La optimización se usa en el desarrollo de planes de producción forestal, aunque estos no consideran explícitamente factores estocásticos (Lohmander, 2007). Al combinar optimización y SED se pueden anticipar eventos dinámicos produciendo soluciones realistas y útiles para sistemas de soporte de decisiones (Marques et al., 2014). En este sentido, Azadeh y Maghsoudi (2010) y Baesler et al. (2004) verificaron los resultados entregados por el modelo de SED con la aplicación de la prueba *t*, los integraron con diseño de experimentos (DE) mediante la definición de factores de decisión (*k*-factores) y evaluaron los efectos sobre la variable respuesta con el uso de experimentos factoriales.

Quintero y Rosso (2001), Baesler et al. (2004) y Grigolato et al. (2011) utilizaron SED y desarrollaron estudios de flujo en aserraderos de corte masivo. En tales estudios, los trozos de grado homogéneo fueron clasificados por diámetro y procesados por lotes, aplicando un plan de corte predeterminado. Dichos autores aplicaron SED para explorar restricciones del flujo y mediante DE evaluaron escenarios de sustitución de equipos, distribución de planta y materia prima, permitiendo incrementar el flujo y la productividad del proceso de aserrío.

En el caso de estudio de aserraderos de corte cualitativo, los trozos de grado heterogéneo se procesan de forma individual sin clasificación por diámetros. Por lo tanto, a cada trozo se aplica un plan de corte flexible en función del grado y tamaño, la apariencia de la pieza obtenida y de la orden de producción. En este escenario, el análisis del flujo considera el ajuste dinámico de las máquinas y transportes, lo cual es complejo de abordar con enfoques analíticos (Meimban et al., 1991). Hasta ahora, solo Thoews, Maness, y Ristea (2008) han investigado, en parte, el caso del aserrío masivo y cualitativo en diversas especies de maderas utilizando SED y DE. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue optimizar el flujo de producción en un aserradero que procesa madera de *Pinus radiata* D. Don de corte cualitativo de alta producción (1 489 a 1 663 trozos por turno) utilizando la SED y DE.

### Materiales y métodos

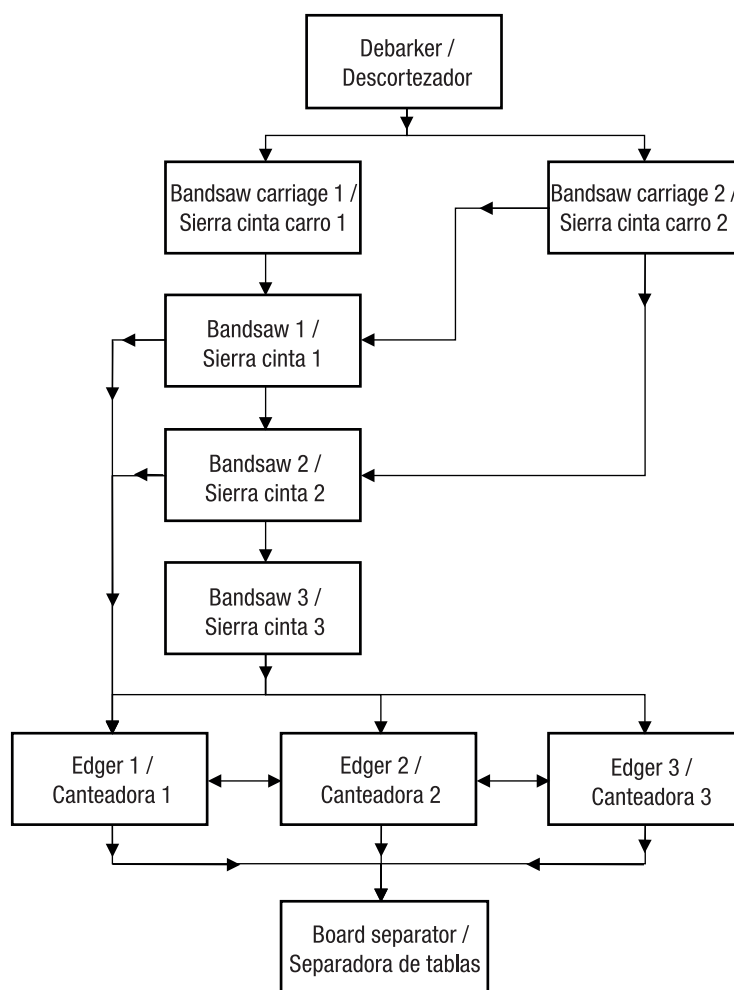
El estudio se realizó en un aserradero de corte cualitativo que procesa trozos de *P. radiata* de diámetros entre

protect the cutting tools in the later sawing. Each log was then processed on two bandsaws with carriage. To do this, the log was positioned and fixed on the carriage's moving squares, and the carriage advanced facing the bandsaw where cuts were sequentially made according to the diameter and quality of the log (primary cuts). The pieces in process, resulting from the primary cuts, were transported and processed in two double horizontal resaw bandsaws (bandsaw 1 and bandsaw 2), obtaining sawnwood pieces with a defined thickness. The pieces requiring an additional process were sent to a single horizontal resaw bandsaw (bandsaw 3). The next step was to eliminate the edges present on the borders of each piece, which also involved dimensioning their width. The operation was performed by three circular edgers (edger 1, edger 2 and edger 3). Finally, the pieces were transported to a board separating machine, where they were sorted for separator placement and final packaging.

33 cm y 44 cm, cuya línea de producción de madera aserrada tiene una capacidad de 180000 m<sup>3</sup> anuales. La planta industrial está ubicada en la ciudad de Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile.

### Proceso de aserrío

El flujo de producción del aserradero comenzó con el proceso de descortezado (Figura 1), el cual tiene como propósito proteger las herramientas de corte en el aserrío posterior. A continuación, cada trozo fue procesado en dos sierras cinta con carro. Para ello, el trozo se posicionó y fijó sobre las escuadras móviles del carro, y este avanzó enfrentando a la sierra cinta donde secuencialmente se realizaron los cortes según el diámetro y la calidad del trozo (cortes primarios). Las piezas en proceso, resultantes de los cortes primarios, se transportaron y procesaron en dos sierras cintas dobles horizontales reaserradoras (sierra cinta 1 y



**Figure 1. Diagram of the production flow in a custom-cutting sawmill that processes *Pinus radiata* wood.**

**Figura 1. Esquema del flujo de producción en un aserradero de corte cualitativo que procesa madera de *Pinus radiata*.**

## Logic of cutting decisions

The cutting plan is a logical sequence of successive cuts, defined by the operation of bandsaws with carriage. Figure 2 illustrates the three cutting decisions based on log diameter.

