

Planificación estratégica del manejo forestal y diseño de la cadena de suministro forestal sostenible en el Nordeste Argentino

Strategic forest management planning and sustainable forest supply chain design in Northeastern Argentina

Doctoranda:

María Emilia DUSSEL

<https://orcid.org/0009-0009-0142-997X>

Instituto de Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Procesos y Química Aplicada (IPQA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

Doctorada en Ingeniería, mención Industrial – Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina

emilia.dussel@unc.edu.ar

Directora:

María Analía RODRÍGUEZ

Codirector:

Juan Matías NOVAS

Resumen

El sector forestal del Nordeste Argentino concentra cerca del 80% de la producción nacional de bosques cultivados, con tasas de crecimiento que superan ampliamente las de Europa y Norteamérica; sin embargo, ni el manejo del recurso ni la industria que lo transforma se encuentran optimizados de manera integrada. Este trabajo aborda el problema en dos niveles complementarios, formulados como programas disyuntivos generalizados (GDP) y reformulados como programas lineales enteros mixtos (MILP). El primer nivel planifica el manejo de 10.141 rodales de Pinus (44.437 ha) en Misiones sobre un horizonte de 40 años, maximizando simultáneamente el valor presente neto (VPN) y el secuestro neto de CO₂. Para volver tratable el problema se propone una estrategia de clustering en tres etapas —tipo de suelo, año de tala rasa y consolidación espacial— que construye Unidades de Manejo Forestal (UMF) y reduce el tamaño del modelo entre 70 y 100 veces, permitiendo resolver con gaps de optimalidad menores al 1 % instancias que sin agregación resultan intratables. El segundo nivel diseña la cadena de suministro de biorrefinerías forestales sobre Misiones, Corrientes y Entre Ríos, minimizando el costo presente total y maximizando un índice social compuesto por dos índices, uno asociado al empleo generado, el desempleo y la población económicamente activa y, otro asociado al valor económico ponderado por el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) de cada nodo. En ambos niveles las fronteras de Pareto obtenidas resultan asimétricas: mejoras ambientales y sociales se alcanzan a costos económicos comparativamente bajos.

Palabras clave: Planificación Forestal, Cadena de Suministro, Optimización Multiobjetivo, Programación Disyuntiva Generalizada, Sostenibilidad.

Abstract

The forest sector of Northeastern Argentina accounts for nearly 80% of the national planted-forest output, with growth rates well above those of Europe and North America; nevertheless, neither the management of the resource nor the industry that processes it are optimized in an integrated manner. This work addresses the problem at two complementary levels, formulated as generalized disjunctive programs (GDP) and reformulated as mixed-integer linear programs (MILP). The first level plans the management of 10,141 Pinus stands (44,437 ha) in Misiones over a 40-year horizon, simultaneously

maximizing net present value (NPV) and net CO₂ sequestration. To make the problem tractable, a three-stage clustering strategy is proposed —soil type, clear-cut year and spatial consolidation— which builds Forest Management Units (FMUs) and reduces model size by a factor of 70 to 100, allowing instances that are intractable without aggregation to be solved within optimality gaps below 1%. The second level designs the forest biorefinery supply chain across Misiones, Corrientes and Entre Ríos, minimizing total present cost and maximizing a social index composed of two indices: one associated with generated employment, unemployment, and the economically active population, and another associated with the economic value weighted by the Multidimensional Poverty Index (MPI) of each node. At both levels the resulting Pareto frontiers are asymmetric: environmental and social improvements are attained at comparatively low economic cost.

Keywords: Forest Planning, Supply Chain, Multi-objective Optimization, Generalized Disjunctive Programming, Sustainability.

Introducción

Las condiciones climáticas y edáficas del Nordeste Argentino generan un ambiente particularmente propicio para el desarrollo forestal: las métricas de crecimiento de los bosques cultivados llegan a sextuplicar las europeas, y por eso casi el 80% de la producción nacional se concentra en las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos. Sin embargo, la explotación silvícola de la región no se encuentra optimizada y enfrenta desafíos estructurales tanto en la gestión del recurso como en la articulación con la industria que lo transforma (Broz et al., 2018). A esto se suma el rol que el IPCC asigna a la gestión forestal como vía concreta de captura de carbono, lo que introduce un objetivo ambiental que compite con el económico.

