

Estudio exploratorio del efecto de los parámetros de corte en la precisión de aserrado de la madera boliviana de *Hymenaea courbaril*.

Effect of cutting parameters on sawing precision of the *Hymenaea courbaril*.
Bolivian wood, an exploratory study

Francisco Vergara ^{a*}, Giovanni Castillo ^b,
Gerson Rojas ^a, Claudio Montero ^c

*Autor de correspondencia: ^a Universidad del Bío-Bío, Facultad de ingeniería,
Departamento de Ingeniería en Maderas, Concepción, Chile, tel.: 56 41 23111668, fvergara@ubiobio.cl

^b Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra, Dirección de Postgrado, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

^c Universidad del Bío-Bío, Laboratorio de Materiales Compuestos, Concepción, Chile.

SUMMARY

The sawing of *Hymenaea courbaril* is complex due to its high density and abrasiveness. These factors accelerate the wear on saw blade teeth, and as a consequence, increase the cutting variability and process costs. The effect of cutting parameters on standard deviation of sawn-wood thickness was evaluated to propose optimal sawing conditions. A log carriage bandsaw with two saw blade geometries, three log diameter classes, and two feed rates were used to carry out the sawing tests. The results showed that the sawing variation expressed by the total standard deviation of board thickness was lower than 1 mm, when log diameter was lower than 0.79 m, and the log carriage feed rate was lower than or equal to 10 m min⁻¹ for both saw geometries. The sawing thickness was affected by log diameter and log carriage feed rate, while saw geometry was not statistically significant. However, the goal of this initiative was not an estimation of the changes on sawmill productivity. Before this study, all log classes were processed with a log carriage feed rate of no higher than 10 m min⁻¹. Consequently, given the estimated total standard deviations, it can be suggested that the logs of class 2 could be sawn at a 50 % higher rate without altering the cutting precision, improving sawmill productivity.

Keywords: cutting precision, saw teeth geometry, experimental design, statistical analysis, feed rate.

RESUMEN

El aserrío en la madera de *Hymenaea courbaril* es complejo debido a su elevada densidad y abrasividad. Estos factores producen un desgaste acelerado de los dientes de la sierra y como consecuencia, un aumento de la variabilidad del corte y los costos del proceso. Se evaluó el efecto de parámetros de corte sobre la desviación del corte en el espesor de la madera aserrada de manera de proponer óptimas condiciones de aserrado. Se realizaron ensayos de aserrío utilizando una sierra de banda con carro porta-trozos, considerando sierras con dos geometrías de dientes, trozos agrupados en 3 rangos de diámetro, y dos velocidades de avance. Los resultados indicaron que la variación de corte expresada como la desviación estándar total del espesor de las piezas no fue mayor a 1,00 mm, cuando el diámetro del trozo fue inferior a 0,79 m y la velocidad del avance inferior a 10 m min⁻¹ para ambas geometrías de sierra. El diámetro del trozo y la velocidad de avance afectaron el espesor de aserrado, mientras que la geometría de la sierra no tuvo un efecto directo. Aunque el objetivo no fue determinar el cambio de productividad, previo a esta investigación, los trozos de los 3 grupos de diámetros se aserraban a velocidades inferiores a 10 m min⁻¹. En consecuencia, en virtud de las desviaciones estándar totales estimadas, se puede sugerir que los trozos del grupo de diámetros 2, podrían ser aserrados a una velocidad un 50 % mayor, sin alterar la precisión de corte, mejorando la productividad del aserradero.

Palabras clave: precisión de corte, geometría del diente, diseño experimental, análisis estadístico, velocidad de avance.

INTRODUCCIÓN

El sector forestal-maderero de Bolivia, dispone de 28,7 millones de hectáreas para producción forestal, equivalentes al 26 % de su territorio (López *et al.* 2012), presentando mayormente especies tropicales de alto valor. Lo anterior, evidencia el potencial de este sector para el desarrollo

económico del país, el cual aporta cerca del 0,6 % del PIB Nacional (Banco Mundial 2022). Esto se tradujo en una exportación anual al 2015 de 49 millones de dólares (Cámara Forestal de Bolivia 2022).

Durante los últimos años, debido a una mayor demanda internacional por productos a base de madera sólida, se ha comenzado a explorar la utilización de especies de alto

valor comercial y que presentan potencial para ser manufacturadas de forma rentable.

En particular, se ha puesto atención en la utilización de la madera aserrada de Paquío (*Hymenaea courbaril* L.), cuyos árboles maduros, presentan un diámetro promedio a la altura del pecho de 70 cm y una altura de hasta 40 m (Chundnoff 1984). Esta madera se considera de alto valor, debido a que presenta alta durabilidad natural, densidad y dureza (Wallace *et al.* 2000), además de una dureza que la hace muy dura para el contexto latinoamericano (Chundnoff 1984, Hitchcock y King 2015). En relación con la densidad básica, la *H. courbaril* presenta valores entre 0,71 a 0,82 g cm⁻³ (Chundnoff 1984), con el agravante de exhibir altos niveles de sílice e incrustaciones cristalinas, imponiendo grandes desafíos tecnológicos a su transformación.

Estas particularidades, dificultan la producción de madera aserrada y generan un prematuro desgaste de los elementos de corte, debido al excesivo calentamiento e inestabilidad de las sierras durante el proceso de aserrío. Considerando que un aserradero, busca producir madera aserrada con lados paralelos y homogéneos en espesor y ancho, anomalías en sus procesos provocan desviaciones de esta forma ideal, las cuales son detectadas como desviaciones del espesor y ancho de las piezas. Como consecuencia de una alta variabilidad dimensional, se reduce el rendimiento del proceso de aserrío y de las materias primas, elevando el costo de producción (Salguero y Quevedo 2014).

En este contexto, la calidad del aserrío puede evaluarse por su grado de variación y uniformidad en el espesor de las piezas producidas (Zavala 2003). La presencia de alta variabilidad en el espesor dificulta la comercialización, disminuyendo el valor de la madera aserrada, impactando negativamente en el rendimiento volumétrico y la competitividad del aserradero (Rasmussen *et al.* 2004). De esta manera, se hace necesario un análisis del proceso productivo, con énfasis en la mejora del rendimiento del aserrío y su calidad dimensional (Salguero y Quevedo 2014).

