

# Comparative analysis of volumetric yield of sawn timber from two sawmill variants in Chihuahua

## Análisis comparativo del rendimiento volumétrico de la madera aserrada de dos variantes de aserradero en Chihuahua

Joel Rascón-Solano<sup>1</sup>; Oscar A. Aguirre-Calderón<sup>1</sup>; Juan A. Nájera-Luna<sup>2\*</sup>; Jesús M. Olivas-García<sup>3</sup>; Eduardo Alanís-Rodríguez<sup>1</sup>; Javier Jiménez-Pérez<sup>1</sup>; Eduardo Treviño-Garza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional 85, km 145. C. P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de El Salto, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Calle Tecnológico 101 col. La Forestal. C. P. 34942. Durango, México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. km 2.5 carretera Delicias-Rosales. C. P. 33000. Delicias, Chihuahua, México.

\*Corresponding author: [jalnajera@itelsalto.edu.mx](mailto:jalnajera@itelsalto.edu.mx); tel.: +52 618 158 7940.

### Abstract

**Introduction:** Sawmilling is the most important industrial activity in the forestry sector, being the most widely used methodology for the conversion of roundwood.

**Objective:** To statistically compare volumetric yield and percentage distribution of sawn products by comparing two industrial technologies in ejido sawmills in the state of Chihuahua.

**Materials and methods:** Three ejido industries with thin-cutting technology and two with band saws were studied, the sawing coefficient with and without bark was estimated, and volumetric yield of sawn timber according to thickness, width and length was determined. Comparison between industry types was made with Student's T-test.

**Results and discussion:** Yield without bark was different between modern and traditional industries ( $P = 0.007$ ) with sawing coefficients of 60.93 and 53.09 %, respectively. Log diameter and taper had no effect on yield, suggesting that yield is mainly affected by the technological capacity of sawing equipment. The percentage distribution of nominal thickness indicates that 88.90 mm wood shows the most important differences in yield according to the type of industry; however, they are not significant ( $P = 0.345$ ). Furthermore, no significant differences ( $P > 0.05$ ) were found in the nominal widths 101.60 mm, 152.40 mm and 203.20 mm or in the lengths from 2.44 to 4.88 m.

**Conclusion:** The equipment with modern technologies allows the efficient use of raw materials because the sawing coefficient was higher in modern sawmills.

**Keywords:** sawmill; sawing coefficient; thin-cutting; band saw; logs.

### Resumen

**Introducción:** El aserrío es la labor industrial de mayor relevancia en el sector forestal, dado que es la metodología más empleada para la conversión de madera en rollo.

**Objetivo:** Contrastar estadísticamente el rendimiento volumétrico y la distribución porcentual de los productos aserrados, al tomar como factor de comparación dos tecnologías industriales en aserraderos ejidales del estado de Chihuahua.

**Materiales y métodos:** Se estudiaron tres industrias ejidales con tecnología de corte fino y dos con sierra banda, se estimó el coeficiente de aserrado con y sin corteza, y se determinó el rendimiento volumétrico de madera aserrada por grueso, ancho y largo. La comparación entre tipo de industria se hizo con la prueba  $t$  de Student.

**Resultados y discusión:** El rendimiento sin corteza fue diferente entre industrias modernas y tradicionales ( $P = 0.007$ ) con coeficientes de aserrío de 60.93 y 53.09 %, respectivamente. El diámetro y la conicidad de la troza no afectaron el rendimiento, lo cual sugiere que este es afectado principalmente por la capacidad tecnológica de los equipos de asierre. La distribución porcentual de grueso nominal indica que la madera de 88.90 mm presenta las diferencias más importantes de producción en función del tipo de industria; sin embargo, no son significativas ( $P = 0.345$ ). Asimismo, no existen diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) en los anchos nominales 101.60 mm, 152.40 mm y 203.20 mm ni en los largos de 2.44 a 4.88 m.

**Conclusión:** Los equipos con tecnologías modernas permiten el aprovechamiento eficiente de las materias primas, dado que el coeficiente de aserrío fue mayor en los aserraderos modernos.

**Palabras clave:** aserrío; coeficiente de aserrado; corte fino; sierra banda; trocería.

## Introduction

Long before techniques and tools for cutting wood were developed, humans collected food, medicines and other resources that met their basic needs in forests (Sheppard et al., 2020; Tymendorf & Trzciński, 2020), ecosystems where natural resources with economic, cultural and ecological values are still extracted (Cardenas et al., 2018). For this reason, the forestry sector is often economically important in countries gifted with forests (Lundmark et al., 2021).

The sawmill industry is one of the most important economic activities in several regions (Lundmark et al., 2021; Marchesan et al., 2014; Makkonen, 2018; Ortiz et al., 2016). In the north of Mexico, the sawmill process is the industrial labor of greatest relevance in social organizations for processing roundwood (Zavala & Hernández, 2000). Therefore, sawmill practices are the main forestry industrial activity in the state of Chihuahua because it is the most accessible methodology to generate wood products in ejidos, communities and private microenterprises.

Rascón-Solano et al. (2020, 2022) mentioned that the state of Chihuahua has undergone changes in timber processing technologies over the last decade. The industrial technological transition is mainly due to the need to be more competitive and efficient in the processes (Herrera-Medina & Leal-Pulido, 2012).

Currently, some activities are challenged by low-value wood products (Townsend et al., 2019), high wood extraction costs or limitations in operational productivity (Holzfeind et al., 2021) and changes in the utilized and installed capacity of forest industries. Melo et al. (2012) and Rascón-Solano et al. (2022) identified that the timber activity shows problems due to the age of the equipment, little knowledge in the efficient use of the dimensional and quality characteristics of the raw material, and changes in production and consumption patterns (Lauri et al., 2021).

Small and medium-sized enterprises in the sawnwood producing sector play a crucial role in improving the productivity and competitiveness of a region (Lähtinen et al., 2016). For this, the evaluation of efficiency in firms sharing similar production processes is necessary in order to obtain information on relative success based on the choice of optimal sets of technologies (Hetemäki & Hurmekoski, 2016). The objective of this research was to statistically contrast the volumetric yield and percentage distribution of sawn products by taking two industrial technologies as a comparison factor in ejido sawmills in the state of Chihuahua.

## Introducción

Mucho antes de que se desarrollaran técnicas y herramientas para cortar madera, los humanos recolectaban alimentos, medicamentos y otros recursos que cubrían sus necesidades básicas en los bosques (Sheppard et al., 2020; Tymendorf & Trzciński, 2020), ecosistemas de donde aún se extraen recursos naturales con valores económicos, culturales y ecológicos (Cardenas et al., 2018). Por tal motivo, el sector forestal suele ser económicamente importante en los países dotados de bosques (Lundmark et al., 2021).

La industria del aserrío es una de las actividades económicas de mayor importancia en diversas regiones (Lundmark et al., 2021; Marchesan et al., 2014; Makkonen, 2018; Ortiz et al., 2016). En el norte de México, el proceso de aserrado es la labor industrial de mayor relevancia en las organizaciones sociales para procesar la madera en rollo (Zavala & Hernández, 2000). Por tanto, las prácticas de aserrío son la principal actividad industrial forestal del estado de Chihuahua, debido a que es la metodología más accesible para generar productos de madera en los ejidos, comunidades y microempresas privadas.

Rascón-Solano et al. (2020, 2022) mencionan que el estado de Chihuahua ha presentado cambios en las tecnologías de transformación maderable durante la última década. La transición tecnológica industrial se da principalmente por la necesidad de ser más competitivos y eficientes en los procesos (Herrera-Medina & Leal-Pulido, 2012).

Actualmente, algunas actividades se ven desafiadas por los productos de madera de bajo valor (Townsend et al., 2019), costos elevados de extracción de madera o limitaciones en la productividad operativa (Holzfeind et al., 2021) y cambios en la capacidad utilizada e instalada de las industrias forestales. Melo et al. (2012) y Rascón-Solano et al. (2022) identificaron que la actividad maderera presenta problemas en función de la antigüedad de los equipos, poco conocimiento en el aprovechamiento eficiente de las características dimensionales y de calidad de la materia prima, y cambios en los patrones de producción y consumo (Lauri et al., 2021).