Planificar el manejo de un bosque cultivado a escala regional es un problema de decisión de grandes dimensiones. Los horizontes son largos —una decisión de hoy condiciona el negocio durante décadas—, la escala involucra miles de rodales con suelos y características heterogéneas, y los productos obtenidos son diversos, con demanda diferenciada por industria. Modelar exactamente cada rodal conduce a formulaciones con millones de variables que resultan computacionalmente intratables, lo que en la práctica obliga a trabajar con modelos menos detallados. Una estrategia para sortear esta limitación consiste en agregar la información de entrada en unidades de manejo para reducir el tamaño del input del modelo, lo que derivará en una disminución de las dimensiones del modelo en sí.

Aguas abajo, la industria forestal genera grandes volúmenes de residuos y subproductos que hoy se queman o se descartan, cuando podrían alimentar biorrefinerías para producir combustibles y químicos de origen renovable. El uso de residuos evita además la competencia con biomasa destinada a alimentos, y la región cuenta con infraestructura instalada aprovechable: plantas de pulpa kraft integrables con biorrefinerías y refinerías capaces de coprocesar aceite de pirólisis hidrogenado. El diseño óptimo de esta cadena bajo incertidumbre fue abordado previamente por Piedra-Jiménez et al. (2024) con un único objetivo económico.

De las tres dimensiones de la sostenibilidad, la social es sistemáticamente la menos estudiada en el diseño de cadenas de suministro de biomasa (Santos et al., 2019; Turner et al., 2025; Zahraee et al., 2020). Los trabajos que sí la incorporan suelen reducirla al conteo de empleos directos (Cambero y Sowlati, 2014); son pocos los que combinan creación de empleo con indicadores de pobreza o desarrollo regional, y menos aun los que los validan sobre sistemas forestales reales. Es decir, existe una oportunidad para generar métricas sociales sensibles al contexto territorial y vinculadas operacionalmente a las decisiones del modelo. Esto es especialmente relevante en el Nordeste Argentino, donde las provincias con mayor potencial forestal presentan también niveles altos de vulnerabilidad social.

Este trabajo presenta un marco de optimización de programación matemática respecto a la planificación forestal a gran escala y el diseño de la cadena de suministro incluyendo parámetros sociales. La sección siguiente, describe sintéticamente ambas formulaciones; luego se presentan los resultados obtenidos y, finalmente, las conclusiones y trabajo futuro.

Desarrollo: Planificación Forestal

El rodal es la unidad mínima que se utiliza en la gestión forestal y agrupa información de especie, superficie, edad, densidad y ubicación. Los rodales se agrupan en Unidades de Manejo Forestal (UMF), y a cada UMF se le asigna una prescripción, entendida como una secuencia predefinida de actividades silviculturales —raleos, podas, tala rasa— a ejecutar en años determinados.

Planteo del problema. *Dado:* un conjunto de miles de rodales, un conjunto de prescripciones compuestas por distintas intervenciones, un conjunto diverso de productos, costos de manejo forestal, demanda diferenciada por producto, secuestro neto de carbono por intervención y, un horizonte de planificación a largo plazo. Se debe *determinar:* qué prescripción asignar a cada rodal y cuándo debe comenzar, qué volúmenes de producción se deben obtener en cada intervención. Con el objetivo de maximizar el retorno económico y la captura de carbono.

Modelo y caso de estudio. Sobre una base curada de 10.141 rodales de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* en Misiones (44.437 ha, seis tipos de suelo), se procede a una etapa de agregación en tres pasos sucesivos para disminuir las dimensiones del problema: primero por tipo de suelo, luego por año de tala rasa —de modo que todos los rodales de una UMF queden disponibles para una nueva prescripción en el mismo momento— y finalmente por proximidad espacial mediante K-Means, con el número de clusters elegido por máxima puntuación de Silhouette. El resultado sirve como input a un modelo GDP bi-objetivo (Dussel et al., 2026) que decide qué prescripción asignar a cada UMF y en qué año iniciarla, sobre un horizonte de 40 años y 30 prescripciones posibles.

Los dos objetivos en conflicto se expresan en las ecuaciones (1) y (2). El primero, maximiza el valor presente neto de los ingresos obtenidos por la venta de productos, donde $V_{o,i,p,c,e,t}$ es una variable continua que representa el volumen de producto o obtenido en la intervención i , de la prescripción p , en la UMF c , de la especie e , en el periodo t [m^3]; $\varepsilon_{o,e}$ es el precio de venta del producto o de la especie e [USD/m^3]; $\alpha_{o,i,p,c,e}$ representa el costo de realizar la operación i , de la prescripción p , para obtener el producto o , en la UMF c , en el periodo t [USD/m^3]; y ρ representa la tasa de descuento. El segundo objetivo, maximiza el secuestro neto de CO_2 , donde $\text{NetCO2}_{i,p,c,e,t}$ representa el CO_2 neto secuestrado en el periodo t , para la especie e , prescripción p , y FMU c [t CO_2], y se calcula como la diferencia entre el carbono incorporado por el crecimiento del rodal y la reducción en la capacidad de secuestro de carbono cuando se realiza una intervención.

