

Strategic design of bioSNG supply chains: A technology selection approach applied to Northwest Argentina.

Rodríguez, Azul¹ [0009-0001-1381-5781], Ferraro, Santiago^{1,2} [0009-0003-5243-0184], Machin Ferrero, Lucas M.^{1,2} [0000-0003-1348-6057], Mele, Fernando D.^{1,2} [0000-0003-4401-7878]

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. Av. Independencia 1800, T4000 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CCT CONICET NOA Sur, Crisóstomo Álvarez 722, T4000 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

azulrod1501@gmail.com
sferraro@herrera.unt.edu.ar
lmachinferrero@herrera.unt.edu.ar
fmele@herrera.unt.edu.ar

Abstract. This work presents a superstructure optimization approach for the strategic design of biogenic synthetic natural gas (bioSNG) supply chains, integrating multiple feedstocks and concurrent thermochemical conversion pathways. BioSNG is positioned as an essential drop-in fuel for decarbonization, valorizing residual lignocellulosic biomass (citrus pruning and sugarcane bagasse) through gasification and methanation processes that leverage existing natural gas infrastructure. A mixed-integer linear programming (MILP) model is developed to simultaneously determine the optimal location, capacity, and technology configuration selection of production plants. The formulation incorporates a dual-objective optimization approach that maximizes Net Present Value (NPV) over a 16-year horizon or minimizes greenhouse gas emissions. Results demonstrate that the integration of diverse substrates significantly increases operational flexibility and allows for higher production levels compared to single-feedstock scenarios. Furthermore, the selection of technological routes drastically influences the network configuration, favoring centralized structures driven by economies of scale. A critical trade-off is shown between economic and environmental objectives, highlighting the importance of technological flexibility to ensure the viability of renewable gas systems in regions with high biomass availability

Keywords: bioSNG, superstructure, lignocellulosic residues, MILP.

Diseño estratégico de cadenas de suministro de bioSNG: Un enfoque de selección tecnológica aplicado en el NOA

Resumen. Este trabajo presenta un enfoque de optimización de superestructura para el diseño estratégico de cadenas de suministro de gas natural sintético de origen biogénico (bioSNG) que integra múltiples materias primas y rutas tecnológicas concurrentes de conversión termoquímica. El bioSNG se posiciona como un combustible *drop-in* esencial para la descarbonización, valorizando biomasa lignocelulósica residual (poda de cítricos y bagazo de caña) mediante procesos de gasificación y metanación que aprovechan la infraestructura de gas natural existente. Se desarrolla un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) que permite determinar simultáneamente la localización, capacidad y selección de la configuración tecnológica óptima de las plantas de producción. La formulación incorpora un enfoque de optimización dual que maximiza el Valor Actual Neto (VAN) a lo largo de un horizonte de 16 años o minimiza las emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados demuestran que la integración de diversos sustratos incrementa significativamente la flexibilidad operativa y permite alcanzar mayores niveles de producción respecto a escenarios de materia prima única. Asimismo, la selección de rutas tecnológicas influye drásticamente en la configuración de la red, favoreciendo estructuras centralizadas impulsadas por economías de escala. Se revela la existencia de una relación de compromiso (*trade-off*) crítico entre los objetivos económicos y ambientales, lo que resalta la importancia de la flexibilidad tecnológica para garantizar la viabilidad de los sistemas de gases renovables en regiones con alta disponibilidad de biomasa

Palabras claves: bioSNG, superestructura, residuos lignocelulósicos, MILP.

1. Introducción

La urgencia por descarbonizar (desfossilizar) la matriz energética global ha impulsado el desarrollo de energías limpias como los combustibles gaseosos renovables capaces de mitigar el impacto del cambio climático mediante la valorización de residuos.

En la Argentina, más del 80% de la matriz energética primaria proviene de fuentes fósiles, principalmente gas natural y petróleo (Secretaría de Energía, 2023), contribuyendo al cambio climático. En particular, el gas natural sintético de origen biogénico (bioSNG) se presenta como un sustituto directo del gas natural (*drop-in fuel*), permitiendo su inyección en la red sin requerir modificaciones sustanciales en los sistemas de transporte y distribución. En este sentido, el aprovechamiento de biomasa lignocelulósica residual, como la poda de cítricos y el bagazo de caña de azúcar, representa una oportunidad para valorizar residuos agroindustriales y mitigar el impacto ambiental del sistema energético.

