

Optimización de la cadena de suministros de bioetanol explorando opciones de mezcla para mejorar la sustentabilidad

Jonathan Wheeler^{1,2}, Lucas M. Machín Ferrero^{1,2} y Fernando D. Mele^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. Av. Independencia 1800, T4002 S. M. de Tucumán, Tucumán, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CCT CONICET NOA Sur, Crisóstomo Álvarez 722, T4000 S. M. de Tucumán, Tucumán, Argentina.
jwheeler@herrera.unt.edu.ar

Resumen. El uso de combustibles líquidos renovables se encuentra en continuo crecimiento dada la necesidad de una transición energética que garantice el desarrollo sostenible. En el presente trabajo se busca realizar el rediseño de la cadena de suministros de etanol de caña de azúcar en la Argentina, considerando la posibilidad de utilizar un corte de combustible distinto en cada provincia para el transporte de pasajeros. De esta forma, poder establecer una política tanto para la conformación de las mezclas como para el uso de combustibles y así garantizar un mejor desempeño ambiental. Para ello se desarrolla una formulación lineal mixta entera para modelar la cadena de valor del bioetanol, desde el campo hasta su uso en el vehículo, en la cual se busca minimizar el impacto ambiental asociado al cambio climático. Los resultados revelan que flexibilizar el contenido de etanol en los combustibles en cada provincia, permitiendo una variación entre el 0% y el 25%, puede mejorar el desempeño ambiental de la cadena de valor. Además, haciendo un cambio tecnológico en el parque automotor para utilizar naftas al 85% de etanol, se podría mejorar aún más sin implicancias económicas significativas sobre la cadena de producción.

1 Introducción

La necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para alcanzar un balance neto de cero emisiones para el año 2050, un mandato articulado por las Naciones Unidas [1], subraya la necesidad de revisar y enmendar los procesos de producción vigentes. En 2014, se afirmó que, para limitar el aumento de la temperatura a menos de 2°C por encima de los niveles preindustriales, las emisiones acumuladas deben ser limitadas a 1200 Gt para el año 2100 [2]. En 2022, las emisiones acumuladas equivalentes de CO₂ aumentaron a 57,4 Gt por año [3], marcando una proyección para los próximos 20 años donde se alcanzaría el presupuesto de carbono pactado para 2050. El 90% de estas emisiones se atribuyen a la utilización de combustibles fósiles para movilidad, calor y energía [4]. Si bien un esfuerzo global colaborativo que involucre a empresas, gobiernos y la población es necesario para abordar los objetivos de emisiones, es crucial priorizar e intensificar los esfuerzos en estas áreas para acelerar las soluciones a mediano-corto plazo.

En la búsqueda de cero emisiones, un papel crucial será desempeñado por la adopción de fuentes de energía renovables. La producción y el uso de biocombustibles, como el etanol de caña de azúcar, representan una estrategia crucial para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir la dependencia de los combustibles fósiles en el sector del transporte. En la Argentina, la industria de la caña de azúcar ha cobrado un papel relevante al aportar el 50% del bioetanol que se utiliza para las mezclas de combustibles (naftas). Además, existe un fuerte interés del sector en incrementar los niveles de producción dada la continua disminución del consumo de azúcar y las bondades del bioetanol para la reducción de emisiones de carbono.

Si bien el diseño de las cadenas de valor desde un enfoque integral puede traer mayores beneficios al sector, incluir en la toma de decisiones posibles políticas para un mejor uso de los combustibles, podría traer aparejados mayores beneficios ambientales. Un aspecto clave para la planificación del sector sería la flexibilización de los porcentajes de mezcla de etanol en los combustibles, lo que permitiría mejorar los costos logísticos y adaptar el uso de combustibles a las características productivas regionales. La adaptación de políticas flexibles de mezcla de etanol podría además ofrecer ventajas significativas en términos de reducción de emisiones y sostenibilidad ambiental al reducir el traslado de los combustibles, propiciando el consumo local, y adaptando el consumo a los aspectos de la producción de estos.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo realizar el rediseño de la cadena de suministros (CS) actual del etanol de caña de azúcar en la Argentina, teniendo en cuenta posibles estrategias para el uso de este en la conformación de los combustibles para el transporte de pasajeros. Para ello, se considera la posibilidad de que cada provincia tenga su propio corte de etanol en el combustible disponible para el transporte. Para cuantificar el beneficio de las posibles alternativas, se emplean metodologías de evaluación ambiental asociadas al ciclo de vida del producto, con un enfoque que abarca desde la etapa agrícola hasta el uso en los vehículos para el transporte de pasajeros.

En este trabajo se presenta una estrategia de optimización para el rediseño de la cadena de suministro de bioetanol con criterios de sustentabilidad que incorpora nuevas opciones para la mezcla con etanol en los combustibles. Específicamente, se busca diseñar la cadena de suministro de etanol, partiendo de su estado actual, teniendo en cuenta la posibilidad de variar el corte de combustible en cada provincia de la Argentina, a diferencia de la política actual de establecer un único corte para todo el territorio. Esto implicaría, modificar el esquema productivo, instalar nuevas plantas de procesamiento, almacenes y establecer nuevas unidades para el transporte del producto, para la producción, almacenamiento y distribución del producto. Para ello se establece un modelo lineal mixto entero (MILP) que tiene como objetivo minimizar el impacto ambiental, medido en términos de límites planetarios (PB) [5] utilizando una metodología de análisis de ciclo de vida (LCA) [6], dándole mayor peso a los resultados obtenidos en los impactos referidos a cambio climático que son altamente influenciadas por el sector de transporte.