1. Diameter less than or equal to 34 cm. For this case, the log was sawn in two parts by the main machine, requiring a single cut.
2. Diameter between 36 and 42 cm. The log was sawn in four parts, requiring three cuts.
3. Diameter greater than or equal to 44 cm. The log was sawn in five parts, requiring four cuts.

When making cuts on the bandsaw carriage, processing times varied according to log diameter and length, as well as the number of pieces delivered to the next machines. Thus, the routes taken by the pieces depend on the number of units queued in the transports of the following machines and the capacity of units queued in the transport between the machines involved. When the capacity is exceeded, the transports and machines are stopped or blocked, which can occur forward or backward from the production flow.

## Development and validation of the simulation model

The sawmill has a series of transports and cutting machines that are operated in a synchronized manner by the equipment operators according to the type and quantity of pieces in process. The process presents failures in machines, variability in diameters and number of pieces that trigger high randomness. These attributes prevent its analysis with static models based on time studies. Therefore, in this research, a DES model was developed to analyze critical machines and evaluate opportunities for improvement.

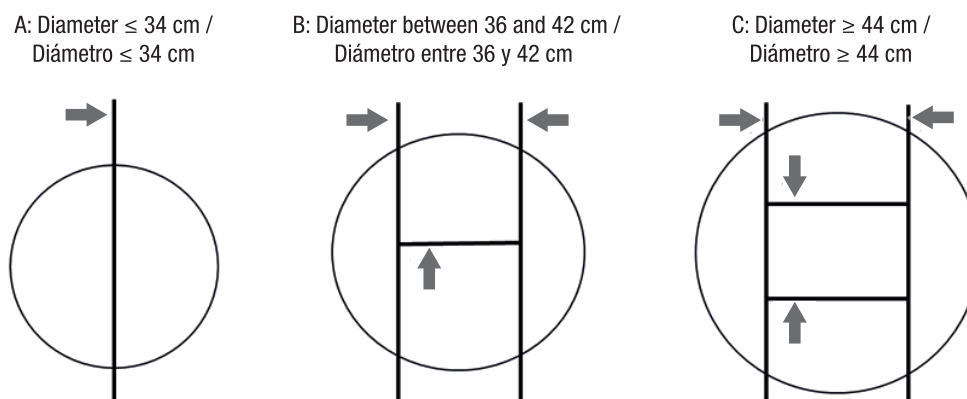
sierra cinta 2), obteniendo piezas con espesor definido. Las piezas que requirieron de un proceso adicional se enviaron a una sierra cinta horizontal simple reaserradora (sierra cinta 3). El siguiente paso fue eliminar las aristas presentes en los bordes de cada pieza, lo cual también implicó dimensionar el ancho de estas. La operación fue realizada por tres máquinas de sierra circular canteadora (canteadora 1, canteadora 2 y canteadora 3). Finalmente, las piezas se transportaron a una máquina separadora de tablas, donde se ordenaron para colocación de separadores y empaquetado final.

## Lógica de decisiones de corte

El plan de corte es una secuencia lógica de cortes sucesivos, definido mediante la operación de las sierras cinta con carro. La Figura 2 ilustra las tres decisiones de corte según el diámetro del trozo:

1. Diámetro menor o igual a 34 cm. Para este caso el trozo fue aserrado en dos partes por la máquina principal, requiriendo un solo corte.
2. Diámetro entre 36 y 42 cm. El trozo fue aserrado en cuatro partes, requiriendo tres cortes.
3. Diámetro mayor o igual a 44 cm. El trozo fue aserrado en cinco partes, requiriendo cuatro cortes.

Al realizar los cortes en la sierra cinta con carro, los tiempos de procesamiento variaron según el diámetro y longitud del trozo, al igual que el número de piezas entregadas a las máquinas siguientes. De este modo, las rutas que toman las piezas dependen del número de unidades en cola en los transportes de las máquinas siguientes y de la capacidad de unidades en cola del transporte entre las máquinas involucradas. Cuando la capacidad se excede, los transportes y máquinas se detienen o bloquean, lo cual puede ocurrir hacia adelante o atrás del flujo de producción.



**Figure 2. Cutting decisions applied to *Pinus radiata* logs according to their diameter.**

**Figura 2. Decisiones de corte aplicadas a los trozos de *Pinus radiata* en función de su diámetro.**



The DES model was developed based on the logic of the cutting decisions for each log diameter. This logic was incorporated into the programming of the DES model through “virtual” labels that identified the entities (logs, pieces in process and finished pieces) advancing in the process. This identification allowed determining, for each entity, the cutting decision, the number of pieces to be obtained, and the direction of the production flow based on the processing capacity of the transports and machines in relation to time. The behavior of each machine in the system was examined and the flow of pieces was analyzed based on the cuts applied to the processed logs, under the different production scenarios. The DES requires that the characteristic times of the production process be treated with their variability; therefore, they must be transformed into probability distributions. The processing, failure and arrival times of entities (logs, pieces in process and finished pieces) at each workstation were recorded, and probability distributions were fitted for each of them. Based on historical information, two simulation models were developed for sawing *P. radiata* logs with lengths of 2.5 and 5.0 m, and diameters between 34 and 44 cm. This raw material was sawn to produce sawnwood at a single thickness of 5/4” with variable width. The number of logs processed per shift was considered as the model’s response variable. The logic of cutting decisions and the processing times of the equipment were programmed and entered into the Arena® 3.5 discrete event simulation software package (Arena, 2007).