El control dimensional de la madera identifica problemas en máquinas específicas, sus calibraciones, al igual que en todo el aserradero. La información obtenida es una herramienta de control y administración del proceso de aserrado, que minimiza la suma de los canales de corte (kerf), la variación de corte, y la rugosidad de la madera producida. Aserraderos que han implementado el control dimensional han reducido las variaciones de las dimensiones de la madera verde y la rugosidad, ahorrando entre 300 mil y un millón de dólares anuales (Brown 2000). En el control dimensional, múltiples mediciones permiten evaluar cómo la máquina se comporta. Por lo tanto, múltiples puntos de medición a lo largo de la pieza revelan variaciones en el espesor o ancho de estas. El número de piezas a medir dependerá si el programa de control dimensional se está iniciando, o se encuentra en curso. El mayor beneficio de la información obtenida es la capacidad de detectar pro-

blemas de corte en las máquinas, aislar problemas, identificar su origen, y buscar soluciones (Brown 2000).

En términos prácticos, la variación de corte es el concepto más extendido en los aserraderos en relación con el concepto estadístico de la desviación estándar (Brown 2000). Es por esta razón que en esta investigación se emplea la variación de corte, desviación estándar de corte, y precisión de corte como términos sinónimos.

Entre los autores, que han estudiado las variables que afectan la uniformidad del espesor en la madera aserrada, se encuentran Loehnertz *et al.* (1996) y Zavala (2003), quienes investigaron la variación dimensional en maderas excesivamente abrasivas y de elevada densidad, enfatizando en una adecuada selección del elemento de corte, según las características de la especie a procesar. Esto considera definir la correcta geometría del elemento de corte (paso y altura del diente, profundidad de garganta, ángulo de diente, de ataque y de incidencia) y de la velocidad de avance. En consecuencia, modificar los parámetros del elemento de corte permite contrarrestar el efecto nocivo de la dureza y de los extractivos corrosivos, responsables del prematuro desgaste de los aceros tradicionalmente empleados en las herramientas de corte en aserraderos. En este sentido, el retroceso de la arista de corte en el diente, producida por el desgaste prematuro del filo, acarrea dos efectos inseparables que son: aumento de consumo de energía de corte, y el deterioro de la calidad de la superficie aserrada, y como consecuencia la reducción de la calidad dimensional de la pieza.

Por otra parte, la aplicación de aleaciones cromo-cobalto o metal duro en la punta del elemento de corte y tratamientos de endurecimiento, han permitido mejorar la resistencia a la abrasión y a la corrosión, ya que, al utilizar aleaciones en los dientes, se reduce el desgaste prematuro y sus consecuencias (aumento en la variación dimensional y reducción de la calidad de corte). De esta manera, se reduce la fricción entre el elemento de corte y la madera, entregando mayor capacidad de tolerar la dureza y la abrasión entre ambas (Zavala 2003).

A pesar de los esfuerzos realizados por mejorar el rendimiento del aserrío en especies como *H. courbaril*, estos aún no han sido suficientes, siendo lo habitual una baja productividad del aserrío y una baja calidad dimensional de las piezas obtenidas. En la producción de madera aserrada de *H. courbaril* se observa que la desviación estándar del espesor en la tabla y entre tablas oscila en un rango de 1 a 4 mm, lo cual excede la tolerancia del mercado de exportación, aunque satisface la tolerancia del mercado doméstico boliviano. Por lo que la hipótesis de esta investigación es que la uniformidad en el espesor de aserrado en la madera de *H. courbaril* es mayor al utilizar altas geometrías en las sierras y bajas velocidades de avance de los trozos. De esta manera, el objetivo principal de esta investigación fue evaluar el efecto de los parámetros de corte y de la velocidad de avance sobre la desviación estándar del corte en madera aserrada de *H. courbaril* aplicados a diferentes diámetros de trozos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material de estudio. Para el desarrollo del estudio de aserrío se seleccionaron 36 trozos de *H. courbaril*, de largo variable, agrupadas en tres rangos de diámetros, el primer rango consideró trozos de diámetros entre 40 a 59 cm, el segundo rango, trozos de diámetros entre 60 y 79 cm, y el tercer rango, trozos de diámetros entre 80 y 99 cm. El espesor de las piezas a obtener fue de 34 mm. Para el aserrío, se utilizó una máquina sierra de banda con volantes de diámetro de 1.470 mm con carro perteneciente a la empresa Oquiriquia SRL, ubicada en el Bajo Paraguá, provincia Ñuflo de Chávez, Santa Cruz de la Sierra. El plan de corte aplicado fue realizar el destape del trozo por sus 4 caras, generando una basa de cada trozo, y luego realizar el aserrado de la basa obteniendo piezas de espesor fijo y ancho determinado por la altura de la basa (función del diámetro del trozo), por lo tanto, dentro del trozo, el ancho de las piezas fue fijo.

Evaluación de la desviación estándar en el espesor de las piezas del proceso de aserrío. Tal como se indicó en Brown (2000), la variabilidad de corte de las piezas en el aserrado corresponde estadísticamente a la desviación estándar. Donde la variación total de corte o desviación estándar total del espesor de las piezas (SD_T) tiene dos componentes; la variación de corte o desviación estándar del espesor en la pieza (SD_W) y la variación de corte o desviación estándar del espesor entre piezas (SD_B).

La SD_W mide la variación del espesor o ancho a lo largo de la pieza, estas son llamadas: serpiente, acuñamiento y conicidad; la serpiente es la variación a lo largo de una cara de la pieza respecto a la cara opuesta. Una de las causas de esta variación, es la sobre alimentación de la sierra durante el corte y aunque no exista serpiente, y solo existan variaciones dentro de la pieza, sus causas se basan en la misma práctica de corte. El acuñamiento es una reducción del espesor desde un canto de la pieza al otro, puede que no se extienda por todo el largo de la pieza, problemas de alineamiento y excesiva velocidad de avance son sus causas más comunes. La conicidad de punta a punta de la pieza es un incremento o decremento del espesor de un extremo al otro de la pieza, y es usualmente provocado por problemas de avance o alineamiento de la máquina.

La SD_B mide como el promedio de espesor o ancho de las piezas varían desde una pieza a la otra en la misma máquina o línea de corte. Si las piezas con excesiva variación entre piezas provienen de la misma línea de corte, el método de medición debe ser revisado, y la repetitividad de estas debe ser examinada. Si la variación entre piezas proviene de diferentes líneas de corte, entonces el espacio de las mediciones debe ser examinado, aunque a veces el problema no está relacionado con la máquina sino con una basa procesada en otra línea o máquina de corte. La desviación estándar total del espesor de las piezas SD_T

relaciona la desviación estándar de corte en la pieza SD_W con la desviación estándar del espesor entre piezas SD_B , la cual, sumada a la tolerancia de contracción por secado y por cepillado, determina la dimensión objetivo verde a la que debe ser aserrada la madera.

