

Cuantificación y caracterización de los residuos del proceso de aserrío en una fábrica de tarimas en El Salto, Durango, México

Quantification and characterization of residues from the sawmill process in a pallet factory of El Salto, Durango, Mexico

Javier Ezequiel Medrano-Guerrero*, Pedro Meza-López*, Francisco
Javier Hernández*, Juan Abel Nájera-Luna*✉

Medrano-Guerrero, J. E., Meza-López, P., Hernández, F. J., & Nájera-Luna, J. A.
(2022). Cuantificación y caracterización de los residuos del proceso de aserrío
en una fábrica de tarimas en El Salto, Durango, México. *Investigación y
Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, e3599,
<https://doi.org/10.33064/iycuaa2022863599>

RESUMEN

Durante el procesamiento industrial de la madera se genera una gran cantidad de residuos cuyo destino final es la incineración o confinamiento, lo que implica serios riesgos a la salud de las personas y al paisaje. Para abordar esta problemática y promover la recuperación de una parte de esos residuos y canalizarlos de nuevo a la cadena productiva se dio seguimiento al asierre de 30 trozas de pino para producción de tarimas y realizar su cuantificación y caracterización tipológica y morfológica. Se encontró que por cada m³ de madera en rollo que se procesa es posible generar 25% de residuos en forma de capotes, tiras y recortes con capacidad de liberar 187.40 kgCO_{2e} a la atmósfera al quemarlos. La caracterización de los residuos permitió considerar seriamente su recuperación y la posibilidad de reincorporarlos a la economía circular de la madera.

Palabras clave: cadena productiva forestal; economía circular; morfología; recuperación; rendimiento; tipología.

ABSTRACT

During the industrial processing of wood, a large amount of waste is generated whose final destination is incineration or confinement, which implies serious risks to the health of people and the landscape. To address this problem and promote the recovery of part of these residues and channel them back to the production chain, the sawing of 30 pine logs to produce pallets was monitored and quantification and typological and morphological

Recibido: 13 de marzo de 2022, Aceptado: 2 de agosto de 2022

*Programa de Ingeniería Forestal, Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de El Salto (TecNM-ITES).
Calle Tecnológico No. 101, Colonia La Forestal, C. P. 34942, El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México. Correo
electrónico: ezequielmedrano1500@gmail.com; petermezza@itelsalto.edu.mx; fcojhernan@yahoo.com.mx;
jalnajera@itelsalto.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5817-559X>; <https://orcid.org/0000-0003-4963-0874>;
<https://orcid.org/0000-0003-0480-624X>; <https://orcid.org/0000-0002-3989-3323>

✉ Autor para correspondencia

characterization was carried out. It was found that for every m³ of roundwood that is processed, it is possible to obtain 25% of residues in the form of capes, strips, and cuttings with the capacity to release 187.40 kgCO_{2e} into the atmosphere when burned. The characterization of the waste made it possible to seriously consider its recovery and the possibility of reincorporating it into the circular economy of wood

Keywords: forest production chain; circular economy; morphology; recovery; yield; typology.

INTRODUCCIÓN

El esquema económico lineal de extracción, procesamiento, utilización y eliminación de productos y materiales de los actuales sistemas de producción, así como la escasez de recursos naturales y la generación de residuos sin una adecuada disposición final son una preocupación mundial, pues este esquema no garantiza una sostenibilidad de modo indefinido (Araújo et al., 2019; Espaliat Canu, 2017). La industria de la madera no es ajena a esta condición, pues genera grandes volúmenes de residuos durante las diversas fases del procesamiento (Lesme Jaén, Oliva Ruiz, Palacios Barrera, & Lesmes Jaén, 2006) y la mayoría de esos residuos terminan convertidos en agentes de contaminación ambiental, pues su disposición final es generalmente la combustión (Manzanares, Velázquez, & Guyat, 2007).

En México se generan anualmente alrededor de 2.8 millones de metros cúbicos de desechos forestales, principalmente en forma de aserrín, leñas, virutas y cortezas (Fregoso-Madueño et al., 2017). Estos pueden representar 40 a 48% del volumen total rollo que ingresa a un aserradero (Haro Pacheco et al., 2015; Nájera-Luna et al., 2011). Así que aprovechar esos residuos constituye una necesidad para disminuir los impactos ambientales que afectan a la población y al paisaje.