2 Metodología propuesta

Para obtener el rediseño de la CS de bioetanol teniendo en cuenta la posibilidad de utilizar diferentes cortes de combustibles en cada región como estrategia para mejorar la sustentabilidad en el transporte de pasajeros, se propone la siguiente metodología: (P1) se estiman los rendimientos y propiedades de los combustibles a tener en cuenta como opciones a utilizar, (P2) se estima el impacto ambiental para cada etapa de la cadena utilizando la metodología PB-LCA aplicada a CS [7], (P3) se establece un MILP que minimiza el impacto ambiental para satisfacer una demanda de transporte de pasajeros (Fig.1)



Fig. 1. Metodología para el cálculo de impacto, modelado y optimización de la CS.

La CS considerada incluye las instalaciones para la obtención de materia prima, los productos derivados de la caña de azúcar y almacenes. Además, se conoce la demanda de transporte de pasajeros para cada región considerada. El resultado del P3 incluye la decisión sobre qué corte de etanol en combustible utilizar en cada región y las decisiones asociadas al número y tipo de instalaciones necesarias para la producción de etanol y la logística para la distribución. También se obtienen los costos de la CS y la distribución del impacto ambiental del sistema resultante por etapa.

2.1 Paso 1: Obtención de datos para el transporte de pasajeros mediante el uso de combustibles de diferentes cortes de etanol

El transporte de pasajeros se realiza a partir de diferentes tipos de vehículos, con diferentes consumos asociados. Para cada tipo de corte de combustible considerado como opción para la resolución del problema, se deben conocer sus propiedades físicas, rendimiento promedio en combustión y emisiones de gases. Para ello se utiliza el programa GREET® [8] que permite formular distintos tipos de cortes de etanol y nafta y calcular tanto las propiedades como las emisiones del uso del vehículo de pasajeros. Este paso reviste gran importancia, dado que el mayor impacto ambiental asociado al cambio climático se encuentra en la etapa de transporte [7].

2.2 Paso 2: Evaluación de impacto ambiental mediante límites planetarios

Los PB consideran un conjunto de procesos de los sistemas terrestres que son claves para mantener al planeta dentro de una ventana operativa segura (*Safe Operating Space*)

– SOS). Si bien existen actualmente 13 límites planetarios definidos a nivel local y regional, los que han recibido mayor atención y se han estimado con mayor certeza, son los referidos al cambio climático, particularmente los referidos al desequilibrio energético y la concentración de CO₂ atmosférico [5]. El valor absoluto de estos límites para las actividades terrestres se encuentra todavía en discusión, pero existe un acuerdo general sobre la relevancia global de estos procesos. Al aplicarlos sobre sistemas de producción, estos indicadores nos pueden dar una idea sobre la sustentabilidad absoluta de una actividad, a diferencia de otros indicadores que sirven de forma comparativa. La evaluación ambiental propuesta sigue la metodología de LCA y comprende sus primeras tres fases: definición del objetivo y alcance, análisis de inventarios y evaluación de impacto [9]. Para el cálculo de impacto ambiental, se evalúa cada una de las etapas de la CS desde el campo hasta el uso del vehículo.

En la primera fase de la evaluación de impacto se debe definir la unidad funcional (FU) y qué categoría de PB utilizar. Los resultados para los PB se expresan en flujos anuales por lo que el horizonte de tiempo de la actividad considerada debe ser anual. Una vez definidos los PB a utilizar es necesario determinar qué parte de ese límite global le corresponde a la CS a estudiar. Los PB representan una especie de presupuesto ambiental que no se debe exceder para respetar los límites terrestres. Entonces, para determinar esta cuota correspondiente a una actividad o producto, es necesario aplicar un principio de asignación para reducir la escala y poder fijar el límite a una actividad específica. Para ello, se pueden utilizar distintos principios de reducción de escala [7]. Para este trabajo se propone utilizar un principio igualitario que refleja la preferencia de los consumidores sobre la actividad analizada. El principio denominado “utilitario” calcula esta fracción (aS) que le corresponde a la unidad funcional elegida, basada en el gasto final de consumo (GFC_{FU}) en la FU respecto al gasto final de consumo a nivel mundial (GFC_{mundo}) (Ec. 1).

$$aS = \frac{GFC_{FU}}{GFC_{mundo}} \quad (1)$$

Se puede asumir la misma fracción para los PB seleccionados, aunque podría pensarse también en una distinta para cada impacto. Una vez obtenida esta fracción, se puede calcular la cuota ambiental para el PB (b) que le corresponde a la FU ($SoSOS_b$) a partir de conocer el valor global (SOS_b) (Ec. 2)

$$SoSOS_b = aS_b SOS_b \quad \forall b \quad (2)$$

A partir del valor de la cuota, se puede calcular mediante la Ec. 3 el indicador de sustentabilidad para la FU. Este se calcula mediante el cociente entre el valor de impacto medido para la FU de la cadena de suministros (IPB_b) y la cuota $SoSOS_b$.

$$FSoSOS_b = \frac{IPB_b}{SoSOS_b} \quad \forall b \quad (3)$$

Como se discutirá en la subsección siguiente, en lugar de utilizar estos indicadores de impacto para la optimización, se procederá a optimizar la transgresión de los límites establecidos, dado que para cada límite planetarios existen dos zonas de transgresión: una zona de incertidumbre o moderada donde no se desconoce si la tierra podrá

adaptarse o no y otra de mayor riesgo que representa los valores para los cuáles se conoce que la tierra se pone en riesgo.

