

EVALUACIÓN AMBIENTAL DE ALTERNATIVAS PARA EL AGREGADO DE VALOR A SUBPRODUCTOS DE ASERRADEROS EN MENDOZA

Paula D. Rodríguez, Fernando Arce Bastias, Alejandro P. Arena

Grupo CLIOPE “Energía, Ambiente y Desarrollo Sustentable”, Facultad Regional Mendoza,
Universidad Tecnológica Nacional

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Rodríguez 273, Ciudad de Mendoza, Mendoza

www.frm.utn.edu.ar/clioppe (54) (261) 5244693 E mail pdrodriguez@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN: La industria de la madera en Mendoza se encuentra relegada en relación a otros sectores industriales y tiene baja productividad, generando un elevado porcentaje de residuos o subproductos. En general, estos son ofrecidos en el mercado, pero la dificultad para el agregado de valor conduce al desaprovechamiento de oportunidades de mercado y, en ocasiones, a soluciones perjudiciales para el ambiente. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue contribuir al agregado de valor a los subproductos en un aserradero tipo de la Provincia de Mendoza. Para ello, se propusieron opciones para el reprocesamiento de los subproductos, y se compararon considerando los impactos sobre el cambio climático y el nivel de circularidad material alcanzado. Se utilizó la metodología del Análisis de Ciclo de Vida y se calculó el Indicador de Circularidad Material a partir de datos suministrados por propietarios de aserraderos. Los resultados mostraron que la producción de chips de madera y la venta del aserrín para la producción de ladrillos provocan el menor impacto sobre el cambio climático por cada unidad de beneficio económico generado. Asimismo, esta opción de procesamiento presenta un buen desempeño respecto al nivel de circularidad alcanzado.

Palabras clave: Economía Circular. Biocombustibles sólidos. Chips de madera. Virutas. Pellets.

INTRODUCCIÓN

El sector foresto-industrial comprende las labores de transformación de la madera para generar productos finales de acuerdo a dos formas: i) mecánica, que incluye el aserrado de madera y la fabricación de envases, muebles, entre otras manufacturas; y, ii) química, que abarca la producción de pasta celulósica, papel, cartón, entre otros productos (Gramundo y Asenjo, 2011). En Argentina, la actividad foresto-industrial se concentra mayormente en la Región Mesopotámica. Por su parte, la Región de Cuyo incluye industrias dedicadas principalmente a la elaboración de tableros y cajonería a partir de madera de álamo (Piattoni, 2010). En Mendoza, esta actividad se divide en dos subsectores: i) industrialización primaria, que abarca la producción de madera aserrada; y, ii) industrialización secundaria, que comprende la elaboración de muebles (Ministerio de Agroindustria, 2017).

La industria maderera tiene una participación de 2% en el Producto Bruto Geográfico del sector industrial de Mendoza, dominado por las refinerías de petróleo y por las industrias de elaboración de bebidas (DEIE, 2020). Este dato indica que la foresto-industria ha quedado relegada en relación a otros sectores industriales. Mendoza cuenta con 63 aserraderos, cuyo rendimiento de producción promedio es de 37% (Ministerio de Agroindustria, 2017). Esto evidencia la existencia de un alto porcentaje de generación de residuos de madera, que ronda el 63% del total de madera procesada.

Los residuos de madera obtenidos en los aserraderos comprenden el aserrín, la viruta, los despuntes y las tapas o costaneros. En algunas ocasiones, estos residuos pueden ser considerados como subproductos, ya que son vendidos para distintos usos. Por ejemplo, el aserrín y la viruta son vendidos para la producción de ladrillos, mientras que los costaneros son generalmente vendidos como leña (Eduardo Álvarez, com. pers., 11 de mayo de 2020). Sin embargo, en algunas circunstancias, estos residuos son considerados como material de descarte por no hallar un mercado donde colocarlos (Ministerio de Agroindustria, 2017). Asimismo, algunos dueños de aserraderos han manifestado que los residuos de madera representan un problema para el trabajo cotidiano, porque ocupan espacio y elevan el riesgo de incendio en las instalaciones (Eduardo Álvarez, com. pers., 11 de mayo de 2020). Este hecho, sumado a la dificultad para el agregado de valor, conduce a soluciones perjudiciales para el ambiente, como la quema de los residuos, o que implican el desaprovechamiento de una oportunidad de mercado, como la entrega gratuita a vecinos (Ministerio de Agroindustria, 2017).

En este contexto, la Economía Circular (EC) adquiere relevancia porque proporciona al sistema económico un modelo de flujo cíclico (Korhonen et al., 2018), con el objetivo de capitalizar el reciclo de los flujos de materiales (Winans et al., 2017) y mantener el valor de los recursos dentro del sistema (Suárez-Eiroa et al., 2019). Diversas estrategias pueden ser aplicadas en todas las etapas de la cadena de valor de los productos para mantener los materiales en su más alta utilidad (Anlló et al., 2016), aunque las etapas de “fin de vida” son las que han recibido mayor atención (Kalmykova et al., 2018). Bajo este paradigma, los residuos de madera son de especial interés, porque pueden ser utilizados con diversos fines, enmarcados en dos grupos generales: i) producción de biocombustibles sólidos para la generación de energía (FAO, 2014); y, ii) generación de bio-productos (Kamm y Kamm, 2007).