Dada la naturaleza exploratoria de esta investigación, se emplearon los 3 tipos de desviación estándar para evaluar la variación del espesor: desviación estándar total del espesor de las piezas (SD_T), desviación estándar en la pieza (SD_W) y desviación estándar entre piezas (SD_B).

Las observaciones obtenidas, se efectuaron a través de mediciones cada 0,5 m a lo largo de cada pieza aserrada según lo indicado por Brown (2000), siendo efectuadas con un pie de metro digital de precisión 0,1 mm (marca Mitutoyo®, modelo 500-181-20), evitando medir sobre nudos o cualquier otro defecto presente en la madera. En todas las piezas, la primera medición se realizó en la dirección de salida de la sierra de banda con carro, para identificar eventuales problemas durante el aserrado. La información obtenida se registró en un sistema de plantillas utilizando el software Microsoft Excel®.

Diseño del experimento. El enfoque aplicado en esta investigación fue un experimento factorial, donde se estableció la relación causa efecto entre variables independientes (predictores) y las 3 variables dependientes a evaluar (respuestas). Para los ensayos de aserrío, se emplearon los siguientes predictores: dos geometrías de elemento de corte (identificadas como G1 y G2), dos velocidades de avance para la sierra de banda con carro (10 y 15 m min⁻¹), las cuales fueron aplicadas en tres rangos de diámetros (D1 entre 40 y 59 cm; D2 entre 60 y 79 cm; D3 entre 80 y 99 cm). Esto implicó desarrollar un diseño experimental de tipo factorial, donde se aplicó un arreglo del tipo 3 × 2 × 2 con tres repeticiones cada uno, lo que exigió desarrollar 36 ensayos experimentales, utilizando para cada tratamiento 24 piezas aserradas, lo cual implicó evaluar un total de 288 piezas aserradas (cuadro 1).

El experimento consideró el efecto de los predictores anteriores en tres tipos de desviación estándar del espesor de la madera producida. Es decir, para cada tratamiento se obtuvo: 1) desviación estándar total del espesor de las piezas (SD_T), 2) desviación estándar del espesor entre piezas (SD_B), y 3) desviación estándar del espesor en la pieza (SD_W). Las expresiones matemáticas que definen estos estadígrafos se muestran a continuación en las ecuaciones [1], [2], y [3].

$$SD_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N X_i^2 - \frac{(\sum_{j=0}^N X_t)^2}{k}}{N - 1}} \quad [1]$$

$$SD_B = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^k Avg_j^2 - \frac{(\sum_{j=0}^k Avg_j)^2}{k}}{k - 1}} \quad [2]$$

$$SD_W = \frac{\sum_{j=0}^k MS_j}{k} \quad [3]$$

donde:

x_i = Medición individual del espesor de la pieza en i -ésima posición.

n_j = Número de mediciones en la pieza j .

k = Número de piezas.

N = Número total de mediciones en el espesor de las piezas.

Avg_j = Promedio de las mediciones de la pieza j .

MS_j = Cuadrado de las medias (varianza) de la pieza j .

SD_T = Desviación estándar total de los espesores de las piezas.

SD_B = Desviación estándar del espesor entre piezas.

SD_W = Desviación estándar del espesor en la pieza.

Las características de los elementos de corte utilizados en cada ensayo de aserrío, se diferencian principalmente por su ángulo de ataque y su ángulo de alivio, así como en el espesor de la sierra, por el volumen de garganta, y el espesor del diente (cuadro 2).

Análisis estadístico. El análisis estadístico fue realizado con el software Design Expert versión 6.1 definiendo como variable respuesta a evaluar a: 1) desviación estándar total

del espesor de las piezas (SD_T), 2) desviación estándar del espesor entre piezas (SD_B), y 3) desviación estándar del espesor en la pieza (SD_W).

Se efectuó el Análisis de Varianza (ANOVA) para conocer si existen diferencias significativas en los tratamientos evaluados y sus correspondientes interacciones. Se consideró un nivel de significancia del 10 % ($P \leq 0,1$), debido a la naturaleza exploratoria del estudio y por las condiciones en terreno en las que fue realizado.

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las variables respuestas para cada uno de los tratamientos (cuadro 3).

Análisis de varianza (ANOVA) para las variables en estudio. En el cuadro 4, se muestran los resultados del análisis de varianza ANOVA, mostrando la existencia de diferencias significativas entre las variables estudiadas: diámetro del trozo, velocidad de avance, y geometría de las sierras, y sus interacciones sobre 3 variables respuestas empleadas. En primer lugar, cuando se emplea la SD_T del espesor de las piezas como variable respuesta (cuadro 4) se establece una significativa relación con la variable diámetro del trozo ($P = 0,016$), y una significativa relación con la

Cuadro 1. Variables a evaluar en cada ensayo de aserrío.

Variables to evaluate in each sawing test

Variable	Nivel		
Diámetro del trozo (cm).	D1: [40 – 59]	D2: [60 – 79]	D3: [80 – 99]
Velocidad de avance carro huincha (m min ⁻¹).	V1: 10 m min ⁻¹	V2: 15 m min ⁻¹	-
Geometría del elemento de corte.	G1	G2	-

Cuadro 2. Características de los elementos de corte utilizados.

Features of cutting tools used.

Características del elemento de corte	Geometría – G1	Geometría – G2
Paso del diente (mm)	45	45
Altura (mm)	12	12
Espesor del cuerpo de la sierra (mm)	1,47	1,47
Espesor de la sierra (mm)	2,9	3,1
Huelgo lateral (mm)	0,715	0,815
Ángulo de ataque	21 °	18 °
Ángulo del cuerpo	57 °	57 °
Ángulo de alivio	12 °	15 °
Volumen disponible de garganta (mm ³)	895	957
Área de garganta (mm ²)	309	309

Cuadro 3. Valores de desviaciones estándar de cada tratamiento.

Standard deviation values of response variables for each treatment.