La mayoría de las empresas forestales de la región de El Salto, Durango, México en las que se generan residuos del procesamiento industrial de la madera no disponen en forma adecuada de esos materiales, por lo que es común observar la combustión y confinamiento de aserrín, virutas, recortes, tiras y capote; sin embargo, existen alternativas para canalizarlos como materia prima para producir eco productos que alarguen el ciclo de vida de la madera como artesanías y pequeños objetos de madera (POM), pues en su elaboración suelen usarse materiales con huella de carbono reducida por su origen local, lo que perfectamente puede asociarse a los principios de sostenibilidad de la economía circular que impacte positivamente en los aspectos social, ambiental, económico y cultural y que al mismo tiempo se fortalezca la identidad de las comunidades locales (Doubek Lopes, 2009). Debido a la gran cantidad de residuos que genera el proceso de aserrío y los problemas ambientales que genera su disposición final, a la fecha no existen iniciativas para abordar esta problemática desde otra perspectiva en la región forestal de El Salto, Durango.

El presente trabajo tiene como propósito cuantificar, caracterizar tipológica y morfológicamente, así como estimar las emisiones biogénicas por la combustión de los diferentes residuos generados durante el procesamiento de la madera en la industria de tarimas y cajas que absorbe 25% de la producción forestal en rollo de esta región; partiendo del supuesto de que es posible destinar parte de estos residuos a emprendimientos artesanales en función a las características tipológicas y morfológicas antes que optar por su incineración, fomentando así su reutilización y manejo adecuado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) 1008 "El Salto", localizada al suroeste del estado de Durango en el sistema montañoso denominado Sierra Madre Occidental (Pro Floresta, S. C., 2008), en las coordenadas geográficas: 23° 47' 00" Norte y 105° 22' 00" Oeste, en un aserradero de tarimas y cajas ubicada en el Instituto Tecnológico de El Salto (figura 1).



Figura 1. Izquierda: aserradero de tarimas evaluado.
Derecha: disposición final de los residuos del aserrío.
Fotografías de Javier Ezequiel Medrano-Guerrero.

A partir del seguimiento de una muestra de 30 trozas de pino que se distribuyeron en tres categorías diamétricas (15-25, >25-35 y >35 cm) con 10 trozas por categoría cuyos diámetros oscilaron entre 16 y 49 cm con un largo promedio de 1.24 m, aserradas para elaborar las piezas de armado en tarimas, se cuantificó el volumen de residuos generados. El error de muestreo corresponde a 15%. En primera instancia el volumen de las trozas se obtuvo mediante la fórmula de Smalian (Husch, Beers, & Kershaw, 2003).

$$V = \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L$$

donde:

V= Volumen de la troza (m³)

A₁= Área de la sección menor de la troza (m²)

A₂= Área de la sección mayor de la troza (m²)

L = Largo de la troza (m)

Para cuantificar los residuos, primero se colectó cada pieza descartada del proceso de asierre de cada troza y se clasificaron en tres categorías: residuos de capote, tira y recorte (figura 2).



Figura 2. Izquierda: cubicación de trozas. Centro: asierre de trozas. Derecha: residuos de capote, tira y recorte.
Fotografías de Javier Ezequiel Medrano-Guerrero.

En este estudio no se consideró el volumen de aserrín debido a la complejidad operativa que representa su colecta y cuantificación; a este respecto, Haro Pacheco et al. (2015) determinaron que el aserrín representa 10% del volumen que entra al proceso de aserrío en la industria de tarimas y cajas de la región de El Salto, Durango, México. El volumen de los residuos se obtuvo mediante el método de desplazamiento de líquidos, para lo cual se utilizó un xilómetro calibrado (figura 3).



Figura 3. Izquierda: preparación de los residuos por tipo. Centro: cubicación de los residuos mediante el método de desplazamiento. Derecha: toma de lecturas del xilómetro para estimar el volumen por desplazamiento.
Fotografías de Javier Ezequiel Medrano-Guerrero.

Con los valores del volumen de los residuos y de las trozas se procedió a determinar el rendimiento mediante la siguiente relación (Quirós, Chinchilla, & Gómez, 2005):

$$Rrf = \frac{Vrf}{Vmr} \times 100$$

donde:

Rrf = Rendimiento de los residuos forestales (%)

Vrf = Volumen de los residuos forestales (capote, tira y recorte) resultantes del aserrío (m^3)

Vmr = Volumen inicial de madera en rollo (m^3)

La caracterización tipológica de los residuos se llevó a cabo en función de la frecuencia de cada tipo de tira, capote y recorte; donde las tiras se consideraron a todo aquel residuo proveniente de los extremos laterales de las piezas de madera aserrada que se han dimensionado en ancho regularmente de forma rectangular y triangular; los capotes son los residuos laterales que tienen una cara libre de corteza y la otra con corteza; la forma de su sección generalmente es rectangular o semicircular; mientras que los recortes son las secciones terminales de piezas y resultan del proceso de dimensionado en largo de la madera (Gysling Caselli, 2020) (figura 4).



