

Optimal design of sustainably efficient biorefineries supply chain

Lucas M. Machin Ferrero^{1,2}, Richard Cabrera Jiménez³, Jonathan Wheeler^{1,2}, Carlos Pozo³, and Fernando D. Mele^{1,2*}

¹ Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, T4002BLR S. M. de Tucumán, Argentina

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

³ Universitat Rovira i Virgili, Av. Països Catalans 26, 43007 Tarragona, Spain
* fmele@herrera.unt.edu.ar.

Abstract. A more comprehensive use of biomass as raw material to produce food, energy and products would result in an important contribution towards the Sustainable Development Goals. The concept of biorefinery allows regions with abundant natural resources to make the most of available biomass for these purposes, achieving progressive independence from fossil resources. This study presents a framework for the multi-criteria design of biorefinery supply chains (SC) under sustainability considerations. Therefore, an optimization approach of different scenarios is performed followed by a ranking based on the Data Envelopment Analysis (DEA) model to assess the efficiency according to different economic, environmental and social indicators. The capabilities of this approach are demonstrated through a case study of the biomass SC centered in the Northwest of Argentina.

Keywords: Biomass, Multi-criteria decision-making, Data Envelopment Analysis

Diseño óptimo de cadenas de suministros de biorrefinerías sustentablemente eficientes

Lucas M. Machin Ferrero^{1,2}, Richard Cabrera Jiménez³, Jonathan Wheeler^{1,2}, Carlos Pozo³, and Fernando D. Mele^{1,2*}

¹ Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, T4002BLR S. M. de Tucumán, Argentina

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

³ Universitat Rovira i Virgili, Av. Països Catalans 26, 43007 Tarragona, España
*fmele@herrera.unt.edu.ar.

Resumen. El uso integral de la biomasa como materia prima para producir alimentos, energía y productos es crucial para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible. El concepto de biorrefinería permite que regiones con abundantes recursos naturales aprovechen al máximo su disponibilidad de biomasa, consiguiendo una progresiva independencia de los recursos fósiles. Este estudio presenta un marco multicriterio para el diseño de cadenas de suministros (CS) de biorrefinerías bajo consideraciones de sustentabilidad. Se realiza una etapa de optimización de diferentes escenarios seguida de una clasificación basada en el modelo de Análisis Envolvente de Datos (DEA) para evaluar la eficiencia de cada escenario de acuerdo con diferentes indicadores económicos, ambientales y sociales. Las capacidades de este enfoque se ilustran a través de un caso de estudio de una CS de biomasa localizada en el noroeste de la Argentina.

Palabras clave: Biomasa, Toma de decisiones multicriterio, Análisis Envolvente de Datos

1 Introducción

Ante las problemáticas globales relacionadas con el cambio climático, el aumento de la población mundial y el agotamiento de los recursos no renovables, ha surgido la necesidad acuciante de implementar políticas que aseguren la sustentabilidad de los sistemas productivos convencionales [1]. En consecuencia, se están realizando y planificando acciones en los sectores agroindustriales de los países para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como los relacionados con el consumo y la producción responsable (ODS 12) y la acción por el clima (ODS 13) [2].

Las biorrefinerías conducen a un uso más integral de la biomasa como materia prima para producir alimentos, energía y productos, lo cual supondría una importante contribución a los objetivos perseguidos. Estas plantas fabriles permiten que regiones con

abundantes recursos naturales aprovechen al máximo la biomasa disponible, consiguiendo una progresiva independencia de los recursos fósiles [3].

Las decisiones sobre las materias primas a utilizar, el diseño de la cartera de bioproductos, la planificación de la producción y las tareas de distribución deben abordarse y evaluarse en conjunto para garantizar una gestión sustentable de las cadenas de suministros (CS) en las que las biorrefinerías se insertan [4] [5]. Por lo tanto, el foco debe estar puesto en los diferentes escalones de las CS, durante las etapas de diseño y planificación, con criterios de sustentabilidad bien definidos, que involucren indicadores económicos, ambientales y sociales. El uso de la programación matemática está bien establecido como herramienta para la Gestión de Cadenas de Suministros. Sin embargo, el problema se torna cada vez más complejo al incorporar múltiples criterios de sustentabilidad, múltiples materias primas (biomasa) a procesar y una extensa cartera de bioproductos [6].

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una herramienta de soporte a la toma de decisiones para el diseño de CS con biorrefinerías (producción-almacenamiento-mercado) que incluya las tres dimensiones de la sustentabilidad: económica, ambiental y social. Este enfoque multicriterio combina la optimización, a través de la programación lineal mixta entera (MILP) para encontrar las configuraciones de CS más económicas y Análisis Envolvente de Datos (DEA) para clasificar y encontrar aquellas que son más sustentables, incorporando su desempeño ambiental y social. A partir de la Sección 4, se exponen las capacidades del enfoque propuesto a través de un caso de estudio que aborda el diseño de una CS de biorrefinerías en el Noroeste Argentino (NOA).

2 Enfoque propuesto

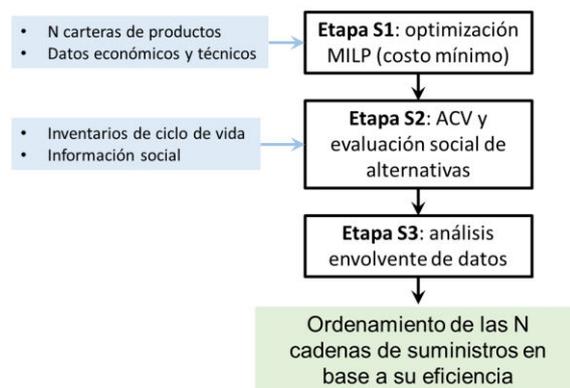


Fig. 1. Enfoque de tres etapas para evaluar la eficiencia de un conjunto de redes de CS de biorrefinerías.