2.3 Paso 3: Optimización de la CS

Se considera un problema típico de diseño de CS basado en la industria de la caña de azúcar y etanol, y se añade la etapa de uso de combustible como se muestra en la Fig. 2. Particularmente se usa como base un modelo MILP presentado en trabajos anteriores [10] para la cadena de valor de la industria sucro-alcoholera en la Argentina.

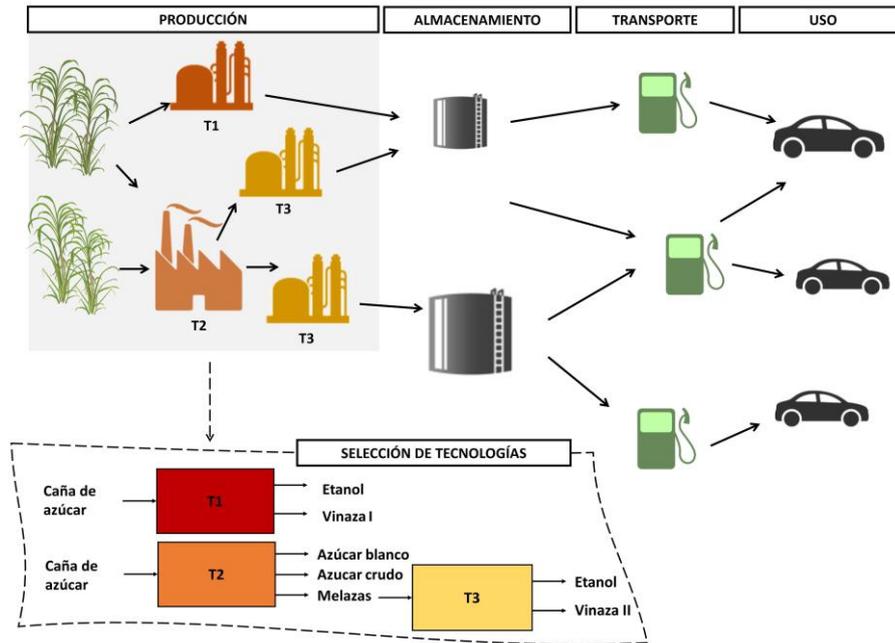


Fig. 2. Etapas de la cadena de suministros y tecnologías consideradas para la producción de etanol y azúcar

En este modelo se incorpora en la etapa de uso del combustible en los vehículos para el transporte para darle el enfoque ambiental denominado “de la cuna a la rueda”, el más propicio para cuantificar el impacto ambiental para el transporte. En este modelo se considera la posibilidad de utilizar un corte diferente de etanol en cada región, como estrategia para disminuir el impacto ambiental, lo que constituye la hipótesis de este trabajo. En particular, se analiza un conjunto de mezclas discretas que resultan de interés para el sector. Cada mezcla combustible m considerada, tiene un contenido de etanol (BLD_m) y un rendimiento (PFM_m) medido como kilómetros transportados por kilogramo de combustible. Conocida la cantidad de kilómetros transportados por vehículos de pasajeros en cada región g en un año t (DKM_{gt}), se puede calcular la cantidad de combustible demandado en una región ($FUEL_{gmt}$) de acuerdo con la Ec. 4.

$$FUEL_{gmt} PFM_m = SFX_{gmt} DKM_{gt} \quad \forall g, m, t \tag{4}$$

donde SFX_{gmt} es una variable binaria que vale uno si el tipo de combustible m fue elegido para la región g y cero si no. Basándonos en las regulaciones actuales, para cada región se puede establecer un solo tipo de combustible (Ec. 5).

$$\sum_m SFX_{gmt} = 1 \quad \forall g, t \quad (5)$$

Por último, la cantidad de etanol necesaria en cada región (DTS_{igt}) se puede calcular a partir de la cantidad de combustible necesario y el contenido de etanol de cada mezcla (Ecuación 6), mientras que la cantidad de nafta (DTG_{gt}) se la obtiene de la diferencia entre la cantidad de combustible y etanol necesarios (Ecuación 7)

$$DTS_{igt} = \sum_m FUEL_{gmt} BLD_m \quad i = ethanol \quad \forall g, t \quad (6)$$

$$DTG_{gt} = \sum_m FUEL_{gmt} - DTS_{igt} \quad i = ethanol \quad \forall g, t \quad (7)$$

Como se mencionó anteriormente, la función objetivo para medir el desempeño ambiental conviene establecerla en base a la transgresión respecto del PB establecido para la FU, para saber si un proceso es sustentable o no y para poder ponderar si una transgresión se está dando en la zona de incertidumbre o en una zona de riesgo para ese PB.

