

# Diseño y planificación de la cadena de suministro de la biomasa forestal para la producción de bioenergía y biocombustibles

## Design and planning of the forest biomass supply chain for producing bioenergy and biofuels

Presentación: 08-09/10/2024

### Doctoranda:

**Agustina ANSELMINO**

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) / Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional (UTN FRCU)  
[anselminoaustina@conicet.gov.ar](mailto:anselminoaustina@conicet.gov.ar)

### Directora:

**Mariana Evangelina CÓCCOLA**

### Codirector:

**Rodolfo Gabriel DONDO**

### Resumen

Este trabajo aborda la problemática en la cadena de suministro (CS) de la biomasa forestal para su conversión en bioenergía y/o biocombustibles, considerando como fuentes de materia prima no solo a los subproductos obtenidos en la industrialización primaria de la madera, sino también contemplando el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas. Se propone un modelo matemático lineal entero mixto (MILP) como apoyo al proceso de toma de decisiones para el diseño y la planificación estratégica de operaciones en la CS. El modelo de optimización incluye decisiones sobre la planificación forestal, la recolección y transporte de la biomasa, su conversión en bioenergía y/o biocombustibles, así como la venta de energía eléctrica y térmica, incluyendo el autoabastecimiento cuando sea aplicable, y la distribución de pellets a los mercados. El objetivo es maximizar el Valor Presente Neto (VPN) en un horizonte de planificación de 20 años. La herramienta de optimización se aplica en un caso de estudio que considera la infraestructura asociada con la actividad foresto-industrial en la provincia de Entre Ríos.

Palabras clave: Optimización, Planificación Estratégica, Biomasa Forestal, Bioenergía, Plantaciones Dendroenergéticas.

### Abstract

This study addresses the challenges within the supply chain (SC) of forest biomass for conversion into bioenergy and/or biofuels, considering not only the by-products obtained from primary wood processing but also the establishment of energy woody crops as sources of raw materials. A mixed-integer linear programming (MILP) model is proposed to support decision-making in the design and strategic planning of SC operations. The optimization model encompasses decisions related to forest planning, biomass collection and transportation, its conversion into bioenergy and/or biofuels, the sale of electrical and thermal energy—including self-supply when applicable—and the distribution of pellets to markets. The objective is to maximize the Net Present Value (NPV) over a 20-year planning horizon. The optimization tool is applied to a case study that considers the infrastructure associated with the forestry-industrial activities in the province of Entre Ríos.

Keywords: Optimization, Strategic Planning, Forest Biomass, Bioenergy, Energy Woody Crops.

## Introducción

Nuestro país cuenta con un notable potencial para desarrollar energías renovables no convencionales, como la dendroenergía, gracias a la abundancia y diversidad de fuentes de biomasa disponibles. Desde una perspectiva internacional, una de las principales fuentes de materia prima proviene de los subproductos de la industria maderera, especialmente los residuos o chips generados en los aserraderos. A pesar de su potencial para la producción de bioenergía, una gran parte de estos subproductos se comercializan a empresas de celulosa y tableros de fibra y partículas, que los utilizan como materias primas en sus procesos (Ministerio de Agroindustria, 2017). Además, las actividades de poda y raleo, junto con los residuos de cosecha de plantaciones forestales, constituyen una fuente significativa de biomasa en el país (FAO, 2020a).

En los últimos años, se ha comenzado a explorar el uso de tierras marginales (no aptas para la agricultura) para el establecimiento de cultivos y plantaciones forestales dedicadas específicamente a la producción de biomasa con fines energéticos. Esto no solo aumenta la disponibilidad de biomasa y evita la competencia con otras industrias que utilizan residuos forestales, sino que también promueve el desarrollo de economías rurales sin interferir con la producción de alimentos o cultivos forrajeros (Morales et al., 2015). La Región Mesopotámica de nuestro país cuenta con un gran potencial para el desarrollo de plantaciones dendroenergéticas, especialmente de la especie *Eucalyptus Grandis*, disponiendo de aproximadamente 348.146 hectáreas (FAO, 2020b).

La mayoría de los estudios presentes en la literatura para la planificación de operaciones en la CS de la biomasa forestal consideran como fuentes de materia prima a los residuos de cosecha y a los subproductos generados por las industrias madereras. El principal objetivo de estos estudios es disminuir los costos logísticos por unidad de energía generada, con el fin de hacerla competitiva en el mercado frente a las formas de energía convencionales. Pocos trabajos analizan la posibilidad de implantar bosques exclusivamente para la producción de energía (FAO, 2020b).