Estadístico	Diámetro	V1: (10 m min ⁻¹)		V2: (15 m min ⁻¹)	
		G1	G2	G1	G2
SD _T (mm)	D1 (40 - 59 cm)	0,506	0,624	0,964	0,979
	D2 (60 - 79 cm)	1,142	1,061	1,011	0,955
	D3 (80 - 99cm)	1,093	1,100	0,827	0,854
SD _w (mm)	D1 (40 - 59 cm)	0,225	0,206	0,193	0,193
	D2 (60 - 79 cm)	0,222	0,298	0,290	0,465
	D3 (80 - 99cm)	0,483	0,538	0,507	0,471
SD _B (mm)	D1 (40 - 59 cm)	0,470	0,605	0,964	0,981
	D2 (60 - 79 cm)	1,144	1,043	0,992	0,867
	D3 (80 - 99cm)	1,015	0,998	0,693	0,747

Donde:

SD_T: Desviación estándar total del espesor de las piezas.

SD_w: Desviación estándar del espesor en la pieza.

SD_B: Desviación estándar del espesor entre piezas.

D1: Diámetro de trozo entre 40 y 59 cm.

D2: Diámetro de trozo entre 60 y 79 cm.

D3: Diámetro de trozo entre 80 y 99 cm.

V1: Velocidad de avance de 10 m min⁻¹.

V2: Velocidad de avance de 15 m min⁻¹.

G1: Geometría de elemento de corte 1.

G2: Geometría de elemento de corte 2.

Cuadro 4. Análisis de varianza para las variables respuesta empleadas.

Variance analysis for the response variables employed.

Variable	Estadístico	D	V _A	G	D y V _A	D y G	V _A y G
SD _T	F	61,91	0,25	0,063	94,13	3,60	0,22
	P	0,016*	0,665	0,826	0,010*	0,218	0,685
SD _w	F	38,85	0,78	2,31	2,87	2,36	0,023
	P	0,025*	0,471	0,268	0,259	0,298	0,893
SD _B	F	29,28	0,035	0,048	65,63	4,12	0,19
	P	0,033*	0,868	0,847	0,015*	0,195	0,702

SD_T: Desviación estándar total del espesor de las piezas.

SD_w: Desviación estándar del espesor en la pieza.

SD_B: Desviación estándar del espesor entre piezas.

F: Valor obtenido mediante la prueba F.

P: probabilidad.

*Significativo a un nivel de significancia del 10 %

interacción de las variables diámetro del trozo y velocidad de avance ($P = 0,0010$). En segundo lugar, cuando se emplea la SD_w como variable respuesta (cuadro 4) se establece un efecto significativo solo con la variable diámetro del trozo ($P = 0,025$). En tercer lugar, cuando se emplea la desviación estándar del espesor entre piezas como variable respuesta (cuadro 4), se establece un efecto significativo con la variable diámetro del trozo ($P = 0,033$), y significativa con la interacción de las variables diámetro del trozo y velocidad de avance ($P = 0,015$).

La relación entre las 3 variables respuestas empleadas y la geometría del diente no mostró un efecto estadísti-

camente significativo, y la variable velocidad de avance solo fue significativa cuando interacciona con la variable diámetro del trozo.

Efecto de las variables de estudio sobre la desviación estándar total de las piezas. Cuando se emplea la SD_T como variable respuesta, se observa que el factor Diámetro del trozo, y la interacción entre el factor Diámetro del trozo, y el factor Velocidad de avance, tienen un impacto significativo. Sin embargo, el factor Geometría del diente y sus interacciones con los factores Diámetro del trozo, y Velocidad de avance no lo tienen.

Al observar los gráficos de interacción, se puede evidenciar (figura 1A y 1B) que: al aserrar con una sierra de geometría de diente 1 y/o 2, y velocidad 1 y/o 2; a la vez que se aumenta el diámetro del trozo aserrado de 1 a 2, se incrementa la SD_T del tratamiento (es decir baja la precisión de corte). Al pasar del diámetro 2 al 3, la SD_T se mantiene estable cuando se emplea la velocidad 1. Sin embargo, cuando se emplea la velocidad 2, y pasar del diámetro 2 al 3, las magnitudes de las desviaciones estándar totales se reducen levemente.

Efecto de las variables de estudio sobre la desviación estándar dentro de la pieza. Cuando se emplea la SD_W como variable respuesta, se observa que solo el factor Diámetro del trozo tiene un impacto significativo (figura 2A y 2B). Es probable que la SD_W , al ser en magnitud inferior a la SD_T sea menos sensible al efecto de los predictores elegidos y empleados.

Efecto de las variables de estudio sobre la desviación estándar entre piezas. Cuando se emplea la SD_B como variable respuesta, se observa un impacto significativo del factor Diámetro del trozo, la interacción de los factores Diámetro del trozo y Velocidad de avance (figura 3A y 3B).

Al observar el gráfico de interacciones (figura 3A) se puede evidenciar que: al aserrar con una sierra de geometría 1 y la velocidad de avance 1, aumenta la SD_B (es decir baja la precisión de corte entre piezas) a medida que aumenta el diámetro del trozo. Aunque esto solo ocurre al subir del diámetro 1 al 2, al pasar del diámetro 2 al 3, disminuye la SD_B . Contrariamente al emplear la velocidad de avance 2, se mantiene la SD_B al aumentar el diámetro aserrado de 1 a 2. Sin embargo, al pasar del diámetro 2 al 3, la SD_B se reduce, aunque solo fue estadísticamente significativa para la velocidad V2 (figura 3A).

Al emplear una sierra de geometría 2, y analizar el gráfico de interacciones (figura 3B) se puede evidenciar que:

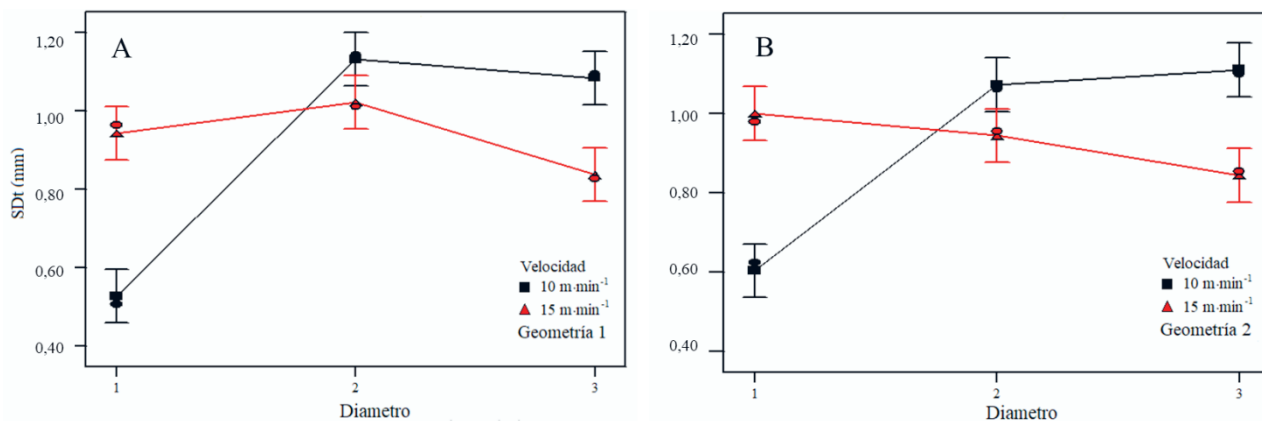


Figura 1. Desviación estándar total del espesor de las piezas SD_T , para A: Geometría del diente 1 y B: Geometría del diente 2.
 Total standard deviation of board thickness SD_T for A: Geometry 1 and B Geometry 2.

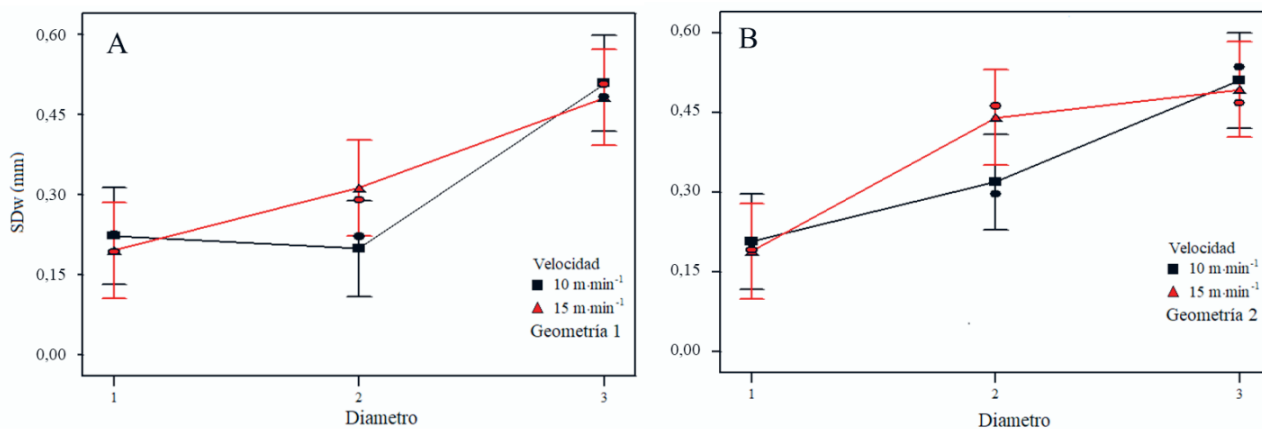


Figura 2. Desviación estándar del espesor dentro de las piezas SD_W , para A: Geometría del diente 1 y B: Geometría del diente 2.
 Standard deviation of thickness within boards SD_W for A: Teeth geometry 1 and B: Teeth geometry 2.

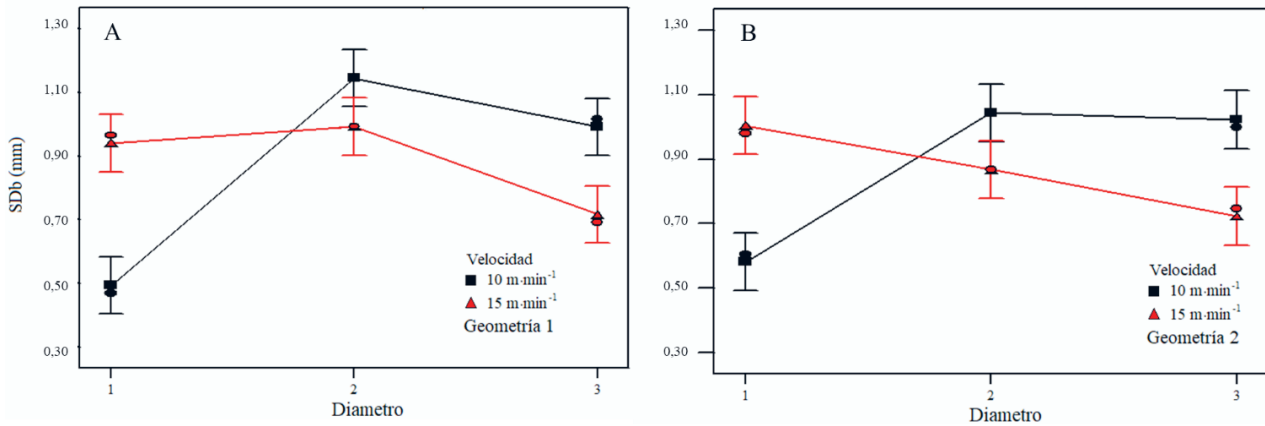


Figura 3. Desviación estándar del espesor entre piezas SD_B para A: Geometría del diente 1 y B: Geometría del diente 2.
Standard deviation between boards for A: Teeth geometry 1 and B: Teeth geometry 2.

al aumentar el diámetro del trozo desde el diámetro 1 al 2, y emplear la velocidad de avance 1, la SD_B aumenta. Aunque al pasar del diámetro 2 al 3, la SD_B se mantiene. Por otro lado, al emplear la velocidad de avance 2, la SD_B disminuye al aumentar el diámetro aserrado, es decir, mejora la precisión de corte entre piezas (aunque este fenómeno es solo evidente al pasar del diámetro 2 al 3).

DISCUSIÓN

En esta investigación se privilegió la identificación de condiciones de aserrío y selección de herramientas de corte que permitieran mejorar la precisión de corte, la cual se observó a través de la desviación estándar de las piezas aserradas (Brown 1986, Steele *et al.* 1992). Para ello, se realizó un experimento factorial que consideró variables operacionales del proceso de aserrío. El análisis de varianza fue empleado para identificar diferencias significativas entre las variables dependientes: SD_T del espesor de las piezas, del espesor entre piezas, y del espesor en la pieza; y las variables dependientes: diámetro del trozo, la velocidad de avance, y la geometría del diente de la sierra huincha empleada. El diseño del experimento siguió el mismo enfoque que Okai *et al.* (2006), aunque esta última investigación evaluó el efecto de diferentes huelgos laterales de la sierra, y la aleación empleada en los dientes de las sierras de banda sobre el ancho de la arista de corte (kerf).