El impacto total IPB_b para un PB surge de la sumatoria de los impactos de todas las etapas de la FU (Ec.8): agricultura ($VPBPU_b$), producción ($VPBPE_b$), transporte de productos ($VPBQ_b$), impacto de la cadena de la gasolina ($VPBG_b$) y uso del combustible para transporte de pasajeros ($VPBU_b$).

$$IPB_b = VPBPU_b + VPBPE_b + VPBQ_b + VPBG_b + VPBU_b \quad \forall b \quad (8)$$

Cada uno de estos impactos es cuantificado multiplicando las emisiones de cada etapa ($LCIE_{jb}$) por un factor correspondiente al PB ($PBCF_{jb}$). En la Ec. 9 se muestra el esquema de cálculo para una de ellas, siendo extensivo el mismo para las otras etapas consideradas.

$$VPBPU_t = \sum_j LCI_{jbt}^{PU} PBCF_{jb} \quad (9)$$

Los factores de caracterización fueron estudiados y establecidos en trabajos anteriores y se encuentran en constante revisión y actualización [6].

El modelo de optimización busca minimizar la transgresión total a los PB ($TPBT$), penalizando el nivel de transgresión cuando este valor excede a uno, y permitiendo soluciones que puedan ir en detrimento de un PB sin exceder el límite establecido (Ec. 10).

$$f_{AMB} = TPBT = w^Y \sum_b \frac{SL_b^Y}{SoSOS_b^Y} + w^R \sum_b \frac{SL_b^R}{SoSOS_b^R} \quad (10)$$

$TPBT$ cuantifica la magnitud total de las transgresiones de un PB a través de las variables de holgura SL_b^Y y SL_b^R que representan las transgresiones para un PB en la zona

de incertidumbre y la zona de riesgo-respectivamente. Además, se añaden factores de ponderación para las transgresiones en una zona o la otra de forma tal de asignar mayor relevancia a la transgresión a la zona de riesgo (w^R) frente a la zona de incertidumbre (w^Y). Si una solución transgrede el límite asignado para la FU, las variables de holgura deben activarse de acuerdo con las siguientes restricciones (Ec. 11, 12 y 13):

$$SL_b^Y, SL_b^R \geq 0 \quad \forall b \quad (11)$$

$$IPB_b \leq SoSOS_b^Y + SL_b^Y + SL_b^R \quad \forall b \quad (12)$$

$$IPB_b \leq SoSOS_b^R + SL_b^R \quad \forall b \quad (13)$$

donde $SoSOS^Y$ es el PB establecido para la zona segura, y $SoSOS^R$ el límite de la zona de incertidumbre, que inicia la zona de riesgo para cada PB. Si un PB no ha sido excedido, entonces las variables de holgura valdrán cero.

Para cuantificar el desempeño económico del rediseño de la CS se calculan los costos asociados a todo el funcionamiento de esta, expresados como los costos totales actualizados (NPC) (Ec. 14).

$$NPC = \sum_t \frac{CF_t}{(1 + ir)^{t-1}} \quad (14)$$

donde ir es la tasa de interés y CF_t los costos totales de la CS para el año de funcionamiento t . Estos costos se calculan a partir de los costos operativos (FOC_t), los de transporte (TOC_t), los de la cadena de la gasolina ($GCOST_t$), calculados a partir del valor de la gasolina mayorista para cada región, y los de inversión, cuantificados como la fracción depreciable de las inversiones realizadas para la cadena ($FTDC_t$) (Ec. 15).

$$CF_t = TOC_t + FOC_t + GCOST_t + FTDC_t \quad (15)$$

La forma de cálculo de cada uno de estos costos se encuentra expresada en trabajos anteriores, como así también las restricciones de balances de materia, demanda de productos y otras que representan el comportamiento de las etapas de la CS [7].

Formalmente el problema de rediseño de la CS de etanol de caña de azúcar se puede establecer de la siguiente forma: dados los costos de cultivo, producción, almacenamiento, el pronóstico de demanda para el transporte de pasajeros y los coproductos del etanol, las tasas de impuestos, las capacidades instaladas de cada tecnología, la capacidad máxima de producción de materia prima, las penalidades económicas para disposición de residuos (vinazas), el objetivo es determinar el corte de etanol que debe utilizar cada provincia conjuntamente con el número y tipo de nuevas instalaciones necesarias para la producción y almacenamiento de etanol y las decisiones de planeamiento logístico asociadas con el objeto de minimizar el impacto ambiental de toda la actividad. La toma de decisiones incluye el porcentaje de etanol en el combustible en cada región, el número, tipo y capacidad de nuevas plantas productivas, y la determinación de los caudales de materia prima, productos terminados y desechos dentro de la CS, para un determinado escenario productivo.

3 Caso de estudio

Se busca rediseñar la CS para el etanol de caña de azúcar que se utiliza en el corte de combustibles para los vehículos nafteros en la Argentina, de forma de mejorar el desempeño ambiental de la misma. El corte de etanol en los combustibles actualmente es del 12% v/v debido a la legislación vigente. Para el funcionamiento de la CS se considera la posibilidad de utilizar distintos cortes de etanol por región, pudiéndose ampliar la capacidad de producción si los límites técnicos y de disponibilidad de materia prima lo permiten, cumpliendo además con la demanda de los otros productos derivados de la caña de azúcar (azúcar refinado y crudo). Este planteo abre la posibilidad de generar diferentes estrategias para la producción y la logística de la cadena, que abarca la distribución y almacenaje del etanol producido en las diferentes regiones.

Se toman en cuenta las tecnologías actuales que procesan caña de azúcar y su capacidad instalada: producción de etanol mediante fermentación de jugo (T1), producción de azúcar refinada, crudo y melaza (T2) y producción de etanol a partir de melaza (T3) (Fig. 2). Además, la posibilidad de establecer almacenes de etanol en cada región y la de establecer nuevas unidades de transporte y estrategias de distribución del etanol terminado.