Figura 4. Tipo de residuos generados en el aserrío. Izquierda: tiras. Centro: capotes. Derecha: recortes. Fotografías de Javier Ezequiel Medrano-Guerrero.

La caracterización morfológica de los residuos se realizó identificando la semejanza del residuo en función a la forma, ya sea rectangular, semicircular, cuadrangular y triangular para cada una de las tiras, capotes y recortes a los que se les midió el grueso, ancho y largo.

Por otra parte, la estimación del contenido de carbono se realizó a partir de la relación entre la biomasa seca por un factor de conversión de biomasa a carbono igual a 0.5 para las especies maderables de la región de El Salto, Durango obtenidos por Vargas-Larreta et al. (2017). Para convertir el volumen de los residuos a biomasa seca total se utilizó la información sobre la densidad básica de la madera para las especies de pino de la región de El Salto, Durango, realizada por Honorato Salazar y Meraz Alemán (2002) que promedió $421 \text{ kg}/m^3$ y la relación sugerida por Soto Sandoval, Aguirre, Méndez y Páez (2000):

$$BT = VT * Db$$

donde:

BT= Biomasa seca total (kg)

VT = Volumen total de residuos (m³)

Db= Densidad básica de la madera de pino (kg/m³)

y para determinar las emisiones biogénicas por la combustión de los residuos se utilizó el contenido de energía de la madera mediante el poder calorífico (0.0156 GJ·kg⁻¹) y la densidad básica de la madera. Posteriormente se aplicaron factores de emisión documentados nivel 1 del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006):

$$E_{biogénicas}^{CO_2} = CE_{residuos} * FE_i^{CO_2}$$

$$E_{biogénicas}^{N_2O} = CE_{residuos} * FE_i^{N_2O}$$

$$E_{biogénicas}^{CH_4} = CE_{residuos} * FE_i^{CH_4}$$

$$E_{biogénicas}^{CO_2e} = \left[\left(E_{biogénicas}^{CO_2} \right) + \left(E_{biogénicas}^{N_2O} \right) (PCG_{N_2O}) + \left(E_{biogénicas}^{CH_4} \right) (PCG_{CH_4}) \right]$$

donde:

$E_{biogénicas}^{CO_2}$ = emisiones de dióxido de carbono derivadas de la combustión de residuos (kg)

$E_{biogénicas}^{N_2O}$ = emisiones de óxido nitroso derivadas de la combustión de residuos (kg)

$E_{biogénicas}^{CH_4}$ = emisiones de metano derivadas de la combustión de residuos (kg)

$CE_{residuos}$ = contenido energético de los residuos (GJ)

FE_i = factor de emisión de la combustión de desechos de madera ($FE^{CO_2} = 112 \text{ kg}^{CO_2} \cdot \text{GJ}^{-1}$, $FE^{N_2O} = 0.0040 \text{ kg}^{N_2O} \cdot \text{GJ}^{-1}$, $FE^{CH_4} = 0.0300 \text{ kg}^{CH_4} \cdot \text{GJ}^{-1}$)

PCG = potencial de calentamiento global del dióxido de carbono (1 CO₂e), metano (28 CO₂e) y óxido nitroso (265 CO₂e).

$E_{biogénicas}^{CO_2e}$ = emisiones biogénicas equivalentes provenientes de la combustión de residuos (kgCO₂e)

Los potenciales del calentamiento global (PCG) fueron tomados del quinto reporte de evaluación (AR5) del IPCC (2015).

Procesamiento estadístico

Con los datos del volumen de las trozas y los tipos de residuos generados en el aserrío y a partir de las frecuencias de tiras, capotes y recortes, así como de las formas y dimensiones adoptadas por cada tipo de residuo, se elaboraron tablas con estadísticos de tendencia central y de dispersión para cada una de estas variables. Adicionalmente, los tipos de residuos (capote, tiras, recortes y total) de cada categoría diamétrica (15-25, >25-35 y >35 cm) se sometieron a pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk modificado, quien mostró que estas variables no provienen de una población con distribución normal ($p < 0.0070$). Para identificar diferencias estadísticas significativas con respecto a la cantidad de residuos generados por categoría diamétrica de las trozas aserradas se realizaron análisis de varianza no paramétrico y pruebas de comparación de rangos de la mediana de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$) utilizando el programa InfoStat versión 2018 (Di Rienzo et al., 2018).