Para evaluar el potencial de las plantaciones dendroenergéticas en la cadena de suministro de la biomasa forestal, se propone un modelo de optimización para dar soporte a la toma de decisiones, a nivel estratégico, que permitan determinar la mejor configuración para la producción de bioenergía y/o biocombustibles. El modelo incluye decisiones sobre el manejo productivo de los rodales disponibles, tales como el periodo de implantación, los ciclos de producción y los turnos de corta, así como la localización, el tipo y la capacidad de las tecnologías de conversión a emplear. El objetivo es maximizar el Valor Presente Neto (VPN) en un horizonte de planificación de 20 años.

El modelo propuesto se utiliza para resolver un caso de estudio diseñado para evaluar el desarrollo de proyectos dendroenergéticos en la provincia de Entre Ríos. En Argentina, a través del programa RenovAr, se han construido plantas dedicadas a la producción de energía a partir de residuos forestales, todas operando con sistemas de combustión. Sin embargo, y a pesar de la importancia que la industria forestal tiene en la región, actualmente no existen plantas de este tipo en Entre Ríos.

## Desarrollo

Para el problema antes descrito, se define una representación matemática de la cadena de suministro que incluye diferentes ubicaciones  $I = \{I^S \cup I^W \cup I^L \cup I^M\}$  para identificar: (i) *Puntos de suministros* ( $I^S \cup I^W$ ), diferenciando las plantaciones dendroenergéticas y los aserraderos capaces de suministrar biomasa residual en forma de chip o aserrín; (ii) *Plantas de conversión*  $I^L$ , determinando las posibles localizaciones en dónde pueden operar distintas tecnologías de conversión, tales como la cogeneración de energía, la producción de energía térmica y la producción de pellets, con diferentes capacidades y, en consecuencia, con diferentes costos de instalación y operación (fijos y variables); (iii) *Mercados*  $I^M$ , hacia donde distribuir los biocombustibles. Con respecto a la bioenergía, se asume que la energía eléctrica se inyecta a la red, mientras que la energía térmica se entrega a las industrias cercanas que lo utilizan en sus procesos. La siguiente figura muestra, de manera general, la estructura de la cadena de suministro considerada.

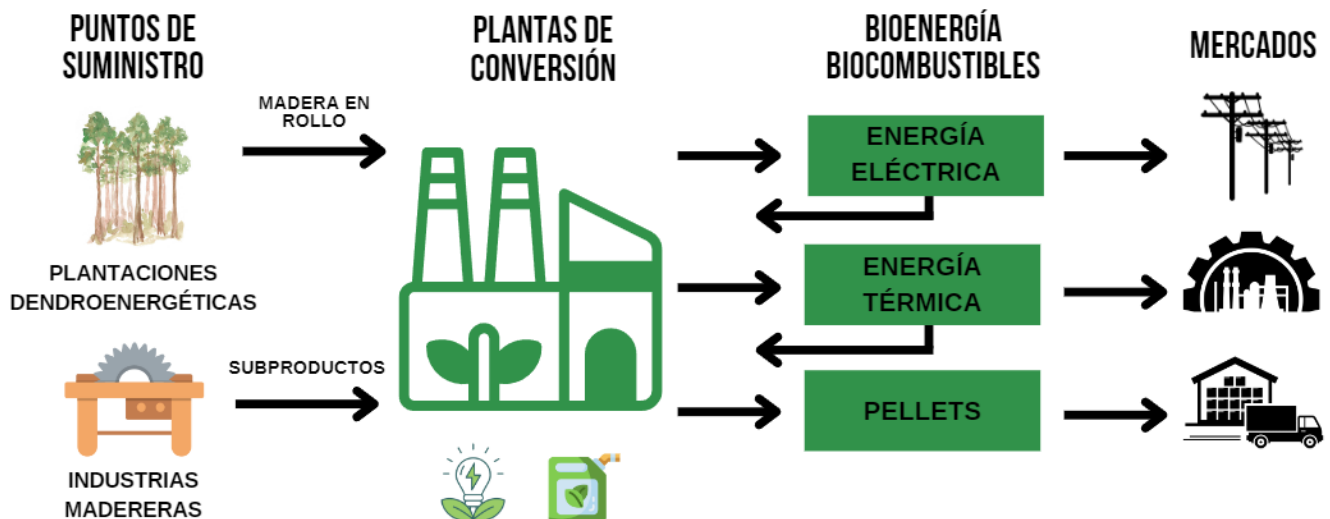


Figura 1: Estructura de la cadena de suministro.