Las pequeñas y medianas empresas en el sector productor de madera aserrada tienen un papel crucial en la mejora de la productividad y competitividad de una región (Lähtinen et al., 2016). Para esto, es necesaria la evaluación de la eficiencia en empresas que comparten procesos de producción similares con el fin de obtener información sobre el éxito relativo en función de la elección de conjuntos óptimos de tecnologías (Hetemäki & Hurmekoski, 2016). En tal sentido, el objetivo de esta investigación fue contrastar estadísticamente el

## Materials and Methods

### Study area site

This research was carried out in the physiographic province of the Sierra Madre Occidental in the municipalities of Balleza, Guachochi and Urique in the state of Chihuahua. Data collection was carried out in the first quarter of the year 2021 in band sawmills in the ejidos Cieneguita de la Barranca and Corareachi, as well as in horizontal thin-cut sawmills in the ejidos Aboreachi, Tecorichi and San Carlos.

### Sawmill technical description

The sawmills at the Aboreachi, Tecorichi, and San Carlos ejidos use Wood-Mizer® model MW3500 horizontal-cutting equipment with 635 mm diameter flywheels; the band is made of fine-cut steel, has locking teeth and a  $\frac{3}{4}$  in. tooth pitch; the band is 35 mm wide and 1.07 mm thick. The equipment has a processing platform with leveling rollers, traction toothed rollers, locking jacks and bidirectional chain to rotate the logs. This study considered this type of industry as a modern sawmill. Due to their recent installation, it was necessary to train personnel in the use of raw material, the use of consoles for programming cutting diagrams, and the preparation of raw material for the multiple saws or resawing machines.

The sawmills in the Cieneguita de la Barranca and Corareachi ejidos were installed in the 1970s by Productos Forestales de la Tarahumara (PROFORTARAH). The sawmills have a vertical band saw with 1473 mm diameter flywheels, 203.2 mm wide cutting bands, 17 gauge (1.37 mm), 44.45 mm tooth pitch, 15.88 mm throat depth, and 30° cutting angle. Industries with these characteristics were considered traditional sawmills for this research. Due to their age, the operators' skills have been based mainly on obtaining knowledge and experience in raw material utilization and equipment handling, based on empirical perceptions.

### Sawing yield

The largest and shortest length and diameter (with and without bark) were measured on a sample of at least 90 logs per sawmill. Total volume with bark, timber volume, bark volume and log taper were determined from this information. Log volume (V) was determined with the Smalian formula (Husch et al., 2003):  $V = [(S_0 + S_1) / 2] * L$ ; where,  $S_0$  = larger diameter area,  $S_1$  = smaller diameter area and L = length.

The percentage yield (Y) of sawn wood according to nominal thickness, width and length was determined with the equation  $R = (V_a / V_r) * 100$  (Quirós et al., 2005);

rendimiento volumétrico y la distribución porcentual de los productos aserrados al tomar dos tecnologías industriales como factor de comparación en aserraderos ejidales del estado de Chihuahua.

## Materiales y métodos

### Localización del área de estudio

La investigación se realizó en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental en los municipios de Balleza, Guachochi y Urique en el estado de Chihuahua. La toma de datos se efectuó durante el primer trimestre del año 2021 en aserraderos de sierra banda de los ejidos Cieneguita de la Barranca y Corareachi, así como en aserraderos horizontales de corte fino de los ejidos Aboreachi, Tecorichi y San Carlos.

### Descripción técnica de los aserraderos

Los aserraderos de los ejidos Aboreachi, Tecorichi y San Carlos poseen equipo Wood-Mizer® modelo MW3500 de corte horizontal con volantes de 635 mm de diámetro; la cinta es de acero de corte fino, cuenta con dientes trabados y un paso de diente de  $\frac{3}{4}$  in, la cinta es de 35 mm de ancho y 1.07 mm de espesor. Los equipos cuentan con una plataforma de transformación con rodillos de nivelación, rodillos dentados traccionados, gatos de bloqueo y cadena bidireccional para girar los troncos. En el presente estudio se consideró este tipo de industrias como aserraderos modernos. Debido a su reciente instalación fue necesaria la capacitación del personal en temas de aprovechamiento de la materia prima, manejo de las consolas para programación de diagramas de corte y habilitado de materia prima para las sierras múltiples o reaserradoras.

Por su parte, los aserraderos de los ejidos Cieneguita de la Barranca y Corareachi se instalaron en la década de 1970 por Productos Forestales de la Tarahumara (PROFORTARAH). Los aserraderos cuentan con una sierra banda vertical con volantes de 1 473 mm de diámetro, cintas de corte de 203.2 mm de ancho, calibre 17 (1.37 mm), paso de diente de 44.45 mm, profundidad de garganta de 15.88 mm y 30° de ángulo de corte. Las industrias con tales características se consideraron aserraderos tradicionales para esta investigación. Debido a la antigüedad de estos, las habilidades de los operarios se han basado principalmente en la obtención de conocimiento y experiencia sobre el aprovechamiento de la materia prima y manejo del equipo, a base de percepciones empíricas.

### Rendimiento de aserrado

La longitud y el diámetro (con y sin corteza) mayor y menor se midieron en una muestra de al menos 90 trozas por aserradero. Con dicha información se

where,  $V_a$  = volume of boards according to nominal thickness, width and length ( $m^3$ ) and  $V_r$  = volume of roundwood without bark ( $m^3$  r).

### Timber size

The most popular timber sizes are: 22.23, 31.75 and 38.10 mm (7/8 in, 5/4 in and 6/4 in, respectively) plus reinforcement; for nominal thicknesses of 22.23 mm, the reinforcement used is 3.17 mm (1/8 in) and, from 31.75 mm onwards, the reinforcement is 6.36 mm (1/4 in). Also, 88.90 x 88.90 mm (3 1/2 in x 3 1/2 in) poles are produced. Wood widths range from 101.60 to 304.80 mm (4 in to 12 in), plus 12.70 mm (1/2 in) reinforcement. Piece lengths range from 1219.20 to 4876.80 mm (4 ft to 16 ft), plus 50.80 mm (2 in) reinforcement. The volume of each piece ( $V$ ,  $m^3$ ) was estimated with the expression  $V = t * w * l$ ; where,  $t$  = thickness (m),  $w$  = width (m) and  $l$  = length (m).

### Statistical Analysis

The smallest diameter without bark and taper category of logs in the five sawmills were evaluated by Duncan's multiple comparisons test ( $P = 0.05$ ). Statistical differences in log to timber conversion ratio and volumetric yield of thickness, width and length between industry types were identified by Student's t-test ( $P = 0.05$ ). The statistical package IBM-SPSS version 25 (IBM Corp., 2017) was used for the development of information analysis and determination of results.

## Results

### Description of raw material

The categories of smallest diameter without bark among sawmills show significant differences ( $P=0.0000$ ) in a sample of 486 pine logs entering the sawmilling process. The sawmill owned by the Tecorichi ejido included logs with smaller diameters (28.34 cm) in the sawmilling process; the rest of the ejidos had logs with larger diameters very similar to each other (Cieneguita de la Barranca [31.25 cm], Corareachi [31.97 cm], San Carlos [33.81 cm] and Aboreachi [36.20 cm]). Table 1 shows the estimated values of raw material for each of the industries evaluated.

Regarding integrated raw material, Table 2 indicates significant differences ( $P = 0.0001$ ) in mean log diameter among sawmills; however, between type of technology involved in the process, the differences were not significant ( $P = 0.0842$ ).

Table 3 shows that sawmills in ejidos San Carlos and Corareachi had logs with lower average taper, 0.80 and 0.91  $cm \cdot m^{-1}$ , respectively. This results in

determinó el volumen total con corteza, volumen de madera, volumen de corteza y conicidad del tronco. El volumen del tronco ( $V$ ) se determinó con la fórmula de Smalian (Husch et al., 2003):  $V = [(S_0 + S_1) / 2] * L$ ; donde,  $S_0$  = superficie de diámetro mayor,  $S_1$  = superficie del diámetro menor y  $L$  = longitud.

El rendimiento porcentual ( $R$ ) de madera aserrada por grueso, ancho y largo nominales se determinó con la ecuación  $R = (V_a / V_r) * 100$  (Quirós et al., 2005); donde,  $V_a$  = volumen de las tablas por grueso, ancho y largo nominal ( $m^3$ ) y  $V_r$  = volumen de madera en rollo sin corteza ( $m^3$  r).