En este trabajo se desarrolla una estrategia en tres etapas para seleccionar los bioproductos a producir y la topología de la CS más conveniente basada en aspectos de sustentabilidad: (S1) resolución de un modelo MILP que minimiza los costos totales de la CS para satisfacer ciertos patrones de demanda de productos (cartera de productos a lo largo del horizonte de tiempo), (S2) evaluación de indicadores ambientales y sociales de la CS, y (S3) aplicación de DEA para evaluar las CS obtenidas en S1 considerando los indicadores económicos, ambientales y sociales calculados en S2 (Figura 1).

La estructura de la CS incluye los puntos de aprovisionamiento de biomasa (materias primas), sitios de las instalaciones fabriles y de almacenamiento y puntos de venta o destino de los productos. Se puede seleccionar diferentes tipos de biomasa y, en la fabricación, se puede seleccionar diferentes tecnologías para producir alimentos, biocombustibles y bioenergía. Se consideran varios medios de transporte entre nodos (para el transporte de biomasa, productos sólidos y productos líquidos).

Las decisiones que se toman en la etapa S1 incluyen el tipo (tecnologías), el número, la ubicación, la capacidad y el nivel de producción de las biorrefinerías; el tipo, número y capacidad de los almacenes que se establezcan en diferentes regiones; las rutas y formas de transporte en toda la red, y la cantidad de productos entregados a los mercados. Estas decisiones son tales que aseguren que los costos totales sean mínimos para una cartera de productos determinada.

En la etapa S2, una vez confeccionados los inventarios del ciclo de vida de los nodos de cada CS y obtenidos los datos socioeconómicos de las regiones, se calculan indicadores ambientales y sociales para cada una de las CS optimizadas desde el punto de vista económico en la etapa S1. Finalmente, en la etapa S3, se aplica el DEA para clasificar las configuraciones de CS obtenidas en función de los indicadores seleccionados para evaluar la sustentabilidad.

Es importante remarcar que el enfoque propuesto intenta trasuntar la forma en que quienes toman decisiones en una CS abordan usualmente este tipo de problema. Primero se centra la atención en asegurar que una CS que responde a un determinado patrón de demanda sea la mejor (óptima) desde el punto de vista económico, y luego, a partir de un conjunto de soluciones óptimas, se puede escoger aquellas que resulten más sustentables (eficientes desde el punto de vista del DEA). Luego, no se trata de un enfoque de optimización multiobjetivo sino de un enfoque de selección secuencial de alternativas.

3 Métodos

3.1 Etapa S1: Optimización económica

Se utiliza como base un modelo MILP previamente publicado por los autores [7]. Se trata de una formulación multiperíodo, multi-materia-prima y multiproducto. La función objetivo son los costos totales actuales (SC_{costs}) asociados a la CS. Estos incluyen costos relacionados con la producción de biomasa (TMC_t), instalación de biorrefinerías y sus niveles de producción (TBC_t), consumo de energía de biorrefinerías relacionadas con gas natural (TGC_t) y electricidad (TEC_t), instalación de bodegas y sus niveles de inventario promedio (TSC_t), y establecimiento de enlaces de transporte de materias primas y productos (TTC_t) a lo largo de la CS (Ec. 1 y 2). Una lista resumida de los índices y conjuntos puede consultarse en la Sección Nomenclatura.

$$SC_{costs} = TC_{t=1} + \sum_{t \geq 1} \frac{TC_t}{(1+\alpha)^{t-1}} \quad (1)$$

$$TC_t = TMC_t + TBC_t + TEC_t + TGC_t + TSC_t + TTC_t \quad \forall t \quad (2)$$

3.2 Etapa S2: Evaluación ambiental y social

Evaluación de impacto ambiental. El desempeño ambiental de CS se cuantifica siguiendo las tres primeras fases del Análisis o Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) [8]: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario y evaluación de impacto. En esta etapa, el cálculo de los indicadores ambientales utiliza los resultados obtenidos en la etapa anterior (es decir, optimización de las CS en S1). Para ello, se propone el siguiente esquema de cálculo.

El impacto total de la CS referido a la categoría de impacto e (SC_e) en todo el horizonte temporal se calcula utilizando la Ec. 3. Este valor acumula los impactos asociados a cada actividad de la CS: $I_{M_{e,t}}$ es el impacto asociado a la producción y recogida de materias primas, $I_{B_{e,t}}$ es el asociado a la instalación y operación de biorrefinerías, $I_{T_{e,t}}$ es el generado por las distintas instancias de transporte a lo largo de la CS, $I_{S_{e,t}}$ es el relacionado con las tareas de almacenamiento, $I_{E_{e,t}}$ e $I_{G_{e,t}}$ son los impactos asociados a la producción y uso de energía externa, electricidad y gas natural, respectivamente.

$$SC_e = \sum_t [I_{M_{e,t}} + I_{B_{e,t}} + I_{T_{e,t}} + I_{S_{e,t}} + I_{E_{e,t}} + I_{G_{e,t}}] \quad \forall e \quad (3)$$

$I_{M_{e,t}}$ se calcula como el impacto de las materias primas $i \in IR(i)$ producidas y utilizadas en las mismas regiones $g \in GB(g) \cap GH(g)$ (representado por la variable $H_{i,g,t}$) y producido en la región $g \in GH(g)$ pero transportado y utilizado en otras regiones $g' \in GB(g)$ (representado por la variable $Q_{i,l,g,g',t}$) (Ec. 4). $ImpCat_{M_{i,e}}$ es el impacto por tonelada de materia prima $i \in IR(i)$ referido a la categoría de impacto e .

$$I_{M_e,t} = \sum_{g \in GH} \sum_{i \in IR} ImpCat_{M_{i,e}} (H_{i,g,t} + \sum_{g',g' \in GB,g' \neq g} \sum_{i,l \in IL} Q_{i,l,g,g',t}) \quad \forall e, t \quad (4)$$