El uso de los residuos de madera es de notable importancia dada la situación de deterioro ambiental a nivel general, donde se destaca el cambio climático. En este marco, el desarrollo de las energías renovables es un objetivo importante para todos los países (Hong et al., 2018). Actualmente, a nivel mundial, la contribución de la bioenergía o energía de biomasa para la generación de calor desde fuentes renovables es de 70%. En otros sectores, la bioenergía está creciendo rápidamente, por ejemplo, para la generación de electricidad, con un aporte del 4%, y como biocombustible para el transporte, con una contribución del 4% (Buonocore et al., 2019). A nivel nacional, el desarrollo de la energía de biomasa moderna está representada principalmente por la producción de biocombustibles líquidos, mientras que la producción y uso de biocombustibles sólidos o gaseosos se encuentra más relegada. Por su parte, en Mendoza, la producción de energía a partir de biomasa no tradicional es incipiente, aunque existen algunas iniciativas legales para darle impulso (Bertolotti, 2021).

Este escenario alienta la implementación de algún esquema de utilización de residuos de madera para la producción de biocombustibles sólidos o productos a base de madera. *A priori*, esta situación podría significar una mejora en la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, su aprovechamiento implica la existencia de diversos procesos de transformación y uso, que deben ser tenidos en cuenta para evitar el traslado de cargas ambientales entre etapas de la cadena productiva o componentes del medio. En consecuencia, la evaluación ambiental de las tecnologías que promueven la utilización de la biomasa es altamente importante (Kaur et al., 2014), especialmente con perspectiva de ciclo de vida.

En este sentido, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se configura como una metodología idónea porque permite evaluar los impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o servicio (ISO, 2006a). El ACV es utilizado como una herramienta para la toma de decisiones con el objeto de identificar y desarrollar tecnologías de producción limpias (Pieragostini et al., 2012). El desafío es, entonces, evaluar y comparar los impactos ambientales de la gestión y los usos actuales de los residuos de los aserraderos con los impactos potenciales derivados de las estrategias de aprovechamiento que pudieran implementarse.

Objetivos

Las consideraciones expuestas anteriormente dan fundamento al desarrollo de este trabajo, cuyo

objetivo general fue contribuir al agregado de valor a los subproductos derivados del aserrado de madera bajo un esquema de Economía Circular en un aserradero tipo de la Provincia de Mendoza, teniendo en consideración la obtención de ventajas ambientales.

Además, se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Proponer alternativas de procesamiento de los subproductos derivados del aserrado de madera para incrementar su valor agregado.
- Analizar y comparar los impactos sobre el cambio climático asociados a cada una de las alternativas evaluadas para el procesamiento de los subproductos de madera.
- Evaluar y comparar el nivel de circularidad material alcanzado en cada una de las alternativas de procesamiento propuestas.

METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo se contó con la colaboración de propietarios de aserraderos de Mendoza, quienes suministraron los datos primarios para el análisis y detalles del proceso productivo. Los datos utilizados corresponden a un “aserradero normal” o “aserradero tipo”, que realiza actividades de industrialización primaria de la madera. En el contexto mendocino, se denomina “aserradero normal” al que utiliza dos máquinas (sierras sin fin) durante ocho horas diarias, y trabaja con cinco operarios.

Descripción general del proceso productivo

El proceso productivo comienza con la recepción de la madera en forma de rollizos. Posteriormente, la madera se cuadra utilizando una sierra sin fin y, con la misma máquina, se cortan tablas y tablones de diferentes dimensiones, que conforman el producto principal. Por último, las tablas y tablones se estiban en pilas y se dejan secar al aire libre durante un período de ocho meses. Junto con el producto principal, el aserrado de la madera permite obtener dos residuos (o subproductos): las tapas o costaneros, constituidas principalmente por la corteza de los rollizos, y el aserrín (Fig. 1).



Figura 1: Materia prima: madera en rollizos (A). Producto principal: tablas y tablones (B). Subproductos: tapas (C) y aserrín (D). Fuente: fotografías tomadas por los autores.

Descripción de las alternativas de procesamiento

En este trabajo se consideró el procesamiento de los residuos de madera para la generación de biocombustibles sólidos y bio-productos según cada corriente residual:

- Tapas: producción de virutas para uso en jardines o en camas de animales; y producción de chips de madera para la generación de energía de biomasa.
- Aserrín: producción de pellets de madera para la generación de energía de biomasa.

Con el propósito de analizar estas distintas opciones, se confeccionaron y evaluaron seis escenarios:

- E0. Línea de base: es el escenario de referencia, que describe la situación actual en el aserradero tipo evaluado. Los subproductos disponibles para la venta son las tapas, que se

usan como leña, y el aserrín, que es vendido a ladrilleras locales y se incorpora en la pasta para la producción de los ladrillos.

- E1. Producción de virutas: las tapas son reprocesadas para la producción de virutas y el aserrín es vendido a ladrilleras locales.
- E2. Producción de chips: las tapas son reprocesadas para la producción de chips de madera y el aserrín es vendido a ladrilleras locales.
- E3. Producción de pellets: las tapas son vendidas como leña y el aserrín es remanufacturado para la producción de pellets.
- E4. Producción de virutas y pellets: las tapas son reprocesadas para la producción de virutas y el aserrín es remanufacturado para la producción de pellets.
- E5. Producción de chips y pellets: las tapas son reprocesadas para la producción de chips de madera y el aserrín es remanufacturado para la producción de pellets.