Las decisiones relacionadas a la ubicación de las plantas de conversión, la cantidad de plantas a operar, las capacidades y tecnologías con las que operarán dichas plantas, las cantidades a producir, los proveedores que suministrarán materia prima y los volúmenes de aprovisionamiento, los rodales a establecer y cosechar, entre otras decisiones, corresponden al nivel estratégico de planificación en la cadena de suministros. Para abordar la problemática descrita y dar soporte a la toma de decisiones mencionadas, a continuación se describen los bloques de restricciones que integran el modelo matemático desarrollado a través de un enfoque de programación lineal entero mixto. El objetivo es maximizar el Valor Presente Neto en un horizonte de planificación de 20 años.

**Bloque 1: Ingresos y costos operativos.** Cada año  $t \in T$  se obtienen ganancias que pueden provenir de la venta de bioenergía (energía eléctrica y/o térmica) o biocombustibles (pellets), producidos por cualquier tecnología en cualquier planta de conversión que opera en una determinada ubicación  $i \in I^L$  durante el horizonte de planificación. Los costos operativos se componen por los costos de establecimiento, manejo y cosecha de rodales, compra de biomasa, costos de transporte de la materia prima desde las plantaciones dendroenergéticas o los aserraderos a las plantas de conversión, costos de instalación y operación (fijos y variables) de las tecnologías de conversión en cada ubicación, costos de compra de energía cuando las plantas de conversión no puedan autoabastecerse, y, en el caso de los biocombustibles, costos de distribución de los mismos a los mercados propuestos. Los costos de cosecha son dependientes de la productividad de cada rodal  $PR_{i,f,t}$ . Los costos de compra de biomasa y los costos de transporte, en cada año  $t \in T$ , se calculan a partir de las variables continuas que determinan las toneladas de cada tipo de biomasa  $k \in K$  transportada desde los aserraderos  $QM_{k,i,i',j,t}$  y los sitios forestales  $QS_{i,i',j,t}$  a la ubicación de planta  $i'$  para ser procesadas por una tecnología específica  $j$ . Por otro lado, los costos relacionados a las operaciones en las plantas de conversión incluyen la inversión inicial para comenzar a operar una determinada tecnología  $j$ , más los costos operativos fijos y variables. Además, se considera la compra de energía eléctrica  $E_{i,t}^-$  y térmica  $H_{i,t}^-$  cuando éstas no puedan autoabastecerse a partir de la producción propia. Finalmente, los costos de distribución se calculan a partir de las toneladas de biocombustibles  $P_{i,i',t}$  transportados desde las plantas hacia los mercados.

**Bloque 2: Establecimiento y gestión de rodales.** Para cada sitio potencialmente apto para desarrollar una plantación  $i \in I^S$ , se determina que el establecimiento del rodal solo puede realizarse a lo sumo en un periodo de tiempo durante el horizonte de planificación  $t \in T$ , y utilizando un manejo productivo  $f$ . El número de ciclos de aprovechamiento en cualquier rodal está limitado por los años en que éste se encuentre activo dividido el periodo de rotación, o bien por el número máximo de rotaciones consideradas en el modelo productivo elegido. La variable binaria  $Y_{i,f,t}$  determina los periodos de cosecha considerando el año de cultivo del rodal y el modelo productivo aplicado. La productividad  $PR_{i,f,t}$  de un rodal en cada periodo de tiempo dependerá de si dicho rodal se cosecha ese año, y también del número de cortas realizadas previamente. Para representar los efectos del número acumulado de cortas sobre la productividad, se supone que el rendimiento de la primera rotación  $hy_f$  se reduce en un porcentaje  $ly_f$  en cada una de las siguientes rotaciones.

**Bloque 3: Suministro de la biomasa a las plantas de conversión.** Existe un límite en la cantidad de biomasa que puede ser suministrada desde cada fuente (industria maderera o plantación dendroenergética) para el funcionamiento de todas las tecnologías que se encuentren en operación durante cada periodo de tiempo. Además, las calderas de combustión de biomasa están diseñadas para operar mayormente con chips, por lo que se impone una limitación en la cantidad de aserrín que puede procesar cada tecnología de bioenergía en operación.