En términos de la variación de corte en el espesor de las piezas, en este estudio se encontró un valor SD_T de 0,93 mm (rango 1,14 y 0,56 mm), para todas las condiciones evaluadas, la cual es inferior al valor de 3,93 mm reportadas por Zavala (2003), para el aserrío de *Quercus laurina* Bomp., *Quercus candicans* Née., y *Quercus acutifolia* Née. en máquinas similares. Aunque dicho autor buscó identificar sistemas de corte, rendimientos y productividad de aserrado. Para Devlieger y Baettig (1999), al ajustar a un nivel de confianza de 95 % ($Z = 1,96$), permite obtener

una tolerancia de corte de 1,53 mm, la cual permitió alcanzar una calidad dimensional suficiente. Por otro lado, Álvarez-Lazo *et al.* (2004), Nájera-Luna *et al.* (2011) y Ortiz *et al.* (2016) reportaron variaciones de corte entre 1,05 y 2,90 mm para *Pinus rudis* Endl en piezas de 19 mm y 13 mm de espesor nominal. El rango de desviaciones estándar totales promedio, obtenidas por un estudio comparativo de precisión de aserrado en maderas duras para una máquina de sierra huincha con carro fue de 1,19 mm (rango de 0,76 a 1,52 mm), valor muy similar al encontrado en esta investigación (Steele *et al.* 1992). Para Nájera-Luna *et al.* (2006), la variación de corte expresada por la SD_T de las piezas al procesar madera de Encino cambia en función del tipo de corte, siendo 1,54 mm para corte mixto, 1,27 mm para corte radial, y 1,48 mm para corte tangencial. Por lo tanto, al comparar estos valores, se debe consignar que existen factores tecnológicos y de las propiedades físicas de las especies que limitan su aserrado eficiente, entre estas destacan: la densidad, la dureza, y la presencia de taninos y de sílices que aumentan el desgaste de los filos de las sierras (Zavala 2003). Es decir, la comparación de valores de SD_T de corte siempre debe tratarse con precaución, dadas las singularidades de las especies, y el estado de las máquinas de aserrío.

Cuando se analiza el comportamiento de la SD_T del espesor de las piezas, se podría afirmar que un valor de 0,93 mm, indica que la calidad de corte no fue del todo satisfactoria, aunque ocurrieron tratamientos altamente satisfactorios, como los que emplearon el diámetro 1 y la velocidad 1, donde la SD_T fue inferior a 0,62 mm (tratamientos 1 y 2). Dicho valor es considerado según Brown (1986) como alta calidad de aserrío, debido a que un aserrío excelente es de una SD_T de 0,38 mm para coníferas. En cambio, para Nájera-Luna *et al.* (2006), en latifoliadas como *Quercus sideroxyla* Humb & Bomp., un SD_T de 1,43 mm es aceptable. Sin embargo, 5 de los 10 tratamientos mostraron SD_T entre 0,82 y 0,97 mm (tratamientos 3, 4, 8,

11 y 12), los cuales están en el rango inferior de la SD_T reportadas por Steele *et al.* 1992. Los tratamientos 5, 6, 7, 9 y 10 mostraron SD_T de hasta 1,10 mm, los cuales según Ambriz *et al.* (2018), indicarían la necesidad de tomar acciones correctivas, aunque nuevamente considerando la referencia de Steele *et al.* (1992) podrían ser calificadas como aceptables para maderas duras y este tipo de máquinas. Es decir, las desviaciones totales del espesor de las piezas obtenidas en este estudio son realistas y están en un rango de precisión de corte aceptable para esta máquina y tipo de madera.

Al comparar los valores de las desviaciones estándar del espesor dentro de la pieza, en esta investigación se obtuvo un rango de entre 0,47 a 1,14 mm, lo cual concuerda con el promedio de 0,55 mm (rango de 0,38 a 0,76 mm) del mismo parámetro reportado en investigaciones previas (Steele *et al.* 1992) realizadas en el mismo tipo de máquina y maderas duras. Complementariamente, Nájera-Luna *et al.* (2006), reportan valores del mismo parámetro al aserrar Encino de 1,35 mm para corte mixto, 1,02 para corte radial, y 1,32 para corte tangencial.

La altura de corte, y la SD_W están muy relacionados con la desviación de la sierra durante el corte, o bien a fallas de sujeción de la pieza cortada durante el aserrado (Brown 2000). Los resultados de esta investigación no evidencian problemas de avance durante el aserrado por problemas de sujeción del trozo, ya que, si bien esta aumenta y luego decae al aumentar el diámetro aserrado, es difícil relacionar este comportamiento *a priori* solo al mecanismo de avance de la máquina.

En términos de SD_B en los diferentes tratamientos aplicados el valor de este parámetro osciló entre un mínimo de 0,19 mm, y un máximo de 0,53 mm, lo cual es muy similar al promedio existente de 0,40 mm, 0,85 para corte mixto, 0,76 para corte radial, y 0,74 para corte tangencial informados por Steele *et al.* (1992) y Nájera-Luna *et al.* (2006) para la misma máquina y similar grupo de maderas. En general, la variación del espesor entre piezas aserradas se atribuye al ineficiente funcionamiento del sistema de la calibración del ancho / espesor de corte de las piezas de madera en la máquina (Steele *et al.* 1992). Los resultados de esta investigación (cuadro 3) muestran una tendencia creciente de este parámetro (SD_B) al aumentar el diámetro del trozo aserrado, y la interacción entre este último y la velocidad de avance.

Las diferencias significativas identificadas por el Análisis de Varianza indican una significativa influencia del diámetro del trozo sobre las 3 desviaciones empleadas. Aunque solo la SD_T de las piezas, y la SD_W son las que capturan la interacción entre el diámetro del trozo y la velocidad de avance. En este sentido, Okai (2006), empleó sierras con incrementos de huelgos laterales de 2 décimas de mm, con sierras de dientes tipo estelita y dientes recalados e idéntica geometría, identificando diferencias significativas en la altura de corte. Sin embargo, las geometrías de los dientes empleados en esta iniciativa no presentaron diferencias significativas sobre las desviaciones estándar

empleadas, ni en forma individual ni en interacción con otras variables (predictores).