### Dimensionado de la madera

Los gruesos de la madera que se producen con mayor frecuencia son: 22.23, 31.75 y 38.10 mm (7/8 in, 5/4 in y 6/4 in, respectivamente) más refuerzo; para los gruesos nominales de 22.23 mm, el refuerzo empleado es de 3.17 mm (1/8 in) y, a partir de 31.75 mm, el refuerzo es de 6.36 mm (1/4 in). También se producen polines de 88.90 x 88.90 mm (3 1/2 in x 3 1/2 in). Los anchos de la madera varían de 101.60 a 304.80 mm (4 in a 12 in), más un refuerzo de 12.70 mm (1/2 in). Los largos de las piezas oscilan de 1 219.20 a 4 876.80 mm (4 ft a 16 ft), más un refuerzo de 50.80 mm (2 in). El volumen de cada pieza ( $V$ ,  $m^3$ ) se estimó con la expresión  $V = t * w * l$ ; donde,  $t$  = grueso (m),  $w$  = ancho (m) y  $l$  = longitud (m).

### Análisis estadístico

El diámetro menor sin corteza y la categoría de conicidad de las trozas en los cinco aserraderos se evaluaron mediante la prueba de comparaciones múltiples de Duncan ( $P = 0.05$ ). Las diferencias estadísticas en el coeficiente de conversión de madera en rollo a madera aserrada y el rendimiento volumétrico de grueso, ancho y largo, entre tipos de industria, se identificaron mediante prueba de contraste t de Student ( $P = 0.05$ ). El paquete estadístico IBM-SPSS versión 25 (IBM Corp., 2017) se empleó para el desarrollo de los análisis de información y determinación de resultados.

## Resultados

### Descripción de la materia prima

Las categorías de diámetro menor sin corteza entre aserraderos presentan diferencias significativas ( $P = 0.0000$ ) en una muestra de 486 troncos de pino ingresados al proceso de aserrado. El aserradero propiedad del ejido Tecorichi integró trozas de menor dimensión (28.34 cm) en el proceso de aserrío; el resto de los ejidos tuvieron trozas con diámetros mayores muy semejantes entre sí (Cieneguita de la Barranca [31.25 cm], Corareachi [31.97 cm], San Carlos [33.81 cm]



significant differences compared to the other sawmills ( $P = 0.0000$ ); however, the log taper has similar values in the comparison between industry types ( $P = 0.6620$ ).

### Sawing coefficient

The modern sawmills considered in this research processed 156.19 m<sup>3</sup>r (cubic meter in logs) with bark or 138.00 m<sup>3</sup>r without bark that generated 83.72 m<sup>3</sup> of saw timber. The average sawing coefficient with bark corresponds to 53.63 %, and without bark, the yield increases to 60.93 (influence of bark 7.55 %); therefore, considering these yields and that 1 m<sup>3</sup>r = 424 BF, it is possible to achieve 227.27 and 257.23 board feet (BF), respectively, when processing 1 m<sup>3</sup>r of pine.

On the other hand, traditional sawmills generated 51.60 m<sup>3</sup> of sawn timber, resulting from processing

y Aboreachi [36.20 cm]). El Cuadro 1 indica los valores estimados de la materia prima para cada una de las industrias evaluadas.

En cuanto a la materia prima integrada, el Cuadro 2 indica que existen diferencias significativas ( $P = 0.0001$ ) en el diámetro medio de las trozas entre aserraderos; sin embargo, entre tipo de tecnología involucrada en el proceso, las diferencias no fueron significativas ( $P = 0.0842$ ).

El Cuadro 3 muestra que los aserraderos de los ejidos San Carlos y Corareachi tuvieron trozas con conicidad promedio más baja, 0.80 y 0.91 cm·m<sup>-1</sup>, respectivamente. Esto deriva en diferencias significativas en comparación con los otros aserraderos ( $P = 0.0000$ ); sin embargo, la conicidad de la trocería presenta valores similares en la comparación entre tipo de industria ( $P = 0.6620$ ).

**Table 1. Characteristics of raw material in five sawmills in the state of Chihuahua, Mexico.**

**Cuadro 1. Características de la materia prima en cinco aserraderos del estado de Chihuahua, México.**

Sawmill / Aserradero	Logs (n) / Trozas (n)	Sampling error (%) / Error muestral(%)	Minimum diameter with bark (cm) / Diámetro mínimo con corteza (cm)	Taper (cm·m <sup>-1</sup> ) / Conicidad (cm·m <sup>-1</sup> )	Total volume (m <sup>3</sup> r) / Volumen total (m <sup>3</sup> r)
Aboreachi	102	9.70	36.20 ± 6.23	1.26 ± 0.69	53.90
Tecorichi	95	10.06	28.34 ± 6.85	1.28 ± 0.60	45.79
San Carlos	91	10.27	33.81 ± 9.71	0.79 ± 0.55	56.50
Corareachi	94	10.11	31.97 ± 7.32	0.90 ± 0.63	51.06
Cieneguita	104	9.61	31.25 ± 6.19	1.38 ± 0.80	59.27

Mean values ± standard deviation.

Valores medios ± desviación estándar.

**Table 2. Comparison of categories of smallest diameter without bark in logs from five sawmills with different industrial technology in Chihuahua.**

**Cuadro 2. Contraste de categorías de diámetro menor sin corteza en trozas de cinco aserraderos con distinta tecnología industrial en Chihuahua.**

Sawmill / Aserradero	Treatment / Tratamiento	Logs (n) / Trozas (n)	Diámetro mínimo sin corteza / Minimum diameter without bark (cm)	Medians / Medianas	P-value / Valor P
Aboreachi	1	102	31.32 ± 5.49 a	30	0.0001
Corareachi	3	94	32.13 ± 7.46 abd	30	
Cieneguita	2	104	31.73 ± 5.98 ad	30	
Tecorichi	5	96	28.13 ± 6.85 c	25	
San Carlos	4	91	33.79 ± 9.81 b	35	
Modern/Moderna	1	289	31.04 ± 7.84 a	30	0.0842
Traditional/Tradicional	2	198	31.92 ± 6.71 a	30	

Mean values ± standard deviation with a common letter are not significantly different among sawmills (Duncan's multiple comparison  $P > 0.05$ ) and between industry types (Student's  $t$   $P > 0.05$ ).

Valores medios ± desviación estándar con una letra común no son significativamente diferentes entre aserraderos (comparación múltiple de Duncan  $P > 0.05$ ) y entre tipos de industria ( $t$  de Student  $P > 0.05$ ).

**Table 3. Comparison of taper categories in logs from five sawmills with different industrial technology in Chihuahua.****Cuadro 3. Contraste de categorías de conicidad en trozas de cinco aserraderos con distinta tecnología industrial en Chihuahua.**

Sawmill/Aserradero	Treatment/ Tratamiento	Logs (n)/ Trozas (n)	Taper (cm·m <sup>-1</sup> )/ Conicidad (cm·m <sup>-1</sup> )	Medians / Medianas	P-value / Valor P
Aboreachi	1	102	1.25 ± 0.64 a	1	0.0000
Tecorichi	2	96	1.29 ± 0.61 ab	1	
Cieneguita	5	104	1.38 ± 0.83 ab	1	
San Carlos	3	91	0.80 ± 0.55 c	1	
Corareachi	4	94	0.91 ± 0.65 c	1	
Modern/Moderna	1	289	1.12 ± 0.64 a	1	0.6620
Traditional/Tradicional	2	198	1.16 ± 0.79 a	1	

Mean values ± standard deviation with a common letter are not significantly different among sawmills (Duncan's multiple comparison  $P > 0.05$ ) and between industry types (Student's  $t$   $P > 0.05$ ).

Valores medios ± desviación estándar con una letra común no son significativamente diferentes entre aserraderos (comparación múltiple de Duncan  $P > 0.05$ ) y entre tipos de industria ( $t$  de Student  $P > 0.05$ ).

110.33 m<sup>3</sup>r with bark or 97.09 m<sup>3</sup>r without bark. The average sawing coefficient without bark was 53.09 %; according to the influence of bark (6.36 %), a yield with bark of 46.73 % was determined.

The Student's  $t$  test showed highly significant differences when comparing transformation coefficients with bark ( $P = 0.0006$ ) and without bark ( $P = 0.0074$ ) between both types of industry. Finally, the estimated bark percentage had no significant differences ( $P = 0.4415$ ).