Critical machines and possible alternative flows were identified and their impact on the production flow was determined with a factorial experiment ( $k$  factors). The simulation model was validated by comparing the sawmill’s actual production indicators against those obtained by the simulation model. In particular, the number of logs processed per shift and the production per shift were compared, concluding that the DES model is a good representation of the actual system. Subsequently, the production flow study was initiated. For this, the simulation model was iterated and performance results of the machines and transports were obtained. The appropriate number of samples for analysis was obtained with a pilot test of five iterations of the model, with the purpose of obtaining the preliminary descriptive statistics of the process. The next step was to determine the number of model iterations according to a desired error and confidence level. Therefore, the number of replications or iterations to be performed, for each production flow study scenario in the model, was calculated using the formula suggested by Montgomery, Runger, and Medal (1996):

$$n = \left( \frac{t_{(\alpha/2), (n-1)} \times S_x}{p \times \bar{X}} \right)^2$$

## Desarrollo y validación del modelo de simulación

El aserradero tiene una serie de transportes y máquinas de corte que funcionan sincronizadas por los operadores de los equipos de acuerdo con el tipo y cantidad de piezas en proceso. El proceso presenta fallas en máquinas, variabilidad en diámetros y número de piezas que detonan alta aleatoriedad. Estos atributos impiden su análisis con modelos estáticos basados en estudios de tiempo. Por lo anterior, en esta investigación se desarrolló un modelo SED para analizar las máquinas críticas y evaluar oportunidades de mejora.

El modelo de SED se desarrolló con base en la lógica de las decisiones de corte para cada diámetro de trozo. Dicha lógica se incorporó en la programación del modelo SED a través de etiquetas “virtuales” que identificaban las entidades (trozos, piezas en proceso y piezas terminadas) que avanzaban en el proceso. Esta identificación permitió determinar, para cada entidad, la decisión de corte, el número de piezas a obtener, y la dirección del flujo de producción con base en la capacidad de procesamiento de los transportes y máquinas en relación con el tiempo. El comportamiento de cada máquina del sistema se examinó y el flujo de piezas se analizó con base en los cortes aplicados a los trozos procesados, bajo los diferentes escenarios de producción. La SED requiere que los tiempos característicos del proceso productivo sean tratados con su variabilidad, por lo tanto, deben ser transformados a distribuciones de probabilidad. Los tiempos de procesamiento, de fallas y de llegada de entidades (trozos, piezas en proceso y piezas terminadas) a cada estación de trabajo se registraron, y se ajustaron distribuciones de probabilidad para cada uno de ellos. Con base en la información histórica se desarrollaron dos modelos de simulación para el aserrío de trozos de *P. radiata* con longitudes de 2.5 y 5.0 m, y diámetros entre 34 y 44 cm. Esta materia prima se aserró para producir madera a un espesor único de 5/4” con ancho variable. La cantidad de trozos procesados por turno se consideró como variable de respuesta del modelo. La lógica de decisiones de corte y los tiempos de procesamiento de los equipos se programaron e ingresaron en el paquete de simulación de eventos discretos Arena® 3.5 (Arena, 2007).

Las máquinas críticas y los flujos alternativos posibles se identificaron y su impacto sobre el flujo de producción se determinó con un experimento factorial ( $k$  factores). El modelo de simulación se validó mediante la comparación de los indicadores reales de producción del aserradero contra los obtenidos por el modelo de simulación. En particular, se comparó el número de trozos procesados por turno y la producción por turno, concluyendo que el modelo de SED es una buena representación del sistema real. Posteriormente,

where,

$n$  = number of model replication for the desired level of accuracy

$S_x$  = standard deviation of the sample

$\bar{X}$  = mean of the pilot runs

$t_{\alpha/2, n-1}$  = critical value associated with the  $t$ -Student distribution

$p$  = precision level using error ( $\alpha$ ) of 5 % ( $p = 1-\alpha$ ).

In this way, a number of 10 replicates was obtained for each production scenario (two log lengths) with an extension of 480 min for each run of the model, equivalent to one production shift of the sawmill. To determine the base production condition or pattern of the sawmill, the production results with 2.5 m and 5.0 m long logs were subjected to a descriptive statistical analysis and Tukey's multiple comparison test ( $P = 0.1$ ).

### Identification of critical machines

The results of the five iterations of the simulation model were analyzed by determining the number of processed logs, units queued in transports between machines, machine usage factor, machine failure factor, factor without machine feeding, and blocking factor of each machine. Consequently, workstations with a usage factor close to 100 % and their number of queued units close to their design capacity were identified as critical machines.

### Application of the experimental design for the evaluation of the factors

A full 2k factorial experimental design was applied for the purpose of determining whether there is statistically significant evidence that the factors evaluated influenced the "production level" response variable. The factors identified and considered were: A) deliver from bandsaw carriage 1 to bandsaw 3; B) double debarker capacity; C) eliminate the failures of bandsaw 1 and 2; D) directly deliver the pieces from bandsaw 2 to edger 2 directly.

The effect of the factors was evaluated in the "applied" (+) and "not applied" (-) operational levels with respect to the reference condition, represented by the sawmill without making any type of change. Finally, the experimental design was evaluated with the Design Expert 6.0 statistical package (Design Expert, 2007).

## Results and discussion

### Identification of critical machines and proposals for improvement

The results at the production level for the base condition or pattern, represented by the current

se inició el estudio de flujo de producción. Para ello, el modelo de simulación se iteró y se obtuvieron resultados de desempeño de las máquinas y transportes. El número de muestras adecuado para el análisis se obtuvo con una prueba piloto de cinco iteraciones del modelo, con el propósito de obtener la estadística descriptiva preliminar del proceso. El siguiente paso fue determinar la cantidad de iteraciones del modelo de acuerdo con un nivel de error y confianza deseado. Por lo tanto, el número de réplicas o iteraciones a realizar, para cada escenario de estudio de flujo de producción en el modelo, se calculó a través de la fórmula sugerida por Montgomery, Runger, y Medal (1996):

$$n = \left( \frac{t_{(\alpha/2), (n-1)} \times S_x}{p \times \bar{X}} \right)^2$$

donde,

$n$  = número de réplicas del modelo para el nivel de exactitud deseado

$S_x$  = desviación estándar de la muestra

$\bar{X}$  = media de las corridas pilotos

$t_{\alpha/2, n-1}$  = valor crítico asociado a la distribución  $t$ -Student

$p$  = nivel de precisión utilizando error ( $\alpha$ ) de 5 % ( $p = 1-\alpha$ ).

De esta manera, se obtuvieron un número de 10 réplicas para cada escenario de producción (dos longitudes de trozo) con una extensión de 480 min para cada corrida del modelo, equivalente a un turno de producción del aserradero. Para la determinación de la condición de producción base o patrón del aserradero, los resultados de producción con trozos de 2.5 m y 5.0 m de longitud se sometieron a un análisis de estadística descriptiva y comparación de medias de Tukey ( $P = 0.1$ ).