En cuanto al impacto ambiental de las biorrefinerías (Ec. 5), depende de las tecnologías seleccionadas y sus niveles de producción $X_{k,b,g,t}$. $ImpCat_{B_{k,e}}$ es el impacto por cantidad de flujo de referencia de la tecnología k , referido a la categoría de impacto e .

$$I_{B_e,t} = \sum_{g \in GB} \sum_b \sum_k ImpCat_{B_{k,e}} X_{k,b,g,t} \quad \forall e, t \quad (5)$$

Para impactos de transporte, $I_{T_e,t}$, se consideran los impactos generados por el transporte de materias primas $i \in IR(i)$ desde las regiones productoras de biomasa $g \in GH(g)$ hacia las regiones procesadoras de biomasa $g \in GB(g)$, las correspondientes al transporte de los productos $i \in IM(i)$ desde las biorrefinerías a las regiones con almacenes $g \in GS(g)$, y al transporte de los productos $i \in IM(i)$ desde los almacenes a los puntos de demanda $g \in GD(g)$. La Ec. 6 muestra el cálculo para el primer tramo de transporte mencionado anteriormente, donde $NL_{i,l,g,g',t}$ es el número de viajes requeridos para el transporte del material i por medio del modo de transporte l de la región g a la región g' en el período de tiempo t , $d_{g,g'}$ es la distancia entre las regiones g y g' , $ImpCat_{TF_{l,e}}$ e $ImpCat_{TE_{l,e}}$ son los impactos generados por kilómetro recorrido por el modo de transporte l lleno o vacío, respectivamente.

$$I_{T_e,t} = \sum_l \sum_{g \in GH} \sum_{g' \in GB,g' \neq g} \sum_{i \in IR} NL_{i,l,g,g',t} (ImpCat_{TF_{l,e}} d_{g,g'} + ImpCat_{TE_{l,e}} d_{g',g}) \quad \forall e, t \quad (6)$$

Considerando la posibilidad de implementaciones relacionadas con la economía circular, el modelo a resolver en S1 puede decidir instalar tecnologías para producir energía tales como biogás a partir de desechos líquidos o electricidad a partir de materiales lignocelulósicos. Con esto se pretende reducir el consumo de energía externa. Esta decisión se refleja en el cálculo del impacto ambiental de la CS a través de las Ec. 7-9. En la Ec. 7, el impacto relacionado con la electricidad externa ($I_{EP_e,t}$) se calcula considerando el saldo de electricidad comprado a la red ($EP_{g,t}$) y la electricidad exportada a la red ($EX_{g,t}$). En este caso, $ImpCat_{E_e}$ es el impacto e de consumir electricidad de la red externa, por kWh. El impacto relacionado con la electricidad producida *in situ* por la biorrefinería ($I_{EC_e,t}$) se calcula a partir de la cantidad de electricidad generada por la tecnología k en la biorrefinería b , región g y período de tiempo t ($X_{k,b,g,t}$) y su impacto ambiental específico ($ImpCat_{B_{k,e}}$) por kWh producido (Ec. 8).

$$I_{EP_e,t} = \sum_{g \in GB} ImpCat_{E_e} (EP_{g,t} - EX_{g,t}) \quad \forall e, t \quad (7)$$

$$I_{EC_e,t} = \sum_{g \in GB} \sum_b \sum_{k=Cogeneration} ImpCat_{B_{k,e}} X_{k,b,g,t} \quad \forall e, t \quad (8)$$

$$I_{E_e,t} = I_{EP_e,t} + I_{EC_e,t} \quad \forall e, t \quad (9)$$

Finalmente, se suman los impactos de consumir electricidad de la red y los de producirla internamente (Ec. 9). El cálculo del impacto del biogás y del gas natural es

similar al de la electricidad. Los impactos asociados con las instalaciones de almacenamiento de productos intermedios y finales se desprecian con respecto a los otros impactos de la CS (producción de materia prima, fabricación y transporte).

Evaluación de impacto social. En la búsqueda de un indicador social que represente el desempeño de la instalación y operación de biorrefinerías, manteniendo la importancia de las características regionales, se selecciona el indicador desarrollado por Meyer [9]. Este indicador considera datos socioeconómicos de las regiones donde están instaladas las biorrefinerías y la cantidad de empleo directo generado por las tecnologías en cada biorrefinería.

Los parámetros socioeconómicos necesarios para calcular el indicador social son: la población económicamente activa de cada región g (PEA_g , como % de personas con empleo o que lo buscan), la tasa de desempleo abierto de cada región g (OUR_g , como % de desocupados en relación con PEA_g) y el número de habitantes en cada región g (Hab_g). Estos parámetros serán diferentes para cada región analizada y de fácil acceso a través de los informes de censos nacionales.

A partir de la cantidad de tecnologías y biorrefinerías que se decidan instalar en la etapa S1 para diferentes carteras de productos, se puede calcular la cantidad de empleos generados (Ec. 10). $LE_{g,t}$ es el número de puestos de trabajo locales generados en cada región $g \in GB(g)$ cuando se instala una planta (es decir, cuando la variable binaria $z_{k,b,c,g,t}$, en S1, toma el valor de 1). N_{OL_k} es el requerimiento de mano de obra operativa (número de puestos de trabajo generados) asociado a la tecnología k (Ec. 10).

$$LE_{g,t} = \sum_b \sum_k \sum_c z_{k,b,c,g,t} N_{OL_k} \quad \forall g \in GB(g), t \quad (10)$$

$$SI_{g,t} = \frac{\gamma_g LE_{g,t}}{Hab_g EAP_g - \lambda_g Hab_g EAP_g OUR_g} \quad \forall g \in GB(g), t \quad (11)$$

$$SC_S = \sum_{g \in GB} \sum_t SI_{g,t} \quad (12)$$

La Ec. 11 es la expresión utilizada para calcular el índice social para la región g en el período t , siendo γ_g y λ_g factores que permiten ponderar a los empleados y desempleados locales, respectivamente. Finalmente, en la Ec. 12, se calcula el índice social de la CS (SC_S) en el horizonte temporal. Cabe destacar que el indicador es siempre positivo. Cuanto mayor sea el indicador, mayor será el número de puestos de trabajo generados en las regiones con mayor tasa de desempleo. Como hipótesis se plantea que, para cada región g , la cantidad de empleos generados puede ser absorbida por los habitantes de dicha región.