Análisis de los impactos sobre el cambio climático

El análisis de los impactos sobre el cambio climático se efectuó según los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040:2006 (ISO, 2006a) e ISO 14044:2006 (ISO, 2006b) para la realización de estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), y las directrices de la norma ISO 14067:2012 (ISO/DIS, 2012) para el cálculo de la Huella de Carbono de productos. De acuerdo con esta metodología, el sistema debe ser analizado según la función que desempeña, expresada por medio de la unidad funcional (ISO, 2006a). Sin embargo, es usual encontrar sistemas que desempeñan más de una función y generan más de un producto de forma simultánea. Al analizar estos sistemas, es necesario distribuir las cargas ambientales entre los diferentes “co-productos”. Otra forma de abordarlos radica en la selección de una unidad funcional basada en el uso de materia prima, que es una forma apropiada para determinar el mejor uso de recursos biomásicos (Ahlgren et al., 2015). En este caso, y de acuerdo con el objetivo del estudio, se consideró una unidad funcional basada en el uso de materia prima, definida como “producir madera aserrada y subproductos de madera a partir de la materia prima recibida en el aserradero en un mes”. De este modo, es posible realizar una comparación de los distintos escenarios, considerando los flujos de referencia (esto es, la cantidad de producto que permite obtener la unidad funcional (Rodríguez, 2021)) en cada uno de ellos (Tabla 1).

Ítem	Escenario						
	E0	E1	E2	E3	E4	E5	
Materia prima [ton/mes]	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	
Producto [ton/mes]	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	
Subproductos [ton/mes]	Tapas	154,40	N/A	N/A	154,40	N/A	N/A
	Aserrín	9,60	9,60	9,60	N/A	N/A	N/A
	Virutas	N/A	138,96 ¹	N/A	N/A	138,96 ¹	N/A
	Chips	N/A	N/A	138,96 ²	N/A	N/A	138,96 ²
	Pellets	N/A	N/A	N/A	3,17 ³	3,17 ³	3,17 ³

¹ Se asumió una eficiencia de procesamiento de 0,90.

² Se asumió una eficiencia de procesamiento de 0,90.

³ Se consideró una eficiencia de procesamiento de 0,33 (Bertolotti, 2021).

N/A: no aplica.

Tabla 1: Productos y subproductos generados en cada escenario.

El estudio se realizó con enfoque “de la cuna a la puerta”. Los límites del sistema abarcaron los procesos de producción y transporte de la materia prima, y los procesos de manufactura requeridos para obtener los productos y subproductos (procesos de primer plano) (Fig. 2). Para modelar el procesamiento de los subproductos, se consideró el requerimiento energético de los equipos utilizados según el escenario (Tabla 2). En el caso de la elaboración de pellets, se asumió que el secado del aserrín se realiza al aire libre. Además, se consideró la producción de la energía eléctrica y de los combustibles utilizados (procesos de fondo) (Fig. 2). La confección del inventario de emisiones de gases

de efecto invernadero (GEI) se llevó a cabo con datos contenidos en la base de datos Ecoinvent 3.5 (Wernet et al., 2016) y provistos por las Directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Garg et al., 2006).

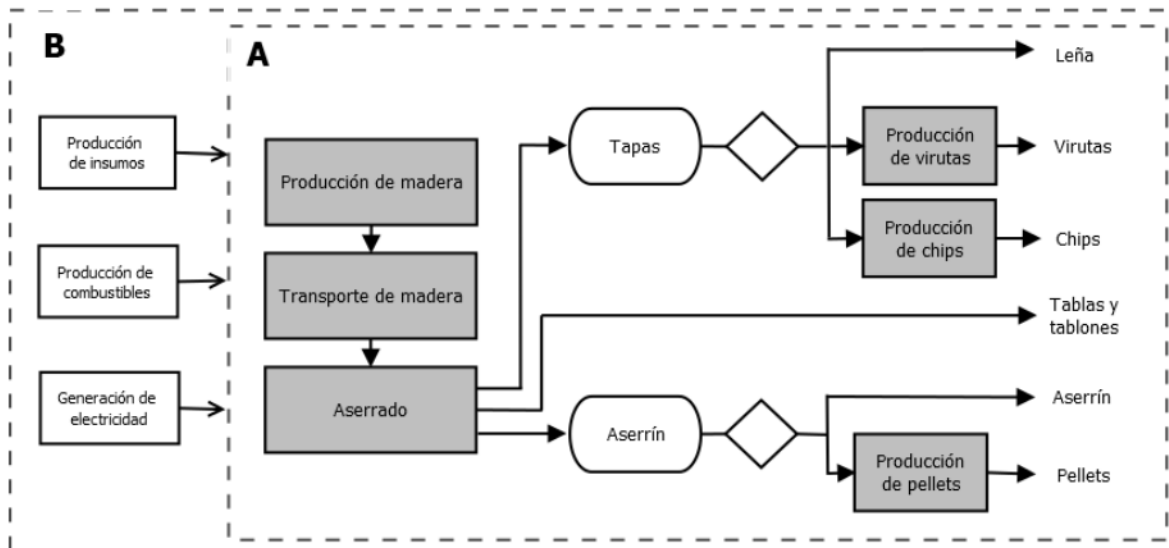


Figura 2: Diagrama de flujo del proceso productivo para la obtención de los productos y subproductos analizados. Los límites del sistema comprenden procesos de primer plano (A) y procesos de fondo (B). Estos procesos se combinan alternativamente en cada uno de los escenarios analizados.

Por otro lado, la metodología establece que deben considerarse tanto las emisiones como las remociones de GEI desde la atmósfera ocurridas en el ciclo de vida del sistema analizado (ISO/DIS, 2012). En este caso, la producción de la madera implica una remoción de CO₂ desde la atmósfera como consecuencia del proceso de fotosíntesis. Esto significa que la madera puede comportarse como un reservorio temporal de carbono, dependiendo de su uso final. En este punto es importante la determinación de un horizonte temporal que delimite el rol de los productos de madera como reservorios, ya que a largo plazo el carbono contenido en ellos retornará a la atmósfera (Kujanpää et al., 2009). Por lo tanto, en este trabajo se consideró la absorción de CO₂ correspondiente a aquellos productos y subproductos donde el carbono puede quedar almacenado, contemplando un horizonte temporal de 10 años, es decir, el carbono almacenado en la madera aserrada y en el aserrín utilizado para la producción de ladrillos. Sin embargo, no se consideró la remoción y almacenamiento de carbono correspondiente a las virutas, los chips de madera y los pellets, ya que su uso final implica el retorno del carbono a la atmósfera en un plazo inferior al horizonte temporal definido. El cálculo se realizó de manera teórica, asumiendo un contenido de carbono de 50% en la madera (Gasparry y Manghi, 2004) y la relación de peso molecular entre el CO₂ y el C (3,67 kg/kg), que arrojó una relación de absorción de 1,83 kg CO₂/kg de madera.