RESULTADOS

Volumen de los residuos del proceso de aserrío

De los 3.0457 m³ rollo con corteza que ingresaron al proceso de aserrío se generaron 0.7630 m³ de residuos o leñas, el mayor porcentaje corresponde a las tiras (13%), seguido por el capote (8%) y finalmente los recortes (4%). El volumen total fue de 25% sin considerar el aserrín, lo que indica que por cada metro cúbico de madera en rollo que entra al proceso de elaboración de tarima se generan 0.2506 m³ de residuos, que corresponden a 106.22 pies tabla (pt) [un metro cúbico de madera equivale a 424 pt] que se distribuyen en 0.1314 m³ de tiras (55.70 pt), 0.0824 m³ de capote (34.94 pt) y 0.0367 m³ de recortes (15.58 pt) (tabla 1).

Tabla 1
Generalidades de las trozas y residuos generados en el proceso de aserrío

| Variable | n | Suma | Media | D.E. | Mínimo | Máximo |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Largo de la troza (m) | - | - | 1.24 | 0.06 | 1.16 | 1.44 |
| Diámetro de la troza (m) | - | - | 0.30 | 0.09 | 0.16 | 0.49 |
| Volumen de la troza (m ³) | 3.0457 | - | 0.1024 | 0.06 | 0.0239 | 0.24 |
| Volumen de capote (m ³) | 0.2510 | - | 0.0084 | 0.0068 | 0.00 | 0.03 |
| Capote (%) | - | - | 8 | 5 | 1.00 | 20 |
| Volumen de tiras (m ³) | 30 | 0.4001 | 0.0134 | 0.0073 | 0.0021 | 0.026 |
| Tiras (%) | - | - | 13 | 4 | 9 | 25 |
| Volumen de recortes (m ³) | 0.1119 | - | 0.0038 | 0.0019 | 0.001 | 0.008 |
| Recortes (%) | - | - | 4 | 2 | 1 | 8 |
| Total de residuos (m ³) | - | 0.7630 | 0.0256 | 0.0137 | 0.0044 | 0.047 |
| Total de residuos (%) | - | - | 25 | 6 | 18 | 46 |

Nota: Elaboración propia.

Generación de residuos por categoría diamétrica de las trozas aserradas

Los resultados del análisis de varianza indican que la cantidad de residuos generados es diferente en al menos una de las categorías diamétricas ($p < 0.05$), donde es posible

observar la tendencia de una disminución en el volumen de residuos promedio conforme aumenta la categoría diamétrica de las trozas (tabla 2).

Tabla 2
Tipos de residuos por categoría diamétrica de las trozas

| Categoría diamétrica (cm) | Medias (m ³) | Medianas (m ³) | Promedio de rangos* | Gl | C | H | p |
|--|--------------------------|----------------------------|---------------------|----|---|----|---------|
| Residuos generados totales por categoría diamétrica | | | | | | | |
| 15 a 25 | 0.0100 | 0.0109 | 5.50 a | | | | |
| >25 a 35 | 0.0294 | 0.0249 | 18.00 b | 2 | 1 | 21 | <0.0001 |
| > 35 | 0.0380 | 0.0384 | 23.00 b | | | | |
| Residuos de capote o costeras por categoría diamétrica | | | | | | | |
| 15 a 25 | 0.0027 | 0.0023 | 6.35 a | | | | |
| >25 a 35 | 0.0098 | 0.0078 | 18.60 b | 2 | 1 | 17 | <0.0002 |
| > 35 | 0.0128 | 0.0123 | 21.55 b | | | | |
| Residuos de tiras por categoría diamétrica | | | | | | | |
| 15 a 25 | 0.0052 | 0.0049 | 5.60 a | | | | |
| >25 a 35 | 0.0155 | 0.0143 | 17.40 b | 2 | 1 | 21 | <0.0001 |
| > 35 | 0.0201 | 0.0198 | 23.50 b | | | | |
| Residuos de recortes por categoría diamétrica | | | | | | | |
| 15 a 25 | 0.0021 | 0.0021 | 6.85 a | | | | |
| >25 a 35 | 0.0042 | 0.0040 | 18.10 b | 2 | 1 | 15 | <0.0005 |
| > 35 | 0.0051 | 0.0050 | 21.55 b | | | | |

Nota: *Rangos con la misma letra en común no son significativamente diferente, Kruskal Wallis $\alpha = 0.05$.
Gl: grados de libertad; C: factor de corrección del estadístico por observaciones empatadas; H: estadístico de la prueba no corregido por empates; p: significativo ($p < 0.05$).
Elaboración propia.