3.3 Etapa S3. Modelado con DEA

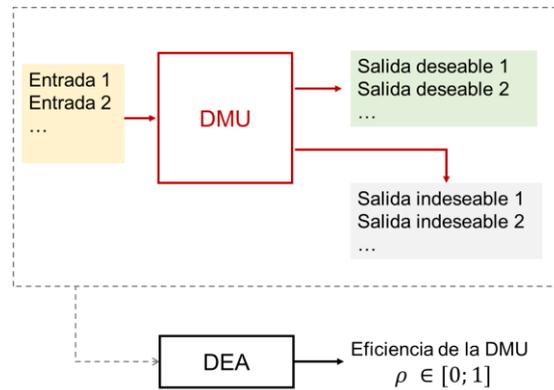


Fig. 2. Esquema conceptual del DEA.

Luego de obtener las configuraciones óptimas de CS para diferentes carteras de productos planteadas (etapa S1) y caracterizar cada una de ellas en términos sociales y ambientales (etapa S2), en esta etapa se genera un *ranking* de CS en base a ciertos indicadores de sustentabilidad. Las herramientas de toma de decisiones multicriterio han resultado efectivas para hacer frente a este propósito, por ejemplo, el proceso analítico jerárquico (AHP) y la teoría del valor multiatributo [10]. El DEA, una herramienta ampliamente utilizada para la clasificación de sistemas con múltiples atributos, tiene la ventaja de combinar múltiples indicadores en un solo puntaje, sin necesidad de definir pesos entre los indicadores evitando la subjetividad. DEA evalúa la eficiencia relativa de un conjunto de N entidades similares llamadas unidades de toma de decisiones (DMU), que convierten múltiples entradas en múltiples salidas. Las entradas y salidas pueden ser cualquier indicador de rendimiento. De acuerdo con la metodología, las entradas y salidas son cantidades a minimizar y maximizar, respectivamente [11]. Dependiendo de la formulación, existen salidas “no deseadas”, que son aquellas salidas del proceso de producción que uno podría querer reducir (Figura 2). Para cada DMU, se calcula un puntaje de desempeño o eficiencia que toma valores entre 0 y 1. Las DMU con puntaje igual a 1, son eficientes y pasan a formar parte de una frontera eficiente. Por otro lado, las DMU con puntuaciones inferiores a 1 se consideran ineficientes. El DEA permite la identificación de las mejoras a las que las DMU ineficientes deben apuntar para volverse eficientes.

En este trabajo, se utiliza la variante basada en holgura no radial (SBM) propuesta por Tone [12] donde las salidas no deseadas se consideran entradas al momento de evaluar la eficiencia de las DMU. Esta formulación no lineal se linealiza utilizando la transformación de Charnes-Cooper [13] (ver modelo M),

$$\rho^* = \min t - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}} \quad (\text{M})$$

$$\text{s. t. : } 1 = t + \frac{1}{k} \sum_{r=1}^k \frac{S_r^+}{y_{r0}}$$

$$\sum_{j=1}^n \Lambda_j X_{ij} + S_i^- = x_{i0} t \quad \forall i$$

$$\sum_{j=1}^n \Lambda_j Y_{rj} - S_r^+ = y_{r0} t \quad \forall r$$

$$S_i^- > 0 \quad \forall i, S_r^+ > 0 \quad \forall r, \Lambda_j > 0 \quad \forall j$$

$$t > 0$$

En este modelo, ρ^* es la eficiencia del DEA SBM, X_{ij} es el valor de la entrada i de la DMU j , Y_{rj} es el valor de la salida r de la DMU j , x_{i0} y y_{r0} son los valores de la entrada i y la salida r , respectivamente, de la DMU en evaluación, S_i^- y S_r^+ son las holguras de entrada y salida (es decir, la distancia desde la DMU evaluada hasta la frontera eficiente).

4 Caso de estudio

La metodología antes mencionada se aplica al diseño de la CS de la agroindustria del NOA, considerando la posibilidad de establecer biorrefinerías en la provincia de Tucumán, teniendo en cuenta que es la mayor productora de azúcar, bioetanol (a partir de la caña de azúcar) y limones del país [14] [15].

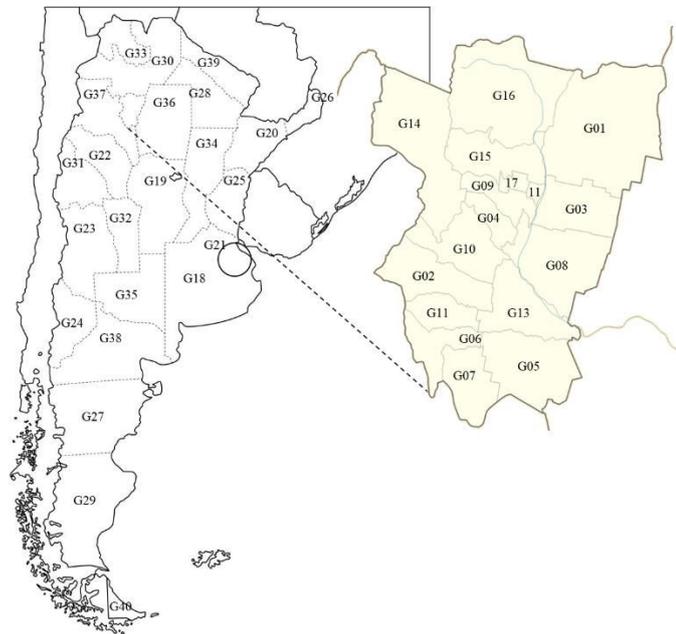


Fig. 3. Regiones geográficas consideradas para el caso de estudio: a la izquierda, la Argentina, a la derecha (región ampliada), la provincia de Tucumán con sus departamentos.

