

An Optimization Approach for Price Determination in the Forest Biomass Market

Agustina Anselmino¹, Rodolfo Dondo², Mariana Coccolla¹

¹ Universidad Tecnológica Nacional, CONICET, FRCU, E3264

Concepción del Uruguay, Argentina

² INTEC (UNL – CONICET), S3000 Santa Fe, Argentina

anselmanoagustina@conicet.gov.ar;

rdondo@santafe-conicet.gov.ar;

marcoccolla@santafe-conicet.gov.ar

Abstract. This paper presents a mixed-integer quadratic programming (MIQP) model with linear constraints, designed to assess how competition among different industries that consume forest biomass affects the price and availability of this resource. The main objective is to analyze the effects of decision variables on the growth and development of the bioenergy market in Argentina. The optimization model is applied to evaluate the forest biomass supply chain in the province of Entre Ríos, where the fiberboard and particleboard industry is the largest consumer of residual biomass, and its production is more profitable than energy generation.

Keywords: Optimization, Tactical Planning, Forest Biomass, Bioenergy, Logistics.

Un Enfoque de Optimización para la Determinación de Precios en el Mercado de la Biomasa Forestal

Resumen. Este trabajo presenta un modelo matemático cuadrático entero mixto (MIQP) con restricciones lineales, diseñado para evaluar cómo la competencia entre las distintas industrias que consumen biomasa forestal influye en el precio y la disponibilidad del recurso. El objetivo principal es analizar los efectos de las variables de decisión sobre el crecimiento y desarrollo del mercado de la bioenergía en Argentina. El modelo de optimización se aplica para evaluar la cadena de suministro de la biomasa forestal en la provincia de Entre Ríos, donde la industria de tableros de fibras y partículas es el mayor consumidor de biomasa residual, siendo su producción más rentable que la generación de energía.

Palabras clave: Optimización, Planificación Táctica, Biomasa Forestal, Bioenergía, Logística.

1 Introducción

Existe, a nivel global, una creciente presión por incrementar la participación de energías renovables en la matriz energética como parte de los esfuerzos para mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de combustibles fósiles. En Argentina, se han implementado diversas políticas y convocatorias orientadas a incentivar la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Entre ellas se pueden mencionar a la Convocatoria Abierta Nacional e Internacional “RenMDI” y el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA).

La región Mesopotámica de Argentina posee condiciones particularmente favorables para el aprovechamiento de biomasa forestal con fines bioenergéticos debido a su amplia superficie de plantaciones, principalmente de especies como Eucalyptus y Pino. Además de la reutilización de los subproductos de la industria maderera, que representan más del 60% del volumen de madera procesada en forma primaria, en los últimos años se ha comenzado a explorar el potencial del desarrollo de plantaciones dendroenergéticas destinadas exclusivamente a la producción de biomasa con fines energéticos, utilizando ciclos de rotación más cortos en comparación con los de plantaciones tradicionales orientadas a la producción de madera aserrable.

En este contexto, Anselmino et al. (2025) desarrollaron un modelo de optimización lineal entero mixto (MILP), con el objetivo de maximizar el Valor Actual Neto (VAN) en un horizonte de planificación de 20 años, evaluando la producción de bioenergía y biocombustibles a partir de biomasa proveniente tanto desde aserraderos como desde plantaciones dendroenergéticas. Para un caso de estudio en la provincia de Entre Ríos, los resultados obtenidos demostraron la viabilidad de instalar una planta de cogeneración de bioenergía de 3 MW en el Parque Industrial de Concordia, zona núcleo de la actividad foresto-industrial en la provincia. A partir del estudio, los autores concluyen que el costo de producción de una tonelada de biomasa es el doble del precio al que se pueden obtener los subproductos desde los aserraderos, y que un incremento en el precio de la biomasa residual puede afectar significativamente la rentabilidad del proyecto.

En este sentido, el aprovechamiento de la biomasa forestal en Argentina con fines energéticos enfrenta importantes desafíos económicos y logísticos. Actualmente, la oferta de biomasa residual tiene un mercado desarrollado en el que la utilización para la producción de energía entraría en competencia por el recurso con otras industrias como la de celulosa y la de tableros de fibras y partículas, cuya actividad es más rentable que la producción energética. Esto generaría distorsiones en el mercado de la biomasa, elevando sus precios por encima del punto de rentabilidad de las usinas térmicoeléctricas (FAO, 2019). La demanda del recurso por parte de estos grandes competidores genera monopsonios regionales que fijan los precios del recurso dificultando la inserción de proyectos bioenergéticos en las zonas de influencia. Además, resulta conveniente evaluar el costo del transporte y su impacto en la viabilidad económica de los proyectos bioenergéticos, a partir de la determinación de los límites geográficos de las biocuenca, dentro de las cuales es técnica y económicamente factible transportar la biomasa. En consecuencia, el problema se puede abordar desde un enfoque de planificación táctica con el objetivo de determinar el precio y la disponibilidad de biomasa dentro de cada biocuenca. El análisis se enfoca en minimizar los costos logísticos en la

cadena de suministro con el fin de determinar un precio competitivo para el combustible biomásico que permita el desarrollo de proyectos bioenergéticos rentables.

2 Definición del problema

El problema de planificación táctica abordado considera una cadena de suministro que incluye al conjunto de ubicaciones $I = \{I^+ \cup I^-\}$, siendo I^+ el conjunto de nodos fuente (representando a los proveedores que comercializan biomasa forestal en sus diferentes formas) e I^- el conjunto de nodos consumidores de dicho recurso, los que pueden requerir del recurso para la producción de bioenergía (I^B) o para su transformación en otros tipos de productos (I^P), siendo $I^- = \{I^B \cup I^P\}$. La Figura 1 esquematiza la estructura de la cadena de suministro considerada en este estudio, donde varios tipos de industrias con diferente valor agregado en sus productos, compiten por el mismo tipo de materia prima que, en este caso, es la biomasa de origen forestal.