### Identificación de máquinas críticas

Los resultados de las cinco iteraciones del modelo de simulación se analizaron determinando el número de trozos procesados, unidades en cola en transportes entre máquinas, factor de uso de máquinas, factor de falla de máquinas, factor sin alimentación de máquina y factor del tiempo de bloqueo de cada máquina. Por consiguiente, las estaciones de trabajo que presentaran un factor de uso cercano al 100 % y que resultaran con una cantidad de unidades en cola cercana a su capacidad de diseño se identificaron como máquinas críticas.

### Aplicación del diseño del experimento para la evaluación de los factores

Se aplicó un diseño experimental de tipo factorial 2k completo con el propósito de determinar si existe evidencia estadísticamente significativa de que los factores evaluados influyeron sobre la variable respuesta

**Table 1. Production of *Pinus radiata* logs with lengths of 2.5 and 5.0 m.**  
**Cuadro 1. Producción de trozos de *Pinus radiata* con longitudes de 2.5 y 5.0 m.**

Log length (m)/ Longitud de trozo (m)	Log production per shift/ Producción de trozos por turno	Volume of sawn timber per shift (m <sup>3</sup> )* / Volumen de madera aserrada por turno (m <sup>3</sup> )*
2.5	1489 ± 73.38	251 a
5.0	1663 ± 77.35	418 b

\*Average production volume by indirect calculation. ± Standard deviation of the mean. Different letters denote means with statistically significant differences (Tukey's test,  $P = 0.1$ ).

\*Volumen medio de producción por cálculo indirecto. ± Desviación estándar de la media. Letras diferentes denotan medias con diferencias estadísticamente significativas (HSD de Tukey,  $P = 0.1$ ).

sawmill production flow, were: 1489 logs per shift for 2.5 m long logs and 1663 logs per shift for 5.0 m long ones (Table 1). Tukey's multiple comparison test showed statistically significant differences ( $P = 0.1$ ) in production volume when processing different log lengths. This behavior is consistent with that recorded by authors such as Steele (1984) and Cown, McConchie, and Treolar (1984), who reported an increase in production and yield by increasing the diameter and length of processed logs. On the other hand, these values coincided with the actual production data recorded in the sawmill, which fully validated the results obtained with the iterations of the DES model.

Like Baesler et al. (2004) and Thoews et al. (2008), the results of the DES model were used to detect critical machines; although the detected machines differ, the same search method was applied focusing on machines that showed a high utilization rate. The results of the model with respect to the time use of the sawmill machines allowed identifying these machines and proposing modifications to the flow of semi-finished pieces. The modifications or factors evaluated are shown in Table 2.

#### Analysis of the proposed scenarios

The variety of factors to be studied can be very diverse; that is, from the increase in capacity of critical machines (Baesler et al., 2004) and the storage location and size of products in process (Heshmat et al., 2013), to changes in the distribution of the logs used in the sawmill (Grigolato et al., 2011). However, this research focused on the first two factors, given that the sawmill is supplied with logs on the open market, which cannot be controlled.

The model generated 16 treatments from four evaluated factors. Table 3 shows the results of the effect of individual and combined factors on the response variable (logs per shift) in each production scenario (log length).

“nivel de producción”. Los factores identificados y considerados fueron: A) entregar desde la sierra cinta carro 1 a la sierra cinta 3; B) duplicar la capacidad del descortezador; C) eliminar las fallas de las sierras cintas 1 y 2; D) entregar las piezas de la sierra cinta carro 2 a la canteadora 2 en forma directa.

El efecto de los factores se evaluó en los niveles de operación “aplicado” (+) y “no aplicado” (-) con respecto a la condición de referencia, representada por el modelo del aserradero sin realizar tipo de cambio. Finalmente, el diseño de experimentos se evaluó con el paquete estadístico Design Expert 6.0 (Design Expert, 2007).

## Resultados y discusión

### Identificación de máquinas críticas y propuestas de mejora

Los resultados en el nivel de producción para la condición base o patrón, representada por el flujo de producción actual del aserradero fueron: 1489 trozos por turno para trozos de 2.5 m de longitud y 1663 trozos por turno para trozos de 5.0 m (Cuadro 1). La prueba de comparación de medias de Tukey mostró diferencias estadísticamente significativas ( $P = 0.1$ ) en el volumen de producción al procesar longitudes distintas de trozos. Dicho comportamiento concuerda con lo registrado por autores como Steele (1984) y Cown, McConchie, y Treolar (1984), quienes reportaron aumento de la producción y del rendimiento, al incrementar el diámetro y la longitud de los trozos procesados. Por otra parte, estos valores coincidieron con los datos de producción reales registrados en el aserradero, lo cual validó plenamente los resultados obtenidos con las iteraciones del modelo de SED.

Al igual que Baesler et al. (2004) y Thoews et al. (2008), los resultados del modelo de SED se usaron para detectar máquinas críticas; aunque las máquinas detectadas difieren, se aplicó el mismo método de búsqueda



**Table 2. Analysis of critical machines and factors to be evaluated in a custom-cut sawmill processing *Pinus radiata* timber.**  
**Cuadro 2. Análisis de máquinas críticas y factores a evaluar en un aserradero de corte cualitativo que procesa madera de *Pinus radiata*.**

Factor	Identified situation/Situación identificada	Evaluated factor/Factor evaluado
1	High use rate of resaw bandsaw 1/ Tasa alta de ocupación de la sierra cinta reaserradora 1.	Direct delivery from band carriage 1 to bandsaw 3/ Entrega directa desde el carro cinta 1 hasta la sierra cinta 3.
2	Debarker with high use factor and following machines with a high percentage of non-feeding time/ Descortezador con factor alto de uso y máquinas siguientes con porcentaje alto de tiempo sin alimentación.	Increased processing capacity of the debarker/ Aumento de la capacidad de procesamiento de la máquina descortezador.
3	Bandsaws 1 and 2 with design problems in their output transport and with frequent failures that cause short interruptions/ Sierras cinta 1 y 2 con problemas de diseño en su transporte de salida y con fallas frecuentes que provocan interrupciones de corta duración.	Complete elimination of failures in bandsaws 1 and 2/ Eliminación completa de fallas en las sierras cinta 1 y 2.
4	For 5 m long logs: edger 3 with high use factor that causes bottlenecks in the previous machine and bandsaw carriage 2/ Para trozos con longitud de 5 m: canteadora 3 con alto factor de uso que provoca bloqueo de la máquina anterior y del carro cinta 2.	Flow change. Direct delivery of pieces from bandsaw 2 to edger 2/ Cambio de flujo. Entrega de piezas de forma directa desde sierra cinta 2 a canteadora 2.