Caracterización tipológica y morfológica de los residuos

En el análisis tipológico y morfológico se contabilizaron 724 residuos generados de las 30 trozas. Las dimensiones promedio en grueso van desde 1.24 centímetros en los capotes rectangulares hasta 3.79 cm en las tiras triangulares, donde en este rango se ubicaron 85% de los residuos; mientras que en ancho varían de 4.42 cm en las tiras rectangulares hasta los 9.13 cm en capotes rectangulares, en este rango entraron 79% de los residuos; en cuanto al largo se observaron de 4.78 cm en recortes cuadrados a 119.24 cm en tiras rectangulares, aquí entra 98% de los residuos en ese rango de largo. Pero considerando solo los residuos que contemplen las tres dimensiones mínimas promedio que fueron registradas (1.24 x 4.42 x 4.78 cm) se encontró que 67% de los residuos las reúnen (tabla 3).

Tabla 3
Tipología y morfología de los residuos del proceso de aserrío

| Residuo | Forma | Dimensiones | n | Mediana (cm) | Media (cm) | D.E. (cm) | Mínimo (cm) | Máximo (cm) |
|------------|--------------|-------------|-------|--------------|------------|-----------|-------------|-------------|
| Capote | Rectangular | Grueso | 45 | 1.00 | 1.24 | 0.83 | 0.27 | 3.90 |
| | | Ancho | | 8.60 | 9.13 | 1.94 | 6.50 | 14.40 |
| | | Largo | | 117.00 | 112.18 | 20.54 | 32.60 | 128.70 |
| | Semicircular | Grueso | 84 | 1.80 | 1.97 | 0.92 | 0.71 | 5.80 |
| | | Ancho | | 8.40 | 8.76 | 1.96 | 4.50 | 14.00 |
| | | Largo | | 114.00 | 106.77 | 22.18 | 29.10 | 139.80 |
| Recorte | Cuadrangular | Grueso | 8 | 2.75 | 3.04 | 1.31 | 1.90 | 6.10 |
| | | Ancho | | 3.70 | 4.64 | 1.83 | 3.50 | 7.70 |
| | | Largo | | 3.70 | 4.78 | 1.97 | 3.60 | 8.10 |
| | Rectangular | Grueso | 129 | 2.10 | 2.24 | 1.08 | 0.60 | 6.30 |
| | | Ancho | | 8.20 | 7.54 | 2.21 | 2.10 | 14.20 |
| | | Largo | | 13.50 | 15.6 | 7.24 | 3.80 | 29.50 |
| | Semicircular | Grueso | 214 | 2.45 | 2.64 | 1.36 | 0.60 | 8.60 |
| | | Ancho | | 7.35 | 7.29 | 2.51 | 2.60 | 15.80 |
| | | Largo | | 10.55 | 12.76 | 6.88 | 4.00 | 77.50 |
| | | Grueso | | 2.60 | 3.09 | 2.42 | 0.41 | 7.40 |
| Triangular | Ancho | 7 | 5.30 | 5.86 | 2.04 | 3.70 | 8.60 | |
| | Largo | | 22.00 | 19.24 | 6.30 | 8.00 | 25.80 | |
| Tira | Rectangular | Grueso | 61 | 2.10 | 2.41 | 1.73 | 0.86 | 12.00 |
| | | Ancho | | 4.30 | 4.42 | 1.44 | 1.40 | 7.90 |
| | | Largo | | 122.00 | 119.24 | 17.17 | 51.8 | 143.80 |
| | Triangular | Grueso | 176 | 3.65 | 3.79 | 1.32 | 1.00 | 10.10 |
| | | Ancho | | 5.70 | 5.58 | 2.05 | 1.50 | 17.90 |
| | | Largo | | 121.60 | 117.22 | 19.24 | 12.66 | 143.90 |

Nota: Elaboración propia.

Con respecto a las emisiones biogénicas por la combustión, se encontró que por cada metro cúbico de residuos que son incinerados se liberan en total 187.40 kgCO₂e, de los cuales 184.27 kg corresponden a dióxido de carbono, 1.38 kg a metano y 1.74 kg a óxido nítrico. La tabla 4 muestra el contenido de energía y las emisiones biogénicas por residuo y tipo de gas de efecto invernadero (GEI). La quema de las tiras representa la mayor carga ambiental con 96.63 kgCO₂, mientras que la combustión de capote y recortes emite 60.62 y 27.03 kgCO₂ de manera respectiva. De ahí la importancia de buscar alternativas de reconversión en productos artesanales o POM mediante procesos que no incrementen ni la huella de carbono de los productos maderables obtenidos en las fábricas de cajas y tarimas ni de nuevas alternativas para utilizar dichos residuos.