Se consideran tres escenarios para el diseño de la CS. En el primero (S1) se considera la posibilidad de que el corte de etanol pueda tomar valores de 0 (E0), 4 (E4), 8 (E8), 10 (E10), 12 (E12), 16 (E16), 20 (E20) y 25% (E25), porcentajes para los cuáles no hace falta una adaptación del parque automotor actual. En el segundo escenario (S2) se añade la posibilidad del corte al 85% (E85) con la necesidad de un cambio en el parque automotor, mientras que en el tercer escenario (S3) se añade la posibilidad de no cumplir con el 25% de la demanda de azúcar.

3.1 Paso 1: Información para la etapa de transporte de pasajeros

A partir del programa GREET® [8] se obtienen los datos para un tipo de vehículo promedio mediante el cual se realiza el transporte de pasajeros. Para este caso de estudio se selecciona un automóvil con motor de combustión interna con inyección directa, de materiales convencionales (SIDI ICEV), que puede utilizar hasta un corte de combustible del 25%, y también se obtienen los datos para un vehículo tipo “flex” (SIDI ICEV – Dedi. EtOH) para los escenarios que consideran un corte del 85%. Para cada tipo de combustible considerado en el problema, se obtienen los rendimientos del combustible y sus propiedades físicas (Tabla 1). Además, se obtienen las emisiones devenidas del uso del vehículo para el cálculo ambiental en la etapa de uso del combustible (Tabla 2).

Para calcular la cantidad total de kilómetros transportados en la Argentina, se utilizan los datos de consumo anual de combustibles tipo nafta y se lo multiplica por la eficiencia del combustible E12 (utilizado actualmente). La distancia total transportada es de 143.000 millones de kilómetros, de los cuales, el 50% corresponde al combustible E12 formulado con etanol de caña de azúcar, el resto a bioetanol de maíz [11].

Tabla 1. Propiedades de los combustibles con distintos cortes de etanol

Combustible	Fracción de etanol (v/v)	Rendimiento (hkm/tn)	Fracción de etanol (m/m)	Densidad (tn/m ³)
E4	4	200,96	0,0427	0,7398
E8	8	198,33	0,0853	0,73955
E10	10	196,94	0,1067	0,7396
E12	12	195,32	0,1279	0,7405
E16	16	190,18	0,1683	0,75
E20	20	186,44	0,2093	0,7541
E25	25	181,93	0,2599	0,759
E85	85	186,28	0,8576	0,782
Gasolina	0	203,67	0	0,74

Tabla 2. Emisiones para el uso del vehículo con diferentes combustibles. VOC: compuestos orgánicos volátiles; CO: monóxido de carbono; NO_x: óxidos de nitrógeno; CH₄: metano; CO₂: dióxido de carbono; N₂O: dióxido de nitrógeno; VOC_evap: compuestos volátiles orgánicos evaporados.

Combustible	Emisiones (kg/hkm)						
	VOC	CO	NO _x	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	VOC_evap
E4	4,3x10 ⁻³	0,17	5,10x10 ⁻³	9,10x10 ⁻⁴	17,43	2,43x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻²
E8	4,3x10 ⁻³	0,17	5,10x10 ⁻³	9,10x10 ⁻⁴	16,60	2,43x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻²
E10	4,3x10 ⁻³	0,17	5,10x10 ⁻³	9,10x10 ⁻⁴	16,34	2,43x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻²
E12	4,3x10 ⁻³	0,17	5,10x10 ⁻³	9,10x10 ⁻⁴	16,11	2,43x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻²
E16	4,3x10 ⁻³	0,17	5,10x10 ⁻³	9,10x10 ⁻⁴	15,61	2,43x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻²
E20	4,3x10 ⁻³	0,17	5,10x10 ⁻³	9,10x10 ⁻⁴	15,09	2,43x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻²
E25	4,3x10 ⁻³	0,17	5,10x10 ⁻³	9,10x10 ⁻⁴	14,45	2,43x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻²
Gasolina	4,3x10 ⁻³	0,17	5,10x10 ⁻³	9,10x10 ⁻⁴	17,52	2,43x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻²

3.2 Paso 2: Evaluación de impacto ambiental utilizando PB

Como los PB están definidos en términos de flujos anuales, para facilitar la comprensión e interpretación de los resultados, la FU utilizada en este trabajo se define de la siguiente forma: “la demanda anual de transporte de pasajeros en la Argentina, realizada con vehículos convencionales que utilizan nafta o mezclas con etanol de caña”. Es decir que la FU depende de la actividad completa de la CS durante un año de funcionamiento. Además, esta definición permitirá obtener valores más precisos para el cálculo de las cuotas ambientales (Ec. 1 y 2).

Para la tecnología T2, que involucran más de un producto, se aplica un criterio de asignación de carga ambiental por masa de azúcar entre productos. La melaza que sirve para producir etanol le corresponde el 17,06% de la carga ambiental de la T2. Las vinazas provenientes de la actividad alcohólica (T1 y T3), se toman como residuos a los cuales no se les asigna una carga ambiental, pero si existe una penalidad económica para su deposición.

Para el cálculo de las cuotas ambientales, se utiliza la Ec. 1. El gasto total en transporte en la Argentina (GFC_{FU}) es de US\$ 24000 millones mientras que el gasto mundial en este rubro es de US\$ 43900 billones, por lo que la fracción que le corresponde a la FU es de $2,39 \times 10^{-7}\%$.