$$\max NPV = \sum_{t \in T} \frac{1}{(1 + \rho)^{t-1}} \sum_{\substack{o,i,p,c,e \\ (i,p) \in IP \\ (c,p) \in CP \\ (p,e) \in PE}} (\varepsilon_{o,e} - \alpha_{o,i,p,c,e}) V_{o,i,p,c,e,t} \quad (1)$$

$$\max TotalCO2 = \sum_{\substack{i,p,c,e,t \\ (i,p) \in IP \\ (c,p) \in CP \\ (p,e) \in PE}} \text{NetCO2}_{i,p,c,e,t} \quad (2)$$

La frontera de Pareto entre ambos objetivos se construye por el método ε -constraint, resolviendo cada tipo de suelo de forma independiente. El modelo incorpora, además, un bloque de restricciones sobre las prescripciones consecutivas (evitando superposición, su inicio en momentos que no corresponden, sincronización con las actividades forestales, etc.), restricciones de producción, cotas de mercado por producto y periodo. Además, se plantea la posibilidad de excluir del aprovechamiento aquellos rodales que actúan como corredores ecológicos, es decir, franjas de bosque que permiten el desplazamiento de fauna.

Desarrollo: Cadena de Suministro

Planteo del problema. *Dado:* costos de cosecha, transporte, procesamiento e inversión; ubicaciones potenciales de plantas; rutas tecnológicas posibles; rendimientos de procesamiento, capacidades, expansiones y factores de escala posibles; Índice de Pobreza Multidimensional, empleos creados y valor económico de plantas nuevas/integradas; disponibilidad de biomasa; niveles de demanda. Se debe *determinar:* qué tierras y especies de árboles talar, dónde instalar o integrar plantas, con qué tecnología, niveles de capacidad, niveles de producción, si se realizarán expansiones a lo largo del horizonte de planificación y flujos de transporte. Con el objetivo de minimizar los costos de la cadena de suministro y maximizar el beneficio social.

Modelo y caso de estudio. El modelo extiende la formulación de Piedra-Jiménez et al. (2024) incorporando la dimensión social. La superestructura considerada abarca 25 zonas de suministro de biomasa residual forestal (*Pinus* y *Eucalyptus*), 3 plantas de pulpa kraft existentes —co-ubicables con biorrefinerías—, 13 ubicaciones potenciales de biorrefinería y 26 nodos de demanda, compuestos por 21 plantas de biodiésel de soja y 5 refinerías de petróleo. Las tecnologías disponibles son pirólisis rápido, gasificación catalítica e hidrodeshidrogenación, que permiten obtener aceite de pirólisis, bio-metanol y aceite de pirólisis hidrogenado. El modelo decide qué plantas abrir, con qué tecnología y capacidad, cómo expandirla a lo largo del horizonte y cómo distribuir los flujos de materiales.

El primer objetivo, ecuación (3), minimiza el costo presente total, que agrega costos de capital (CC_t), costos fijos de operación (FC_t), costo de la biomasa (BC_t), costos variables de producción (VC_t) y costos de transporte (TC_t), descontados a lo largo del horizonte.

$$\min TPC = \sum_{t \in T} \frac{CC_t + FC_t + BC_t + VC_t + TC_t}{(1 + \rho)^{t-1}} \quad (3)$$

El segundo objetivo, ecuación (4), maximiza un índice social compuesto y normalizado. Su primer término, $JC_{k,m,c}$, pondera los empleos directos generados por cada planta nueva por la tasa de desempleo y la población económicamente activa del departamento donde se instala, donde k representa la localización de la nueva planta, m la tecnología que se selecciona y c la capacidad instalada. Su segundo término, EV_k , pondera el valor económico generado por la planta —ventas de productos finales valuadas a precio de mercado— por el Índice de Pobreza Multidimensional de la provincia. La igualdad que define $JC_{k,m,c}$ se incorpora dentro de la disyunción que decide la apertura de cada planta, de manera que el aporte social sólo se contabiliza si la instalación efectivamente se construye.

$$\max IndSoc = \frac{1}{JC_{max}} \sum_{\substack{k,m,c \\ m \in M^{new}}} JC_{k,m,c} + \frac{1}{EV_{max}} \sum_{k \in K} EV_k \quad (4)$$

Los parámetros sociales se construyeron utilizando cuatro fuentes: población total, población económicamente activa y tasa de desempleo por departamento del Censo 2022 del INDEC; el Índice de Pobreza Multidimensional por provincia publicado por SIEMPRO —que integra vivienda, educación, empleo, salud y protección social—; los modelos JEDI del NREL, adaptados desde etanol celulósico y pirólisis rápida, para estimar empleos directos, por tecnología y capacidad; y precios de mercado de metanol, aceite de pirólisis y aceite de pirólisis hidrogenado.