### Yield per nominal thickness

Figure 1a shows that sawing production in modern industries is concentrated in the nominal thickness of 7/8 in (22.23 mm) with a mean and standard deviation of  $57.05 \pm 25.45$  % of the total volume sawn, followed by 5/4 in (31.75 mm) with  $21.39 \pm 18.63$  %. The 6/4 in (38.1 mm) size represents a production of  $9.67 \pm 4.18$  % and 3 1/2 in (88.90 mm) poles occupy  $11.89 \pm 6.01$  % of the sawn volume. On the other hand, the traditional industries mainly produce nominal thickness of 7/8 in with an average of  $39.33 \pm 5.38$  %, followed by 6/4 in which represents  $23.59 \pm 26.30$  %. The 5/4 in size represents  $15.15 \pm 16.89$  % and the 3 1/2 in logs correspond to  $21.93 \pm 14.78$  % of the total volume sawn (Figure 1b).

### Yield per nominal width

According to Figure 2a, in modern industries, the production per nominal width of 4 in (101.60 mm), 6 in (152.40 mm) and 8 in (203.20 mm) dominates with a volumetric yield of 83.83 % altogether, while the nominal widths of 10 in (254.00 mm) and 12 in (304.80 mm) only represent 16.17 % as a whole. Similarly, on average, the traditional industries produce

### Coefficiente de aprovechamiento

Los aserraderos modernos considerados en esta investigación procesaron 156.19 m<sup>3</sup>r (metro cúbico rollo) con corteza o 138.00 m<sup>3</sup>r sin corteza que generaron 83.72 m<sup>3</sup> de madera aserrada. El coeficiente de aserrado promedio con corteza corresponde al 53.63 %, y sin corteza, el rendimiento incrementa a 60.93 (influencia de la corteza 7.55 %); por tanto, considerando estos rendimientos y que 1 m<sup>3</sup>r = 424 pt, es posible obtener 227.27 y 257.23 pies tabla (pt), respectivamente, al transformar 1 m<sup>3</sup>r de pino.

Por su parte, los aserraderos tradicionales generaron 51.60 m<sup>3</sup> de madera aserrada, producto de transformar 110.33 m<sup>3</sup>r con corteza o 97.09 m<sup>3</sup>r sin corteza. El coeficiente de aprovechamiento sin corteza promedio fue 53.09 %; de acuerdo con la influencia de corteza (6.36 %), se determinó un rendimiento con corteza de 46.73 %.

La prueba de contraste de  $t$  de Student reflejó diferencias altamente significativas en la comparación de coeficientes de transformación con corteza ( $P = 0.0006$ ) y sin corteza ( $P = 0.0074$ ) entre ambos tipos de industria. Por último, el porcentaje de corteza estimado no presentó diferencias significativas ( $P = 0.4415$ ).

### Rendimiento por grueso nominal

La Figura 1a muestra que la producción del aserrío en las industrias modernas se concentra en el grueso nominal de 7/8 in (22.23 mm) con una media y desviación estándar de  $57.05 \pm 25.45$  % del volumen total aserrado, seguido por 5/4 in (31.75 mm) con  $21.39 \pm 18.63$  %. La medida de 6/4 in (38.1 mm) representa una producción del  $9.67 \pm 4.18$  % y los polines de 3 1/2 in (88.90 mm) ocupan  $11.89 \pm 6.01$  % del volumen aserrado. Por su parte, las industrias

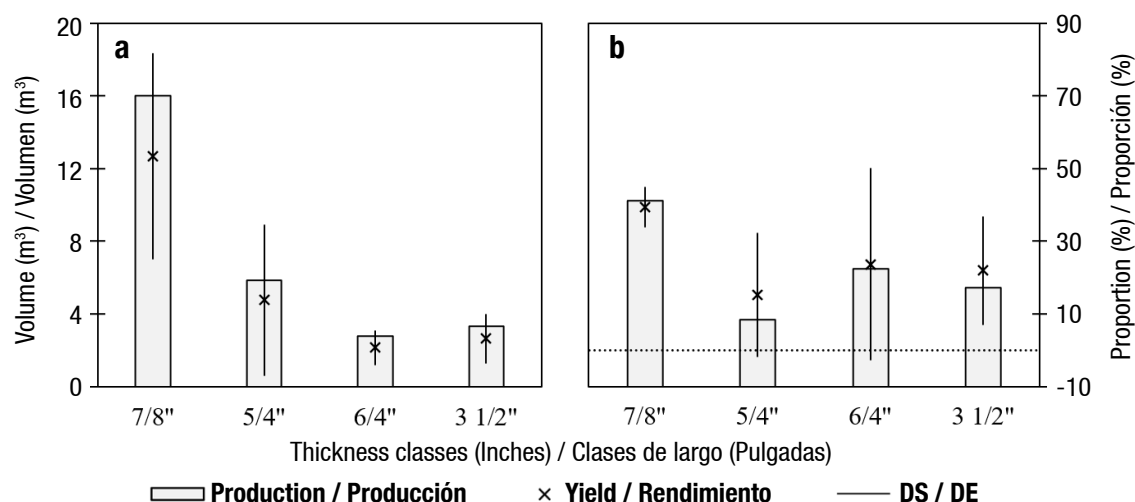


Figure 1. Mean volumetric frequency in the production of nominal thickness, proportion (yield) of products and standard deviation (SD) in modern sawmills (a) and traditional sawmills (b). Student's t-tests show no significant differences in the yield of nominal thickness of 7/8 in ( $P = 0.424$ ), 5/4 in ( $P = 0.731$ ), 6/4 in ( $P = 0.594$ ) and 3 1/2 in ( $P = 0.345$ ) between sawmill types.

Figura 1. Frecuencia volumétrica media en la producción de grueso nominal, proporción (rendimiento) de los productos y desviación estándar (DE) en aserraderos modernos (a) y aserraderos tradicionales (b). Las pruebas t de Student indican que no existen diferencias significativas en el rendimiento del grueso nominal de 7/8 in ( $P = 0.424$ ), 5/4 in ( $P = 0.731$ ), 6/4 in ( $P = 0.594$ ) y 3 1/2 in ( $P = 0.345$ ) entre tipos de aserraderos.

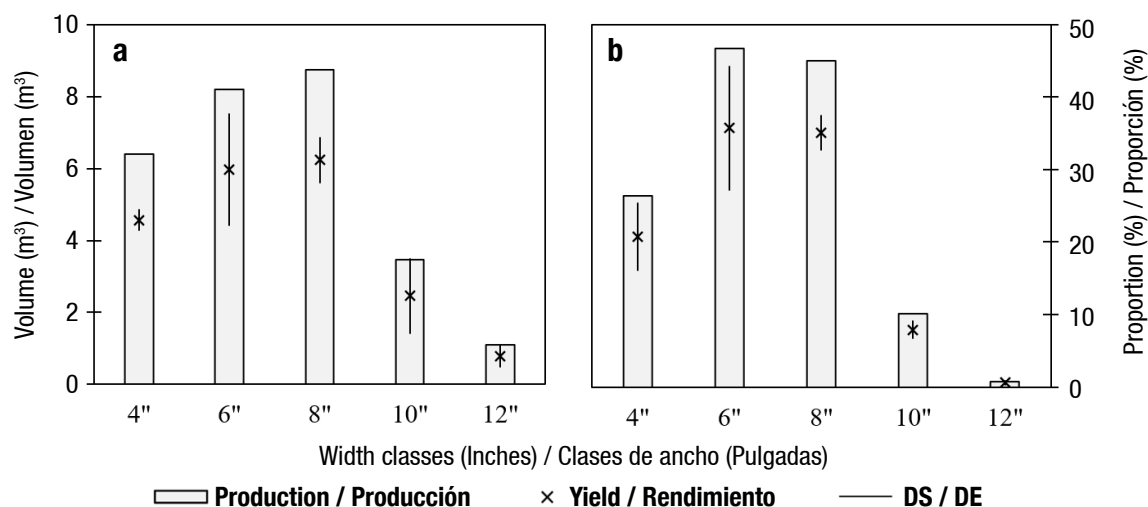


Figure 2. Mean volumetric frequency in nominal width production, proportion (yield) of products and standard deviation (SD) in modern sawmills (a) and traditional sawmills (b). Student's t-test indicates no significant differences in yield per nominal widths of 4 in ( $P = 0.484$ ), 6 in ( $P = 0.477$ ), 8 in ( $P = 0.237$ ) and 10 in ( $P = 0.344$ ) between sawmill types; 12 in timber had a  $P$  value = 0.057.