Un estudio previo en la región (Ferraro et al., 2025) ha abordado el potencial de obtención de biometano a partir de residuos ganaderos.

2. Descripción del sistema y decisiones del modelo

Este trabajo aborda el diseño óptimo de una cadena de suministro (CS) de bioSNG basada en biomasa lignocelulósica. El sistema considera las etapas de disponibilidad de biomasa, transporte, conversión termoquímica (gasificación, metanación y purificación) e inyección final en la red de gas natural.

La conversión termoquímica se descompone en dos etapas principales: (i) gasificación, donde la biomasa se transforma en gas de síntesis (syngas) mediante diversas tecnologías (gasificación indirecta o gasificación de lecho fluidizado) y (ii) metanación catalítica seguida de una purificación, donde el syngas se convierte en metano y el gas saliente se acondiciona mediante tecnologías como *pressure swing adsorption* (PSA) con aminas para obtener bioSNG con calidad requerida para su inyección en la red de gas natural existente.

El problema se formula como un modelo de programación lineal entera mixta (MILP), en el cual se determinan simultáneamente la localización de plantas, sus capacidades, las tecnologías de conversión y la asignación de flujos de materiales. El modelo comprende restricciones operativas y de balances de masa, y dos funciones objetivo alternativas: siendo la primera, la maximización del Valor Actual Neto (VAN) del sistema, y la segunda, la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), permitiendo evaluar distintas configuraciones óptimas bajo cada criterio. Además, posee conjuntos que representan materiales (i), regiones (g), posibles plantas (j), medios de transporte (b), tecnologías (k), capacidad de plantas (c) y períodos temporales (t). En particular, se distinguen subconjuntos para materias primas (IM), productos intermedios (IT) y productos finales (IP), así como regiones de disponibilidad de biomasa (GM), regiones candidatas para la instalación de plantas (GP) y regiones de demanda (GD). En cuanto a tecnologías, los subconjuntos existentes son KG para gasificación y KU para purificación.

2.1 Formulación matemática

Disponibilidad de biomasa y limitaciones de flujo

Estas restricciones describen como la biomasa disponible ($M_{i,g,t}$) se distribuye entre el posible consumo local ($L_{i,g,t}$) y el transporte a los centros de producción ($Q_{i,b,g,g',t}$) (Ec. 1). Posteriormente, la biomasa recibida se asigna a las plantas de producción mediante los flujos $x_{i,j,c,k,k',g,t}$ (Ec. 2). Todas las variables involucradas en estas restricciones representan flujos o cantidades de biomasa y se expresan en toneladas por año (t/año).

$$M_{i,g,t} \geq L_{i,g \in (GM \cap GP),t} + \sum_{g' \in GP, g \neq g', b \in IB} Q_{i,b,g,g',t} \quad \forall i \in IM(i), g \in GM(g), t \quad (1)$$

$$\sum_{j,c,k \in KG, k' \in KU} x_{i,j,c,k,k',g,t} = L_{i,g \in (GM \cap GP),t} + \sum_{g' \in GM, g \neq g', b \in IB} Q_{i,b,g,g',t} \quad (2)$$

$$\forall i \in IM, g \in GP, t$$

Instalaciones de la planta y limitaciones de capacidad

La cantidad de materia prima que puede ingresar a una planta está limitada por la capacidad mínima y máxima de procesamiento asociada al nivel de capacidad seleccionado ($jCAP_{min,c}$ y $jCAP_{max,c}$, respectivamente), expresadas en toneladas por año (t/año), y definidas como la capacidad mínima y máxima de procesamiento de biomasa que puede admitir una planta de capacidad c (Ec. 3). Asimismo, se utiliza una variable binaria ($y_{j,c,k,k',g,t}$) para asegurar que una planta no posea más de una tecnología por etapa (Ec. 4), que no se instale más de una vez a lo largo del horizonte temporal considerado (Ec. 5) y, por último, que una única capacidad de procesamiento de biomasa ($x_{i,j,c,k,k',g,t}$) quede asociada a cada planta (Ec. 6).