Tabla 1. Distribución de la biomasa disponible, en toneladas por año. RAC: residuos de cosecha de caña de azúcar, RCL: residuos de cosecha de limón, CL: cáscara de limón.

Región	RAC	caña	RCL	CL
G01	$1,59 \cdot 10^5$	$4,51 \cdot 10^5$	$7,35 \cdot 10^4$	$4,36 \cdot 10^5$
G02	$8,55 \cdot 10^4$	$2,11 \cdot 10^6$	$1,84 \cdot 10^4$	$1,09 \cdot 10^5$
G03	$2,40 \cdot 10^5$	$1,13 \cdot 10^6$	$9,64 \cdot 10^3$	$5,72 \cdot 10^4$
G04	$5,09 \cdot 10^4$	$3,18 \cdot 10^6$	$2,24 \cdot 10^4$	$1,33 \cdot 10^5$
G05	$3,28 \cdot 10^4$	$6,74 \cdot 10^5$	0	0
G06	$3,41 \cdot 10^4$	$4,35 \cdot 10^5$	9,40E+03	$5,58 \cdot 10^4$
G07	$5,40 \cdot 10^4$	$7,15 \cdot 10^5$	$1,52 \cdot 10^4$	$9,04 \cdot 10^4$
G08	$2,73 \cdot 10^5$	3,62E+06	0	0
G09	$4,58 \cdot 10^4$	$6,06 \cdot 10^5$	$1,21 \cdot 10^4$	$7,19 \cdot 10^4$
G10	$1,20 \cdot 10^5$	$1,58 \cdot 10^6$	$1,96 \cdot 10^4$	$1,16 \cdot 10^5$
G11	$7,72 \cdot 10^4$	$1,02 \cdot 10^6$	$7,16 \cdot 10^3$	$4,25 \cdot 10^4$
G12	2,75E+02	$3,64 \cdot 10^3$	0	0
G13	$2,00 \cdot 10^5$	$2,64 \cdot 10^6$	0	0
G14	0	0	0	0
G15	$1,79 \cdot 10^3$	$2,37 \cdot 10^4$	$2,27 \cdot 10^4$	$1,35 \cdot 10^5$
G16	0	0	0	0
G17	$5,50 \cdot 10^2$	$7,28 \cdot 10^3$	$6,86 \cdot 10^3$	$4,07 \cdot 10^4$

Ámbito geográfico. Este caso de estudio considera las 23 provincias de la Argentina (siendo una de ellas la Ciudad Autónoma de Buenos Aires) y los 17 departamentos de Tucumán (es decir, 40 regiones geográficas) (Figura 3). Las regiones productoras de biomasa, $GH(g)$, y las regiones de ubicación potencial de biorrefinerías, $GB(g)$, son G01 a G17 (dentro de Tucumán). Asimismo, la ubicación potencial de los almacenes, $GS(g)$, son G18 a G40 (fuera de la provincia de Tucumán), mientras que las regiones con demanda de producto, $GD(g)$, dependen del producto final considerado.

Disponibilidad de biomasa. La Tabla 1 muestra el tipo de biomasa considerada y la cantidad disponible en cada región $g \in GH(g)$: caña de azúcar, residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC), cáscara de limón (CL) y residuos de cosecha de limón (RCL). Los datos técnicos y económicos para la producción de caña de azúcar y la generación de los residuos de biomasa se toman de la literatura [7], mientras que para la biomasa del limón se estiman a partir de estudios e informes regionales [16] [17].

Tabla 2. Entradas y salidas para cada tecnología k . RAC: residuos de cosecha de caña de azúcar, RCL: residuos de cosecha de limón, CL: cáscara de limón, DCL: cáscara de limón deshidratada.

Tecnología	entradas	salidas	Tecnología	entradas	salidas
K00	- caña	- jugo - bagazo	K10	- jugo de caña	- etanol - vinazas
K01-K02	- RAC - bagazo - RCL	- hexosas - xilosa	K11	- hexosas	- etanol
K03	- hexosas - jugo de caña - miel - melazas	- ácido cítrico	K12	- hexosas - xilosa	- etanol
K05	- RAC - bagazo - RCL - CL	- metanol	K13	- hexosas - jugo de caña - miel - melazas	- ácido láctico
K06	- jugo de caña	- azúcar blanco - azúcar crudo - melazas	K14	- RAC - bagazo - RCL - LDP	- electricidad
K07	- jugo de caña	- azúcar blanco - azúcar crudo - miel	K15	- vinazas	- biogás
K08	- melazas	- etanol - vinazas	K16	- CL	- hexosas - xilosa - limoneno
K09	- miel	- etanol - vinazas	K17	- CL	- CLD

Procesamiento de biomasa. Los productos finales considerados son: azúcar blanco y crudo, etanol de primera y segunda generación, ácido cítrico, ácido láctico, metanol, biogás y electricidad. Las tecnologías pueden procesar 17 materias primas y flujos intermedios. Los parámetros técnicos y económicos provienen de la literatura para la caña de azúcar y de los trabajos de Machin Ferrero [17] y Pourbafrani [18] para el procesamiento del limón. La Tabla 2 resume las posibles entradas y salidas para cada tecnología k . Las tecnologías se pueden instalar con dos capacidades diferentes (pequeña o grande). Los parámetros de transporte y almacenamiento se toman de trabajos anteriores de los autores [7] [19].