**Bloque 4: Operación de las tecnologías de conversión en cada ubicación de planta.** Cualquier tecnología de conversión  $j \in J$  puede operar en cada potencial ubicación de planta  $i \in I^L$ , y una vez instalada, ésta continúa en operación hasta el final del horizonte de planificación. En cuanto a la capacidad de las tecnologías  $cap_j$ , se imponen límites mínimos y máximos para su utilización. El parámetro  $uf_j$  determina la tasa mínima de utilización, mientras que  $\pi_j = 24 * 365 * \alpha_j$  representa la cantidad de horas que una determinada tecnología  $j$  puede estar operativa durante un año, siendo  $\alpha_j$  el porcentaje de tiempo que el sistema está disponible para operar sin considerar el tiempo que pueden insumir las actividades de mantenimiento preventivo y/o correctivo. La capacidad utilizada por cada tecnología en operación  $C_{j,i,t}$  y la eficiencia de conversión determinan el flujo de entrada  $IN_{j,i,t}$  a ser procesado. Dicho flujo de entrada se computa de diferentes maneras, dependiendo si la tecnología en cuestión produce bioenergía o biocombustibles. Para las tecnologías que producen bioenergía, la energía total que ingresa al sistema multiplicada por la eficiencia de conversión determina cuánta energía eléctrica y térmica pueden generarse. Finalmente, para determinar la producción neta de cada tipo de energía en cada planta, se computan las necesidades térmicas y eléctricas (en MWh) de todas las tecnologías de conversión que operan en dicha ubicación. Las variables  $H_{I_{i,t}}$  y  $E_{I_{i,t}}$  determinan el consumo interno de energía térmica y eléctrica, respectivamente, que proviene de la producción propia.

**Bloque 5: Venta de la bioenergía y/o biocombustibles producidos.** Cerca de cada ubicación alternativa de planta  $i \in I^L$  se identifican varias industrias de pequeño tamaño como consumidores potenciales de la energía térmica que se puede producir en dicha planta. Se supone que la totalidad de energía eléctrica producida se inyecta a la red. En cuanto a las plantas de pellets en operación, la cantidad de producto vendido a los mercados no debe ser mayor que la producción total de cada instalación.

## Caso de Estudio

El modelo mencionado se aplica a un caso de estudio en la provincia de Entre Ríos, para el cual se seleccionan los parques industriales de 3 ciudades ubicadas en el polo maderero de la región, es decir, en las cercanías de la costa del Río Uruguay, siendo estas Federación, Concordia y Ubajay. La biomasa se puede obtener desde plantaciones dendroenergéticas (desde las que se produce chips de madera) o desde aserraderos (que proveen chips de madera o aserrín). Mediante el uso de un Sistema de Información Geográfico (QGIS) se seleccionaron 16 rodales forestales, cada uno con un tamaño igual o mayor a 20 ha y menor a 30 ha, localizados a 10 km, 20 km y 30 km alrededor de las potenciales ubicaciones de las plantas de conversión. Para el establecimiento de las plantaciones, se consideraron 4 modelos productivos, que contemplan 2 densidades de siembra (2.000 y 2.500 plantas/ha) y diferentes periodos de rotación (5 y 7 años entre turnos de corta). La especie a implantar es el Eucalyptus Grandis, con controles de hormigas y malezas durante los 24 meses siguientes a la plantación, y luego de cada cosecha. Los costos asociados al establecimiento, manejo y cosecha de los rodales se extraen del reporte del INTA (INTA, 2024). Se consideran 10 aserraderos con capacidad de suministrar un máximo de 36.971 toneladas de biomasa por año. Los precios de referencia para la compra de los subproductos se extraen del reporte de INTA (INTA, 2024). El transporte de la biomasa hacia las plantas de conversión se realiza por medio de camiones, y se considera la distancia desde los aserraderos y desde las plantaciones dendroenergéticas hacia cada planta de conversión, y desde éstas hacia los mercados para el caso de la distribución de pellets. Para la transformación de la biomasa se evalúan 11 alternativas de conversión que incluyen: (i) la cogeneración de energía térmica y eléctrica, con capacidades de 3 MW, 5 MW, 7 MW y 10 MW; (ii) la generación de energía térmica, con capacidades de 1 MW, 2 MW, 3 MW y 5 MW; (iii) la producción de pellets, con capacidades de 0,3 ton/hora, y 2 ton/hora utilizando el 47,5% y el 100% de la capacidad operativa. Se asume que la energía producida puede inyectarse a la red o venderse, y que los pellets se pueden distribuir a 4 potenciales mercados.