Tabla 4
Emisiones biogénicas generadas por cada metro cúbico de residuos que son incinerados

| Residuos | Volumen (m ³) | Contenido de energía (GJ) | Emisiones biogénicas | | |
|----------|---------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| | | | kgCO ₂ | kgCH ₄ | kgN ₂ O |
| Tiras | 0.13 | 0.86 | 96.63 | 0.03 | 0.0035 |
| Capotes | 0.08 | 0.54 | 60.62 | 0.02 | 0.0022 |
| Recortes | 0.04 | 0.24 | 27.03 | 0.01 | 0.0010 |

Nota: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

La cantidad de residuos de capote, tira y recortes generados en este estudio (25%) es menor al 39% reportado por Haro Pacheco et al. (2015) para aserraderos de tarimas y cajas de la región de El Salto, Durango, México, lo que indica que por cada metro cúbico de madera en rollo procesado se generan 165 pt de residuos de leñas. Sin embargo, ambos estudios coinciden en que el mayor volumen de residuos corresponde a las tiras y capotes. En Cuba, Velázquez Viera, Manzanares Ayala, Guyat Dupuy y Sánchez Téllez (2006) obtuvieron para el aserrío de madera en *Pinus caribaea* que los residuos generados representan 28% del volumen en rollo que entra al proceso de aserrío, valores compatibles a los encontrados en este trabajo, pero con la diferencia de que el mayor volumen de los residuos corresponde a los capotes o costeras con 23%.

Estas diferencias se deben seguramente a lo mencionado por Alcántara de Cerqueira, Correia Vieira, Magalhães-Barberena, Clímaco-Melo y de Freitas (2012), quienes establecen que la variación de la fracción porcentual que representan los residuos en el aserrío obedece a factores como el tipo de producto a procesar, la maquinaria utilizada, la capacidad de los operarios; así como a las dimensiones y características físicas y anatómicas de las trozas. Biasi y da Rocha (2007) mencionan que teóricamente a una troza completamente cilíndrica le corresponde un rendimiento máximo en madera aserrada de 64% si se removiera solo un bloque cuadrado de la circunferencia de esa troza y que la generación de residuos se compone en términos generales de 7% de corteza, 10% de aserrín y 28% de leñas; esto último es consistente con el resultado obtenido en este estudio.

Mientras mayores irregularidades en diámetro, forma y tamaño presenten las trozas requerirán de un mayor número de intervenciones para obtener piezas con cortes regulares y la proporción de residuos generados será mayor, sobre todo en trozas con diámetros pequeños donde el volumen perdido por capotes y tiras representa un porcentaje mayor en relación al volumen de la troza; pero a medida que aumenta el diámetro esta tendencia se reduce (Manhiça, da Rocha, & Timofeiczuk, 2013); esto concuerda con la tendencia observada en el presente trabajo, donde las trozas de diámetros mayores observaron la menor cantidad de residuos generados durante el proceso de aserrío.

Lo anterior tiene fuertes implicaciones de tipo técnico y económico, ya que por una parte se evidencia la realidad tecnológica de los procesos que se caracterizan por una escasa eficiencia de conversión de la materia prima (Flores-Velázquez, Serrano-Gálvez, Palacio-Muñoz, & Chapela, 2007) y, por otra parte, un bajo rendimiento en productos aserrados es una muestra del reducido nivel de aprovechamiento de la materia prima y,

por consecuencia, la generación de cantidades mayores de residuos, que la mayoría de las veces no tienen utilización dentro de la misma empresa (Barbosa, Pedrazzi, Ferreira, Schneid, & Wille, 2014) y el mercado disponible es como material combustible, donde el precio asignado es casi simbólico, pues de ninguna manera contribuyen a la rentabilidad del proceso.

Dada la naturaleza del proceso de asierre, las formas y tamaños de los residuos de este estudio varían en gran medida, lo que aumenta la heterogeneidad en su tipología y morfología; sin embargo, Brand, de Muñiz, da Silva y Klock (2002) mencionan que estas consideraciones pueden suplirse con la disponibilidad y tipo de producto factible de generar como artesanías y POM, ya que este criterio también determina el potencial de aprovechamiento. Doubek Lopes (2009) menciona que una alternativa para canalizar parte de los residuos del aserrijo consiste en la producción de POM, pues esta actividad presenta una buena factibilidad económica, social y ambiental; ya que a partir de residuos con dimensiones promedio de 4.5 cm de ancho x 4.5 cm de largo x 1 cm de grueso elaboró diferentes prototipos de POM que se probaron y aprobaron en aspectos estéticos y de funcionalidad que permitieron agregar valor a los residuos y ampliar sus posibilidades de utilización.