**Table 3. Effect of the factors evaluated in each production scenario (log length) in a custom-cut sawmill processing *Pinus radiata* timber.**

**Cuadro 3. Efecto de los factores evaluados en cada escenario de producción (longitud del trozo) en un aserradero de corte cualitativo que procesa madera de *Pinus radiata*.**

Treatment/ Tratamiento	Response variable average (logs per shift)/Promedio variable respuesta (trozos por turno)				Log length (m)/ Longitud del trozo (m)	
	Factors/Factores				2.5	5.0
	A	B	C	D		
1/Control	-	-	-	-	1489	1663
2	+	-	-	-	1505	1694
3	-	+	-	-	1512	1740
4	+	+	-	-	1519	1734
5	+	-	+	-	1534	1739
6	+	+	+	-	1536	1866
7	+	-	-	+	1551	1692
8	+	+	-	+	1574	1750
9	-	-	+	-	1586	1752
10	+	-	+	+	1601	1723
11	-	-	-	+	1609	1700
12	-	+	+	-	1624	1809
13	+	+	+	+	1634	1916
14	-	-	+	+	1661	1777
15	-	+	-	+	1717	1793
16	-	+	+	+	1766	1928

Factors: A) delivery from bandsaw carriage 1 to band saw 3; B) doubled debarker capacity; C) failures eliminated from bandsaw 1 and 2; D) pieces directly delivered from bandsaw 2 to edger 2. The effect of the factors was evaluated at the "applied" (+) and "not applied" (-) operational levels with respect to the reference condition.

Factores: A) entrega desde la sierra cinta carro 1 a la sierra cinta 3; B) capacidad duplicada del descortezador; C) fallas eliminadas de las sierras cintas carro 1 y 2; D) piezas entregadas de la sierra cinta carro 2 a la canteadora 2 en forma directa. El efecto de los factores se evaluó en los niveles de operación "aplicado" (+) y "no aplicado" (-) con respecto a la condición de referencia.

### Analysis of the model for 2.5 m long logs

The analysis of variance (ANOVA) showed that the model was significant ( $F = 15.38$ ;  $P < 0.001$ ), with only a 0.1 % probability that it could be affected by some factor not included (Table 4). Similarly, when observing the  $F$  value of each factor individually, it was found that factor D had a greater effect on production, followed by factors A, C and B. As a whole, the factors were able to predict 84.83 % of the sawmill's production; therefore, the proposed model was able to adequately explain the production of 2.5 m long logs.

The response surface of the model allows visualizing the conditions under which the highest sawmill production is obtained (Figure 3), which is possible to attain by setting factors B, C and D at their maximum level (+) and factor A at its minimum level (-). This allows production to be increased by 13 % with respect to the initial condition, that is, the production level increased from 251 to 298  $\text{m}^3 \cdot \text{shift}^{-1}$  of finished product.

focalizándose en las máquinas que mostraron tasa alta de utilización. Los resultados del modelo con respecto al uso del tiempo de las máquinas del aserradero permitieron la identificación y propuesta de modificaciones al flujo de piezas semiterminadas. Las modificaciones o factores evaluados se presentan en el Cuadro 2.

### Análisis de los escenarios propuestos

La variedad de factores a estudiar puede ser muy diversa; es decir, desde el aumento de capacidad de máquinas críticas (Baesler et al., 2004) y la localización y tamaño de almacenamiento de productos en proceso (Heshmat et al., 2013), hasta cambios en la distribución de los trozos consumidos en el aserradero (Grigolato et al., 2011). No obstante, esta investigación se focalizó en los dos primeros factores, dado que el aserradero se abastece de trozos en el mercado abierto, el cual no puede ser controlado.

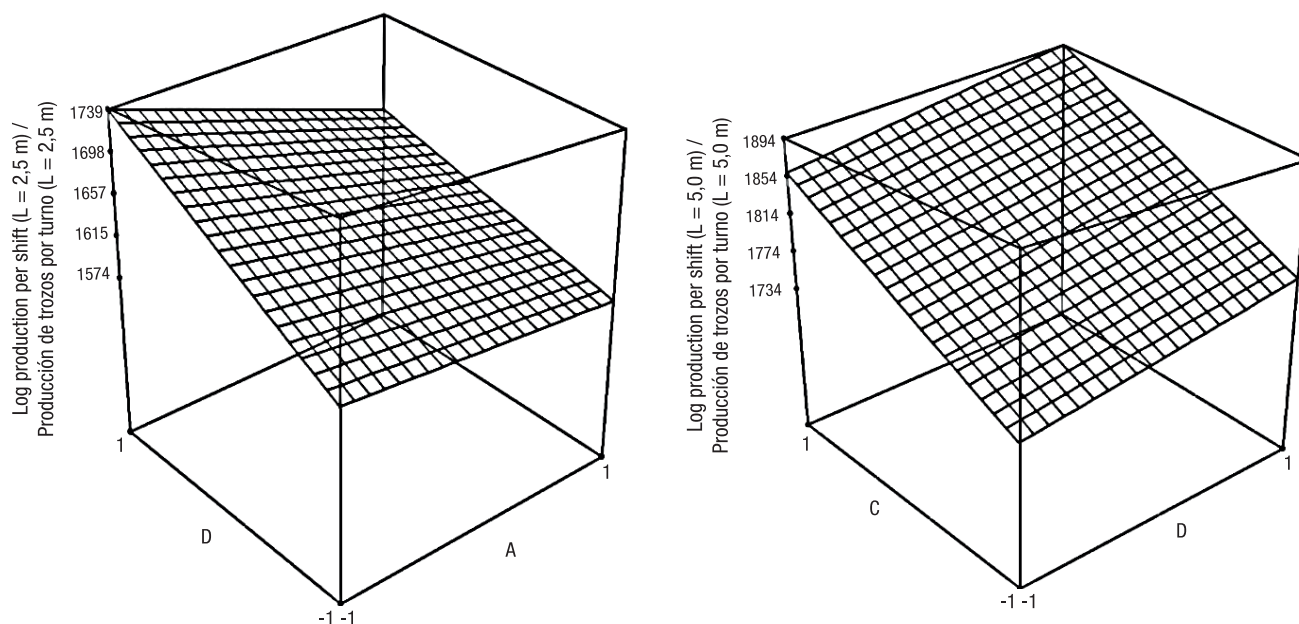
**Table 4. Analysis of variance for the production of 2.5 m long *Pinus radiata* logs.**