En esta investigación se estudiaron los tres tipos de desviación estándar como variable respuesta, de manera de explorar su eficacia para explicar la variación de corte de la madera de Paquí. En virtud de las evidencias obtenidas, la SD_T es una eficiente variable respuesta para estudiar las variaciones de corte, ya que captura con mayor significación estadística el impacto de las variables independientes empleadas sobre la variación dimensional ($<$ valores p). Aunque, las otras dos variables respuestas empleadas (SD_W y SD_B) fueron capaces de capturar variabilidad de las variables independientes también, pero lo hicieron con menor significancia estadística ($>$ valores p).

En virtud de las diferencias significativas identificadas de las variables independientes individuales y en interacción sobre DS_T , se puede recomendar para aserrar trozos de Paquí las siguientes condiciones operacionales:

- i. Si se aserrea solo trozos de diámetro 1, la sierra a emplear es de geometría de diente 1, y la velocidad de avance $\geq 10 \text{ m min}^{-1}$, de manera de garantizar una $SD_T \leq 0,66 \text{ mm}$ (figura 2).
- ii. Si se aserrea trozos de diámetro 2, la sierra a emplear es ahora es de geometría de diente 2, y la velocidad de avance debe ser 15 m min^{-1} , de manera de garantizar un $SB_T \leq 0,98 \text{ mm}$ (figura 1).
- iii. Si se aserrea trozos de diámetro 3, se puede emplear cualquiera de las geometrías de dientes 1 o 2, y la velocidad de avance debe ser de 10 m min^{-1} o inferior, dado que los datos experimentales obtenidos no son concluyentes, y además se contraponen con la teoría del corte. Es decir, sugiriendo que al aumentar la velocidad a 15 m min^{-1} la SD_T sería inferior a 0,84 mm.

Es importante señalar que, para la tercera recomendación los resultados no fueron del todo consistentes como si lo fue con las dos recomendaciones anteriores, dado que, al aumentar la velocidad de avance, y el diámetro del trozo, la SD_T debería aumentar y no disminuir. Sin embargo, Okai (2006), investigó la variación dimensional total en función del huelgo lateral a una velocidad de avance de 13 m min^{-1} , concluyendo que a medida que aumenta el huelgo lateral (hl), la SD_T puede reducirse, llegando a un valor óptimo con un hl de 0,7 mm, con una sierra de banda de espesor 1,3 mm, en madera de *Triplochiton scleroxylon* K. Schum. Lo anterior podría estar avalando esta recomendación, dado que la sierra de geometría de diente 2 empleada en esta investigación poseía un huelgo lateral de 0,81 mm, el cual es un 14 % mayor que el de huelgo lateral de la sierra de geometría de diente 1 (hl = 0,71 mm). En relación a lo anterior y dada esta inconsistencia observada se sugiere realizar estudios posteriores, aumentando el número de repeticiones, que permitan validar la hipótesis que a medida que aumenta la velocidad de avance y diámetro del trozo disminuye la SD_T

CONCLUSIONES

Se exploró e identificaron condiciones de aserrío, para reducir la variación dimensional durante el aserrío de la madera de *H. courbaril*. El diámetro del trozo y la velocidad de avance afectaron en la variación del espesor de las piezas producidas. La geometría del diente no tuvo efecto estadísticamente significativo, probablemente por una selección conservadora de este, o por emplear un volumen de madera o un tiempo de corte insuficiente para evidenciar su efecto. Se debe considerar que la geometría del diente afectará más bien a la calidad del corte y en menor medida a la desviación del corte, si el estado del filo es deficiente entonces afectará significativamente a la desviación de corte, siendo notoria en la SD_w y no en SD_B . En consecuencia, los valores estudiados fueron muy cercanos uno a otro, por ello no se observó efecto en los resultados. Sin embargo, para continuar la exploración de las razones que explican la variación dimensional, el diámetro del trozo se puede igualar a la altura de corte y la velocidad de avance a la mordida, ambos parámetros tienen influencia sobre la desviación de corte, en particular con la SD_w y no en SD_B .

La metodología desarrollada debe continuar siendo aplicada para profundizar la identificación de mejores condiciones de aserrío para la especie *H. courbaril*, esto permitirá reducir la SD_T del espesor de las piezas o la variación del corte, aumentar el rendimiento del aserrío y del valor de la madera aserrada. En este sentido, se propone que investigaciones futuras exploren factores de corte identificados en este estudio en una mayor amplitud y considerar factores no incluidos, dada la dificultad de aplicación en las condiciones de operación del aserradero en el momento que se desarrolló el estudio. En este sentido, candidatos a factores o variables nuevas a explorar podrían ser:

- 1) el contenido de humedad de los trozos, 2) el tiempo de corte, la altura de corte o la distancia cortada con la sierra, 3) uso de geometrías de diente alternativas, y uso de herramientas de corte con dientes con aleaciones de cobalto-cromo o estelita, y uso de alturas de corte segmentadas rigurosamente como predictores, dado que los otros parámetros no son significativos.

Se establecieron las condiciones apropiadas para aserrar la madera de *H. courbaril*, las cuales pueden ser empleadas asegurando las variaciones dimensionales obtenidas en esta investigación.

Para futuras investigaciones se propone: el uso del parámetro Índice de Alimentación de Garganta Gullet Feed Index (GFI), concepto que corresponde a la razón entre el volumen de madera removido por un diente, y el volumen de la garganta del diente, de manera de ayudar a obtener información para definir que variables son críticas, al igual que a dilucidar la inconsistencia encontrada con la teoría de corte en relación al decrecimiento de la SD_T cuando se in-

crementa la velocidad de avance desde 10 a 15 m min⁻¹. Por otro lado, el huelgo lateral empleado en esta investigación excedió los valores clásicos recomendados en sierras huinchas para maderas duras. Por lo tanto, se sugiere ajustarse a las referencias bibliográficas para dicho parámetro en investigaciones futuras. Finalmente, los datos experimentales mostraron una inconsistencia con la teoría del corte, la cual debe ser investigada en profundidad en el futuro con ensayos de aserrío con un mayor número de repeticiones.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, los autores de esta investigación agradecen a la empresa Oquiriqua SRL por facilitar sus instalaciones industriales de producción de madera aserrada para desarrollar este estudio. En segundo lugar, los autores manifiestan su gratitud a la Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra, y la Universidad del Bío-Bío por soportar esta investigación en el marco del programa de Magister en Industrias de la Madera.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

El primer autor contribuyó en el diseño conceptual de la investigación, el procesamiento de los datos y su análisis, discusión y la redacción del artículo. El segundo autor contribuyó en el diseño estadístico del experimento, la ejecución del experimento en terreno toma y depuración de datos. El tercer autor contribuyó en el análisis de resultados, discusión científica, y edición del artículo, y el cuarto autor contribuyó en el análisis estadístico, revisión bibliográfica, y discusión científica del artículo.