Equipamiento	Potencia [kW]	Capacidad de procesamiento [ton/h]	Eficiencia de procesamiento
Virutera			
Motor principal	14,91	0,60	0,90
Soplante	0,37		
Remolador	3,73		
Chipeadora	29,83	6,00	0,90
Pelletizadora	15,00	0,20	0,33

Tabla 2: Datos utilizados para el cálculo del requerimiento de energía eléctrica para el reprocesamiento de los subproductos.

La caracterización del impacto se efectuó con el método IPCC 2013 GWP 100a, contenido en el

software SimaPro® (versión 9.1.1.7). Los resultados reflejan el balance entre emisiones y remociones de GEI en el ciclo de vida del sistema analizado, y se expresan en masa de CO₂ equivalente [kg CO₂ eq].

Adicionalmente, se analizó la relación entre el impacto ocasionado por las emisiones de GEI originadas por la incorporación de procesos para el agregado de valor de los subproductos y el beneficio económico que representa la venta de estos. El cálculo del beneficio económico se efectuó como la diferencia entre los ingresos potenciales por la venta de los subproductos y el costo de producirlos, teniendo en cuenta el costo de la energía eléctrica utilizada y el costo de la mano de obra (Tabla 3).

Precio de venta de los subproductos (julio de 2021)		
Subproducto	Precio de venta [ARS/kg]	Fuente
Tapas	2,30	Dato primario provisto por aserradero
Aserrín	5,27	Dato primario provisto por aserradero
Virutas	13,03	Dato primario provisto por aserradero
Chips	51,40	Promedio de precios hallados en Mercado Libre
Pellets	31,33	Dato primario facilitado por empresa proveedora
Costos unitarios para el procesamiento de subproductos (julio de 2021)		
Ítem	Costo [ARS/kWh]	Fuente
Electricidad	6,66 ¹	Ente Provincial Regulador Eléctrico (EPRE)
Ítem	Costo [ARS/h]	Fuente
Mano de obra	227,77 ²	Dato primario provisto por aserradero

¹ Corresponde al cargo variable de tarifa T1 G (pequeñas demandas, general). Anexo I. Res EPRE N° 069/2021.

² Sueldo mensual sin considerar contribuciones patronales y adicionales (feriados, presentismo, etc.).

Tabla 3: Precios de venta de los subproductos y costos unitarios de la energía eléctrica y la mano de obra para el procesamiento de los subproductos.

Análisis de circularidad material

Para medir el grado de aplicación de los principios de la EC, se calculó el Indicador de Circularidad Material (MCI) (del inglés, *Material Circularity Indicator*), elaborado por la Fundación Ellen MacArthur (2015). El MCI mide la restauración de los flujos materiales de un producto o una empresa, y su valor varía en un rango de 0 (sistema 100% lineal) a 1 (sistema 100% circular). La información más relevante para su cálculo son los flujos de entrada (materia prima virgen e insumos) y los flujos de salida (residuos no recuperables y residuos que pueden ser reusados, reciclados o valorizados energéticamente).

El MCI se calcula a partir de 27 sub parámetros, pero dos de ellos son los más importantes: el Índice de Flujo Lineal (LFI) (del inglés, *Linear Flow Index*) y el Factor de Utilidad (en inglés, *Utility Factor*). El LFI mide la proporción en la que un flujo material sigue un comportamiento lineal ("tomar, hacer, desechar"), y varía entre 0 (flujo restaurativo) y 1 (flujo lineal). El Factor de Utilidad es función del parámetro X que contabiliza la vida útil de un producto y la intensidad de uso del producto medido en unidades funcionales con respecto a valores promedios (Rufí-Salís et al., 2021; EMF, 2015). La formulación matemática del MCI para un producto se expresa en la Ecuación (1).

$$MCI_p = 1 - [LFI \cdot F(X)] \quad (1)$$

Donde:

MCI_p: Indicador de Circularidad Material del producto (adimensional).

LFI: Índice de Flujo Lineal (adimensional).

F(X): Factor de Utilidad (adimensional).

Además, en este trabajo se utilizó la metodología para calcular el MCI a nivel empresa mediante la Ecuación (2) (EMF, 2015), con el propósito de conocer el nivel de circularidad material obtenido en cada escenario. Este indicador se calcula realizando la media ponderada de la circularidad de los productos que son vendidos por el aserradero. Para realizar el cálculo, se define un factor de

normalización para cada producto ($N_{P(\alpha)}$), que se basa en los ingresos generados por la venta. El nivel de circularidad calculado para los productos y subproductos ($MCI_{P(\alpha)}$) de cada escenario es multiplicado por su factor de normalización y luego se adicionan. Finalmente, el MCI a nivel empresa se obtiene dividiendo esa suma por la suma de los factores de normalización (N_C).

$$MCI_C = \frac{1}{N_C} \cdot \sum_{\alpha} N_{P(\alpha)} \cdot MCI_{P(\alpha)} \quad (2)$$

Donde:

MCI_C : Indicador de Circularidad Material de la empresa (adimensional).