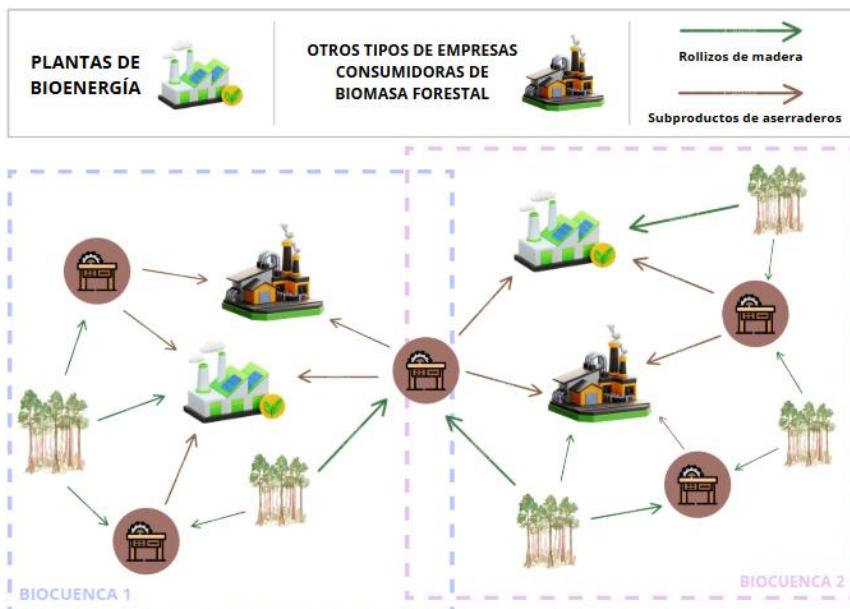


Fig. 1. Estructura de la cadena de suministro.

Cada proveedor $i \in I^+$ puede suministrar diferentes tipos de biomasa, tales como chips, aserrín, y madera en rollo, considerando además diferentes porcentajes de humedad. En la práctica, el contenido de humedad es extremadamente importante para no dañar las calderas, las cuales, dependiendo de su tecnología, tienen capacidad para aceptar un menor o mayor contenido. Por ese motivo, tanto en los acuerdos verbales como en los contratos formales, la humedad de la biomasa es un aspecto clave que compromete el precio final que el consumidor está dispuesto a pagar por la materia prima. Los diferentes tipos de biomasa disponible, diferenciadas por su contenido de humedad, se agrupan en el conjunto K . Para cada mes del horizonte de planificación

$t \in T$, el parámetro $a_{i,k,t}$ determina la cantidad de biomasa $k \in K$ disponible en cada proveedor $i \in I^+$. Otra restricción operativa importante para el funcionamiento de las calderas en cada nodo $i \in I^B$ se relaciona con el porcentaje de finos (incluyendo el aserrín) que puede contener la biomasa entrante, aceptando en las mejores condiciones hasta un 30%. Dicho porcentaje se representa a través del parámetro $wcp_{w,i}$, donde $w \in W$ incluye únicamente los tipos de biomasa, por ejemplo $W = \{chip, aserrín\}$, sin diferenciar su porcentaje de humedad como lo hace el conjunto K , por ejemplo $K = \{chip_30, chip_40, aserrín_40\}$.

Uno de los principales desafíos del mercado de la biomasa es definir el precio adecuado de venta para cada proveedor, teniendo en cuenta el precio mínimo publicado periódicamente por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y el precio puesto en planta que están dispuestos a pagar los consumidores del recurso $i' \in I^-$. Ambos precios para cada periodo $t \in T$ y cada tipo de biomasa $k \in K$, se representan a través de los parámetros $pb_{k,t}^{INTA}$ y $pb_{i',k,t}$, respectivamente. El precio final que reciba cada proveedor $i \in I^+$, se considera como variable de decisión ($P_{i,k,t}$), y su valor dependerá de la disponibilidad de biomasa en la zona, de la distancia entre proveedor y consumidor, y de los contratos previos que las empresas consumidoras puedan tener con los proveedores de la materia prima. La distancia entre los nodos de la red se determina a través del parámetro $d_{i,i'}$, con $i \in I^+$ e $i' \in I^-$. La existencia de un contrato entre un proveedor i y un consumidor i' se establece a través del parámetro $c_{i,i',k,t}$ que determina la cantidad mínima de biomasa k a ser suministrada en el periodo t .

El movimiento de la biomasa desde los puntos de suministro hacia los consumidores se realiza siempre mediante camiones, cuyo costo de operación se establece en toneladas por kilómetro. Específicamente, el parámetro $tc_{k,t}$ contabiliza el costo de transportar una tonelada de producto tipo k a lo largo de un kilómetro durante el periodo t .

Cada nodo consumidor $i' \in I^P$ demanda una cantidad $dem_{i',t}$ de biomasa en cada periodo de tiempo $t \in T$. En el caso de la producción de bioenergía, las plantas $i' \in I^B$ pueden ajustar la producción de acuerdo con el volumen de combustible de entrada recibido, debiendo cumplir siempre con el factor de utilización mínimo $uf_{i'}$ de la capacidad instalada $cap_{i'}$. Se contempla una penalidad con costo asociado $pen_{i',t}$ cuando no se satisface la demanda de algún nodo consumidor $i' \in I^-$ en algún periodo de tiempo $t \in T$.