Respecto de la formulación base, el modelo cuenta con disyunciones de apertura, expansión e integración con planta existente, y restricciones lógicas, de balance forestal, de disponibilidad de biomasa, de capacidad acumulada, de operación, de producción, satisfacción de la demanda y balances de flujo. Ambos objetivos se comparan con una frontera Pareto realizada con el método ε -constraint.

Resultados

Planificación Forestal. El resultado más relevante es de tratabilidad. Sin la etapa de clustering, ninguno de los seis tipos de suelo admite solución: el solver agota la memoria disponible antes de encontrar una solución. Con la agregación en UMF, los seis modelos resuelven gaps de optimalidad iguales o inferiores al 1% en tiempos de entre 26 y 90 minutos, con reducciones de tamaño de entre 70 y 100 veces respecto a la cantidad de variables y restricciones del caso donde el modelo sólo se divide por tipo de suelo. La Tabla 1 resume, para cada tipo de suelo, la cantidad de rodales de partida, las UMF generadas, el número de variables binarias del modelo resultante, el valor presente neto obtenido y el gap alcanzado.

Suelo	Rodales	UMF	Var. binarias	VPN (USD)	Gap
Je13-a	58	25	168.750	$8,60 \times 10^6$	0,77 %
Fh1-3a	3.531	35	236.250	$3,76 \times 10^8$	0,21 %
HI2-3c	4.068	37	249.750	$2,57 \times 10^8$	0,31 %
Nd1-3b	1.783	44	297.000	$2,30 \times 10^8$	0,27 %

Suelo	Rodales	UMF	Var. binarias	VPN (USD)	Gap
WAT	250	39	263.250	$2,56 \times 10^7$	1,00 %
Ne1-3a	450	42	283.500	$3,76 \times 10^7$	0,91 %

Tabla 1: resultados por tipo de suelo con el esquema de clustering original.

La Figura 1 muestra las fronteras de Pareto entre VPN y secuestro de carbono, normalizadas y superpuestas para los seis tipos de suelo. El trade-off resulta asimétrico: resignar entre un 10 % y un 13 % del VPN permite incrementar entre un 18 % y un 24 % el CO₂ secuestrado, de modo que la ganancia ambiental supera la pérdida económica. El punto de mínima distancia al punto ideal se mantiene estable en la misma región de la frontera para los seis suelos, lo que sugiere una solución de compromiso robusta frente a la heterogeneidad edáfica.

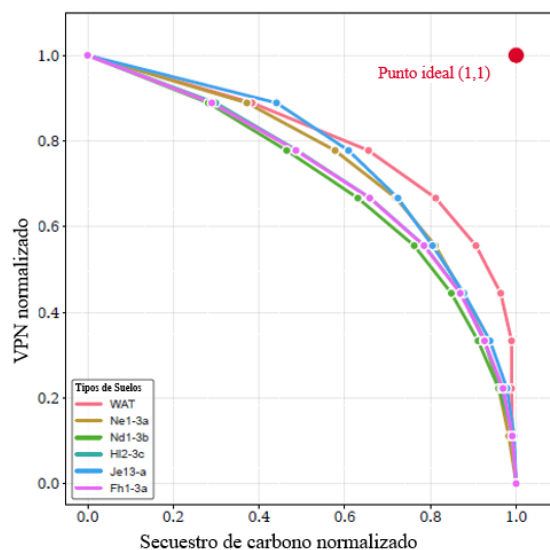


Figura 1: fronteras de Pareto normalizadas entre VPN y secuestro de carbono, por tipo de suelo.

Por último, se evaluó el impacto económico de no explotar los corredores ecológicos, excluyendo del aprovechamiento los rodales que formaban parte de los mismos. La conservación de esta conectividad reduce el VPN en menos del 0,65%, de modo que el costo económico de proteger el hábitat resulta prácticamente despreciable frente al beneficio ambiental que representa.