$$\begin{aligned} \sum_{\tau \leq t} jCAP_{min,c} \sum_{k' \in KU} y_{j,c,k,k',g,t} &\leq \sum_{i \in IM, k' \in KU} x_{i,j,c,k,k',g,t} \\ &\leq \sum_{\tau \leq t} jCAP_{max,c} \sum_{k' \in KU} y_{j,c,k,k',g,t} \quad \forall g \in GP, k \in KG, j, c, t \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sum_c y_{j,c,k,k',g,t} \leq 1 \quad \forall j, k, k', g \in GP(g), t \quad (4)$$

$$\sum_t y_{j,c,k,k',g,t} \leq 1 \quad \forall j, c, k, k', g \in GP(g) \quad (5)$$

$$\sum_{k \in KG, k' \in KU} y_{j,c,k,k',g,t} \leq 1 \quad \forall j, c, g \in GP(g), t \quad (6)$$

Restricciones de conversión

Las restricciones de conversión describen la transformación de los flujos de materia a través de las distintas etapas del sistema. Para ello, se utilizan factores de conversión ($\rho_{i,i'}$ y $conv_k$) asociados a la tecnología seleccionada. El factor $\rho_{i,i'}$ representa la conversión de materia prima en productos intermedios, expresada en t producto intermedio/t materia prima, mientras que $conv_k$ corresponde a la conversión de syngas a BioSNG, expresada en t bioSNG/t syngas. La Ec. (7) modela la generación de productos intermedios y la Ec. (8) su conversión al producto final.

$$x_{i,j,c,k,k',g,t} = \sum_{i' \in IM} \rho_{i',i} x_{i',j,c,k,k',g,t} \quad \forall i \in IT, j, c, k \in KG, k' \in KU, g \in GP, t \quad (7)$$

$$x_{i,j,c,k,k',g,t} = conv_k x_{i',j,c,k,k',g,t} \quad \forall i \in IP, i' \in IT, j, c, k \in KG, k' \in KU, g \in GP, t \quad (8)$$

Restricciones de demanda

La cantidad de bioSNG producida e inyectada a la red de gas natural debe cubrir como mínimo una fracción de la demanda total. El parámetro Dem_f representa dicha fracción, mientras que $Dem_{g',t}$ corresponde a la demanda de gas natural en la región g' durante el período t (Ec. 9).

$$\sum_{j,c,k \in KG(k), k' \in KU(k'), g, i \in IP(i)} x_{i,j,c,k,k',g,t} \geq Dem_f \sum_{g' \in GD(g')} Dem_{g',t} \quad \forall t \quad (9)$$

2.2 Función Objetivo Económica

El objetivo económico del modelo es maximizar el VAN (Ec. 10) del sistema durante el horizonte de planificación.

$$FO_1: \quad maxVAN =$$

$$\sum_{t \in T} DF_t \left[IVAN_t - \left(\sum_{i \in IM} MPVAN_t + PRODVAN_t + TVAN_t + TRCP_t \right) \right] \quad (10)$$

Para cada período t , el VAN se calcula como la diferencia entre los ingresos generados por la venta de bioSNG ($IVAN_t$) y los costos totales del sistema, descontada mediante el factor de descuento (DF_t). En particular, los ingresos provienen de la comercialización de bioSNG, mientras que los costos contemplados en la función objetivo incluyen: los costos de adquisición de biomasa ($MPVAN_{i,t}$), los costos operativos de producción ($PRODVAN_t$), los costos de transporte ($TVAN_t$) y los costos de infraestructura e inyección a la red de gas natural ($TRCP_t$). Por razones de espacio, no se incluye el desarrollo detallado de todas las ecuaciones asociadas a los distintos términos de la función objetivo económica. Los términos económicos de la función objetivo se expresan en dólares estadounidenses (USD), mientras que DF_t es adimensional.