El problema asume que todas plantas cuentan con capacidad para “chipear” madera en rollo, con un costo asociado $ccp_{i',k,t}$ en caso de que fuere conveniente adquirirla. Por otra parte, algunos sistemas de conversión requieren de un proceso de secado previo de la biomasa entrante para que ésta pueda alcanzar un contenido de humedad de entre el 30% y el 50% en base húmeda (para la producción de bioenergía) o 12% (para la producción de pellets). La etapa de secado consiste en la evaporación del agua contenida en el recurso. A través de un parámetro que considera los valores de humedad entrantes y salientes, es posible determinar la cantidad de biomasa seca resultante.

Para su conversión en energía, es necesario conocer a priori el poder calorífico inferior (PCI) de cada tipo de biomasa k según el contenido de humedad aceptado por la tecnología de conversión instalada en cada planta $i' \in I^B$. La cantidad de energía eléctrica que pueda entregar una planta en cada periodo del horizonte de planificación estará

determinada por la capacidad operativa máxima $cap_{i'}$, su eficiencia de conversión ϕ_i , y el volumen de combustible de entrada procesado.

Todos los nodos consumidores cuentan con la infraestructura necesaria para operar y gestionar el almacenamiento de la biomasa entrante, el cual tendrá límites en su capacidad $[i_{i',k,t}^{min}, i_{i',k,t}^{max}]$, y deberá asegurar que el recurso se encuentre en buenas condiciones para no dañar los equipos y poder aprovechar al máximo su potencial energético. Al comienzo del horizonte de planificación, se asume que cada planta $i' \in I^-$ cuenta con un inventario inicial de biomasa, dado por el parámetro $i_{i',k}^0$. Las condiciones de almacenamiento tienen un papel preponderante en el contenido de humedad del recurso biomásico, dado que es diferente disponerlo a cielo abierto (donde adquiere fácilmente humedad del ambiente) que ubicarlo en lugares techados, cerrados y/o en silos. Esto ocurre porque la madera es un material higroscópico, es decir que tiene la capacidad de absorber y retener humedad del medio en el que se encuentra.

La solución al problema descripto tiene como objetivo determinar para cada mes $t \in T$ del horizonte de planificación las siguientes decisiones: (i) El precio de venta de cada tipo de biomasa en cada proveedor, $P_{i,k,t}$, (ii) La cantidad de biomasa transportada entre los nodos de la red, $Q_{i,i',k,t}$, (iii) Las existencias en inventario en cada planta al finalizar el periodo, $I_{i',k,t}$, (iv) La cantidad de biomasa utilizada por cada planta en operación, $C_{i',k,t}$, (v) La demanda insatisfecha en cada nodo de consumo, $UD_{i',t}$, (vi) La cantidad de energía térmica utilizada en cada planta durante el proceso de secado, $H_{i',t}$.

3 Formulación Matemática

El problema se representa matemáticamente mediante un enfoque de programación entera mixta, con función objetivo cuadrática y restricciones lineales. Tanto el precio de venta $P_{i,k,t}$ de la biomasa tipo k por parte del proveedor $i \in I^+$ en el periodo t , como la cantidad suministrada $Q_{i,i',k,t}$ a cada nodo consumidor $i' \in I^-$, se definen como variables de decisión en el problema de optimización. El término cuadrático surge a partir del producto entre ambas variables continuas. Además, se utiliza la variable binaria $Z_{i,i',k,t}$ para indicar el suministro de biomasa tipo k desde el proveedor i al consumidor i' durante el periodo de tiempo $t \in T$. En la formulación matemática, se usan letras minúsculas para indicar parámetros del modelo y letras mayúsculas para las variables de decisión. Las restricciones del problema se agrupan según su tipo en los siguientes bloques:

Función objetivo. Se busca minimizar los costos asociados a la compra, transporte, almacenamiento y preprocesamiento de la biomasa. En consecuencia, la función objetivo contiene los siguientes términos: (i) el precio que paga cada nodo consumidor por el total de biomasa adquirida en cada periodo de tiempo; (ii) los costos de transportar la biomasa desde los proveedores hacia las plantas, donde el parámetro $tc_{k,t}$ representa el costo unitario de transporte por tonelada por kilómetro, y $d_{i,i'}$ la distancia entre dos ubicaciones en la red de suministro; (iii) los costos de “chipeo” en planta, donde el parámetro $ccp_{i',k,t}$ determina el costo unitario de chipear una tonelada de biomasa tipo k en la planta $i' \in I^-$ durante el periodo t ; (iv) los costos de almacenamiento de la biomasa, siendo $ci_{i,k,t}$ el costo de inventario por tonelada de biomasa tipo k en la instalación i durante el periodo t , y la variable continua $I_{i,k,t}$, que indica la cantidad en

inventario en cada nodo consumidor al finalizar cada periodo; (v) los costos asociados al consumo de energía térmica utilizada para el secado de la biomasa, donde el parámetro $ch_{i,t}$ representa el costo por unidad de energía térmica, mientras que la variable $H_{i,t}$ indica la cantidad de calor utilizado en la instalación i durante el periodo t ; (vi) la penalidad por demanda insatisfecha, siendo el parámetro $pen_{i,t}$ el costo unitario por consumo faltante durante el periodo t en la instalación $i \in I^-$, y la variable continua $UD_{i,t}$ la cantidad de demanda insatisfecha, y (vii) la penalidad por no cumplir los requerimientos de inventario al final del horizonte de planificación, siendo $pen_{i,t}^T$ el costo unitario asociado y $UD_{i,t}^T$ la cantidad de inventario no satisfecho.