Siguiendo lo enunciado en la bibliografía, la percepción social y los esfuerzos actuales de los gobiernos para revertir la situación climática, se le asigna una mayor ponderación a la transgresión de la zona de riesgo frente a la zona de incertidumbre, siendo los factores de ponderación de la función objetivo ambiental ($TPBT$) 0,8 para la primera (W^R) y 0,2 para la segunda (W^I) (Ec. 10).

Los inventarios ambientales para las actividades de la CS se obtienen de un trabajo anterior [7], actualizados a los valores actuales de la actividad productiva.

3.3 Paso 3: optimización de la CS

Como se mencionó anteriormente, para este trabajo se modifica un MILP presentado anteriormente [10] y se actualizan todos los valores de producción de la CS para el año 2023. Para los costos de la cadena de la gasolina, que también debe ser distribuida a una región para la conformación del combustible, se considera el valor mayorista para la gasolina en cada región, restado del margen de ganancia para los actores de la cadena. Para obtener el costo de capital y el capital depreciable, se toma 20 años de vida útil.

En el modelo presentado se incluyen las ecuaciones para la selección del tipo de combustible en cada región y las correspondientes cantidades de etanol y gasolina a enviar a cada región (Ecuaciones 4 a 7), sumadas a las del cálculo de impacto ambiental para cuantificar los límites planetarios (Ecuaciones 8 a 13). Para mayor detalle sobre el modelo base, las asunciones y fuentes de datos, consultar un trabajo anterior [10].

Si bien la formulación es multiperiodo, el problema se resuelve para un horizonte de tiempo de un año para obtener los valores acordes a la metodología de PB.

El modelo MILP resultante posee 8211 ecuaciones, 9362 variables continuas y 1992 variables discretas. Para simplicidad en la interpretación y presentación de resultados, el problema se resuelve para un horizonte de tiempo de un año que representaría la planificación estratégica del sector para el año siguiente al considerado para el cual ya se podrían implementar las políticas y realizar las obras necesarias. El modelo se implementó en GAMS® versión 24.0.2 y se utilizó CPLEX 11.0 para encontrar las soluciones a los escenarios planteados. Se utilizó un ordenador con procesador Intel i5® y 16Gb de RAM.

3.4 Resultados

El modelo se resuelve para los tres escenarios propuestos abarcando tiempos de cómputo de 3 a 5 minutos. En la Fig. 3 se muestran los resultados obtenidos para el indicador ambiental de cambio climático normalizado, referido a la concentración de CO_2 atmosférico y desglosado por etapa de la cadena. El valor 1 corresponde a la suma de las transgresiones en todos los PB ($TPBT$). Además, se muestra el indicador económico (NPC), desglosado por tipo de costo. Las soluciones obtenidas se muestran para los escenarios considerados y para el funcionamiento de la CS actual (*business as usual* - BAU).

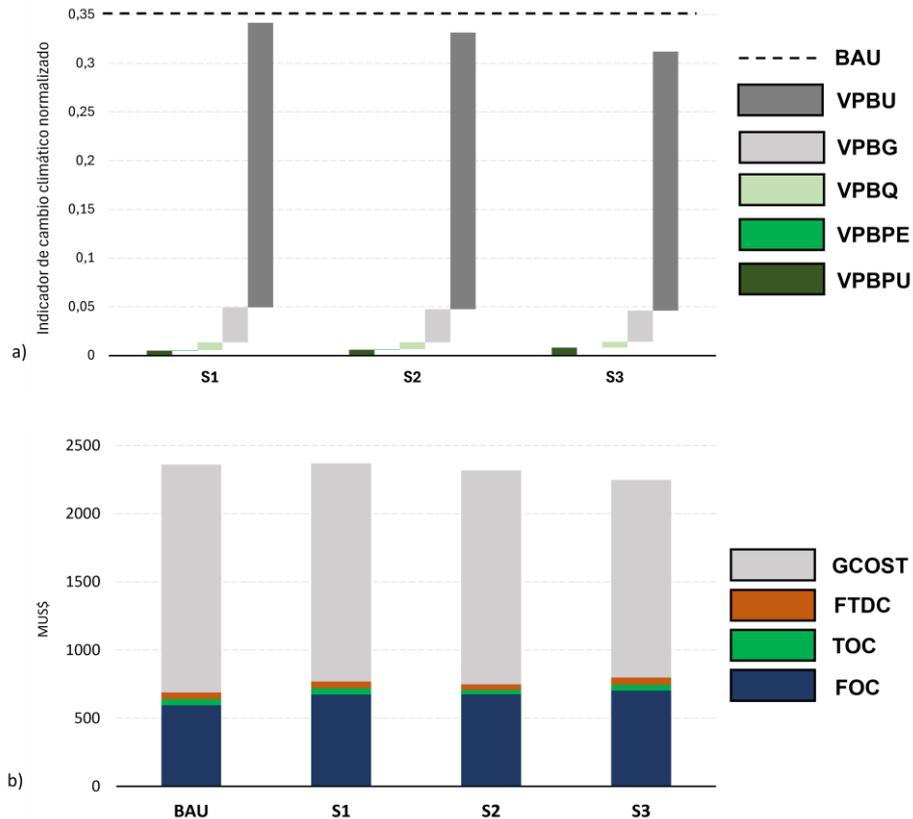


Figura 3. a) Resultados ambientales normalizados descompuestos por etapa de la cadena de suministro y línea de base ambiental para el estado actual de la cadena (BAU). VPBPU: agricultura; VPBPE: producción; VPBQ: transporte; VPBG: cadena de la gasolina; VPBU: uso del combustible en vehículo para los escenarios propuestos. b) Resultados económicos descompuestos por tipo de costo para cada escenario y para el BAU. FOC: costos de operación; TOC: transporte; FTDC: inversión; GCOTS: costo de la nafta.