Las dimensiones descritas por este autor son compatibles con 67% de los residuos que se generaron en este estudio, por lo que esto representa una alternativa interesante para explorar un nicho de innovación y emprendimiento que fomente un manejo adecuado de estos residuos mediante la elaboración de pequeños productos artesanales (Sanmartín Ramón, Zhigue Luna, & Alaña-Castillo, 2017). Finalmente, ante esta perspectiva, Braz, Nutto, Brunsmeier y Silva (2014) señalan que el reuso de los residuos forestales provenientes del procesamiento industrial de la madera puede brindar nuevas oportunidades de emprendimiento dentro del sector forestal, contribuyendo al crecimiento de los ingresos y crear una nueva cadena productiva con valor agregado.

CONCLUSIONES

Durante el proceso de aserrijo de tarimas se genera 25% de residuos en forma de leñas, lo que indica que por cada metro cúbico de madera en rollo que se procesa se genera 0.2506 m³ de residuos que si se incineran pueden liberar 187.40 kgCO₂e. Sin embargo, a pesar de las variadas formas y dimensiones de estos residuos, 67% (0.1679 m³) puede ser recuperado y canalizarlo como materia prima para la elaboración de productos artesanales o pequeños objetos de madera que no requieran de alguna transformación física de estos materiales para asegurar una baja huella de carbono. Con esto se abre una posibilidad de explorar nuevos emprendimientos de producción alternativa que permitan su reutilización antes que su incineración.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango (COCYTED) y al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por el apoyo a los proyectos de desarrollo tecnológico e innovación "Aplicación de los principios de la economía circular a los desechos de la industria forestal como opción de autoempleo en la región de El Salto, Durango" y "Ecodiseño artesanal a partir de desechos del procesamiento industrial de la madera", de los cuales se originó este escrito.