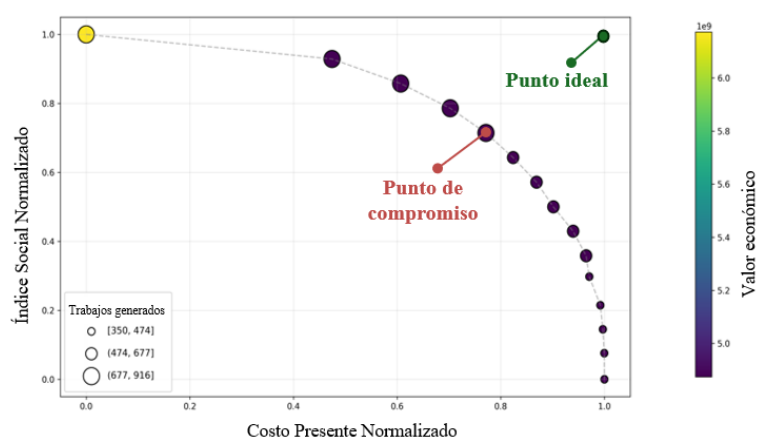


Figura 2: frontera de Pareto entre costo presente total normalizado e índice social normalizado.

Cadena de Suministro. La instancia resuelta comprende 5.219 variables enteras, 94.593 variables continuas y 61.928 restricciones, y se resuelve a optimalidad global en 38 segundos. La Figura 2 presenta la frontera de Pareto entre costo presente total e índice social. El comportamiento es nuevamente asimétrico: las primeras mejoras sociales se obtienen con incrementos mínimos de costo, de modo que existe una región de ganancia social “barata” cercana al extremo de mínimo costo. En el punto de compromiso seleccionado se generan 708 empleos totales, con un costo presente total de USD 6.640.213.749, y

todos los nodos potenciales terminan con planta instalada. La ruta tecnológica seleccionada combina pirólisis en lecho fluidizado sobre residuos forestales y de aserradero con gasificación catalítica de licor negro e hidrodeshidrogenación del aceite de pirólisis.

Conclusiones

En este trabajo se muestra un marco integrado para planificar el manejo forestal de grandes superficies y para diseñar la cadena de suministro forestal, considerando objetivos contrapuestos, como son los económicos y ambientales; y económicos y sociales. El clustering en tres etapas propuesto convierte instancias intratables en modelos resolubles con gaps menores al 1%. La incorporación de un índice social resulta novedosa y contribuye al desarrollo de nuevas métricas sociales. Los dos trade-offs cuantificados apuntan en la misma dirección práctica: tanto la captura de carbono como el impacto social pueden mejorarse a un costo económico moderado, lo que resulta relevante tanto para la decisión empresarial como para el diseño de política pública regional.

Como trabajo a futuro, se propone integrar ambos niveles, utilizando el perfil de producción de biomasa que entrega el modelo forestal como oferta disponible para el modelo de biorrefinerías. Además, se espera incorporar un análisis de incertidumbre sobre los parámetros críticos al marco integrado resultante.

Utilización de IA generativa / herramientas IA

Declaro la utilización de la herramienta IA Claude para su uso en mejoras de redacción y códigos. Confirmando que luego de la utilización, los contenidos obtenidos fueron revisados, constatados y editados, asumiendo plena responsabilidad por el contenido presentado en el presente trabajo.

Referencias

- Broz, D., Rossit, D., & Cavallín, A. (2018). The Argentinian forest sector: Opportunities and challenges in supply chain management. *Uncertain Supply Chain Management*, 6(4), 375–392. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2018.1.001>
- Camero, C., & Sowlati, T. (2014). Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.041>
- Dussel, M. E., Piedra-Jiménez, F., Novas, J. M., & Rodríguez, M. A. (2024). A hybrid clustering-optimization approach for sustainable large scale forest management. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.6982744>
- Piedra-Jiménez, F., Torres, A. I., & Rodríguez, M. A. (2024). A robust disjunctive formulation for the redesign of forest biomass-based fuels supply chain under multiple factors of uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 181, 108540. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108540>
- Santos, A., Carvalho, A., Barbosa-Póvoa, A. P., Marques, A., & Amorim, P. (2019). Assessment and optimization of sustainable forest wood supply chains – A systematic literature review. *Forest Policy and Economics*, 105, 112–135. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.05.026>
- Turner, I., Bamber, N., Andrews, J., & Pelletier, N. (2025). Systematic review of the life cycle optimization literature, and recommendations for performance of life cycle optimization studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208, 115058. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115058>
- Zahraee, S. M., Shiwakoti, N., & Stasinopoulos, P. (2020). Biomass supply chain environmental and socio-economic analysis: 40-Years comprehensive review of methods, decision issues, sustainability challenges, and the way forward. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105777. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105777>