Para los tres escenarios considerados se puede observar una mejora en el desempeño ambiental, principalmente proveniente de la etapa de uso (*VPBU*), aunque con mejoras significativas en las etapas de transporte y de proceso, incluso para el S3, la etapa de proceso no aporta para el impacto ambiental debido a compensaciones por el uso de la T1 en lugar de la secuencia T2-T3. En términos económicos, existe una relación de compromiso entre el S1 y el BAU, dado que, para implementar esta política que mejora el desempeño ambiental se incurre en un incremento de costos. En cambio, para los escenarios S2 y S3 se observan menores costos para la CS al mismo tiempo que se produce una mejora ambiental para el indicador seleccionado, lo cual indicaría que serían los mejores escenarios para implementar como política para el cambio de uso de combustibles líquidos desde el punto de vista económico. Sin embargo, esto implicaría un recambio en la flota de vehículos en las regiones para las cuales se adopte el E85,, costos que no han sido considerados en este análisis. Además, sería necesario realizar un análisis con otros indicadores ambientales para identificar posibles situaciones de

compromiso. En la Fig. 4 se muestra una gráfica que permite visualizar las relaciones entre los resultados obtenidos y la complejidad en la comparación de los escenarios bajo estudio.

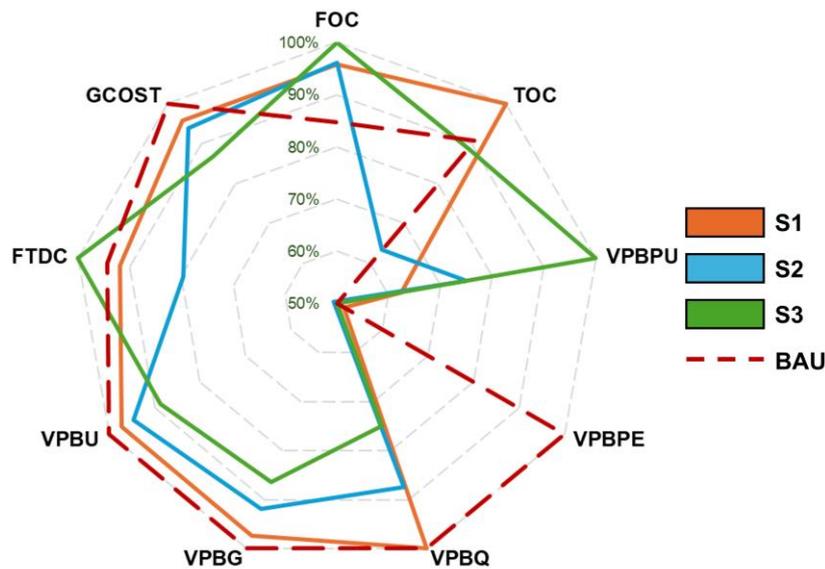


Figura 4. Resultados ambientales y económicos desglosados por etapa de la CS y por tipo de costo. VPBPU: agricultura; VPBPE: producción; VPBQ: transporte; VPBG: cadena de la gasolina; VPBU: uso del combustible en vehículo; FOC: costos de operación; TOC: transporte; FTDC: inversión; GCOTS: costo de la nafta.

Se puede observar que para los escenarios S2 o S3, si bien aumentan los costos operativos por el cambio tecnológico asociado a la T1 y los costos de materia prima aumentan para aumentar la producción de etanol, los costos de transporte y de la CS de la gasolina disminuyen, produciendo una baja en los costos totales. Para el S1, se observa que la relación de compromiso mencionada anteriormente respecto al BAU, se da por el aumento de los costos de transporte y de producción.

En la Fig. 5 se puede observar la selección de combustible en cada región y las inversiones a realizar, en términos del número y tipo de plantas instaladas, para poder cumplir con la producción en los escenarios considerados. Con escala de color de gris oscuro (mayor proporción de nafta) a verde oscuro (mayor etanol) se puede observar cómo quedaría el mapa para la conformación de las mezclas combustibles en la Argentina.

Para todos los escenarios se puede observar un aumento del corte de combustible, hasta el máximo posible, en las mayores zonas productoras de materia prima (G13, G16 y G17), y en regiones aledañas, lo que resulta coherente con la disminución de costos de transporte a pesar de transportar mayor caudal de etanol. Además, se observa que en las zonas alejadas de los centros productores se mantiene un corte mínimo (G10, G12 y G24). Para los tres escenarios se requieren ampliaciones de capacidad debido a la posibilidad de aumentar la producción de etanol respecto al BAU, sin embargo, en los

escenarios S1 y S2 opta por las tecnologías T2 y T3 principalmente, mientras que, para el S3 sólo utiliza la T1. Esto se explicaría por una disminución en la producción de azúcar refinado dada la disminución de la demanda al 75% respecto al BAU. Por cuestiones de espacio, el análisis se limita a estas conclusiones principales.