Escenarios. Se proponen ocho escenarios (E1 a E8) los cuales representan distintas carteras de productos a ofrecer, con distintas progresiones en el horizonte temporal. La Tabla 3 muestra las regiones $g \in GD(g)$ y sus demandas de bioproductos. La demanda anual de productos convencionales (azúcar y etanol) se toma de los informes nacionales [14]. Las demandas de nuevos bioproductos a producir (ácido cítrico, ácido láctico y metanol) se estiman con el objetivo de sustituir las importaciones de los países de estos productos [20] y cubrir estos requerimientos con productos nacionales producidos a

partir de biomasa regional. Cada escenario se describe en la Tabla 4. Se plantean demandas crecientes, decrecientes y constantes de bioproductos de acuerdo con el escenario analizado. El horizonte temporal para todos los escenarios es de cinco años.

Tabla 3. Demanda de productos (toneladas/año).

Provincia		azúcar bco.	etanol	ác. cítrico	ác. láctico	metanol
Buenos Aires	G18	96.281	34.718	12.745	894	826
Córdoba	G19	105.721	38.122	12.745	671	-
Corrientes	G20	31.968	11.527	-	-	-
La Plata	G21	476.625	171.867	-	671	-
La Rioja	G22	12.208	4402	-	-	-
Mendoza	G23	54.748	19.742	-	-	-
Neuquén	G24	17.243	6218	-	-	-
Entre Ríos	G25	39.645	14.296	-	-	112
Misiones	G26	34.108	12.299	-	-	-
Chubut	G27	14.474	5219	-	-	-
Chaco	G28	33.227	11.981	-	-	-
Santa Cruz	G29	7173	2587	-	-	-
Salta	G30	38.639	13.933	-	-	-
San Juan	G31	22.025	7942	-	-	-
San Luis	G32	13.844	4992	6372	-	86
Jujuy	G33	21.521	7760	-	-	-
Santa Fe	G34	101.945	36.761	-	-	3792
La Pampa (General Pico)	G35	105.72	3812	-	-	204
Santiago	G36	27.311	9848	-	-	76
Catamarca	G37	10.824	3903	-	-	-
Río Negro (Ge- neral Roca)	G38	18.879	6808	-	-	-
Formosa	G39	16.990	6127	-	-	-
Tierra del Fuego	G40	4027	1452	-	-	-

Tabla 4. Escenarios considerados. C: demanda constante en el tiempo, V: demanda variable en el tiempo (% de incremento o disminución anual entre paréntesis), X: sin demanda en el horizonte de tiempo.

Escenario	azúcar blanco	etanol	otros bioproductos
E1	C	C	X
E2	V (-5%)	V (+5%)	X
E3	V (-10%)	V (+10%)	X
E4	C	C	C

E5	C	C	V*
E6	X	V (+10%)	C
E7	X	X	C
E8	X	C	V*

* Se prevé cubrir la demanda en 5 años con un aumento de la producción del 20% anual.

Aspectos ambientales. Para la cuantificación de los parámetros ambientales descritos en la Sección 3.2, los inventarios de cada nodo de las CS se construyen con un enfoque *gate-to-gate* siguiendo los lineamientos del ACV. En este caso de estudio solo se cuantifica una categoría de impacto referente al cambio climático: el indicador de Potencial de Calentamiento Global (GWP) de la metodología ReCiPe 2016. Los inventarios para biomasa y tecnologías convencionales se toman o adaptan de la literatura y trabajos previos [7] [19] [21] [22] [23]; para las nuevas tecnologías se construyen en base a información de trabajos citados previamente [7] [17]; para el transporte y para la producción y uso de gas natural y electricidad externos se toman los datos de Ecoinvent 3.8 [24].

Aspectos sociales. Para el cálculo del índice social (Sección 3.2), los empleos directos generados por las tecnologías, N_{OL_k} , se estiman mediante el método propuesto por Turton [25] basado en una correlación que depende del número de operaciones unitarias (reactores, columnas, calentadores, intercambiadores, etc.) involucradas en cada tecnología. Para el cómputo se consideran tres turnos por día como es habitual en las actividades industriales. Los parámetros socioeconómicos, es decir, Hab_g , EAP_g y OUR_g , para cada región donde se podrían instalar biorrefinerías, $GB(g)$, se toman del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC) [26].

DEA. Las ocho CS económicamente óptimas resultantes de la etapa S1 (única por cada escenario) son consideradas como DMU del modelo DEA. Para este caso de estudio se seleccionan como parámetros de DEA los siguientes indicadores, previamente calculados en las etapas S1 y S2, teniendo en cuenta los resultados de la optimización:

Porcentaje de utilización de materia prima, η . El propósito de una biorrefinería es obtener la mayor cantidad de bioproductos a partir de una determinada cantidad de biomasa intentándose promover su máximo aprovechamiento. Así, este indicador se calcula dividiendo la masa total de productos finales producidos en las biorrefinerías en la cantidad, en masa, de materia prima requerida. Esta constituye una salida deseada para el modelo DEA.

Indicador relacionado con los beneficios, $f(costos)$. Toda actividad productiva busca maximizar sus beneficios minimizando costos para un determinado objetivo comercial, las biorrefinerías no serían una excepción. Dada la gran incertidumbre que presenta la estimación de los precios de los bioproductos en el mercado, especialmente los que aún no están consolidados y son proyecciones, se decide incorporar como indicador económico una función de costo representada por un número suficientemente grande del cual se restan los costos totales asociados a la CS. Esta es también una salida deseada del modelo DEA.

Potencial de calentamiento global, GWP. Este indicador ambiental calculado para la operación de toda la CS bajo estudio (Ec. 3, $SC_{e=GWP}$) es un resultado no deseado para el modelo.

Índice social, SC_S . El índice social presentado en la Sección Métodos y evaluado para toda la CS bajo estudio (Ec. 12) es otro resultado deseado del modelo.