REFERENCIAS

- Alcántara de Cerqueira, P. H., Correia Vieira, G., Magalhães-Barberena, I., Clímaco-Melo, L., & de Freitas, L. C. (2012). Análise dos resíduos madeireiros gerados pelas serrarias do município de Eunápolis-BA. *Floresta e Ambiente*, 19(4), 506-510. doi: 10.4322/floram.2012.051
- Araújo, C. K. C., Salvador, R., Piekarski, C. M., Sokulski, C. C., de Francisco, A. C., & de Camargo, S. K. C. A. (2019). Circular economy practices on wood panels: A bibliographic analysis. *Sustainability*, 11(4), 1057. doi: 10.3390/su11041057
- Barbosa, L. C., Pedrazzi, C., Ferreira, É. S., Schneid, G. N., & Wille, V. K. D. (2014). Avaliação dos resíduos de uma serraria para a produção de celulose kraft. *Ciência Florestal*, 24(2), 491-500. doi: 10.5902/1980509814589
- Biasi, C. P., & da Rocha, M. P. (2007). Rendimento em madeira serrada e quantificação de resíduos para três espécies tropicais. *Floresta*, 37(1), 95-108. doi: 10.5380/ufv.37i1.7845
- Brand, M. A., de Muñiz, G. I. B., da Silva, D. A., & Klock, U. (2002). Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. *Floresta*, 32(2), 247-259. doi: 10.5380/ufv.32i2.2288
- Braz, R. L., Nutto, L., Brunsmeier, M., & Silva, D. A. (2014). Resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira na Amazônia – uma análise da cadeia produtiva. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 5(2), 168-181. doi: 10.20873/jbb.uff.cemaf.v5n2.braz
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2018). InfoStat (Versión 2018) [Software]. Recuperado de Facultad de Ciencias Agropecuarias-Universidad Nacional de Córdoba: <http://www.infostat.com.ar>
- Doubek Lopes, C. S. (2009). Desenho de pequenos objetos de madeira com resíduo da indústria de processamento mecânico da madeira. *InterfacEHS*, 4(3), 105-132. Recuperado de http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2013/08/7_ARTIGO_vol4n3.pdf
- Espaliat Canu, M. (2017). Introducción a los principios de la economía circular y de la sostenibilidad [Documento en pdf]. Barcelona, España: Instituto Técnico Español de Limpieza. Recuperado de <https://www.itelspain.com/files/pagina/pdf/20170925100953.pdf>
- Flores-Velázquez, R., Serrano-Gálvez, E., Palacio-Muñoz, V. H., & Chapela, G. (2007). Análisis de la industria de la madera aserrada en México. *Madera y Bosques*, 13(1), 47-59. doi: 10.21829/myb.2007.1311235
- Fregoso-Madueño, J. N., Goche-Télles, J. R., Rutiaga-Quiñones, J. G., González-Laredo, R. F., Bocanegra-Salazar, M., & Chávez-Simental, J. A. (2017). Usos alternativos de los desechos de la industria del aserrío. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2), 243-260. doi: 10.5154/r.rchscfa.2016.06.040
- Gysling Caselli, J. (2020). Subproductos madereros de la industria del aserrío 2020 [Documento en pdf]. Santiago, Chile: INFOR. doi: 10.52904/20.500.12220/30335
- Haro Pacheco, A. J., Nájera Luna, J. A., Méndez González, J., Corral Rivas, S., Hernández Díaz, J. C., Carrillo Parra, A., & Cruz-Cobos, F. (2015). Factor de conversión de productos forestales en la industria de tarimas en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(30), 90-105. doi: 10.29298/rmcf.v6i30.210
- Honorato Salazar, J. A., & Meraz Alemán, R. (2002). Caracterización tecnológica de algunas especies de coníferas de la región de El Salto P. N. (Durango) [Documento en pdf]. Durango, México: CONAFOR-INIFAP. Recuperado de http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/foros/Madera/CARACTERIZACION_TECNOLOGICA_DE_ESPECIES_DE_CONIFERAS.PDF
- Husch, B., Beers, T. W., & Kershaw, J. A., Jr. (2003). *Forest mensuration* (4ª ed.). US: Wiley.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [Página de Internet]. Recuperada de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- _____ (2015). Español [Página de Internet]. Recuperada de https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- Lesme Jaén, R., Oliva Ruiz, L. O., Palacios Barrera, A., & Lesmes Jaén, N. L. (2006). Coeficientes de residuos de la industria forestal. *Tecnología Química*, 26(3), 26-29. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543751004.pdf>
- Manhiça, A. A., da Rocha, M. P., & Timofeiczuk, R., Junior. (2013). Eficiência operacional no desdobro de Pinus utilizando modelos de corte numa serraria de pequeno porte. *Cerne*, 19(2), 339-346. doi: 10.1590/S0104-77602013000200019
- Manzanares, K., Velázquez, D., & Guyat, M. A. (2007). Experiencia del aprovechamiento de los residuos en un aserrío. *Ciencia e Investigación Forestal*, 13(2), 325-334. Recuperado de <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/14022/21720.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nájera-Luna, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Jurado-Ybarra, E., Corral-Rivas, J. J., & Vargas-Larreta, B. (2011). Tiempos y rendimientos del aserrío en la región de El Salto, Durango, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 199-213. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.05.034
- Pro Floresta, S. C. (2008). Estudio regional forestal UMAFOR 1008 "Pueblo Nuevo" Estado de Durango [Documento en pdf]. Durango, México: Autor. Recuperado de http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/9/1134ERF_UMAFOR1008.pdf
- Quirós, R., Chinchilla, O., & Gómez, M. (2005). Rendimiento en aserrío y procesamiento primario de madera proveniente de plantaciones forestales. *Agronomía Costarricense*, 29(2), 7-15. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/436/43629201.pdf>
- Sanmartín Ramón, G. S., Zhigüe Luna, R. A., & Alaña Castillo, T. P. (2017). El reciclaje: Un nicho de innovación y emprendimiento con enfoque ambientalista. *Universidad y Sociedad*, 9(1), 36-40. Recuperado de <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/511>
- Soto Sandoval, J., Aguirre, J. A., Méndez, J., & Páez, G. (2000). Evaluación económica y ambiental de residuos forestales en aserraderos de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 9(30), 29-33. Recuperado de https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6288/Evaluacion_economica_y_ambiental_.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., & Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests*, 8(8), 269. doi: 10.3390/f8080269
- Velázquez Viera, D., Manzanares Ayala, K., Guyat Dupuy, M. A., & Sánchez Téllez, E. (2006). Rendimiento de materia prima en un aserradero de la Provincia de Pinar del Río, Cuba. *Revista Forestal Baracoa*, 25(1), 97-104. Recuperado de <https://docplayer.es/23212832-Rendimiento-de-materia-prima-en-un-aserradero-de-la-provincia-de-pinar-del-rio-cuba.html>



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material
La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.