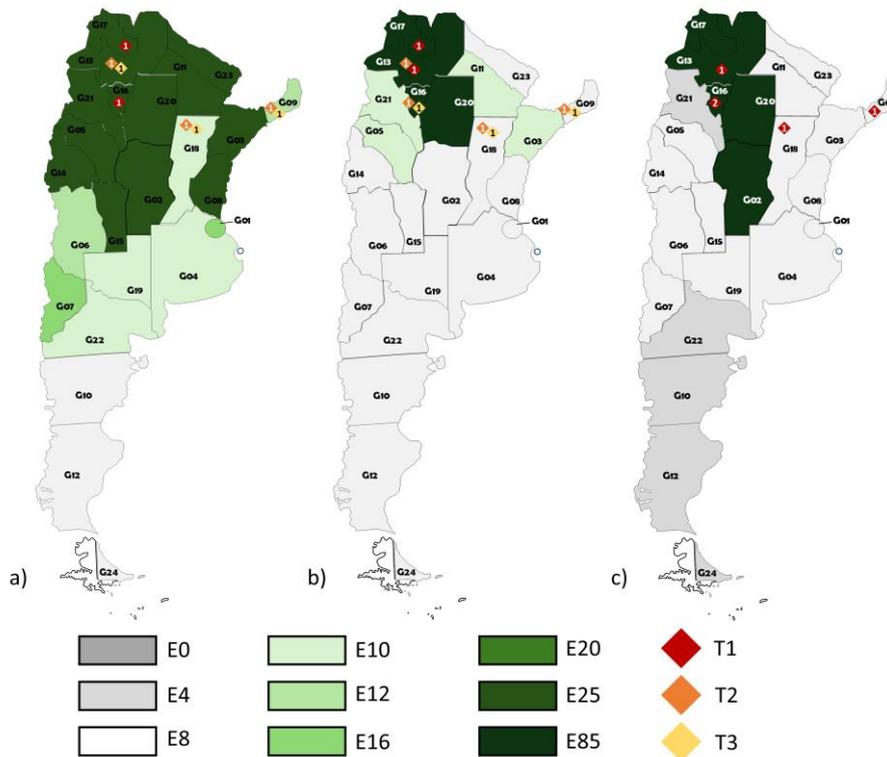


Figura 5. Selección de combustibles en cada región e inversiones a realizar en cada escenario. a) S1 rango de corte de etanol de 0 a 25%; b) S2 se incorpora E85 como opción; c) S3 se incorpora E85 y se establece un cumplimiento de demanda de azúcar del 75% solamente.

4 Conclusiones

En el presente trabajo se presenta un modelo para rediseñar la CS del etanol de caña de azúcar, permitiendo incorporar distintas opciones de mezcla etanol-nafta para los combustibles a utilizar en el transporte de pasajeros en cada provincia de la Argentina. La incorporación de una demanda de transporte en lugar de etanol permite realizar la selección, fijando las demandas regionales de etanol y, a partir de ellas, la estructura de la CS. El modelo busca minimizar una función objetivo basada en indicadores de impacto ambiental definidos en términos de PB, aplicando un enfoque de LCA, y calcula los costos de la CS para completar el análisis.

Los resultados muestran que fijar políticas para la mezcla de combustible diferenciada en cada región, podría traer beneficios ambientales para el transporte de pasajeros, tanto en la etapa de uso, como para las etapas de producción y transporte de la CS. Además, se observó que, para los escenarios propuestos, los costos de la CS aumentan levemente respecto al BAU, si el porcentaje de etanol se pudiese llevar hasta el 25%, y disminuyen si se habilita la posibilidad de utilizar al 85%.

Referencias

1. UN. Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions. Available: <https://reliefweb.int/report/world/synthesis-report-aggregate-effect-intended-nationally-determined-contributions> (2015)
2. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. (2014)
3. United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). Nairobi. (2023) <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>
4. Andrew, R. M., & Peters, G. P. The Global Carbon Project's fossil CO2 emissions dataset (2022v27) [Data set]. Zenodo (2022). Data and methodology can be found at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7215364>
5. Rockström J., Steffen W., Noone K., et al. A safe operating space for humanity. *Nature*. 2009;461:472-475. (2009)
6. Ryberg M. W., Owsianiak M, Richardson K, Hauschild M. Z. Development of a life-cycle impact assessment methodology linked to the planetary boundaries framework. *Ecol Indic*. 2018;88: 250-262. (2018)
7. Wheeler, J., Galán-Martín, Á., Mele, F. D., & Guillén-Gosálbez, G. Designing biomass supply chains within planetary boundaries. *AIChE Journal*, 67(4), e17131. (2021)
8. Wang, M., Elgowainy, A., Lee, U., Bafana, A., Banerjee, S., Benavides, P. T., ... & Zang, G. Summary of Expansions and Updates in GREET® 2021 (No. ANL/ESD-21/16). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States). (2021)
9. ISO 14040. Environmental Management—Life Cycle Assessment Principles and Framework. International Organization for Standardization, Ginebra (2006).
10. Wheeler J, Páez MA, Guillén-Gosálbez G, Mele FD. Combining multiattribute decision-making methods with multi-objective optimization in the design of biomass supply chains. *Comput Chem Eng*. 2018;113: 11-31. (2018)
11. Ministerio de Hacienda y Finanzas Públicas de la República Argentina. Informes de cadenas de valor. Azucarera. (2018)