## Resultados

El algoritmo de optimización fue desarrollado en GAMS y ejecutado en una PC con 16 GB de RAM y 6 núcleos con 12 hilos a 3.9 GHz, utilizando CPLEX como resolvidor MIP. Para el caso de estudio propuesto, considerando un horizonte de planificación de 20 años y una tasa de descuento del 10%, se obtiene una solución de VPN = 32.885.608,26 USD después de 29 segundos de cómputo. La estructura de costos se compone de la siguiente manera: 39% costos de instalación, 31% costos fijos de operación, 11% costos de compra de biomasa, 9% costos de transporte, 6% costos variables de operación, 1% costos de establecimiento de rodales, 1% costos de cosecha, 1% costos de gestión de rodales, y no existen costos de compra de energía dado que la planta se autoabastece.

El modelo propuesto selecciona el Parque Industrial de la ciudad de Concordia para la instalación de una planta de cogeneración de energía (térmica y eléctrica) con una capacidad máxima de 3 MW. En cuanto a la planificación forestal, todos los rodales (plantaciones dendroenergéticas) se establecen en el periodo 1, considerando 2 rotaciones cada 7 años para los rodales S1, S2, S7, S8, S11, S12, S13, S14, S16, y 3 rotaciones cada 5 años para el resto de las plantaciones. En el caso de los aserraderos, suministran 738.897 toneladas de subproductos durante el horizonte de planificación, lo que equivale al 99,9% de la oferta disponible. La relación en el abastecimiento de materia prima desde aserraderos y desde plantaciones dendroenergéticas es del 90% y 10%, respectivamente. El costo por tonelada producida resulta en 26 USD/ton, y considerando que el chip de madera se compra a 12,035 USD/ton, en caso de una mayor competencia se podría llegar a aumentar el precio pagado a los aserraderos, siendo el máximo precio posible el costo de producir una tonelada a partir de rodales. De esta manera se puede incentivar a los aserraderos a almacenar y comercializar sus subproductos, reduciendo problemas de plagas y contaminación, mejorando su margen de ganancias, y permitiendo una planificación a largo plazo considerando un comprador estable. Además, los aserraderos no asumen los costos de transporte.

En la Figura 2 se presentan los niveles de producción de energía eléctrica y térmica (ambos en MWh) para cada año del horizonte de planificación. Se diferencia la producción y venta tanto de energía térmica como eléctrica, y el aprovisionamiento de materia prima desde aserraderos y desde plantaciones dendroenergéticas. Se observa que en los años donde se cosechan los rodales, se incrementa la producción tanto de energía térmica como de energía eléctrica, y se observa una pequeña diferencia entre la producción y la venta, siendo la última inferior a la primera, debido a que en los años donde se cosecha, se requiere energía para autoabastecer el proceso de producción. El costo final de producir 1 MWh de energía (térmica y eléctrica) es de 56 USD.