$$\begin{aligned} \min TC = & \sum_{i \in I^+} \sum_{i' \in I^-} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} P_{i,k,t} \times Q_{i,i',k,t} + \sum_{i \in I^+} \sum_{i' \in I^-} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} tc_{k,t} \times d_{i,i'} \times Q_{i,i',k,t} \\ & + \sum_{i \in I^+} \sum_{i' \in I^-} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} ccp_{i',k,t} \times Q_{i,i',k,t} + \sum_{i \in I^-} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} ci_{i,k,t} \times I_{i,k,t} \\ & + \sum_{i \in I^-} \sum_{t \in T} ch_{i,t} \times H_{i,t} + \sum_{i \in I^-} \sum_{t \in T} pen_{i,t} \times UD_{i,t} \\ & + \sum_{i \in I^-} \sum_{t \in T} pen_{i,t}^T \times UD_{i,t}^T \end{aligned} \quad (1)$$

Disponibilidad y precio de la biomasa. En el mercado de la biomasa, suelen formarse monopsonios regionales, dónde algunas grandes empresas $i' \in I^-$ consumidoras del recurso establecen los precios máximos por tonelada de materia prima puesta en fábrica, dato conocido a través del parámetro $pb_{i',k,t}$. De esta manera, como establece la restricción (2), el valor $P_{i,k,t}$ que recibe cada proveedor dependerá de los nodos de consumo a los que entregue y de la distancia de estos al punto de suministro. A su vez, la restricción (3) impone el precio mínimo de venta $pb_{k,t}^{INTA}$ por tonelada de cada tipo de biomasa k , de acuerdo con los valores de mercado publicados periódicamente por el INTA.

$$P_{i,k,t} \geq (pb_{i',k,t} - tc_{k,t} \times d_{i,i'}) \times Z_{i,i',k,t} \quad \forall i \in I^+, i' \in I^-, k \in K, t \in T \quad (2)$$

$$P_{i,k,t} \geq pb_{k,t}^{INTA} \quad \forall i \in I^+, k \in K, t \in T \quad (3)$$

La restricción (4) fuerza a que la cantidad de biomasa tipo k a ser entregada desde el proveedor $i \in I^+$ a un consumidor $i \in I^-$ en el periodo t sea mayor o igual a la cantidad definida por el contrato $c_{i,i',k,t}$, si existiese acuerdo entre ambos actores, y menor o igual a la cantidad total disponible en el proveedor para su venta $a_{i,k,t}$, siempre que $Z_{i,i',k,t} = 1$. Además, la cantidad de biomasa tipo k entregada por cada proveedor $i \in I^+$ a todos los destinos consumidores $i \in I^-$ no puede ser mayor a la disponibilidad en cada periodo, como lo determina la restricción (5).

$$c_{i,i',k,t} \leq Q_{i,i',k,t} \leq a_{i,k,t} \times Z_{i,i',k,t} \quad \forall i \in I^+, i' \in I^-, k \in K, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{i' \in I^-} Q_{i,i',k,t} \leq a_{i,k,t} \quad \forall i \in I^+, k \in K, t \in T \quad (5)$$

Almacenamiento de la biomasa. La restricción (6) contabiliza el inventario de cada tipo de biomasa en cada nodo consumidor al finalizar un periodo de tiempo. El consumo efectivo de biomasa tipo k en una planta i durante el periodo t se define por la variable continua $C_{i,k,t}$. Además, se utiliza la variable continua $L_{i,k,t}$ para indicar la cantidad acumulada de biomasa que se pierde hasta el periodo t por no haber sido utilizada dentro del plazo límite de tiempo en el cual el material mantiene las cualidades técnicas necesarias para su uso en el proceso. Por otra parte, la restricción (7) establece una capacidad limitada de almacenamiento, definido su límite inferior por $i_{i,k,t}^{min}$ y la cantidad máxima por $i_{i,k,t}^{max}$. Finalmente, la restricción (8) obliga a que la cantidad total de biomasa en inventario, al finalizar el horizonte de planificación, sea mayor o igual a un valor preestablecido na_i . En caso de no alcanzar dicho requerimiento mínimo, la variable $UD_{i,t}^T$ contabiliza la cantidad faltante.

$$I_{i,k,t} = i_{i,k,t}^0 + \sum_{i' \in I^+} \sum_{t' \leq t} Q_{i',i,k,t'} - \sum_{t' \leq t} C_{i,k,t'} - L_{i,k,t} \quad \forall i \in I^-, k \in K, t \in T \quad (6)$$

$$i_{i,k,t}^{min} \leq I_{i,k,t} \leq i_{i,k,t}^{max} \quad \forall i \in I^-, k \in K, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} I_{i,k,t} + UD_{i,t}^T \geq na_i \quad \forall i \in I^-, t \in T: t = |T| \quad (8)$$

Las restricciones (9) y (10) se utilizan para determinar la cantidad de biomasa en almacenamiento que tiene que ser descartada por haber superado el tiempo máximo de almacenamiento tr^{max} . Como se mencionó anteriormente, desde que la biomasa se recibe en la planta, se establece un número máximo de periodos de tiempo para su utilización. Esto se debe a que un almacenamiento prolongado puede causar algunos problemas, tales como la generación de hongos. La variable $L_{i,k,t}$ determina la cantidad acumulada de biomasa tipo k descartada en la planta i hasta el periodo t .

$$L_{i,k,t} \geq \sum_{t' \in T: t' \leq t - tr^{max}} \sum_{i' \in I^+} Q_{i',i,k,t'} - \sum_{t' \in T: t' < t} C_{i,k,t'} \quad \forall i \in I^-, k \in K, t \in T: t > tr^{max} \quad (9)$$

$$L_{i,k,t} \geq L_{i,k,t-1} \quad \forall i \in I^-, k \in K, t \in T: t > tr^{max} + 1 \quad (10)$$