$N_{P(\alpha)}$: Factor de normalización del producto α (\$).

$MCI_{P(\alpha)}$: Indicador de Circularidad Material del producto α (adimensional).

N_C : Sumatoria de los factores de normalización de los productos $N_C = \sum_{\alpha} N_{P(\alpha)}$ (\$).

Para el cálculo del MCI, se consideró que los subproductos son elaborados al 100% por materia reutilizada, mientras que el producto principal es el único que tiene aporte de materia prima virgen (madera en rollizos y gas propano usado como combustible en las maquinarias). En el indicador se tiene en cuenta el fin de vida del producto principal, los subproductos y los residuos generados durante el procesamiento. Estos flujos fueron contabilizados como materiales cuyo destino final es el vertedero o la recuperación de energía (flujos no restaurativos). Con respecto al parámetro X, se supuso un valor de 1 debido a la falta de información sobre la vida útil o intensidad de uso de productos y subproductos.

RESULTADOS

Con el propósito de contribuir al agregado de valor a los subproductos del aserrado de madera en un esquema de Economía Circular, se propusieron alternativas de procesamiento y se compararon en relación a los impactos sobre el cambio climático y el nivel de circularidad material alcanzado. Los resultados corresponden a la producción de madera aserrada y subproductos de madera a partir de la materia prima recibida en el aserradero en un mes, según cada escenario definido.

Análisis de los impactos sobre el cambio climático

Los resultados obtenidos indicaron la existencia de una remoción neta de GEI en todos los escenarios analizados (Fig. 3). Esto significa que la absorción y almacenamiento de carbono en la madera fue mayor que las emisiones de GEI cuantificadas en el ciclo de vida del sistema. No obstante, se notaron diferencias en el resultado global entre los escenarios. En efecto, el escenario de base (E0) mostró el mayor beneficio en términos de captura de carbono. Esto se asocia, por un lado, con el incremento de emisiones de GEI en los escenarios alternativos como consecuencia de la introducción de nuevos procesos para el agregado de valor de los subproductos; y, por otro lado, con la posibilidad de almacenar carbono tanto en la madera aserrada como en el aserrín. En este sentido, se observó que la captura neta de carbono disminuyó notablemente en los escenarios que contemplan el uso de aserrín para la producción de pellets (esto es, E3, E4 y E5), ya que su uso final como combustible imposibilita el almacenamiento de carbono. Finalmente, se constató que los escenarios alternativos E1 y E2 no implicaron una disminución importante de la captura neta de carbono en relación con el escenario de base E0, mostrando una reducción de 3,1% y 0,5%, respectivamente.

Además, se analizó la relación entre el impacto sobre el cambio climático ocasionado por las emisiones adicionales de GEI (originadas por el procesamiento de los subproductos para el agregado de valor), y el beneficio económico derivado de la venta de los subproductos (Fig. 3). En el escenario de base E0 no se contabilizaron emisiones adicionales de GEI, puesto que los subproductos son obtenidos a partir de los procesos habituales para la producción de madera aserrada. Esto implica que la relación entre el impacto y el beneficio económico derivado de la venta de los subproductos es nula. No obstante, esta situación se modificó en los escenarios alternativos por la inclusión de procesos adicionales.

La Fig. 3 muestra que el escenario más desfavorable para el agregado de valor a los subproductos fue aquel que contempla la producción de virutas y pellets (esto es, E4). En efecto, en este escenario se registró el mayor aumento de emisiones de GEI en relación al escenario de base, mientras que el beneficio económico fue 4,44 veces superior al obtenido para el escenario E0, siendo uno de los incrementos más bajos. Una situación similar se observó para el escenario E1, que representa la producción de virutas y la venta del aserrín para la producción de ladrillos, donde existió un importante incremento de las emisiones y un reducido aumento del beneficio económico (4,36 veces) en relación al escenario de base. El mayor aumento de las emisiones GEI fue consecuencia del mayor uso de energía eléctrica para la producción de las virutas en relación a otros subproductos, como los chips. Esto se produce principalmente por la menor capacidad de procesamiento del equipo para la producción de virutas, que, en este caso, es 90% menor a la de la chipeadora (Tabla 2).

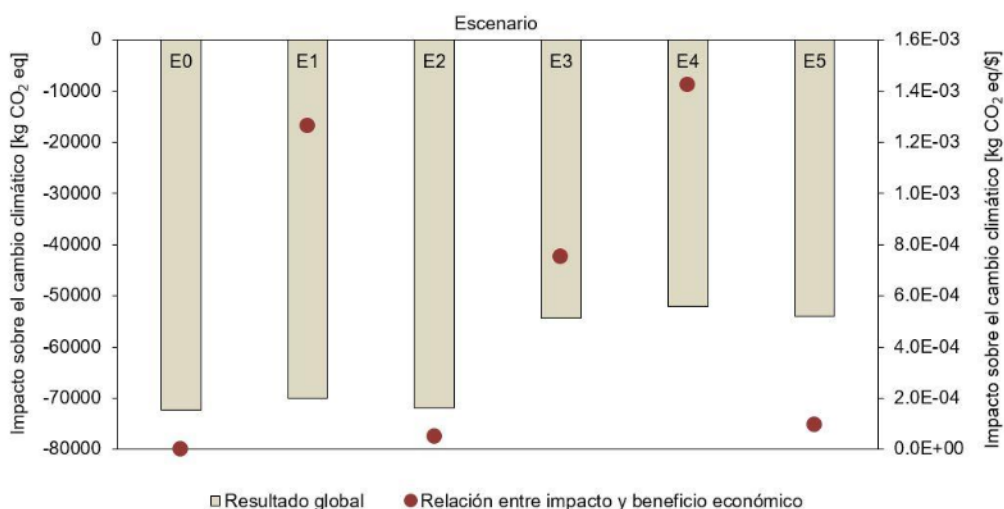


Figura 3. Resultados del cálculo de impactos sobre el cambio climático asociados a cada escenario (gráfico de barras, eje izquierdo). Relación entre el impacto por las emisiones adicionales de GEI y el beneficio económico por el agregado de valor a los subproductos (gráfico de puntos, eje derecho).