Figura 2. Frecuencia volumétrica media en la producción de ancho nominal, proporción (rendimiento) de los productos y desviación estándar (DE) en aserraderos modernos (a) y aserraderos tradicionales (b). La prueba t de Student indica que no existen diferencias significativas en el rendimiento por anchos nominales de 4 in ( $P = 0.484$ ), 6 in ( $P = 0.477$ ), 8 in ( $P = 0.237$ ) y 10 in ( $P = 0.344$ ) entre tipos de aserraderos; la madera de 12 in obtuvo un valor  $P = 0.057$ .

mainly the nominal widths of 4 in, 6 in and 8 in with a yield of 91.53 % (Figure 2b) and the nominal widths of 10 in and 12 in generated an overall yield of 8.47 %.

### Yield per nominal length

For the distribution of volumetric yield per nominal length, modern sawmills had an average yield of  $77.08 \pm 2.32$  % for 16 ft (4876.80 mm); dimensions from 4 to 14 ft (1219.20 to 4267.2 mm) accounted for only 22.92 % of the total yield (Figure 3a). The estimated average production by traditional sawmills (Figure 3b) has similar values; the 16 ft length represents  $73.63 \pm 4.03$  % of the total yield and the rest of the dimensions add up to 26.37 %.

### Discussion

Deficiencies in the sawing process and production efficiency are determined by evaluating the sawing coefficient and volumetric yield (Borz et al., 2021; Stragliotto et al., 2019), which refers to the relationship between the volume of roundwood and the resulting volume of products (Rascón-Solano et al., 2022).

When analyzing the dimensional characteristics of the raw material, Zavala and Hernández (2000) found no increase in the sawing yield coefficient according to the diameter and quality of the logs. Nájera Luna et al. (2012) conclude that sawtimber yield is not

tradicionales producen principalmente grueso nominal de 7/8 in con una media de  $39.33 \pm 5.38$  %, seguido por 6/4 in que representa  $23.59 \pm 26.30$  %. La medida de 5/4 in representa  $15.15 \pm 16.89$  % y los polines de 3 1/2 in corresponden al  $21.93 \pm 14.78$  % del volumen total aserrado (Figura 1b).

### Rendimiento por ancho nominal

De acuerdo con la Figura 2a, en las industrias modernas sobresale la producción por ancho nominal de 4 in (101.60 mm), 6 in (152.40 mm) y 8 in (203.20 mm) con rendimiento volumétrico de 83.83 % en conjunto; en tanto que los anchos nominales de 10 in (254.00 mm) y 12 in (304.80 mm) solo representan en conjunto 16.17 %. De igual manera, en promedio, las industrias tradicionales producen principalmente los anchos nominales de 4 in, 6 in y 8 in con rendimiento del 91.53 % (Figura 2b) y los anchos nominales de 10 in y 12 in generaron un rendimiento en conjunto de 8.47 %.

### Rendimiento por largo nominal

Respecto a la distribución del rendimiento volumétrico por largo nominal, los aserraderos modernos presentaron una producción media del  $77.08 \pm 2.32$  % en la madera de 16 ft (4 876.80 mm); las dimensiones de 4 a 14 ft (1 219.20 a 4 267.2 mm) solo representaron 22.92 % del rendimiento total (Figura 3a). El promedio estimado de producción por parte de los aserraderos

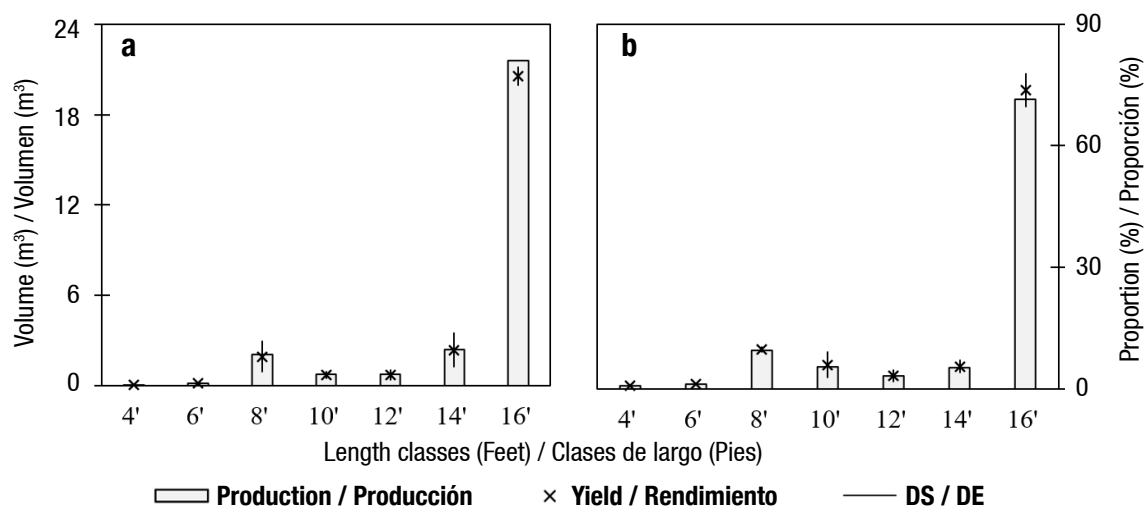


Figure 3. Mean volumetric frequency in nominal length production, proportion (yield) of products and standard deviation (SD) in modern sawmills (a) and traditional sawmills (b). Student's t-test indicates significant differences in yield for nominal lengths of 4 ft ( $P = 0.038$ ) and 6 ft ( $P = 0.045$ ), but not for lengths of 8 to 16 ft ( $P > 0.05$ ) among sawmills.

Figura 3. Frecuencia volumétrica media en la producción de largo nominal, proporción (rendimiento) de los productos y desviación estándar (DE) en aserraderos modernos (a) y aserraderos tradicionales (b). La prueba t de Student indica que existieron diferencias significativas en el rendimiento por largos nominales de 4 ft ( $P = 0.038$ ) y 6 ft ( $P = 0.045$ ), pero no en los largos de 8 a 16 ft ( $P > 0.05$ ) entre aserraderos.



affected by diameter, but it is affected by log length and taper in two private sawmills in El Salto, Durango, Mexico. Grigsby et al. (2015) reported that dimensional characteristics and high log quality result in better economic benefits. Murara et al. (2005) evaluated two sawmilling systems and found that yield is affected by the sawmilling system according to the diameter of the log; in the traditional system they found no increase in yield with increasing diameter, but yield improved with an optimized system as the diameter of the logs increased. Meanwhile, Vaughan et al. (2018) and Fekiač et al. (2021) indicate that the continuous deterioration of raw material in the field can affect the potential yield and quality of forest products; also, Monserud et al. (2004) mention that twisted or curved logs have potentially lower yields.

Some studies agree with that described in this study. When considering a  $P$  value = 0.0842 in the log diameter contrast, the results indicate that this is not a factor that affects the sawtimber yield coefficient; furthermore, taper had no influence on the sawing yield between the type of technology used, with a  $P$  value = 0.6620 in the contrast performed. These results suggest that the sawing coefficient is mainly influenced by the technological capacity of the sawing equipment. Modern sawmills are designed primarily to program the cutting diagrams and enable resaws that generate timber of greater thicknesses (5/4 in and 6/4 in). To achieve this, it is necessary for the operator to have constant training, which results in a better knowledge of raw materials, processes and products. Band sawmills lack the technology to program the cuts; also, due to the traditional use of this old equipment, operators have transmitted their knowledge based on empirical perceptions, related to the dimensional and physical characteristics of the raw material, but without receiving formal training.