Consumo de biomasa en las industrias. Debido a las configuraciones de diseño de los procesos de producción en cada planta $i \in I^-$, es necesario establecer un máximo porcentaje de biomasa de tipo $w \in W$ que puede ser utilizada en cada periodo, como lo establece la restricción (11). Como se explicó anteriormente, el conjunto W incluye únicamente los tipos de biomasa sin considerar su porcentaje de humedad.

$$wcp_{w,i} \times \left(\sum_{k \in K} C_{i,k,t} \right) \geq \sum_{k \in K_w} C_{i,k,t} \quad \forall i \in I^-, w \in W, t \in T \quad (11)$$

El contenido de humedad de la biomasa usada como combustible en las calderas suele ser un factor importante para el buen funcionamiento de los equipos. Además, otros procesos, como por ejemplo la producción de pellets, requieren llevar la humedad de la materia prima a umbrales mínimos. Cuando la humedad del material está por encima de los requerimientos técnicos de la tecnología usada en una determinada instalación, es necesario someter la materia prima a un proceso de secado, siendo el parámetro $dr_{k,i}$ aquel que especifica qué porcentaje de agua hay que evaporar de la biomasa tipo k para alcanzar el umbral de humedad exigido por la tecnología instalada en la planta i . La restricción (12) determina el consumo de energía térmica en una instalación durante cada periodo, considerando el consumo específico de calor η_i^h por tonelada de agua evaporada.

$$H_{i,t} = \eta_i^h \times \sum_{k \in K} (C_{i,k,t} \times (1 - dr_{k,i})) \quad \forall i \in I^-, t \in T \quad (12)$$

Para las plantas $i \in I^B$ que producen bioenergía, la restricción (13) determina, a través de la variable continua $IN_{i,t}$, la cantidad total de energía de entrada (en MWh) al proceso de conversión, multiplicando las toneladas de cada tipo de biomasa resultante del proceso de secado por su poder calorífico inferior $lhv_{k,i}$ (GJ/ton) y por el factor de conversión ρ (MWh/GJ).

$$IN_{i,t} = \sum_{k \in K} (C_{i,k,t} \times dr_{k,i} \times lhv_{i,k} \times \rho) \quad \forall i \in I^B, t \in T \quad (13)$$

Finalmente, la eficiencia de conversión ϕ_i de la tecnología instalada en cada planta $i \in I^B$, determina cuanta energía eléctrica se produce en cada periodo de tiempo, como se especifica en la restricción (14). Se deben cumplir con las capacidades operativas mínimas y máximas. La capacidad operativa mínima se define mediante el producto entre el parámetro uf_i , que determina la tasa mínima de utilización, el parámetro cap_i que indica la capacidad máxima de la planta, y el parámetro $\pi_i = 30 * 24 * \alpha_i$, que representa la cantidad de horas que una determinada planta i puede estar operativa durante un periodo, siendo el factor de disponibilidad α_i el porcentaje de tiempo que el sistema está disponible para operar considerando las actividades de mantenimiento preventivo y/o correctivo. Por otro lado, la capacidad operativa máxima se define como la multiplicación entre la capacidad instalada cap_i y el parámetro π_i . Cuando exista demanda insatisfecha de biomasa en algún periodo de tiempo, la producción de la planta no podrá alcanzar los niveles mínimos requeridos y, por lo tanto, la variable $UD_{i,t}$ será obligada a tomar un valor mayor a cero. Para las plantas de bioenergía $i \in I^B$, la demanda insatisfecha se mide en MWh , indicando la cantidad de energía eléctrica que no pudo ser generada debido a la falta de material combustible.

$$(uf_i \times cap_i \times \pi_i) - UD_{i,t} \leq IN_{i,t} \times \phi_i \leq cap_i \times \pi_i \quad \forall i \in I^B, t \in T \quad (14)$$

Para los otros tipos de industrias consumidoras de biomasa $i \in I^P$, la demanda insatisfecha se mide en toneladas y se calcula como la diferencia entre la demanda total de biomasa al umbral de humedad requerido $dem_{i,t}$ y la cantidad de materia prima consumida en dicho periodo, como se especifica en la restricción (15).

$$dem_{i,t} = \sum_{k \in K} C_{i,k,t} \times dr_{k,i} + UD_{i,t} \quad \forall i \in I^P, t \in T \quad (15)$$

4 Caso de Estudio y Resultados

Para evaluar la potencialidad del modelo propuesto, se plantea un caso de estudio en la provincia de Entre Ríos. Como se muestra en el mapa de la Figura 2, existen 2 grandes empresas consumidoras ubicadas en los departamentos de Concepción del Uruguay (PM1) y Concordia (PM3), las cuales se especializan en la producción de tableros de fibras y partículas, con una demanda promedio de 5.000 toneladas mensuales de biomasa cada una (ver Tabla 1). Además, se identifican otros dos nodos de consumo: la ubicación PM2 que referencia una fábrica de pellets con capacidad de producción de 2 ton/hora y un consumo promedio mensual de biomasa seca de 800 toneladas, y el nodo BP1, que determina la ubicación de una usina termoeléctrica con capacidad de 3 MW y un consumo promedio de 2,2 toneladas de biomasa por MWh generado, proyecto que fue licitado en la última convocatoria del RenMDI para su instalación en la ciudad de Ubajay.