En el lado opuesto, la Fig. 3 enseña que el escenario más favorable para el agregado de valor correspondió a la producción de chips y la venta de aserrín para la producción de ladrillos (esto es, E2). En este escenario, el aumento de las emisiones de GEI ocasionadas por la producción de chips fue baja en relación a los escenarios con producción de virutas (86% inferior respecto a E4), mientras que el beneficio económico por la venta de los subproductos fue 17,70 veces superior al escenario de base. Esto condujo a obtener la mejor relación entre el impacto por el aumento de las emisiones de GEI y el beneficio económico. Del mismo modo, el escenario E5, que contempla la producción de chips y de pellets, mostró un buen desempeño, puesto que el aumento de las emisiones de GEI por el procesamiento de los subproductos fue bajo y el incremento del beneficio económico fue 17,80 veces superior al registrado en E0. La conveniencia de estos escenarios se asocia al uso de equipamiento para la producción de chips con mayor capacidad de procesamiento y menor requerimiento de energía en relación a la producción de virutas. Asimismo, el precio de venta considerado en este trabajo para los chips de madera fue aproximadamente 4 veces superior al precio de las virutas.

Finalmente, el escenario E3, que considera la producción de pellets y la venta de tapas como leña, mostró un desempeño intermedio. En este escenario se registró el menor aumento de las emisiones de GEI respecto al escenario de base. Sin embargo, se obtuvo el menor incremento en el beneficio económico por la venta de los subproductos, que sólo fue 1,08 veces superior al de E0. Esto se asocia a la menor generación de subproducto final en relación a la producción de chips o de virutas. Asimismo, el precio de venta de las tapas como leña es el más bajo de todos los subproductos, lo que implica un reducido beneficio económico por la venta de los subproductos de este escenario.

Análisis de circularidad material

La Fig. 4 muestra el nivel de circularidad alcanzado en cada escenario (MCI_c). En general, los resultados se aproximaron a un valor del indicador de 0,50 y no se observaron diferencias notables entre ellos. La circularidad de cada escenario se calcula a partir de la circularidad de cada producto o subproducto considerado y esta no evidenció variaciones entre los escenarios. En efecto, la madera aserrada es el producto principal del sistema y se consideró en todos los escenarios. Este producto mostró un nivel de circularidad (MCI_p) de 0,47. Cada escenario se complementó con la producción de dos subproductos alternativos. Todos los subproductos analizados resultaron en un idéntico nivel de circularidad, con un MCI_p de 0,55. Por lo tanto, las diferencias obtenidas entre los escenarios se asociaron al factor de normalización asignado a cada producto o subproducto, que depende de los ingresos por ventas en cada escenario. En este caso de estudio, la madera aserrada presentó el precio de venta más alto y, en consecuencia, su nivel de circularidad tuvo la mayor contribución en el resultado de cada escenario, puesto que los productos que presentan mayor contribución al resultado total son aquellos que generan un mayor ingreso económico. Sin embargo, esta contribución varía en cada escenario como consecuencia de la diferencia en los ingresos por venta del conjunto de productos y subproductos incluidos en cada uno de ellos.

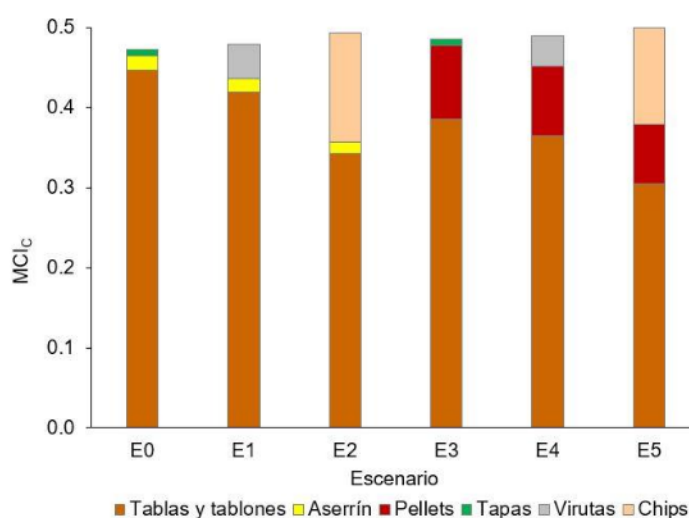


Figura 4. Resultados del indicador MCI de cada escenario planteado (barras). En el interior de las barras se muestran las contribuciones del producto principal y de los subproductos.

El escenario de base (E0) mostró el menor nivel de circularidad, alcanzando un MCI_c de 0,47. La contribución de la madera aserrada al resultado global del escenario fue de 94%, mientras que el aserrín y las tapas presentaron una contribución de 4% y 2%, respectivamente. El escenario E1 obtuvo un MCI_c de 0,48. En este caso, se notó una disminución de la contribución de la madera aserrada, que alcanzó el 88%, y un aumento de la contribución de los subproductos como consecuencia del agregado de valor por la producción de virutas. La contribución del aserrín se mantuvo en 4%, mientras que la de las virutas alcanzó el 9%.