Concerning the yield per band sawmill (traditional in this study), Gatto et al. (2005) evaluated micro and small sawmills with low industrialization in Brazil and found that many technological aspects are unknown or neglected, which causes poor management of raw material, low yield and low quality of the final products. Ortiz et al. (2016) carried out a comprehensive study in a traditional sawmill in Oaxaca and calculated a yield coefficient of 44.18 % when considering volume with bark and 48.27 % without bark; they also indicated a direct increase in the sawing coefficient according to the diameter of the logs and higher yield at lower taper. The results of this analysis indicate that it is possible to produce up to 257.23 BF, when the estimation is based on processing 1 m<sup>3</sup>r without bark in modern sawmills, and 227.27 pts when processing 1 m<sup>3</sup>r without bark in traditional sawmills. On the other hand, it was found that the volume of bark has no influence on

tradicionales (Figura 3b) presenta valores similares; el largo de 16 ft representa  $73.63 \pm 4.03$  % del rendimiento total y el resto de las dimensiones suman 26.37 %.

## Discusión

Las carencias en el proceso de aserrado y la eficiencia productiva se determinan mediante la evaluación del coeficiente de aserrado y rendimiento volumétrico (Borz et al., 2021; Stragliotto et al., 2019), lo cual se refiere a la relación entre el volumen de madera en rollo y el volumen resultante de productos (Rascón-Solano et al., 2022).

Al analizar las características dimensionales de la materia prima, Zavala y Hernández (2000) mencionan que no encontraron incremento del coeficiente de aserrío en función del diámetro y calidad de las trozas. Nájera Luna et al. (2012) concluyen que el rendimiento de la madera aserrada no es afectado por el diámetro, pero sí por el largo y conicidad de las trozas en dos aserraderos privados de El Salto, Durango, México. Grigsby et al. (2015) mencionan que las características dimensionales y alta calidad de la troza resultan en mejores beneficios económicos. Por su parte, Murara et al. (2005) evaluaron dos sistemas de aserrío y comprobaron que el rendimiento es afectado por el sistema de aserrío en función del diámetro de la trocería; en el sistema tradicional no observaron aumento del rendimiento con el incremento del diámetro, pero el rendimiento mejoró con un sistema optimizado a medida que el diámetro de las trozas fue mayor. Por su parte, Vaughan et al. (2018) y Fekiač et al. (2021) indican que el deterioro continuo de la materia prima en campo puede afectar el rendimiento potencial y la calidad de los productos forestales; asimismo, Monserud et al. (2004) mencionan que los troncos torcidos o curvos tienen rendimiento potencialmente menor.

Algunas investigaciones coinciden con lo descrito en este trabajo. Al considerar un valor  $P$  = 0.0842 en el contraste de diámetro de la troza, los resultados indican que este no es un factor que afecte el coeficiente de aprovechamiento de madera aserrada; asimismo, la conicidad no influyó en el rendimiento de aserrío entre tipo de tecnología empleada, con un valor  $P$  = 0.6620 en el contraste realizado. Estos resultados sugieren que el coeficiente de aserrado se ve influenciado principalmente por la capacidad tecnológica de los equipos de asierre. Los aserraderos modernos están diseñados principalmente para programar los diagramas de corte y habilitar reaserradoras que generan madera de espesores mayores (5/4 in y 6/4 in). Para lograr lo anterior, es necesario que el operador cuente con capacitación constante, lo que resulta en un mejor conocimiento de las materias primas, procesos y productos. Por su parte, los aserraderos de sierra banda carecen de tecnología que

the sawing yield of the two variants of industries analyzed; the bark influences 7.55 % on the yield in modern sawmills and 6.36 % in traditional sawmills, representing no statistically significant differences ( $P > 0.05$ ). This information leads to the conclusion that the characteristics of the raw material have no effect on sawmill productivity.

Regarding thin-cutting sawmills (modern in this study), Kehinde et al. (2010) evaluated 170 small (portable sawmills) and medium-scale sawmills (similar to those in this study) in Nigeria and found a log conversion rate of approximately 58.00 %; however, the results indicate that medium-scale sawmills are more efficient than small-scale sawmills. In Finland, Hyytiäinen et al. (2011) estimated a sawing coefficient of 61 to 66 % in the production of private medium-scale sawmills, which represents heterogeneous productivity; moreover, they indicate that it is possible to increase production by integrating the use of current processing technology. Borz et al. (2021) evaluated the sawing coefficient of Norway spruce (*Picea abies* Lam. [Limk.]) and silver fir (*Abies alba* Mill.) in a small-scale sawmill in Romania and considered the processing of 26 m<sup>3</sup>r, resulting in a sawnwood volume of about 18 m<sup>3</sup>. This represented a sawing yield that varied widely between 38.80 and 95.00 % per log with an average of 69.00 %. In this study, the modern sawmills achieved an average yield of 60.93 %, a value that is in a medium range when considering the studies used to compare this result.

The research previously described is consistent with that described in this study, except for the study developed by Borz et al. (2021), whose equipment exceeds productivity of the modern industries evaluated by approximately 8.0 %. According to these studies, raw material, operators' knowledge, sawing equipment capacity and technology used are variables affecting productivity and efficiency of the industries.

In this study, the differences in volumetric production by each sawmill are mainly attributed to the demands of the market where they market their products; however, volumetric difference had no effect on the percentage contrasts of production between the type of industrial technology used, since the standard deviation of the thicknesses generated allowed improving the contrast adjustment in the statistical estimations made. In the case of the yield per nominal thickness, regarding the conversion coefficient (60.93 %), modern industries concentrate their production in the 7/8 in (22.23 mm) thickness with an average of 34.76 %, followed by 5/4 in (31.75 mm) with 13.00 % and the 6/4 in (38.1 mm) size represents 5.89 %. Similarly, traditional industries with a sawing coefficient of 53.09 % produce, mainly, nominal thickness of 7/8 in with an average of 20.88 %, followed by 6/4 in with 12.52 % and 5/4 in with 8.04 % of

permite programar los cortes; asimismo, debido al uso tradicional de estos equipos antiguos, los operadores han transmitido su conocimiento basado en percepciones empíricas, relacionadas con las características dimensionales y físicas de la materia prima, pero sin recibir capacitaciones formales.

En cuanto al rendimiento por aserraderos de sierra banda (tradicionales en este estudio), Gatto et al. (2005) evaluaron micro y pequeños aserraderos con baja industrialización en Brasil y encontraron que muchos aspectos tecnológicos se desconocen o se descuidan, lo que ocasiona un mal manejo de la materia prima, bajo rendimiento y baja calidad de los productos finales. Por su parte, Ortiz et al. (2016) realizaron un estudio amplio en un aserradero tradicional en Oaxaca y calcularon un coeficiente de aprovechamiento de 44.18 % al considerar volumen con corteza y 48.27 % sin corteza; asimismo, indicaron incremento directo del coeficiente de aserrío en función del diámetro de las trozas y mayor rendimiento en menor conicidad. Los resultados del presente análisis indican que es posible producir hasta 257.23 pt, al realizar la estimación en función de transformar 1 m<sup>3</sup> r sin corteza en los aserraderos modernos y 227.27 pt al transformar 1 m<sup>3</sup> r sin considerar la corteza en los aserraderos tradicionales. Por otra parte, se encontró que el volumen de corteza no influye en el rendimiento de aserrado de las dos variantes de industrias analizadas; en este sentido, la corteza influye 7.55 % sobre el rendimiento en los aserraderos modernos y 6.36 % en los aserraderos tradicionales, lo cual no representa diferencias estadísticamente significativas ( $P > 0.05$ ). Esta información permite concluir que las características de la materia prima no afectan la productividad de los aserraderos.

En cuanto a los aserraderos de corte fino (modernos en este estudio), Kehinde et al. (2010) evaluaron 170 aserraderos de pequeña (aserraderos portátiles) y mediana escala (similares a los del presente estudio) en Nigeria y encontraron una tasa de conversión de trozas de aproximadamente 58.00 %; sin embargo, los resultados indican que los aserraderos de mediana escala son más eficientes que los de pequeña escala. En Finlandia, Hyytiäinen et al. (2011) estimaron un coeficiente de aserrío de 61 a 66 % en la producción de los aserraderos privados de mediana escala, lo que representa una productividad heterogénea; adicionalmente, indican que es posible aumentar la producción al integrar el uso de la tecnología actual de transformación. Borz et al. (2021) evaluaron el aprovechamiento de abeto noruego (*Picea abies* Lam. [Limk.]) y abeto plateado (*Abies alba* Mill.) en un aserradero de pequeña escala en Rumania y consideraron la transformación de 26 m<sup>3</sup>r, lo que resultó en un volumen de madera aserrada de aproximadamente 18 m<sup>3</sup>. Esto representó un rendimiento de aserrado que varió ampliamente entre 38.80 y 95.00 % por troza

the total. In this regard, the percentage distribution of products is similar to the results found by Nájera Luna et al. (2011), who observed that sawnwood production in the El Salto region is concentrated in the nominal thickness of 7/8 in with 22.40 % of the total volume sawn, followed by 5/4 in with 13.90 % and 6/4 in with 7.50 %; these values vary according to a sawing coefficient of 57.50 %.