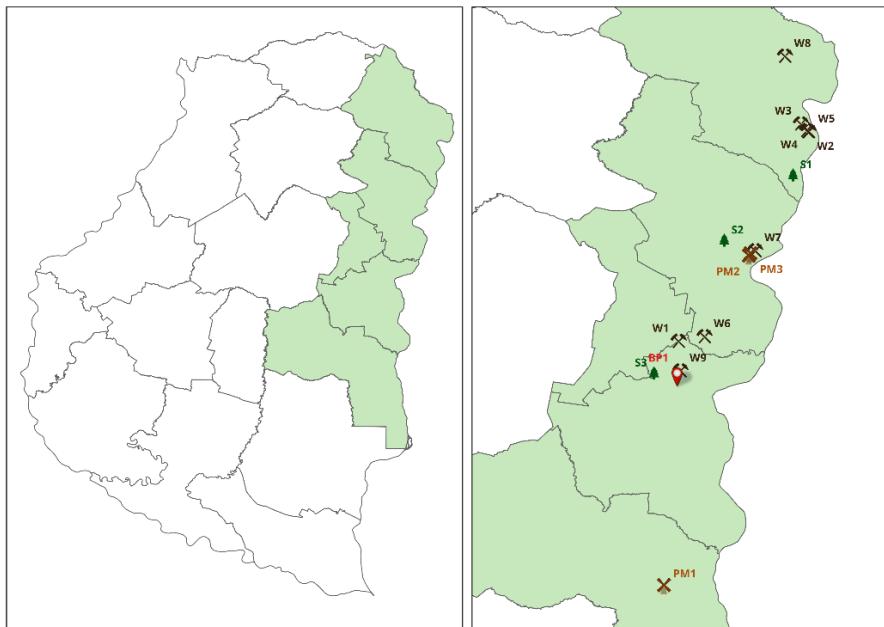


Fig. 2. Actores de la cadena de suministros (W = Aserraderos, S = Rodales forestales, PM = Plantas consumidoras de biomasa, BP = Usina termoeléctrica).

Respecto a la disponibilidad del recurso, la provincia de Entre Ríos cuenta con una gran cantidad y variedad de biomasa forestal, con accesibilidad continua durante todo el año, y que se puede almacenar a la intemperie, transportar y “chipear” fácilmente. Como se resalta en el lado derecho de la Figura 2, el principal polo maderero de la

provincia se ubica sobre la costa del Río Uruguay, en los departamentos de Federación, Concordia y Colón. En la zona funcionan más de 200 aserraderos, que trabajan con promedios de rendimientos menores al 50%, es decir que por cada metro cúbico de rollos que ingresan a esta industria, se producen menos de medio metro cúbico de tablas, y más de la mitad se transforma en subproductos (aserrín, costaneros, despuntes, etc.). Mediante el uso del sistema de información geográfica QGIS, se identifican 3 rodales forestales para la producción de biomasa con un tamaño de entre 20 y 30 hectáreas, de la especie Eucalyptus Grandis. Respecto de los aserraderos, se seleccionan 9 ubicaciones, capaces de suministrar biomasa residual, principalmente aserrín y chips de madera, con diferentes contenidos de humedad. La oferta y demanda mensual promedio de biomasa en cada nodo de la red de suministro se detalla en la Tabla 1.

Tabla. 1. Oferta y Demanda de Biomasa en cada Nodo de la Red

Proveedores	Oferta Promedio Mensual (ton)	Plantas	Demandada Promedio Mensual (ton)
W1	2146	BP1 (3 MW)	Aprox. 2,2 por MWh
W2	2265	PM1 (Fábrica de Table-ros)	5200
W3	1865	PM2 (Fábrica de Pellets)	768 (12% de Conte- nido de humedad en base húmeda)
W4	1816	PM3 (Fábrica de Table-ros)	4200
W5	1798		
W6	1762		
W7	30		
W8	64		
W9	1586		
S1	256		
S2	274		
S3	286		

Los precios de referencia mínimos para la compra de los subproductos son publicados periódicamente por el INTA Concordia (INTA, 2024), quién también provee información sobre los precios de los productos forestales puestos en planta que pagan las empresas consumidoras de la región. Para determinar el precio máximo que podría llegar a pagar la planta de bioenergía por cada tonelada de biomasa, se toman como referencia los resultados del estudio desarrollado por Olemburg y Lupi (2024), considerando un precio subsidiado de la bioenergía de 130 $\left[\frac{USD}{MWh}\right]$.

El transporte del material desde los puntos de suministro hacia los consumidores se realiza utilizando un servicio de transporte terciarizado. La costa del Río Uruguay posee una densa red de infraestructura vial pavimentada con niveles de accesibilidad a las potenciales fuentes de suministro de biomasa por encima del 70%. Los costos de transporte rondan aproximadamente entre 0.12 y 0.15 USD/ton.km, dependiendo del tipo de material transportado. La biomasa es diferenciada por su contenido de humedad,

característica que, si bien no resulta importante para la fabricación de tableros, si es relevante para la producción de pellets y bioenergía, con umbrales máximos de humedad del 12% y 50%, respectivamente. En caso de no cumplir con dicho requerimiento, la biomasa debe pasar por un proceso de secado que tiene un consumo de energía térmica asociado de 1200 kWh por tonelada de agua evaporada. Además, se considera un costo de “chipeado” de 0.0436 USD/ton para la madera en rollo.

Las especificaciones técnicas del equipamiento utilizado en algunos procesos determinan un máximo en la utilización de aserrín, siendo del 20% para la producción de tableros y 30% en las calderas de combustión a biomasa.

Respecto al funcionamiento de la planta de bioenergía, se considera un factor de disponibilidad del 91% y una operación de 24 horas diarias. Además, se impone un mínimo de 41% al uso de la capacidad operativa de 3 MW instalada, con una eficiencia de conversión del 15%.

En principio, se considera que no existen contratos con los proveedores que aseguren el aprovisionamiento de materia prima a las empresas, y que las capacidades de almacenamiento en los nodos de consumo son las suficientes para mantener una operación continua de las plantas.