REFERENCIAS

- Banco Mundial 2023. Crecimiento del PIB (% anual) – Bolivia. Banco Mundial BIRF- AIF. Consultado 22 ene. 2022. Disponible en <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?locations=BO>
- Brown T. 1986. Lumber size control. Corvallis, Oregon, USA. Oregon State University. 23 p. <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/d504rm277>
- Brown T. 2000. Lumber size control. Part 2: size analysis considerations. Corvallis, Oregon, USA. Extension forest products manufacturing specialist, Oregon State University. 28 p. <https://lumberquality.com/wp-content/uploads/2014/12/Performance-Excellence-EM8730.pdf>
- Cámara Forestal de Bolivia 2022. Estadísticas de exportaciones e importaciones de Madera de Bolivia, primer semestre 2015. Cámara Forestal de Bolivia. Consultado 10 ene. 2022. Disponible en <https://www.cfb.org.bo/noticias/estadisticas/estadisticas-de-exportaciones-e-importaciones-de-madera-de-bolivia-primer-semestre-2015>
- Chundnoff M. 1984. Tropical timbers of the world, Agricultural Handbook. Madison Wisconsin, USA. Forest Products Laboratory. 470 p. <https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=FhUUAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Chundnoff+M.+1984.+Tropical+timbers+of+the+world,+Agricultural+Handbook>

- [cultural+Handbook.+Madison+Wisconsin,+The+United+States+of+America.+Forest+Products+Laboratory.+No.+607.+470+p.&ots=7hFPF6_wqz&sig=pLUH_G_o37nJukJ8esNqEyIk_8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](#)
- Devlieger F, R Baetig 1999. Ingeniería de Aserraderos Fundamentos de Planificación y Gestión. Talca, Chile. Facultad de Ciencias Forestales Universidad de Talca. 139 p. https://www.researchgate.net/profile/Ricardo-Baetig/publication/327601403_Ingenieria_de_Aserraderos_Fundamentos_de_Planificacion_y_Gestion_Facultad_de_Ciencias_Forestales_Universidad_de_Talca_Talca_Chile_1999_Autores_Francis_Devlieger_Ricardo_Baetig/links/5b990fd7458515310580c89c/Ingenieria-de-Aserraderos-Fundamentos-de-Planificacion-y-Gestion-Facultad-de-Ciencias-Forestales-Universidad-de-Talca-Talca-Chile-1999-Autores-Francis-Devlieger-Ricardo-Baetig.pdf
- Hitchcock y Kink. 2015. Top 10 hardest woods in the world. Consultado 21 ene. 2020. Disponible en <https://www.hitchcockandking.co.uk/h-k-news/top-10-hardest-woods-world/>.
- Loehertz S, I Cooz, J Guerrero. 1996. Hardwood sawing technology in five tropical countries. *Forest Products Journal* 46(2): 51-56. <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf1996/loehn96a.pdf>
- López L, R Villalba, M Peña-Claros. 2012. Ritmos de crecimiento diamétrico en los bosques secos tropicales: aportes al manejo sostenible de los bosques de la provincia biogeográfica del Cerrado Boliviano. *Bosque* 33(2): 211-219. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002012000200011>
- Nájera-Luna A, I Rodríguez-Reta, J Méndez-González, J Graciano-Luna, F Rosas-García, F Hernández. 2006. Evaluación de tres sistemas de asierre en *Quercus sideroxylla* Humb & Bomp. de El Salto, Durango. *Ra Ximhai* 2(2): 497-513. DOI: <https://doi.org/10.35197/rx.02.02.2006.11.jn>
- Nájera-Luna A, O Aguirre-Calderón, E Treviño-Garza, J Jiménez-Pérez, E Jurado-Ybarra, J Corral-Rivas, B Vargas-Larreta. 2011. Rendimiento volumétrico y calidad dimensional de la madera aserrada en aserraderos de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(4): 75-89. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i4.610>
- Okai R, S Mitchual, K Frimpong-Mensah. 2006. Optimization techniques for minimizing saw teeth deflection and lumber thickness variation. *Precision Engineering* 30(1): 39-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2005.05.004>
- Okai R. 2006. Optimizing saw teeth deflection and lumber thickness variation through precision engineering approach. Department of Technology education. Kumasi, Ghana. University of Education. Consultado 22 ene. 2021. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.510.2804&rep=rep1&type=pdf>
- Ortiz R, S Martínez, D Vazquez, W Juarez. 2016. Determinación del coeficiente y calidad del aserrijo del género *Pinus* en la región sierra sur, Oaxaca, México. *Colombia Forestal* 19(1): 79-93. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.1.a06>
- Rasmussen H, R Kozak, T Maness. 2004. An analysis of machine-caused lumber shape defects in British Columbia sawmills. *Forest Products Journal* 54(6): 47-56. https://www.academia.edu/12612292/An_analysis_of_machine_caused_lumber_shape_defects_in_British_Columbia_sawmills
- Salguero E, R Quevedo. 2014. Rendimiento de aserrijo de cuatro especies forestales de la Chiquitania. (Documento Técnico 1-2014). Santa Cruz, Bolivia. Universidad Gabriel René Moreno. 32 p. <https://docplayer.es/78667406-Documento-tecnico-rendimiento-de-aserrijo-de-cuatro-especies-forestales-de-la-chiquitania.html>
- Steele P, M Wade, S Bullard, P Araman. 1992. Relative kerf and sawing variation values for some hardwood sawing machines. *Forest Products Journal* 42(2): 33-39. https://scholarworks.sfasu.edu/forestry/130?utm_source=scholarworks.sfasu.edu%2Fforestry%2F130&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages
- Wallace R, R Lillian, E Painter, D Rumiz, J Herrera. 2000. La estacionalidad y el manejo de vida silvestre en los bosques de producción del oriente de Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 8: 65-81. <https://www.researchgate.net/publication/240634143>
- Zavala D. 2003. Efecto del sistema de aserrijo tradicional en las características de la madera de encinos. *Madera y Bosques* 9(2): 29-39. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2003.921284>

Recibido: 19.04.22
Aceptado: 14.12.22