2.3 Función Objetivo Ambiental

La función objetivo ambiental (Ec. 11) es minimizar las emisiones totales de GEI de la CS y se define como:

$$FO_2: \min E_{total} = \sum_t EMP_t + ETMP_t + EP_t + ETP_t - EAVOID_t \quad (11)$$

Estas emisiones tienen en cuenta las emisiones asociadas a la materia prima (EMP_t) el transporte ($ETMP_t$ y ETP_t) y la producción (EP_t). Además, el modelo tiene en cuenta las emisiones evitadas debido al reemplazo del gas natural por el bioSNG ($EAVOID_t$)

Como indicador ambiental se utiliza el potencial de cambio climático (*global warming potential*, GWP), expresado en emisiones de CO₂ equivalente. Se implementa la metodología del análisis de ciclo de vida (LCA) estandarizada por las normas ISO 14040-14044 para obtener los parámetros ambientales del modelo. Al igual que para el caso económico, no se presenta el conjunto completo de ecuaciones por cuestión de espacio.

3. Caso de estudio y descripción de datos

El modelo propuesto se aplica en la provincia de Tucumán, Argentina, una región caracterizada por una fuerte actividad agroindustrial y una disponibilidad significativa de biomasa lignocelulósica. El análisis se centra en la producción de bioSNG a partir de residuos disponibles localmente, considerando la distribución espacial y las limitaciones de suministro (FAO, 2021; Secretaría de Energía, 2023).

Como materia prima (IM) se considera la biomasa lignocelulósica y como producto final (IP) el bioSNG. Se incluyen dos tipos principales de biomasa: residuos de poda de cítricos y bagazo de caña de azúcar, ambos ampliamente disponibles en la región debido a su estructura agroindustrial (INTA, 2022). Debido a la estacionalidad de ambas biomásas, se

asume que la disponibilidad anual se distribuye uniformemente a lo largo del año, permitiendo representar una operación continua de las plantas de BioSNG. La distribución espacial de estos recursos responde a la localización de las actividades agroindustriales y a patrones de generación de residuos, lo que permite representar de manera más adecuada la oferta de biomasa en el sistema.

En cuanto a la etapa de gasificación (*KG*), la selección tecnológica se encuentra asociada al tipo de materia prima considerada, adoptándose un método de gasificación indirecta (MILENA; Van der Meijden, 2010) para los residuos de poda y una gasificación por lecho fluidizado (FICFB; Huber M. 2024) para bagazo. Esta vinculación responde a la disponibilidad de información técnico-ambiental confiable para dichas combinaciones, dado que no se dispone de inventarios completos para todas las alternativas posibles. Para la purificación se consideran como opciones PSA y lavado por aminas.

Para el conjunto de regiones se consideran 17 regiones de disponibilidad de materia prima (*GM*) las cuales se dividen en 11 regiones de poda (G1-G11) y 6 regiones de bagazo (G12-G17). En cuanto a las regiones productoras *GP* y de demanda *GD*, se considera que la red de gas natural es accesible desde todos los nodos de producción considerando una distancia promedio (5 km). Por lo tanto, las regiones productoras también son regiones de demanda y se consideran 5 regiones (G18-G22) perteneciente a estos conjuntos. La distribución geográfica de las regiones *GM* se muestra en la Figura 1, mientras que en la Figura 2 se representan las regiones de producción y demanda.

Se consideran tres capacidades de planta: chica, mediana y grande, basadas en el poder calorífico de la biomasa tratada. Los valores son 10 MWh, 32 MWh y 100 MWh, respectivamente.

El horizonte de planificación considera 16 años (2025-2041), capturando variaciones en la disponibilidad de biomasa y el funcionamiento del sistema. En la Tabla 1 se detallan los nombres de cada región considerada, identificándolas con sus respectivos códigos.

Tabla 1. Regiones dentro de los subconjuntos GM, GP y GD.