**Cuadro 4. Análisis de varianza para la producción de trozos de *Pinus radiata* con 2.5 m de longitud.**

Source of variation/ Fuente de variación	Sum of squares/ Suma de cuadrados	Degrees of freedom/ Grados de libertad	Mean squares/ Cuadrados medios	F value/ Valor F	Prob>F
Model/Modelo	82876	5	16576	15.38	<0.001*
A	16256	1	16256	12.80	0.004*
B	7482	1	7482	5.89	0.034*
C	13572	1	13573	10.69	0.008*
D	40804	1	40804	32.13	<0.001*
Residual	13971	11	1270		
Total corrected <sup>1</sup> / Total corregido <sup>1</sup>	92086	15			
Standard deviation/ Desviación estándar	30.35	R <sup>2</sup>	0.8483		
Mean/Media	1588.63	Adjusted R <sup>2</sup> / R <sup>2</sup> ajustado	0.7931		
Coefficient of variation (%) / Coeficiente de variación (%)	1.91	Predicted R <sup>2</sup> / R <sup>2</sup> predicho	0.6790		
Sum of squared errors of prediction/ Suma de cuadrados de error de predicción	29558	Adequate accuracy <sup>2</sup> / Precisión adecuada <sup>2</sup>	13.364		

\*Significance level of 10 % by  $F$  test. <sup>1</sup>Represents the sum of A + B + C + D + residual. <sup>2</sup>Measures the model's signal-to-noise ratio; generally, a value above four indicates a strong signal and, therefore, a reliable model.

\*Nivel de significancia del 10 % mediante la prueba  $F$ . <sup>1</sup>Representa la suma de A + B + C + D + residual. <sup>2</sup>Mide la relación señal ruido del modelo; por lo general, un valor sobre cuatro indica una señal potente y, por lo tanto, un modelo confiable.



**Figure 3.** Response surface for production of the *Pinus radiata* sawmill with two log lengths (L): L = 2.5 m (left) and L = 5.0 m (right). Factors: A) delivery from bandsaw carriage 1 to bandsaw 3; C) failures eliminated from bandsaw 1 and 2; D) pieces directly delivered from bandsaw 2 to edger 2.

**Figura 3.** Superficie de respuesta para producción del aserradero de *Pinus radiata* con dos longitudes (L) de trozos: L = 2.5 m (izquierda) y L = 5.0 m (derecha). Factores: A) entrega desde la sierra cinta carro 1 a la sierra cinta 3; C) fallas eliminadas de las sierras cintas carro 1 y 2; D) piezas entregadas de la sierra cinta carro 2 a la canteadora 2 en forma directa.

#### Analysis of model for 5.0 m long logs

ANOVA showed that the model was significant ( $F = 25.12$ ,  $P < 0.001$ ), with a 0.1 % probability that it could be affected by some factor not included (Table 5). Similarly, when observing the  $F$  value of each factor separately, factor B had a stronger influence on production and, in a lesser order, factors C and D. These factors together predict 86.26% of production; therefore, the model adequately explains sawmill production when processing 5.0 m logs.

The response surface of the model allowed us to visualize the desirable process conditions (Figure 3), which are obtained when factors B, C and D are set at their maximum level; in this way, production increases by 18 % with respect to current production, being equivalent to an increase from 418 to 475  $\text{m}^3 \cdot \text{shift}^{-1}$ . In general, a large effect of factors B, C and D was observed when changing the length of the logs. Although the diameter distribution was not studied as a factor, the results showed an improved process flow when using 5.0 m long logs. This is probably due to the fact that the output transports of the machines are more efficient when processing longer than shorter pieces. It is therefore suggested that future research should study the effect of diameter distribution on productivity.

El modelo generó 16 tratamientos a partir de cuatro factores evaluados. El Cuadro 3 presenta los resultados del efecto de los factores individuales y combinados sobre la variable de respuesta (trozos por turno) en cada escenario de producción (longitud del trozo).

#### Análisis del modelo para trozos con longitud de 2.5 m

El análisis de varianza (ANOVA) mostró que el modelo resultó significativo ( $F = 15.38$ ;  $P < 0.001$ ), existiendo solo una probabilidad del 0.1 % de que pueda ser afectado por algún factor no incluido (Cuadro 4). De igual manera, al observar el valor  $F$  de cada factor en forma individual, se obtuvo que el factor D impactó con mayor efecto sobre la producción, seguido por los factores A, C y B. En su conjunto, los factores fueron capaces de predecir 84.83 % de la producción del aserradero; por lo tanto, el modelo propuesto fue capaz de explicar adecuadamente la producción de trozos con longitud de 2.5 m.

La superficie de respuesta del modelo permite visualizar las condiciones con las que se obtiene la mayor producción del aserradero (Figura 3), lo cual es posible de obtener al fijar los factores B, C y D a su nivel máximo (+) y el factor A en su nivel mínimo (-). Esto permite aumentar 13 % la producción con respecto a la condición inicial; es decir, el nivel de producción aumentó de 251 a 298  $\text{m}^3 \cdot \text{turno}^{-1}$  de producto terminado.