El algoritmo de optimización fue desarrollado en Python utilizando la librería Pyomo, y ejecutado en una PC con 16 GB de RAM y 8 núcleos con 16 hilos a 2.1 GHz, utilizando GUROBI como resovedor MIP. Considerando un horizonte de planificación de 12 meses, se obtiene una solución óptima con mínimo costo operacional de 3.337.594 USD después de 332 segundos de cómputo. Los resultados obtenidos no muestran demanda insatisfecha en ninguno de los nodos consumidores. El flujo óptimo de biomasa desde los puntos de suministro hasta las plantas se ilustra en la Figura 3.

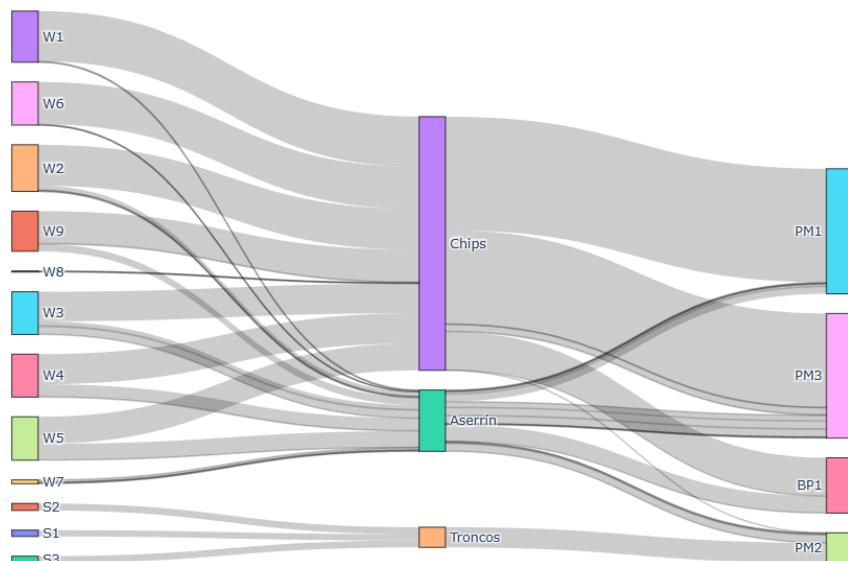


Fig. 3. Dimensión del flujo de cada tipo de biomasa desde los proveedores hacia los consumidores (W = Aserraderos, S = Rodales forestales, PM1, PM3 = Fábricas de Tableros, PM2= Fábrica de Pellets, BP1 = Planta de Bioenergía).

Desde un enfoque de cadena de suministro colaborativa, dónde la función objetivo busca minimizar los costos operativos totales, la solución óptima del problema sugiere que la biomasa producida en el rodal S1 se envíe a la planta PM2 en vez de hacerlo al nodo de consumo más cercano BP1. Esto se debe a que el precio que puede pagar la planta de bioenergía por el recurso es mayor al valor ofertado por la empresa productora de pellets. La Tabla 2 detalla que, en promedio, las distancias recorridas van desde los 2,8 km (en el caso de W7 a PM3, que se visualizan muy cercanas en la Figura 2, en el departamento de Concordia) hasta los 141 km (en el caso de W7 a PM1, considerando que PM1 no cuenta con proveedores cercanos como las demás plantas). El promedio de biomasa consumida en relación con la biomasa disponible es del 91,27%.

Tabla. 2. Detalle de las distancias recorridas y aprovechamiento del recurso

BSN / BCN	Distancia (km)					Consumo (ton)	Disponible (ton)	Aprovechamiento (%)
	BP1	PM1	PM2	PM3	Prom.			
W1		109			109,00	23.936,84	25.755,04	92,94%
W2	110		63,8	62,5	78,77	21.836,78	27.180,00	80,34%
W3	108		62	60,8	76,93	19.992,67	22.378,19	89,34%
W4	109		62,9	61,6	77,83	20.089,63	21.791,95	92,19%
W5	110		69,3	62,6	80,63	20.302,07	21.576,00	94,10%
W6		105		37,7	71,35	20.175,85	21.144,00	95,42%
W7	54,9	141	4,1	2,8	50,70	1.785,68	1.785,68	100,00%
W8	131		84,4	83,2	99,53	487,31	769,44	63,33%
W9		86,9		51,9	69,40	18.772,15	19.032,00	98,63%
S1			72,5		72,50	2.961,48	3.072,00	96,40%
S2			28,7		28,70	3.262,54	3.288,00	99,23%
S3			70,2		70,20	3.200,96	3.432,00	93,27%

En relación con el inventario, la Figura 4 muestra un incremento en todas las plantas a partir del mes 8. Una situación particular ocurre en el mes 11, dónde los nodos BP1 y PM1 incrementan su inventario, pero la planta PM3 disminuye considerablemente el nivel del mismo, volviendo a crecer nuevamente en el siguiente periodo. Esto sugiere que, cuando escasea la materia prima, los competidores organizan sus recursos para que todas las plantas se mantengan operativas.

El precio que obtiene el proveedor por la biomasa varía dependiendo de la región donde la misma se consume, formando de esta manera las biocuencaas anteriormente mencionadas. En la Figura 5 se muestran los valores obtenidos para la variable $P_{i,k,t}$, que indican la cantidad efectiva de dinero que recibe el proveedor por la venta de cada tipo de subproducto, considerando el promedio sobre todo el horizonte de planificación. Cuando el proveedor no comercializa un determinado tipo de biomasa, se asigna el valor 0 en el gráfico. Se observa que el precio más alto corresponde a la biomasa producida en el rodal forestal localizado cerca de la ciudad de Concordia. Respecto a los chips de madera y el aserrín, se observa que los valores más elevados de las variables

de precio corresponden a los establecimientos W2, W4, W3 y W5, localizados en el departamento de Federación. Esto indica que dichos aserraderos perciben una mayor ganancia que los demás por la venta de los subproductos. La característica común que poseen es que todos ellos venden biomasa a la planta BP1, la cual inicialmente está dispuesta a pagar un precio mayor por la biomasa residual puesta en fábrica, no afectando las distancias de transporte mayores a 100 km que existen entre dichos puntos de suministro y la planta de bioenergía. Del análisis realizado en la Figura 5, también se determina que existe una gran variabilidad en los precios, siendo: para el aserrín, desde 3,5 USD a 11,8 USD por tonelada; para los chips, desde 5,8 USD a 13,5 USD por tonelada; para la producción de biomasa, desde 11,5 USD a 17,2 USD por tonelada. Queda en evidencia la variabilidad existente en el precio pagado a los proveedores en las diferentes biocuencas que se generan, reflejando de esta manera la complejidad de la dinámica involucrada en la cadena de suministros.