Nombre	Código	Nombre	Código	Nombre	Código
Burruyacu	G1	La Cocha	G6	Simoca	G20
Chicligasta	G2, G12	Leales	G17, G18	Tafí Viejo	G11, G19
Cruz Alta	G3, G13	Lules	G7	Trancas	G21

Famaillá	G4, G14	Monteros	G8, G16	Graneros	G22
J.B Alberdi	G5, G15	Río Chico	G10, G22		

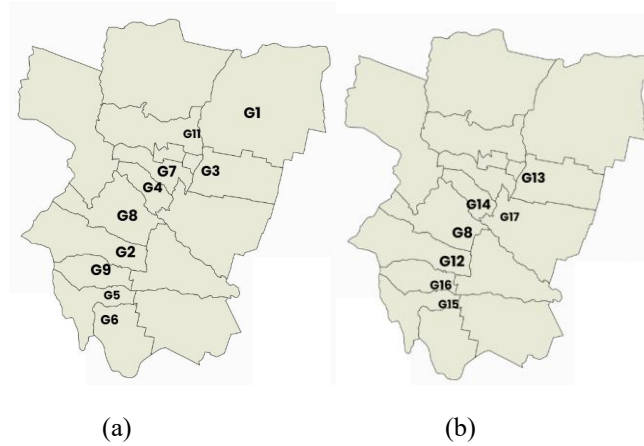


Fig. 1. Distribución geográfica de las regiones consideradas. (a) Regiones con disponibilidad de poda de cítricos (b) Regiones con disponibilidad de bagazo de caña de azúcar.

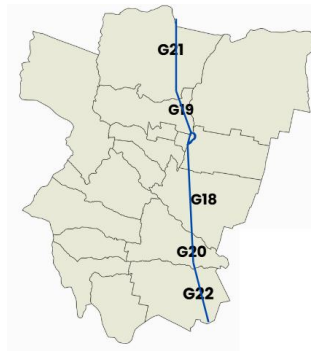


Fig. 2. Regiones productoras de bioSNG consideradas en el modelo, las cuales también se definen como nodos de demanda.

Con el objetivo de analizar el impacto de la composición de la biomasa en el diseño de la cadena de suministro, se definen tres escenarios en función del tipo de materia prima considerada.

Caso B (Bagazo): se considera exclusivamente el uso de bagazo de caña de azúcar, representando un recurso relativamente concentrado y de alta disponibilidad.

Caso P (Poda): se analiza el uso exclusivo de residuos de poda de cítricos, caracterizados por una mayor dispersión geográfica y desafíos logísticos asociados.

Caso M (Mix): se le permite al modelo elegir entre ambas materias primas, evaluando el impacto de la elección en la configuración del sistema.

Los parámetros incluyen disponibilidad de biomasa, demanda energética, costos, rendimientos de conversión y variables ambientales, obtenidos de fuentes bibliográficas y bases de datos técnicas y adaptados a la provincia de Tucumán.

La demanda de bioSNG se estimó a partir del consumo total de gas natural ($\approx 1,25 \times 10^9$ m³/año), según ENARGAS (2024), y se distribuyó según la población departamental (INDEC, 2022), proyectándose con una tasa de crecimiento anual del 1,5%. La disponibilidad de biomasa se estimó a partir de información agroindustrial: para poda de cítricos, superficie de la EEAOC (2025) y un coeficiente de 3 t/(ha·año); para bagazo, un factor de 0,28 t/t de caña, con un 20% disponible.

Los rendimientos se definieron en base energética pero se convirtieron a base másica: $0,95 \frac{t \text{ syngas}}{t \text{ poda cítrico}}$ (MILENA) y $0,90 \frac{t \text{ syngas}}{t \text{ bagazo}}$ (FICFB) para gasificación (Gassner y Maréchal, 2009; Basu, 2010), y $0,13 \frac{t \text{ bioSNG}}{t \text{ syngas}}$ (aminas) y $0,14 \frac{t \text{ bioSNG}}{t \text{ syngas}}$ (PSA) para conversión a bioSNG (van der Meijden et al., 2010; Bauer et al., 2013).

Los costos se tomaron de la literatura y se actualizaron con el índice Marshall & Swift, utilizando una tasa de descuento del 10% (Gassner y Maréchal, 2009; IEA Bioenergy, 2024).