Por su parte, los escenarios E2, E3 y E4 mostraron un nivel equivalente de circularidad, representado por un MCI_c de 0,49. No obstante, se observaron diferencias en relación a la contribución del producto principal y los subproductos. En el escenario E2 se registró una disminución notable de la participación de la madera aserrada en el resultado final en relación a E0, alcanzando el 69%, mientras que el aserrín y los chips tuvieron una contribución de 3% y 28%, respectivamente. En el escenario E3, el aporte de la madera aserrada al resultado final fue de 79%, mientras que los pellets y las tapas presentaron una contribución de 19% y 2%, respectivamente. En el escenario 4, la contribución de la madera aserrada fue de 74%, mientras que las virutas y los pellets tuvieron una participación en el resultado final de 18% y 8%, respectivamente.

Por último, el escenario E5 mostró el mayor nivel de circularidad, con un MCI_c de 0,50. En este caso, la

madera aserrada presentó la menor contribución al resultado total, con un aporte de 61%, en tanto que los pellets y los chips contribuyeron en un 15% y en un 24%, respectivamente.

Estos resultados permitieron constatar que, al aumentar el factor de normalización de los productos con mayor nivel de circularidad (en este trabajo, todos los subproductos considerados), se incrementa el nivel de circularidad del escenario. En este caso de estudio particular, para mejorar el nivel de circularidad a nivel de empresa, es preciso disminuir la participación de la madera aserrada, ya que presentó el menor nivel de circularidad entre los productos, y elevar la contribución de los subproductos, mediante el aumento en el ingreso por ventas o el incremento en la cantidad producida (por ej., elevando la eficiencia). Este propósito se reflejó principalmente en los escenarios E5 y E2.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron alternativas de procesamiento para el agregado de valor de subproductos derivados del aserrado de madera en Mendoza, puesto que esta industria tiene una alta tasa de generación de residuos o subproductos, que normalmente son desaprovechados o subutilizados. Las estrategias de aprovechamiento se concibieron en un esquema de Economía Circular, atendiendo al principio principal de mantener el valor de los recursos tanto como sea posible dentro del sistema. En este contexto, se propuso el reprocesamiento de los residuos de madera para la producción de biocombustibles sólidos (chips y pellets de madera) y para la generación de productos basados en madera (virutas).

En primer lugar, las alternativas se analizaron y compararon en relación a los impactos sobre el cambio climático originados por cada una de ellas. Todos los escenarios evaluados mostraron la existencia de una remoción neta de gases de efecto invernadero que se asocia, principalmente, a la producción de madera aserrada que actúa como un sumidero temporal de carbono. Los escenarios alternativos, que consideran el reprocesamiento de los subproductos para el agregado de valor, mostraron una disminución de este beneficio ambiental en relación al escenario de base, como consecuencia del aumento de las emisiones de GEI por la generación y utilización de energía eléctrica adicional. No obstante, en el escenario que contempla el uso de aserrín para la producción de ladrillos y la producción de chips a partir de las tapas, la reducción de la captura neta de carbono fue despreciable. En efecto, este escenario se mostró como el más favorable para el agregado de valor, ya que registró la menor relación entre el impacto derivado del aumento de las emisiones de GEI y el beneficio económico obtenido por la venta de los subproductos.

Por otro lado, las alternativas se evaluaron respecto al nivel de circularidad alcanzado por cada una de ellas. Si bien los resultados globales fueron similares entre todos los escenarios analizados, el mejor resultado se obtuvo para el escenario que considera la producción de chips y de pellets, seguido por el escenario que contempla la producción de chips y la venta de aserrín a ladrilleras locales.

En atención a los dos aspectos estudiados en este trabajo, se considera que la mejor opción de procesamiento para el agregado de valor en el aserradero tipo evaluado se compone por la venta del aserrín para la producción de ladrillos y la producción de chips de madera a partir de las tapas para su uso como combustible. Si bien los resultados obtenidos corresponden a un caso de estudio particular, se consideran de alto valor, ya que, por un lado, la realidad productiva de otros aserraderos de la zona es similar a la del aserradero tipo abordado; y, por otro lado, no existen estudios de este tipo en la región, lo que destaca la utilidad de la metodología empleada y los resultados alcanzados como base para el análisis de otros casos.

A partir de las limitaciones halladas en esta primera instancia, se definieron actividades futuras de investigación: i) realización de un análisis económico completo, incluyendo las inversiones de capital necesarias para cada alternativa de procesamiento definida; ii) ajuste de los inventarios de gases de efecto invernadero para la inclusión de procesos auxiliares (por ejemplo, el secado del aserrín); iii)

aplicación de técnicas de optimización multi-objetivo para hallar la mejor alternativa de procesamiento desde un enfoque económico y ambiental; y, iv) confección de una planilla de cálculo genérica para la evaluación de estrategias para el agregado de valor de subproductos en otros aserraderos de la zona.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la desinteresada colaboración del Señor Eduardo Álvarez, propietario del Aserradero Don Nicola y miembro de la Asociación de Empresarios Madereros y Afines.