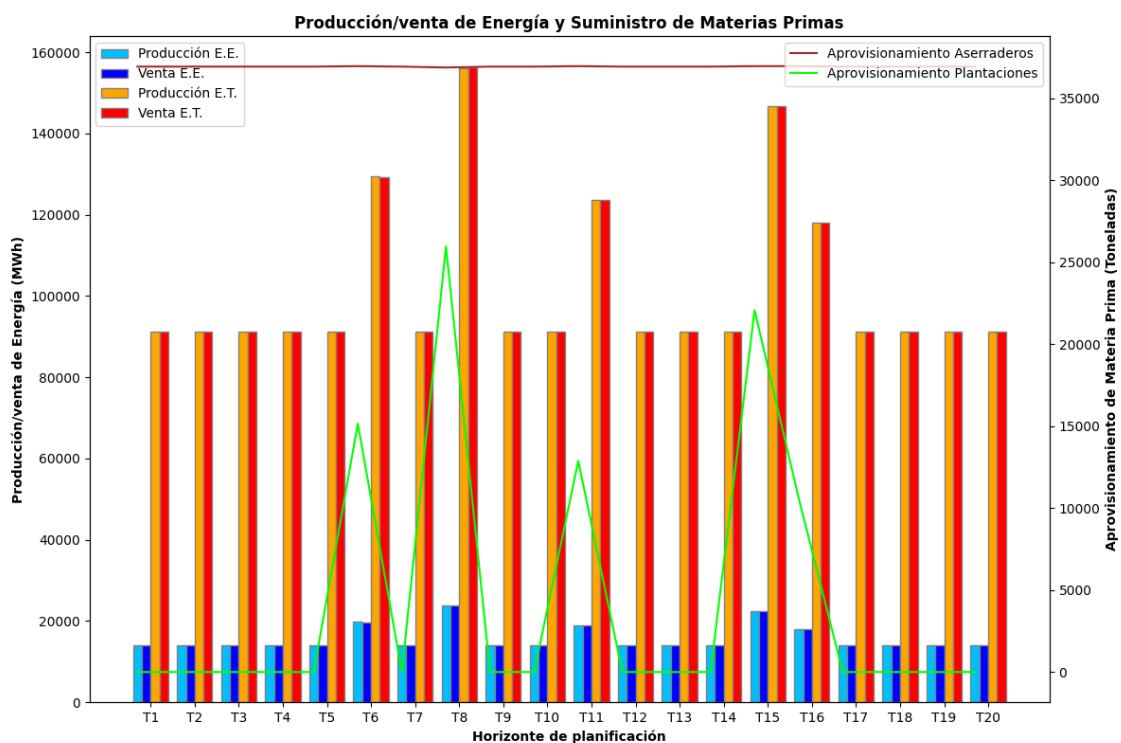


Figura 2: Producción y venta de Bioenergía y Suministro de Materias Primas.



En el año 14 se recupera la inversión, sin considerar financiamiento externo. Para este tipo de proyectos, existen diferentes organismos capaces de brindar financiación, dado que los mismos aportan a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS), principalmente: ODS 7: “Energía asequible y no contaminante”, ODS 8: “Trabajo decente y crecimiento económico”, ODS 11: “Ciudades y comunidades sostenibles”, ODS 12: “Producción y consumo responsables”, y ODS 13: “Acción por el clima”. En caso de obtener un crédito, se espera que en años previos al año 14 se recupere la inversión.

Finalmente, es relevante destacar que la energía proveniente de la biomasa respeta y protege el medioambiente, genera nuevos puestos de trabajo, integra comunidades energéticamente vulnerables, reduce la emisión de gases de efecto invernadero, convierte residuos en recursos, moviliza inversiones, impulsa la transición energética, promueve una cultura de sostenibilidad en la comunidad y genera nuevos negocios y agregado de valor.

## Conclusiones

Este estudio presentó la problemática implicada en la cadena de suministro de la biomasa forestal, considerando como fuentes de suministros las plantaciones dendroenergéticas y los aserraderos. Además, se describieron los bloques de restricciones que integran un modelo MILP diseñado para apoyar la toma de decisiones en la planificación estratégica de operaciones en la CS mencionada. La herramienta desarrollada se aplicó a un caso de estudio que considera la infraestructura foresto-industrial en la provincia de Entre Ríos para verificar su validez y aplicabilidad. Dado que la producción de bioenergía y biocombustibles no puede enfocarse únicamente en la rentabilidad económica, el siguiente objetivo es ampliar el modelo hacia un enfoque multiobjetivo que también contemple aspectos medioambientales y sociales.

## Referencias

- FAO. (2020a). *Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina*. Colección Documentos Técnicos N.º 19. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8764es>
- FAO. (2020b). *Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en la Argentina*. Colección Documentos Técnicos N.º 18. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8031es>
- INTA. (2024). *Boletín de precios de productos y servicios forestales: Zona centro y sudoeste de Corrientes (mayo 2024)*. Recuperado de [https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/18193/INTA\\_CRCorrientes\\_EEABellaVista\\_Zoilo\\_et\\_al\\_Precios\\_prod\\_insumos\\_serv\\_ftales\\_mayo2024.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/18193/INTA_CRCorrientes_EEABellaVista_Zoilo_et_al_Precios_prod_insumos_serv_ftales_mayo2024.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
- Ministerio de Agroindustria (2017). *Censo nacional de aserraderos: Informe del relevamiento censal en la provincia de Entre Ríos - Región Mesopotámica*. Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación.
- Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuña, E., Mola-Yudego, B., & González-García, S. (2015). *Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile*. *Journal of Cleaner Production*, 99, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.085>