Finalmente, para la obtención de los parámetros ambientales, se utilizó la metodología ReCiPe v1.0 mediante el software Brightway 2, combinando inventarios de literatura y base de datos internacionales (ecoinvent).

4. Resultados y discusión

El modelo fue implementado en GAMS® v24.0.2 y resuelto mediante el *solver* CPLEX en una computadora de escritorio con procesador AMD Ryzen 7 5700 (3.7 GHz) y 16 GB de RAM. El modelo contiene aproximadamente 122,150 ecuaciones, 109,811 variables totales (98,867 continuas y 10,944 binarias). El tiempo de resolución promedio fue de 501 s, alcanzando un gap de 1%. Se analizaron tres escenarios según la materia prima: bagazo (B),

poda (P) y combinación de ambas (M), bajo dos funciones objetivo: económica (Econ) y ambiental (Amb), dando lugar a seis subcasos: EconB, AmbB, EconP, AmbP, EconM y AmbM.

4.1 Configuración del sistema

Los resultados muestran que la estructura de la red depende fuertemente tanto del tipo de biomasa como del criterio de optimización.

En los escenarios con bagazo (B), el caso económico (EconB) presenta una configuración altamente centralizada, con una planta principal en G20 (Fig. 3), alcanzando una producción de $6,76 \times 10^8 \text{ Nm}^3$. En contraste, el caso ambiental (AmbB) incorpora una segunda planta en G22, incrementando la producción a $8,80 \times 10^8 \text{ Nm}^3$, y reduciendo distancias de transporte. En ambos casos se utilizan configuraciones basadas en FICFB, diferenciándose en la purificación: PSA en el caso económico y aminas en el ambiental, dejando ver una preferencia en el método de purificación según el objetivo perseguido.

Para los casos que utilizan poda como materia prima (P), la mayor dispersión del recurso conduce a redes menos centralizadas. El caso económico (EconP) combina una planta grande en G20 con expansiones de dos plantas chicas en G21 (Fig. 4), mientras que el caso ambiental (AmbP) presenta la misma configuración que el económico, pero ampliando al máximo el tamaño de todas las plantas. En estos escenarios se emplea la tecnología MILENA para la gasificación y en cuanto a la purificación PSA en el caso económico y aminas en el ambiental, reforzando la preferencia antes mencionada.

En el escenario combinado (M) se utilizan las dos materias primas: el bagazo aporta una mayor disponibilidad concentrada y la poda contribuye a diversificar el abastecimiento del sistema. Como resultado, el EconM alcanza $1,13 \times 10^9 \text{ Nm}^3$, eligiendo como materia prima bagazo y por ende la tecnología FICFB con una única planta grande en G20, obteniendo la misma configuración que para el caso EconB (Fig. 3). Mientras que el AmbM logra la mayor producción del conjunto, con $1,78 \times 10^9 \text{ Nm}^3$, e instala cuatro plantas, dos plantas en G20, una en G21 y la última en G22 (Fig. 4), todas de capacidad grande, utilizando ambas materias primas y por ende ambas tecnologías de gasificación. En este escenario se replican las elecciones en cuanto a tecnologías de purificación.

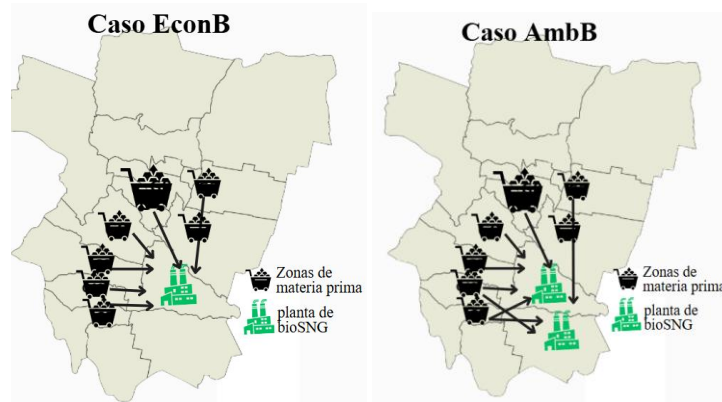


Figura 3. Configuración espacial de la CS a lo largo del horizonte temporal de 16 años para los casos donde se utiliza únicamente bagazo como materia prima.