REFERENCIAS

- Ahlgren S., Björklund A., Ekman A., Karlsson H., Berlin J., Börjesson P., Ekvall T., Finnveden G., Janssen M. y Strid I. (2015). Review of methodological choices in LCA of biorefinery systems-key issues and recommendations. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 9, 5, 606-619.
- Anlló G., Añon M., Bassó S., Bellinzoni R., Bisang R., Cardillo S., Carricarte V., Cassullo E., Ciccía G., Corley E., Fuchs M., Genovesi M., Gutierrez M., Ortiz I., Pagano E., Plata B., Trigo E. y Regunaga M. (2016). *Biotecnología argentina al año 2030: llave estratégica para un modelo de desarrollo tecnoproductivo*. Biotecnología Argentina al año 2030. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, Buenos Aires.
- Bertolotti L. (8 de junio de 2021). [En línea]. Buscan transformar los residuos forestales para calefaccionar los hogares. *Diario Uno*. Dirección URL: <<https://www.diariouno.com.ar/sociedad/buscan-transformar-los-residuos-forestales-calefaccionar-los-hogares-n837974>> [consulta: 1 de agosto de 2021].
- Buonocore E., Paletto A., Russo G. y Franzese, P. (2019). Indicators of environmental performance to assess wood-based bioenergy production: A case study in Northern Italy. *Journal of Cleaner Production* 221, 242–248.
- DEIE. (2020). [En línea]. Producto Bruto Geográfico por Sector y Rama. Mendoza. Años 2004-2018. Dirección URL: <<http://www.deie.mendoza.gov.ar/#!/mendoza-en-datos>> [consulta: 3 de julio de 2020].
- FAO. (2014). [En línea]. Bioenergía y seguridad alimentaria. Evaluación rápida (BEFS RA). Aprovechamiento forestal y residuos del aprovechamiento de la madera. Manual de usuario. Dirección URL: <<http://www.fao.org/3/a-bp857s.pdf>> [consulta: 3 de julio de 2020].
- Fundación Ellen MacArthur. (2015). *Circularity indicators: an approach to measuring circularity - Methodology*. (Vol. 23).
- Garg A., Kazunari K., y Pulles T. (2006). [En línea]. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 1. Dirección URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html> [consulta: 19 de agosto de 2020].
- Gasparri I. y Manghi E. (2004). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas. Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal. Dirección de Bosques. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.
- Gramundo, A. y Asenjo, P. (2011). [En línea]. Análisis Cadena Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. Dirección URL: <<https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/mod/resource/view.php?id=21160>> [consulta: 12 de junio de 2020].
- Hong S., Kim H. y Hur T. (2018). An economic analysis of the carbon benefits of sawmill residues' use in South Korea. *Journal of Cleaner Production* 181, 562-570.
- ISO. (2006a). International Standard 14040. Life Cycle Assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO. (2006b). International Standard 14044. Environmental Management-Life Cycle Assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO/DIS. (2012). Draft International Standard 14067. Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication.
- Kalmykova Y., Sadagopan M. y Rosado L. (2018). *Circular economy—From review of theories and*

- practices to development of implementation tools. *Resources, conservation and recycling* 135, 190-201.
- Kamm B. y Kamm M. (2007). Biorefineries—multi product processes. En *White Biotechnology*, pp. 175-204. Springer, Berlin.
- Kaur S., Dhillon G., Sarma, S, Brar S., Misra K. y Oberoi H. (2014). Waste biomass: a prospective renewable resource for development of bio-based economy/processes. En *Biotransformation of waste biomass into high value biochemical*, pp. 3-28. Springer, New York.
- Korhonen J., Honkasalo A. y Seppälä J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics* 143, 37-46.
- Kujanpää M., Pajula T. y Hohenthal C. (2009). Carbon footprint of a forest product—challenges of including biogenic carbon and carbon sequestration in the calculations. *Life Cycle Assessment of Products and Technologies*, 27-39.
- Ministerio de Agroindustria. (2017). Censo Nacional de Aserraderos. Provincia de Mendoza. Subsecretaría de Desarrollo Foresto Industrial. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación. Argentina.
- Piattoni, R. (2010). [En línea]. Cadena de valor de la foresto industria de la Región Centro: muebles, construcciones y remanufacturas de madera. Consejo Federal de Inversiones. Dirección URL: https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/19171/mod_resource/content/1/RC_2012_F.pdf [consulta: 12 de junio de 2020].
- Pieragostini C., Mussati M. y Aguirre P. (2012). On process optimization considering LCA methodology. *Journal of environmental management* 96, 1, 43-54.
- Rodríguez P. (2021). Contribuciones para la evaluación de impactos por uso y cambio de uso de suelo sobre servicios ecosistémicos de provisión. Aplicación en el estudio de la producción de microalgas en sistemas cerrados. Tesis de Doctorado. Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional.
- Rufí-Salís M., Petit-Boix A., Villalba G., Gabarrell X. y Leipold, S. (2021). Combining LCA and circularity assessments in complex production systems: the case of urban agriculture. *Resources, Conservation and Recycling* 166, 105359.
- Suárez-Eiroa B., Fernández E., Méndez-Martínez G. y Soto-Oñate D. (2019). Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice. *Journal of cleaner production* 214, 952-961.
- Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E. y Weidema B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21, 9, 1218–1230.
- Winans K., Kendall A. y Deng H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68, 825-833.

ABSTRACT: The wood industry in Mendoza is relegated to other industrial sectors, and it has low productivity. Thus, it generates a high percentage of wood residues or by-products that, in general, are offered in the market. However, the difficulty in adding value leads to the waste of market opportunities and, sometimes, to harmful solutions to the environment. Therefore, the aim of this work was to contribute to the value addition of by-products from wood sawing in a typical sawmill in Mendoza. For that purpose, options for the reprocessing of by-products were proposed, and they were compared considering impacts on climate change and the degree of material circularity achieved. Life Cycle Assessment methodology was used, and Material Circularity Indicator was calculated from data provided by sawmills owners. The results showed that the production of wood chips and the sale of sawdust for bricks production cause the lowest impact on climate change for each unit of economic benefit generated. In addition, this processing option presents a good performance regarding the degree of circularity achieved.

KEYWORDS: Circular Economy. Solid biofuels. Wood chips. Wood shavings. Wood pellets.