**Table 5. Analysis of variance when processing 5.0 m long *Pinus radiata* logs.****Cuadro 5. Análisis de varianza cuando se procesan trozos de *Pinus radiata* con 5.0 m de longitud.**

Source of variation / Fuente de variación	Sum of squares / Suma de cuadrados	Degrees of freedom / Grados de libertad	Mean squares / Cuadrados medios	F value / Valor F	Prob>F
Model	79167	3	26389	25.12	<0.001*
B	39601	1	39061	37.70	<0.001*
C	34596	1	34596	32.93	<0.001*
D	4971	1	4971	4.73	0.050*
Residual	12605	12	1050		
Total corrected <sup>1</sup> / Total corregido <sup>1</sup>	91773	15			
Standard deviation / Desviación estándar	32.41	R <sup>2</sup>	0.862		
Mean / Media	1767	Adjusted R <sup>2</sup> / R <sup>2</sup> ajustado	0.828		
Coefficient of variation (%) / Coeficiente de variación (%)	1.83	Predicted R <sup>2</sup> / R <sup>2</sup> predicho	0.755		
Sum of squared errors of prediction / Suma de cuadrados de error de predicción	22410	Adequate accuracy <sup>2</sup> / Precisión adecuada <sup>2</sup>	14.054		

\*Significance level of 10 % by F test. <sup>1</sup>Represents the sum of A + B + C + D + residual. <sup>2</sup>Measures the model's signal-to-noise ratio; generally, a value above four indicates a strong signal and, therefore, a reliable model.

\*Nivel de significancia del 10 % mediante la prueba F. <sup>1</sup>Representa la suma de A + B + C + D + residual. <sup>2</sup>Mide la relación señal ruido del modelo; por lo general, un valor sobre cuatro indica una señal potente y, por lo tanto, un modelo confiable.

The applied methodology that analyzes the results obtained with a DES model, through a factorial experimental design, identified opportunities to increase production between 13 % and 18 % when 2.5 and 5.0 m long logs, respectively, are processed. These results are consistent with those obtained by Baesler et al. (2004), who report increases of between 6.3 % and 17.4 % in a bulk-cut sawmill, and are lower than the 31.5 % obtained by Thoews et al. (2008).

Generally, simulation research focuses only on identifying critical process machines to increase productivity; however, Heshmat et al. (2013) also addressed the design of transport capacity to keep pieces in process. This approach could be highly useful in redesigning the production flow of sawmills and it is suggested that it be addressed in future research.

## Conclusions

The developed model enabled us to understand the dynamic flow of the process and identify the critical factors affecting it. The most sensitive factors impacting productivity were: factor B (increased debarker capacity), C (elimination of failures in the bandsaws when changing log length) and D (direct delivery from bandsaw 2 to edger 2). Low-mechanization sawmills

## Análisis del modelo para trozos de 5.0 m de longitud

El ANOVA mostró que el modelo fue significativo ( $F = 25.12$ ,  $P < 0.001$ ), existiendo una probabilidad del 0.1 % de que pueda verse afectado por algún factor no incluido (Cuadro 5). De igual manera, al observar el valor F de cada factor por separado se tiene que el factor B influyó con mayor fuerza sobre la producción y en menor orden los factores C y D. Estos factores en su conjunto predicen 86.26 % de la producción; por lo tanto, el modelo explica de manera adecuada la producción del aserradero cuando se procesan trozos de 5.0 m.

La superficie de respuesta del modelo permitió visualizar las condiciones deseables de proceso (Figura 3), las cuales se obtienen cuando se fijan los factores B, C y D a su nivel máximo; de esta forma, la producción incrementa 18% con respecto a la producción actual, siendo equivalente a un aumento de 418 a 475 m<sup>3</sup>·turno<sup>-1</sup>. En general se observó un gran efecto de los factores B, C y D, al cambiar la longitud de los trozos. Aunque la distribución diamétrica no se estudió como factor, los resultados mostraron un flujo mejorado del proceso cuando se trabajan trozos de 5.0 m de longitud. Esto se debe probablemente a que los transportes de salida de las máquinas son más eficientes al procesar

with a minimum degree of engineering design show greater potential for improvement by employing the applied approach. Although the application of discrete event simulation is demanding in terms of time capture and programming, once developed it is easily reproducible. Therefore, the resources used in its application will drop drastically, making its application feasible in future research.

### End of English version

## References / Referencias

- Álvarez-Lazo, D., Andrade-Fernando, E., Quintin-Cuador, G., & Domínguez-Goizueta, A. (2004). Importancia del control de las dimensiones de la madera aserrada. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 10(2), 105–110. Retrieved from [https://www.chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?seccion=numero&id\\_revista\\_numero=30](https://www.chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?seccion=numero&id_revista_numero=30)
- Arena. (2007). Arena® simulation software. Version 3.5 para Windows. Milwaukee, WI, USA: Rockwell Automation. Retrieved from <https://www.arenasimulation.com/what-is-simulation/discrete-event-simulation-software>
- Azadeh, A., & Maghsoudi, A. (2010). Optimization of production systems through integration of computer simulation, design of experiment, and Tabu search: The case of a large steelmaking workshop. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(5), 785–800. doi: 10.1007/s00170-009-2305-3
- Baesler, F., Araya, E., Ramis, F., & Sepúlveda, J. (2004). The use of simulation and design of experiments for productivity improvement in the sawmill industry. In R. G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, B. A. Peters, & W. Hilton (Eds.), *Proceedings of the 2004 winter simulation conference* (vol. 2, pp. 1218–1221). USA: IEEE Xplore. doi: 10.1109/WSC.2004.1371452
- Cown, D., McConchie, D., & Treolar, C. (1984). Timber recovery from pruned *Pinus radiata* butt logs at mangatu: Effect of log sweep. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 14(1), 109–123. Retrieved from [https://www.scionresearch.com/\\_data/assets/pdf\\_file/0019/30916/NZJFS1411984COWN109\\_123.pdf](https://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0019/30916/NZJFS1411984COWN109_123.pdf)
- Design Expert. (2007). Design Expert 6.0 para Windows. Minneapolis, MN, USA: Stat-Easy Inc.
- Di Gironimo, G., Balsamo, A., Esposito, G., Lanzotti, A., Melemez, K., & Spinelli, R. (2015). Simulation of forest harvesting alternative processes and concept design of an innovative skidding winch focused on productivity improvement. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39(2), 350–359. doi: 10.3906/tar-1408-64
- Flores-Velázquez, R., Serrano-Gálvez, E., Palacio-Muñoz, V., & Chapela, G. (2007). Análisis de la industria de

piezas más largas que cortas. De esta manera se sugiere que en investigaciones futuras se estudie el efecto de la distribución diamétrica en la productividad.

La metodología aplicada que analiza los resultados obtenidos con un modelo de SED, a través de un diseño de experimento factorial, identificó oportunidades de aumento de la producción entre 13 % y 18 % cuando se procesan trozos de 2.5 y 5.0 m de longitud, respectivamente. Estos resultados son consistentes con los señalados por Baesler et al. (2004), quienes reportan aumentos de entre 6.3 % y 17.4 % en un aserradero de corte masivo; y son inferiores al 31.5 % obtenido por Thoews et al. (2008).