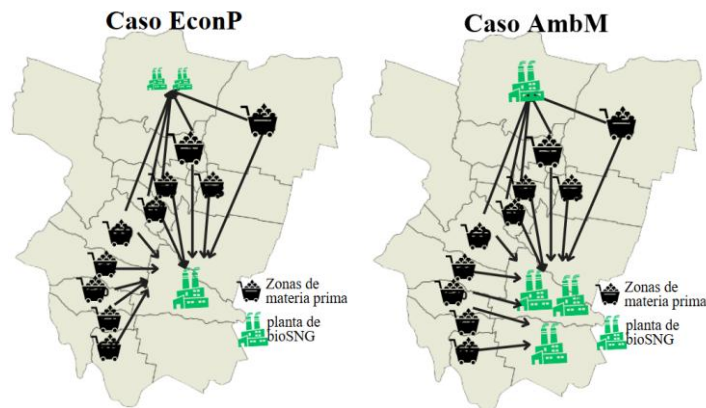


Figura 4. Configuración espacial de la CS para los casos EconP y AmbM a lo largo del horizonte temporal de 16 años.

4.2 Influencia de la materia prima y la tecnología

El bagazo, aunque presenta cierto costo de adquisición, ofrece ventajas logísticas debido a su concentración en los ingenios, lo que permite configuraciones más estables y centralizadas. Por el contrario, la poda, al ser un residuo sin costo de adquisición, mejora el desempeño económico, pero su dispersión geográfica incrementa los costos logísticos y la complejidad operativa.

Desde el punto de vista tecnológico, los escenarios ambientales seleccionan preferentemente sistemas de purificación mediante aminas, debido a su mayor eficiencia de conversión de syngas a bioSNG y menor impacto ambiental, mientras que los escenarios económicos optan por PSA, reduciendo costos operativos a costa de una menor eficiencia.

4.3 Desempeño económico y ambiental

Desde el punto de vista económico, los mejores resultados se obtienen en los escenarios con poda, destacándose el caso EconP con un VAN de $-2,25 \times 10^7$ USD, debido a la ausencia de costo de adquisición de la biomasa. En contraste, los escenarios con bagazo presentan valores de VAN más negativos (por ejemplo, $-6,15 \times 10^7$ USD en EconB), asociados al costo de la materia prima.

En términos ambientales, los escenarios optimizados bajo este criterio presentan los mejores resultados. El caso AmbM alcanza un impacto neto de $-6,03 \times 10^9$, con $7,09 \times 10^9$ emisiones evitadas, mientras que los escenarios económicos presentan valores menores (por ejemplo, $-2,13 \times 10^9$ en EconB). En todos los casos, el análisis desagregado muestra que el bloque de producción domina el impacto ambiental, representando más del 90% del impacto total, con valores del orden de 10^7 por período, mientras que el transporte de biomasa se sitúa en el orden de 10^6 .

4.4 Análisis del compromiso económico-ambiental

En todos los casos, la optimización ambiental conduce a una expansión de la red, mayores niveles de producción y mayores emisiones evitadas, pero con un deterioro del VAN. Por ejemplo, en el caso de bagazo, el paso de EconB a AmbB incrementa la producción en aproximadamente un 30%, pero empeora el resultado económico. De manera similar, en el caso combinado, el paso de EconM a AmbM incrementa la producción en más del 50% y las emisiones evitadas en un 58%, con un VAN significativamente más negativo.

Todos los casos presentan VAN negativo, lo que indica que el sistema no es económicamente viable bajo las condiciones analizadas. En conjunto, los resultados confirman que la integración de materias primas y la selección tecnológica adecuada permiten mejorar el desempeño ambiental, aunque no logran eliminar el compromiso con el desempeño económico.

Para evaluar el efecto del precio de venta del GNC sobre la rentabilidad del proyecto, se realizó un análisis de sensibilidad sobre el escenario EconM, por representar el caso más flexible al permitir el uso conjunto de ambas biomásas. El análisis permitió determinar un precio de equilibrio de 575,5 USD/t de GNC, a partir del cual el proyecto resulta rentable.