Regarding width yield, Ortiz et al. (2016) found that the 12 in (304.80 mm) width excels with 54.18 %, while the nominal widths of 6 in (152.40 mm), 8 in (203.20 mm) and 10 in (254.00 mm) account for 40.30 %, and the 4 in (101.6 mm) only 5.50 %. The report of Ortiz et al. (2016) differs from the results, as the production in this study was mainly concentrated on the lower dimension widths. In modern industries, in the volumetric yield per nominal width, the production of 4 in, 6 in and 8 in stood out with 83.83 % and the nominal widths of 10 in and 12 in only represented 16.17 % as a whole. Similarly, traditional industries mainly produce nominal widths of 4 in, 6 in and 8 in with a production of 91.53 %. The distribution of these products is mainly related to the average log diameter ( $\approx 30$  cm) and market requirements. However, in this study, calculations indicate that the yield of 12 in (304.8 mm) timber ranges from  $3.89 \pm 1.46$  % to  $0.59 \pm 0.29$  %; in such a context, there were evident percentage differences in the production of this nominal width. Therefore, it is suggested that the calculated statistical difference may be affected by the low proportion of this product.

Regarding the distribution of volumetric yield by nominal length, Nájera Luna et al. (2011) found that the length of 16 ft (4.87 m) had the highest value with 27.20 % of the total volume sawn, regarding a yield of 57.50 %. In this study, it was determined that, in 16 ft timber, modern sawmills had an average yield of 46.96 % regarding a yield of 60.93 %, while traditional sawmills (yield 53.09 %) had 39.09 % of the total yield. This is because most of the raw material sourced in the north of Mexico corresponds to 16 ft in length plus reinforcement.

## Conclusions

The sawing coefficient varies significantly when comparing the two sawmilling technologies used. Traditional and modern sawmills have adequate yields (53 to 60 %); however, the use of equipment with modern technologies allows efficient use of the available raw material. In this study, log diameter and taper had no effect on the sawtimber yield coefficient between types of technology used, suggesting that the sawing yield is mainly influenced by the technological capacity of the sawing equipment.

con un promedio de 69.00 %. En el presente estudio, los aserraderos modernos alcanzaron un rendimiento medio del 60.93 %, valor que se encuentra en un rango medio al considerar los estudios con los que se contrastó dicho resultado.

Las investigaciones descritas previamente son consistentes con lo descrito en el presente estudio, a excepción del trabajo desarrollado por Borz et al. (2021), cuyo equipo supera el rendimiento de las industrias modernas evaluadas con 8.0 % aproximadamente. De acuerdo con estos trabajos, la materia prima, el conocimiento de los operarios, la capacidad de los equipos de aserrado y la tecnología empleada son variables que influyen en la productividad y eficiencia de las industrias.

En este estudio, las diferencias en la producción volumétrica por cada aserradero se atribuyen principalmente a las demandas del mercado donde comercializan sus productos; sin embargo, la diferencia volumétrica no genera efecto en los contrastes porcentuales de producción entre el tipo de tecnología industrial empleada, ya que la desviación estándar de los gruesos generados permitió mejorar el ajuste de contraste en las estimaciones estadísticas realizadas. En el caso del rendimiento por grueso nominal, respecto al coeficiente de conversión (60.93 %), las industrias modernas concentran su producción en el grueso de 7/8 in (22.23 mm) con una media de 34.76 %, seguido por 5/4 in (31.75 mm) con 13.00 % y la medida de 6/4 in (38.1 mm) representa 5.89 %. De forma similar, las industrias tradicionales con un coeficiente de aserrado del 53.09 % producen, principalmente, grueso nominal de 7/8 in con una media de 20.88 %, seguido por 6/4 in con 12.52 % y 5/4 in con 8.04 % del total. En este sentido, la distribución porcentual de los productos es similar a los resultados encontrados por Nájera Luna et al. (2011), quienes observaron que la producción de madera aserrada en la región de El Salto se concentra en el grueso nominal de 7/8 in con 22.40 % del volumen total aserrado, seguido por el de 5/4 in con 13.90 % y 6/4 in con 7.50 %; estos valores varían en función de un coeficiente de aserrado del 57.50 %.

En cuanto al rendimiento en ancho, Ortiz et al. (2016) encontraron que el ancho de 12 in (304.80 mm) sobresale con 54.18 %, mientras que los anchos nominales de 6 in (152.40 mm), 8 in (203.20 mm) y 10 in (254.00 mm) representan 40.30 %, y el de 4 in (101.6 mm) solo 5.50 %. El reporte de Ortiz et al. (2016) difiere de los resultados, ya que la producción del presente estudio se concentró principalmente en los anchos de dimensiones inferiores. En las industrias modernas, en el rendimiento volumétrico por ancho nominal sobresalió la producción de 4 in, 6 in y 8 in con 83.83 % y los anchos nominales



## Acknowledgments

The authors would like to thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for funding the first author's PhD studies in Natural Resource Management. Furthermore, the authors would like to thank the anonymous reviewers whose suggestions helped to improve the quality of this paper.

## End of English version

## References / Referencias

- Borz, S. A., Oghnoum, M., Marcu, M. V., Lorincz, A., & Proto, A. R. (2021). Performance of small-scale sawmilling operations: a case study on time consumption, productivity and main ergonomics for a manually driven bandsaw. *Forests*, 12(6), 810. <https://doi.org/10.3390/f12060810>
- Cardenas, E., Orellana, L. H., Konstantinidis, K. T., & Mohn, W. W. (2018). Effects of timber harvesting on the genetic potential for carbon and nitrogen cycling in five North American forest ecozones. *Scientific Reports*, 8(1), 3142. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21197-0>
- Fekiač, J., Gáborík, J., & Vojtkuliak, M. (2021). Properties of plywood made from perforated veneers. *Forests*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/f12121709>
- Gatto, D. A., Santini, E. J., Haselein, C. R., Durlo, M. A., & Calegari, L. (2005). Produção madeireira na região da Quarta Colônia de Imigração Italiana do Rio Grande do Sul. *Ciência Florestal*, 15(2), 177–189. <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/1835/1099>
- Grigsby, W. J., Carpenter, J. E. P., Thumm, A., Sargent, R., & Hati, N. (2015). Labile extractable urea-formaldehyde resin components from medium-density fiberboard\*. *Forest Products Journal*, 65(1-2), 15–19. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00030>
- Herrera-Medina, J. F., & Leal-Pulido, R. O. (2012). Generación de patrones de corte a partir de la programación matemática para la planificación táctica-operativa de aserríos madereros. *Colombia Forestal*, 15(2), 227–245. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.2.a07>
- Hetemäki, L., & Hurmekoski, E. (2016). Forest products markets under change: Review and research implications. *Current Forestry Reports*, 2(3), 177–188. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0042-z>
- Holzfeind, T., Kanzian, C., & Gronalt, M. (2021). Challenging agent-based simulation for forest operations to optimize the European cable yarding and transport supply chain. *International Journal of Forest Engineering*, 32(1), 77–90. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1850074>
- Husch, B., Beers, T. W., & Kershaw, J. A. (2003). *Forest mensuration* (4.<sup>a</sup> ed.). John Wiley and Sons, Inc.
- Hyytiäinen, A., Viitanen, J., & Mutanen, A. (2011). Production efficiency of independent finnish sawmills in the 2000's. *Baltic Forestry*, 17(2), 280–287. [https://www.researchgate.net/publication/289576778\\_Production\\_Efficiency\\_of\\_Independent\\_Finnish\\_Sawmills\\_in\\_the\\_2000's](https://www.researchgate.net/publication/289576778_Production_Efficiency_of_Independent_Finnish_Sawmills_in_the_2000's)

de 10 in y 12 in solo representaron 16.17 % en conjunto. De igual manera, las industrias tradicionales producen, principalmente, los anchos nominales de 4 in, 6 in y 8 in con una producción de 91.53 %. La distribución de estos productos está relacionada principalmente con el diámetro medio de la trocería ( $\approx 30$  cm) y con los requerimientos del mercado. No obstante, en este estudio, los cálculos indican que el rendimiento de la madera de 12 in (304.8 mm) oscila entre  $3.89 \pm 1.46$  % y  $0.59 \pm 0.29$  %; en tal contexto, se presentaron diferencias porcentuales evidentes en la producción de este ancho nominal. Por tanto, se plantea que la diferencia estadística calculada puede verse afectada por la baja proporción de este producto.