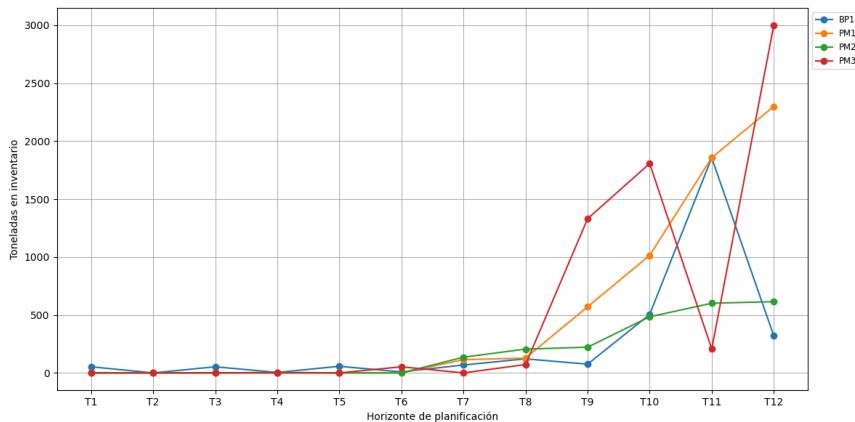


Fig. 4. Evolución del inventario de cada planta a lo largo del horizonte de planificación.

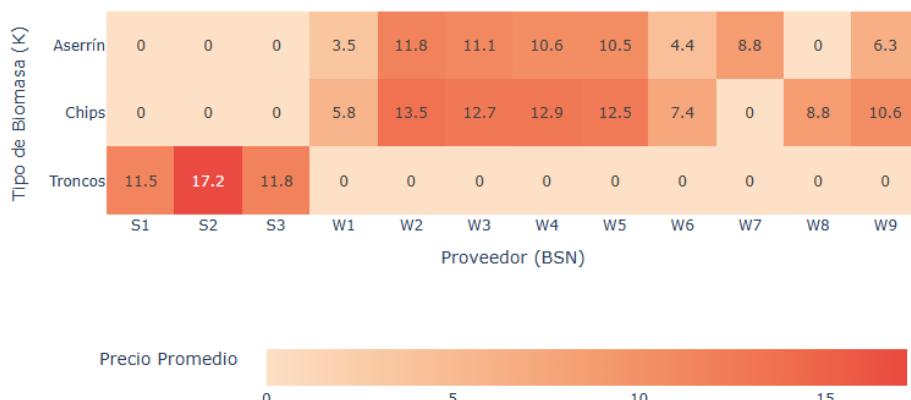


Fig. 5. Precio promedio de la biomasa forestal según cada proveedor.

Finalmente, cabe destacar que el aprovechamiento de la biomasa residual convierte residuos en recursos, minimizando el impacto ambiental que éstos generan, colaborando en la lucha contra el cambio climático y aportando al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (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”.

5 Conclusiones

Este trabajo presentó un modelo MIQP para dar soporte a la toma de decisiones a nivel táctico sobre el abastecimiento de materia prima en una cadena de suministro de biomasa forestal. El modelo fue aplicado en un caso de estudio de la provincia de Entre Ríos para demostrar su validez y aplicabilidad. Como continuidad del trabajo, se planteará considerar como dato de entrada del problema las ganancias obtenidas por cada uno de los actores que participan en la cadena de suministro. Por un lado, los proveedores además de querer generar ingresos a través de la venta de los subproductos derivados de su actividad primaria, también quieren evitar problemas medioambientales por la acumulación del residuo tales como riesgos de incendio y proliferación de roedores. Por parte de los consumidores del recurso, la biomasa se puede transformar en productos de distinto valor agregado, y en el caso de la bioenergía, su precio está subsidiado por el estado nacional para favorecer el desarrollo de energías limpias que permitan transformar la matriz energética de nuestro país. Estas consideraciones sugieren que el planteo de una simple función objetivo que maximice ganancias menos costos no es la mejor opción para alcanzar una representación adecuada del problema en cuestión.

Agradecimientos. Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Tecnológica Nacional por la financiación recibida a través del Proyecto PID UTN SIECCU0008601.

Referencias

- Anselmino, A., Piedra-Jimenez, F., Rodriguez, M. A., Dondo, R. G., & Coccolla, M. E. (2025). *Strategic optimization of short-rotation woody crops for bioenergy production*. Biomass and Bioenergy, 195, 107686. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107686>
- FAO. (2019). *Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo*. Colección Informes Técnicos N.º 7. Buenos Aires. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca7225es>
- INTA. (2024). *Boletín de Precios de Productos, Insumos y Servicios Forestales*. <https://drive.google.com/file/d/1HWkY5K6FHXBAZWOFDOfeqBrWm1PWNQIP/view>
- Oleberg, D., & Lapi, A. M. (2024). *Economic analysis of Eucalyptus biomass cultivation for energy in Argentina*. Cleaner and Circular Bioeconomy, 8, 100085. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100085>