Tabla 2. Comparación entre los seis subcasos.

	EconB	AmbB	EconP	AmbP	EconM	AmbM
Producción de bioSNG [10^8 Nm ³]	6.8	8.8	6.8	9.0	11	18
VAN de la CS [10^7 USD]	-6.1	-9.3	-2.2	-6.6	-6.3	-15
Impacto total de CS [10^9 kg CO ₂ eq]	-2.1	-3	-2.1	-3	-3.5	-6.0
Cantidad de plantas instaladas	1	2	3	3	1	4
Materia prima utilizada	Bagazo	Bagazo	Poda	Poda	Bagazo	Ambas
Tecnologías de gasificación/purificación	FICFB PSA	FICFB Aminas	MILENA PSA	MILENA Aminas	FICFB PSA	Ambas Aminas

5. Conclusiones

Este estudio validó un enfoque de optimización de superestructura para el diseño de cadenas de suministro de bioSNG, integrando la complejidad de las rutas termoquímicas y la heterogeneidad de la biomasa lignocelulósica. Los resultados muestran que existe una relación de compromiso (*trade-off*) entre la rentabilidad económica y el desempeño ambiental, donde la configuración de la red y la selección tecnológica son factores determinantes.

Bajo las condiciones analizadas, el sistema presenta un VAN negativo, lo que pone de manifiesto la necesidad de incentivos para favorecer la incorporación de bioSNG en la red de gas natural. El análisis de sensibilidad permitió identificar un precio de equilibrio de 575,5 USD/t de GNC. No obstante, el desempeño ambiental resultó favorable en todos los escenarios evaluados.

La integración de ambas materias primas aporta mayor flexibilidad al sistema, favoreciendo configuraciones centralizadas desde el punto de vista económico y distribuidas bajo criterios ambientales.

Finalmente, el modelo constituye una herramienta útil para apoyar la toma de decisiones en el desarrollo de gases renovables en el Noroeste Argentino. Como trabajo futuro, se

propone incorporar la estacionalidad de la biomasa, ampliar el análisis de sensibilidad a otros parámetros económicos, e implementar una optimización multiobjetivo en escenarios económicamente viables.

Referencias

- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00002-7>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Hollander, A., Zijp, M., & van Zelm, R. (2017). *ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Enerdata. (2025). *Global energy statistical yearbook 2025*. Enerdata.
- Gassner, M., & Maréchal, F. (2009). Thermo-economic optimisation of the production of synthetic natural gas from biomass. *Energy*, 34(10), 1644–1654. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.09.010>
- Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., & Kolb, T. (2016). Renewable power-to-gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, 85, 1371–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>
- EEAOC. (2025). Informe RA-312: Superficie de limón en Tucumán — Campaña 2025.
- Güssing, A., Schildhauer, T. J., Fleck, T., Rauch, R., Hofbauer, H., Sjöström, K., & Aichernig, C. (2009). *Production of synthetic natural gas from biomass*. *Biomass and Bioenergy*, 33(6–7), 878–889. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.09.004>
- Van der Meijden, C. M., Veringa, H. J., & Rabou, L. P. L. M. (2010). *The production of Bio-SNG from biomass by gasification*. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.11.001>
- IEA Bioenergy. (2024). The role of synthetic natural gas (SNG) in decarbonisation. IEA Bioenergy.
- Ente Nacional Regulador del Gas. (2023). Informe estadístico del sector gas natural en Argentina. ENARGAS.
- Jeremić, M., Krammer, A., & Lehner, M. (2025). *Catalytic methanation of biomass gasification product gas in a fixed-bed reactor: Carbon-safe operation and the influence of light hydrocarbons*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.6834346>
- Ferraro, S., Machín Ferrero, L. M., & Mele, F. D. (2026). Optimization of biomethane production and distribution networks derived from livestock waste in northwestern Argentina. *SADIO Electronic Journal of Informatics and Operations Research (EJS)*, 25(1), e101. <https://doi.org/10.24215/15146774e101>