Las etapas S1 y S2 se resuelven juntas, implementadas en GAMS®, utilizando el solucionador de MILP CPLEX 11.0 en una PC DELL DESKTOP-OMKAB82 con un Intel(R) Core (TM) i5-9500, 3.00 GHz y 8 Gb de RAM. El modelo MILP que se resuelve para cada cartera de productos en la etapa S1 contiene 129.699 ecuaciones, 181.313 variables continuas y 5760 variables discretas. El tiempo de CPU dedicado a encontrar las soluciones óptimas es del orden de 10^3 segundos con un *gap* de optimización de menos del 5 % (promedio de todos los escenarios). El modelo DEA (S3) también se implementa en GAMS® y se resuelve como un problema lineal con estadísticas despreciables con respecto al anterior (menos de un segundo por DMU/CS analizada).

5 Resultados

Las características y aplicaciones del modelo de optimización que se usa en la etapa S1 y su análisis fueron presentados en trabajos previos [7]; por lo que en este trabajo se hace hincapié en los resultados derivados más bien de las etapas S2 y S3. La Tabla 5 y la Figura 4 resumen los principales resultados obtenidos. La Tabla 5 presenta los indicadores normalizados calculados para cada escenario. $f(SC_{COSTS})$ proviene de la etapa S1 y SC_{GWP} y SC_S se calculan en la etapa S2. La Figura 4 muestra la frontera de eficiencia entre los indicadores sociales y ambientales normalizados de cada escenario como pares ordenados.

Tabla 5. Resultados de S2 en términos de los indicadores considerados como parámetros en el modelo de DEA.

Escenario	η	$f(SC_{COSTS})$	SC_{GWP}	SC_S
E1	0,46	0,15	0,95	0,75
E2	0,46	0,15	0,88	0,90
E3	0,42	0,16	0,88	1,00
E4	0,47	0,18	0,88	0,60
E5	0,46	0,15	1,00	1,00
E6	0,27	0,61	0,28	0,25
E7	0,24	0,55	0,36	0,35
E8	0,25	0,61	0,28	0,30

Las CS resultantes de los escenarios E3, E6 y E8 resultan ser eficientes en términos de los indicadores evaluados ($\rho = 1$). Los demás escenarios presentan cierta distancia a la frontera cuyo valor específico depende de los indicadores analizados.

Entre los escenarios eficientes, E6 y E8 muestran cierta similitud, con idénticos indicadores económicos y ambientales (bajo impacto ambiental y buen desempeño económico), mostrando una relación de compromiso entre el uso eficiente de los recursos y el impacto social. En cambio, la solución E3 representa una situación muy diferente, con un alto impacto ambiental y bajo rendimiento desde el punto de vista económico, pero siendo una solución deseable desde el punto de vista social. Esto demuestra claramente la relación de compromiso existente entre los indicadores seleccionados. El escenario E3 se caracteriza por la disminución del consumo de azúcar y el aumento de la producción de etanol, es decir, una tendencia hacia la instalación de destilerías autónomas (que sólo producen etanol y no azúcar). La instalación de biorrefinerías con tecnologías de producción de azúcar y etanol y tratamiento de vinazas (como las existentes actualmente en Tucumán) se realiza solo en regiones en las que incide positivamente el indicador social. Además, el uso de materia prima (caña de azúcar) es uno de los más altos en comparación con otros escenarios. Las tecnologías instaladas en el primer año en este escenario son K00, K06, K07, K08, K09, K10 y K15, mientras que en el segundo y tercer año se instalan tecnologías K10 para obtener etanol directamente del jugo de caña de azúcar. En total, el modelo prescribe instalar siete biorrefinerías en el primer período, en las regiones G02, G04, G06 y G13-G16.

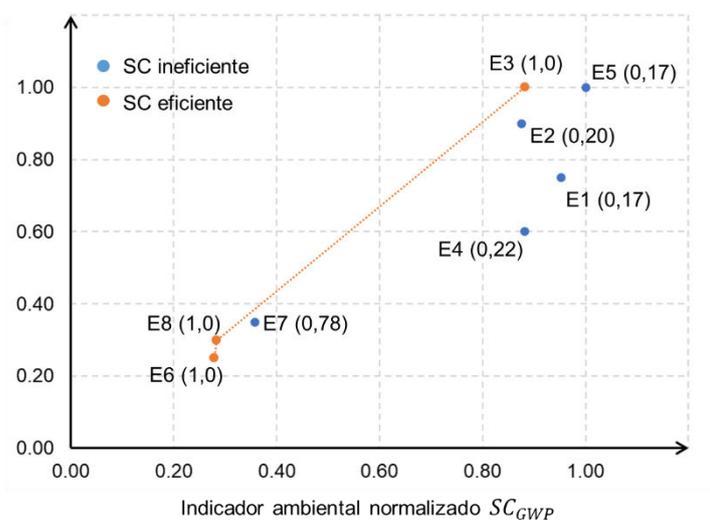


Fig. 4. Frontera de eficiencia. Los valores entre paréntesis son las eficiencias (ρ) para cada escenario E.

Cabe señalar que la solución E7 está cerca de la frontera de eficiencia y mediante modificaciones en las tecnologías que se instalan, entre otras variables sensibles, podría

convertirse en un escenario eficiente con menos dificultad que el resto de los escenarios ineficientes.

6 Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología para el diseño multicriterio —bajo consideraciones de sustentabilidad— de CS que incluyen biorrefinerías como instalaciones productivas. Se hace una optimización de un problema MILP asociado a diferentes carteras de productos (escenarios) seguida de una clasificación basada en el modelo DEA para evaluar la eficiencia de las soluciones óptimas de acuerdo con diferentes indicadores tecnoeconómicos, ambientales y sociales. Las posibilidades de este enfoque se exponen a través de un caso de estudio de dimensiones reales de una CS con centros de procesamiento de biomasa localizados en el NOA, con distribución a todo el país, considerando varios escenarios diferentes de producción de bioproductos. Es importante destacar la utilidad de estos enfoques, que constituyen procedimientos sistemáticos, para resolver problemas complejos de planificación estratégica de CS en las que intervienen numerosas materias primas, múltiples productos y una variedad de criterios de optimización a menudo contrapuestos. Los resultados obtenidos dan una idea clara de la información que podrían obtener quienes estén encargados de tomar decisiones de alto nivel sobre las cadenas de valor, tanto del sector privado como público. Asimismo, debe remarcarse la importancia que este enfoque le otorga al cálculo de indicadores que aseguran soluciones del problema más sustentables, lo cual constituye una tendencia mundial cada vez más acentuada a la hora de planificar la producción. Las proyecciones de trabajo futuro incluyen agregar nuevos indicadores, realizar análisis de supereficiencia en los puntos eficientes y sistematizar la propuesta de mejoras en los escenarios ineficientes.