Generalmente, las investigaciones de simulación se centran solo en identificar las máquinas críticas de los procesos para aumentar la productividad; sin embargo, Heshmat et al. (2013) abordaron, además, el diseño de la capacidad de los transportes para mantener piezas en proceso. Este enfoque podría ser de alta utilidad para rediseñar el flujo productivo de aserraderos y se sugiere sea abordado en investigaciones futuras.

## Conclusiones

El modelo desarrollado permitió comprender el flujo dinámico del proceso e identificar los factores críticos que lo afectan. Los factores más sensibles sobre la productividad fueron: el factor B (aumento de la capacidad del descortezador), el C (eliminación de las fallas en las sierras cintas al cambiar la longitud del trozo) y el D (entrega directa de la sierra cinta 2 a la canteadora 2). Los aserraderos de baja mecanización y mínimo grado de diseño ingenieril en planta muestran mayor potencial de mejora al emplear el enfoque aplicado. Aunque la aplicación de la simulación de eventos discretos es demandante en términos de captura de tiempos y programación, una vez desarrollada es fácilmente reproducible. Por tanto, los recursos empleados en su aplicación bajarán drásticamente, haciendo factible su aplicación en investigaciones futuras.

Fin de la versión en español



- la madera aserrada en México. *Madera y Bosques*, 13(1), 47–59. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/617/61713105.pdf>
- Grigolato, S., Bietresato, M., Asson, D., & Cavalli, R. (2011). Evaluation of the manufacturing of desk and stringer boards for wood pallets production by discrete event simulation. *Biosystems Engineering*, 109(4), 288–296. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.04.009
- Heshmat, M., El-Sharief, M. A., & El-Sebaie, M. G. (2013). Simulation modeling of automatic production lines with intermediate buffers. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(7), 2528–2535. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/303876043\\_SIMULATION\\_MODELING\\_OF\\_AUTOMATIC\\_PRODUCTION\\_LINES\\_WITH\\_INTERMEDIATE\\_BUFFERS](https://www.researchgate.net/publication/303876043_SIMULATION_MODELING_OF_AUTOMATIC_PRODUCTION_LINES_WITH_INTERMEDIATE_BUFFERS)
- Hogg, G. A., Pulkki, R. E., & Ackerman, P. A. (2010). Multi-system mechanized harvesting operation analysis-application of Arena 9 discrete event simulation software in Zululand, South Africa. *International Journal of Forest Engineering*, 21(2), 14–22. doi: 10.1080/14942119.2010.10702594
- Instituto Forestal (INFOR). (2016). *Anuario forestal 2015*. Chile: Author. Retrieved from <https://wef.infor.cl/publicaciones/anuario/2015/Anuario2015.pdf>
- Lohmander, P. (2007). Adaptive optimization of forest management in a stochastic world. In A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal, R. Epstein, & J. Miranda (Eds.), *Handbook of operations research in natural resources* (525–543). Boston, MA, USA: Springer. doi: 10.1007/978-0-387-71815-6\_28
- Marques, A. F., De Sousa, J. P., Rönqvist, M., & Jafe, R. (2014). Combining optimization and simulation tools for short-term planning of forest operations. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29(1), 166–177. doi: 10.1080/02827581.2013.856937
- Meimban, R., Mendoza, G., Araman, P., & Luppold, W. (1991). A simulation model for a hardwood decision support system. *Journal of Forest Engineering*, 4(1), 39–47. Retrieved from <https://journals.lib.unb.ca/index.php/IJFE/article/view/10059/10315>
- Memari, A., Zahraee, S. M., Anjomanshoae, A., & Rahim, A. R. B. A. (2013). Performance assessment in a production-distribution network using simulation. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 2(5), 48–56. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/259532370\\_Performance\\_Assessment\\_in\\_a\\_Production-Distribution\\_Network\\_Using\\_Simulation](https://www.researchgate.net/publication/259532370_Performance_Assessment_in_a_Production-Distribution_Network_Using_Simulation)
- Montgomery, D. C., Runger, G. C., & Medal, E. G. U. (1996). *Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería*. México: McGraw-Hill.
- Opacic, L., & Sowlati, T. (2017). Applications of discrete-event simulation in the forest products sector: A review. *Forest Products Journal*, 67(3-4), 219–229. doi: 10.13073/FPJ-D-16-00015
- Opacic, L., Sowlati, T., & Mobini, M. (2018). Design and development of a simulation-based decision support tool to improve the production process at an engineering wood products mill. *International Journal of Production Economics*, 199, 209–219. doi: 10.1016/j.ijpe.2018.03.010
- Parthanadee, P., & Buddhakulsomsiri, J. (2014). Production efficiency improvement in batch production system using value stream mapping and simulation: A case study of the roasted and ground coffee industry. *Production Planning & Control*, 25(5), 425–446. doi: 10.1080/09537287.2012.702866
- Spinelli, R., Di Gironimo, G., Esposito, G., Magagnotti, N. (2014). Alternative supply chain for logging residues under access constraints. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29(3), 266–274. doi: 10.1080/02827581.2014.896939
- Steele, P. (1984). Factors determining lumber recovery in sawmilling. Retrieved from <https://www.fpl.fs.fed.us/documents/fplgtr/fplgtr39.pdf>
- Thoews, S. E., Maness, T. C., & Ristea, C. (2008). Using flow simulation as a decision tool for improvements in sawmill productivity. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 10(3), 229–242. doi: 10.4067/S0718-221X2008000300006
- Quintero, M., & Rosso, F. (2001). Propuesta de un sistema simulador de aserraderos para la industria forestal venezolana. *Revista Forestal Venezolana*, 45(1), 95–101. Retrieved from <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/24377>
- Walker, J. F. C. (2006). *Primary wood processing, principles and practices* (2nd ed.). Dordrech, Netherlands: Springer Science & Business Media.
- Wolfsmayr, U. J., Merenda, R., Rauch, P., Longo, F., & Gronalt, M. (2016). Evaluating primary forest fuel rail terminals with discrete event simulation: A case study from Austria. *Annals of Forest Research*, 59(1), 145–164. doi: 10.15287/afr.2015.428