Con respecto a la distribución del rendimiento volumétrico por largo nominal, Nájera Luna et al. (2011) encontraron que el largo de 16 ft (4.87 m) tuvo el valor más alto con 27.20 % del volumen total aserrado, respecto a un rendimiento del 57.50 %. En la presente investigación se determinó que, en la madera de 16 ft, los aserraderos modernos tuvieron una producción media del 46.96 % con respecto a un rendimiento de 60.93 %, mientras que los aserraderos tradicionales (rendimiento 53.09 %) tuvieron 39.09 % del rendimiento total. Esto se debe a que la mayor parte de la materia prima que se abastece en el norte de México corresponde a 16 ft de longitud más refuerzo.

## Conclusiones

El coeficiente de aserrío varía significativamente al tomar como factor de comparación las dos tecnologías de aserrado empleadas. Los aserraderos tradicionales y modernos cuentan con rendimientos adecuados (53 a 60 %); sin embargo, el empleo de equipos con tecnologías modernas permite aprovechar las materias primas disponibles eficientemente. En este estudio, el diámetro y la conicidad de la troza no afectaron el coeficiente de aprovechamiento de madera aserrada entre tipo de tecnología empleada, lo cual sugiere que el rendimiento de aserrado se ve influenciado principalmente por la capacidad tecnológica de los equipos de asierre.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento de los estudios de Doctorado en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales del primer autor. Adicionalmente, los autores agradecen a los revisores anónimos que con sus sugerencias contribuyeron a mejorar la calidad de este artículo.

## Fin de la versión en español

- IBM Corp. (2017). IBM SPSS Statistics para Windows, versión 25.0. Armonk, Nueva York: IBM Corp.
- Kehinde, A. L., Awoyemi, T. T., Omonona, B. T., & Akande, J. A. (2010). Technical efficiency of sawnwood production in Ondo and Osun states, Nigeria. *Journal of Forest Economics*, 16(1), 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2009.04.001>
- Lähtinen, K., Toppinen, A., Mikkilä, M., Toivio, M., & Suur-Uski, O. (2016). Corporate responsibility reporting in promoting social license to operate in forestry and sawmilling industries. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 89(5), 525–541. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv055>
- Lauri, P., Forsell, N., Di Fulvio, F., Snäll, T., & Havlik, P. (2021). Material substitution between coniferous, non-coniferous and recycled biomass – Impacts on forest industry raw material use and regional competitiveness. *Forest Policy and Economics*, 132, 102588. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102588>
- Lundmark, R., Lundgren, T., Olofsson, E., & Zhou, W. (2021). Meeting challenges in forestry: Improving performance and competitiveness. *Forests*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/f12020208>
- Makkonen, M. (2018). Stakeholder perspectives on the business potential of digitalization in the wood products industry. *BioProducts Business*, 3(6), 63–80. <https://doi.org/10.22382/bpb-2018-006>
- Marchesan, R., Rocha, M., Silva, J. B., & Klitzke, R. J. (2014). Eficiência técnica no desdobro principal de toras de três espécies tropicais. *Floresta*, 44(4), 629–636. <http://doi.org/10.5380/rf.v44i4.26537>
- Melo, L., Silva, C., Lopes, K., Brito, P., & Santos, I. (2012). Resíduos de serraria no estado do Pará: Caracterização, quantificação e utilização adequada. *Floresta e Ambiente*, 19(1), 113–116. <http://doi.org/10.4322/floram.2012.012>
- Monserud, R. A., Parry, D. L., & Todoroki, C. L. (2004). Recovery from simulated sawn logs with sweep. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 34(2), 190–205. [https://www.scionresearch.com/\\_data/assets/pdf\\_file/0003/59160/05\\_Monserud\\_Todoroki.pdf](https://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0003/59160/05_Monserud_Todoroki.pdf)
- Murara, M. I., Pereira, M., & Timofeiczky, R. (2005). Rendimiento em madeira serrada de *Pinus taeda* para duas metodologias de desdobro. *Floresta*, 35(3), 473–483. <http://doi.org/10.5380/rf.v35i3.5186>
- Nájera Luna, J. A., Adame Villanueva, G. H., Méndez González, J., Vargas Larreta, B., Cruz Cobos, F., Hernández, F. J., & Aguirre Calderón, C. G. (2012). Rendimiento de la madera aserrada en dos aserraderos privados de El Salto, Durango, México. *Investigación y Ciencia*, (55) 11–23. <https://investigacion.uaa.mx/RevistalyC/archivo/revista55/Articulo%202.pdf>
- Nájera Luna, J. A., Aguirre Treviño, O. A., Treviño Garza, E., Jiménez Pérez, J., Jurado Ybarra, E., Corral Rivas, J. J., & Vargas Larreta, B. (2011). Rendimiento volumétrico y calidad dimensional de la madera aserrada en aserraderos de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 77–92. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i4.610>
- Ortiz, R., Martínez, S. D., Vázquez, D. E., & Juárez, W. S. (2016). Determinación del coeficiente y calidad de aserrío del género *Pinus* en la región Sierra Sur, Oaxaca, México. *Colombia Forestal*, 19(1), 79–93. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.1.a06>
- Quirós, R., Chinchilla, O., & Gómez, M. (2005). Rendimiento en aserrío y procesamiento primario de madera proveniente de plantaciones forestales. *Agronomía Costarricense: Revista de Ciencias Agrícolas*, 29(2), 7–15. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43629201.pdf>
- Rascón-Solano, J., Aguirre-Calderón, O., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E., & Nájera-Luna, J. (2022). Productividad del abastecimiento e industrialización maderable en el ejido Aboreachi, Guachochi, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71), 133–158. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1142>
- Rascón-Solano, J., Olivas-García, J. M., Kiessling-Davison, C. M., Hernández-Salas, J., & López-Daumas, G. (2020). Incremento de la rentabilidad de la industria forestal en el Ejido Aboreachi, Chihuahua, México. *Custos e @gronegocio Online*, 15(4), 219–249. <http://www.custoseagronegocioonline.com.br/numero4v15/OK%2010%20costos.pdf>
- Sheppard, J. P., Chamberlain, J., Agúndez, D., Bhattacharya, P., Chirwa, P. W., Gontcharov, A., Sagona, W. C. J., Shen, H.-I., Tadesse, W., & Mutke, S. (2020). Sustainable forest management beyond the timber-oriented status quo: Transitioning to co-production of timber and non-wood forest products—a global perspective. *Current Forestry Reports*, 6(1), 26–40. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00107-1>
- Stragliotto, M. C., Melo, J., Costa, A., & Corradi, B. L. (2019). Yield in sawn wood and residue utilization of *Qualea paraensis* ducke and *Erisma uncinatum* warm. *Floresta*, 49(2), 257–266. <http://doi.org/10.5380/rf.v49i2.57284>
- Townsend, L., Dodson, E., Anderson, N., Worley-Hood, G., & Goodburn, J. (2019). Harvesting forest biomass in the US southern Rocky Mountains: cost and production rates of five ground-based forest operations. *International Journal of Forest Engineering*, 30(2), 163–172. <https://doi.org/10.1080/14942119.2018.1563851>
- Tymendorf, Ł., & Trzcinski, G. (2020). Multi-factorial load analysis of pine sawlogs in transport to sawmill. *Forests*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/f11040366>
- Vaughan, D., Mackes, K., & Webb, J. B. (2018). Time-since-death and its effect on wood from beetle-killed Engelmann spruce in southwest Colorado. *Forest Science*, 64(3), 316–323. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxx017>
- Zavala, D., & Hernández, R. (2000). Análisis del rendimiento y utilidad del proceso de aserrío de trocería de pino. *Madera y Bosques*, 6(2), 41–55. <https://doi.org/10.21829/myb.2000.621374>