Nomenclatura

Índices

c = capacidades
 e = categorías de impacto
 g = regiones
 i = materiales
 k = tecnologías
 l = modos de transporte
 t = periodos de tiempo

Conjuntos

$GH(g)$ = regiones productoras de materias primas

$GB(g)$ = regiones en las que se pueden instalar biorrefinerías
 $GS(g)$ = regiones en las que se pueden instalar almacenes
 $GD(g)$ = regiones en las que existe demanda de productos
 $IL(i, l)$ = conjunto de pares ordenados que vinculan materiales i con su modo de transporte l
 $IR(i)$ = materiales que actúan como materias primas
 $II(i)$ = materiales que actúan como productos intermedios (producidos y consumidos en la biorrefinería)
 $IM(i)$ = materiales que actúan como productos finales
 $K^-(k, i)$ = conjunto de pares ordenados que vinculan tecnologías k con los materiales i que consumen
 $K^+(k, i)$ = conjunto de pares ordenados que vinculan tecnologías k con los materiales i que producen

Referencias

1. Global Risks Report 2022. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2022>, consultado 2023/04/21
2. The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations. <https://sdgs.un.org/es/goals>, consultado 2023/04/23
3. Cherubini, F.: The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*. 51(7) (2010) 1412-1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
4. Ekşioğlu, S. D., Acharya, A., Leightley, L. E., Arora, S.: Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Comp. Ind. Eng.* 57(4) (2009) 1342-1352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.07.003>
5. Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., Khanchi, A.: Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 24 (2013) 608-627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.049>
6. Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., Péton, O.: Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*. 54 (2015) 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>
7. Machin Ferrero, L. M., Mele, F. D.: Optimal design of sugar-cane-based biorefinery networks in Argentina. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 10 (2022), 7916-7928. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00921>
8. ISO 14040. Environmental Management—Life Cycle Assessment Principles and Framework. International Organization for Standardization, Ginebra (2006).
9. Meyer, R., Campanella, S., Corsano, G., Montagna, J. M.: Optimal design of a forest supply chain in Argentina considering economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*. 231 (2019) 224-239. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.090>
10. Wheeler, J., Páez, M. A., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F.D.: Combining multi-attribute decision-making methods with multi-objective optimization in the design of biomass supply chains. *Comp. Chem. Eng.* 113 (2018) 11-31. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.02.010>
11. Cooper, W.W., Seiford, L.M., Zhu J.: *Handbook on Data Envelopment Analysis*. 2nd ed., 164. Nueva York, NY 10013, EE.UU.: Springer US, (2011)
12. Tone, K.: A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*. 130 (2001) 498-509. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00407-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00407-5)

13. Cabrera-Jiménez, R. Mateo-Sanz, J. M., Gavaldà, J., Jiménez, L., Pozo, C.: Comparing bio-fuels through the lens of sustainability: A data envelopment analysis approach. *Applied Energy*. 307 (2022) 118201. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118201>
14. Informe de Cadenas de Valor: Azúcar 2018. Ministerio de Hacienda. <https://www.economia.gob.ar>, consultado 2023/04/21.
15. Informe de Cadenas de Valor: Limón 2018. Ministerio de Hacienda. <https://www.economia.gob.ar>, consultado 2023/04/21.
16. Díaz, G. F.: Evaluación de una planta de gasificación de biomasa residual del cultivo del limón para el abastecimiento energético de una citrícola de Tucumán. Tesis de Maestría (2016)
17. Machin Ferrero, L. M., Wheeler, J., Mele, F. D.: Life cycle assessment of the Argentine lemon and its derivatives in a circular economy context. *Sustainable Production and Consumption*. 29 (2022) 672-684. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.014>
18. Pourbafrani, M., McKechnie J., MacLean, H. L., Saville, B. A.: Life cycle greenhouse gas impacts of ethanol, biomethane and limonene production from citrus waste. *Environmental Research Letters*. 8 (2013) 015007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015007>
19. Mele, F. D., Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G.; Jiménez, L.: Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 50 (2011) 4939-4958. <https://doi.org/10.1021/ie101400g>
20. INDEC, Argentina. Consultas del Comercio Exterior de Bienes. <https://comex.indec.gob.ar>, consultado 2023/04/28
21. Amores, M. J., Mele, F. D., Jiménez, L., Castells, F.: Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 18 (2013) 1344-1357. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0584-2>
22. Nishihara Hun, A. L., Mele, F. D., Pérez, G. A.: A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 22 (2017) 502-515. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1047-3>
23. Machin Ferrero, L. M., Araujo, P. Z., Nishihara Hun, A. L., Valdeón, D. H., Mele, F. D.: Water footprint assessment of lemon and its derivatives in Argentina: a case study in the province of Tucumán. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 26 (2021), 1505-1519. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-021-01939-5>
24. Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B. *et al.*: The Ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 21 (2016) 1218-1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
25. Turton, R., Shaeiwitz, J. A., Bhattacharyya, D.; Whiting, W. B. Analysis, synthesis, and design of chemical processes. 5th ed., Pearson Education (2018)
26. INDEC. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Argentina. <https://www.indec.gob.ar>, consultado 2023/04/24