

Estudio comparativo de diferentes mezclas nafta/etanol de caña de azúcar usando el enfoque de Ciclo de Vida

L. Patricia Garolera De Nucci*, Fernando D. Mele**, Andrea L. Nishihara Hun** y Gerónimo J. Cárdenas*

RESUMEN

Este estudio presenta una comparación, desde el punto de vista ambiental, entre nafta y mezclas nafta-etanol promovidas por la Ley Nacional 26.093 a nivel de uso. Se ha elegido el Análisis o Evaluación de Ciclo de Vida (LCA– Life Cycle Assessment) como herramienta adecuada para esta comparación. Con esto se contribuye en un área que actualmente está esperando mayor desarrollo mediante la incorporación de datos locales de producción. A partir de este análisis, surge que la percepción de sustentabilidad asociada a los biocombustibles frente a los combustibles fósiles no es absoluta, sino que dependerá en gran medida de las prácticas adoptadas para disminuir el impacto ambiental de la cadena de producción de biocombustibles.

Palabras clave: bioetanol, industria sucroalcoholera, impacto ambiental.

ABSTRACT

Comparison of different gasoline-sugarcane-based ethanol blends using a life cycle approach

This study presents a comparison of the environmental impacts of using gasoline and gasoline-ethanol blends as proposed by Argentina's National Act 26093. As a suitable tool, the methodology known as Life-Cycle Analysis or Life-Cycle Assessment (LCA) was chosen for this comparison. This is intended as a contribution to an area that needs further development, namely environmental impact studies based on local data. This analysis demonstrates that the perception of biofuels as being sustainable versus fossil fuels is not as absolute as it seems. Their sustainability strongly depends on the actions taken to mitigate the environmental impact of the biofuel production chain.

Key words: bioethanol, sugar-ethanol industry, environmental impact.

Artículo recibido: 15/09/15 y Aceptado: 10/11/17

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC pgarolera@eeaac.org.ar

** Facet, UNT, Tucumán, Argentina

INTRODUCCIÓN

Desde hace algún tiempo está consolidándose una conciencia creciente sobre la disminución de los recursos energéticos fósiles. La sustitución de estos por biocombustibles se considera una alternativa importante en la transición hacia una economía baja en carbono, pues del combustible usado para transporte, el 90% tiene origen en el petróleo.

Dada la volatilidad de los precios del petróleo, además de la inestabilidad geopolítica de los países que tienen las mayores reservas de este recurso, el uso de biocombustibles líquidos ha ido en aumento. Así, la seguridad energética es uno de los factores principales detrás de este aumento, especialmente en el sector del transporte (Cremonese *et al.*, 2015).

La Argentina sancionó en 2006 la Ley 26.093 que proporciona el marco para la inversión, producción y comercialización de biocombustibles. Implementada en 2010, esta ley establece un contenido mínimo de bioetanol de 5% en la nafta. Actualmente dicho porcentaje es del 12%. El objetivo principal es reducir las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (GEI), diversificar el suministro de energía y promover el desarrollo de economías regionales, especialmente en beneficio de los pequeños y medianos productores agrícolas. Uno de los biocombustibles líquidos apto para sustituir parcial o totalmente a la nafta es el bioetanol. Puede usarse hidratado (96° GL) directamente en los motores de explosión convencionales con algunas modificaciones, y deshidratado (anhidro) en mezclas con nafta, hasta un 27,5% en etanol en motores sin modificaciones. Ambas situaciones se presentan en la actualidad en Brasil, donde el 90% de los vehículos de ciclo Otto son de tecnología "flex": pueden operar mezclas nafta-etanol anhidro o bien con 100% de etanol hidratado (Mesquita, 2009). El uso del bioetanol en vehículos con motor Otto no es en modo alguno nuevo sino que fue propuesto por primera vez por Henry Ford en 1896 (Mele *et al.*, 2011), retomándose esta iniciativa en la década del 70 del pasado siglo debido a la crisis del petróleo. Actualmente, Brasil y EE.UU. son los principales productores de bioetanol en el mundo (OCDE/FAO, 2013).

En la Argentina, el etanol de caña de azúcar se obtiene como co-producto del azúcar y su mercado principal es el interno. Se produce en 16 destilerías —no todas deshidratan— anexas a ingenios azucareros ubicados en el noroeste del país, que utilizan mieles del proceso de fabricación de azúcar y, a veces, parte del jugo directo de la caña como materia prima. Todos estos ingenios producen a partir del bagazo electricidad para su propio consumo y algunos venden el excedente a la red eléctrica.

El modelo productivo de etanol se basa principalmente en un sistema de cultivo de caña de azúcar con uso extensivo de tierras agrícolas, moderada aplicación de fertilizantes y pesticidas, y escaso riego artificial. Los productores argentinos de bioetanol se enfrentan al reto de analizar más detenidamente el comportamiento ambiental de sus productos con el fin de cumplir con criterios de sustentabilidad (Farrell *et al.*, 2006). En relación a esto ya se han hecho ciertos avances. Por ejemplo, en el área agrícola se propuso el uso de biofertilizantes (Alonso *et al.*, 2008) como alternativa para disminuir el uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, y el uso de inhibidores enzimáticos para retardar la transformación de urea en amoníaco.

Un aspecto clave que aún no ha sido abordado es la comparación del impacto ambiental en el uso de bioetanol argentino frente al combustible fósil, teniendo en cuenta un abanico de categorías de impacto y no solo el impacto asociado a la emisión de GEI.

El Análisis del Ciclo de Vida (LCA – Life Cycle Assessment) es una técnica idónea para realizar este tipo de estudio comparativo. Permite conocer y cuantificar el impacto de cualquier sistema sobre el medio ambiente, identificar áreas susceptibles de mejoras en un proceso y realizar comparaciones entre procesos y productos, entre otras posibilidades. Según la Society for Environmental Toxicology and Chemistry (Setac), la evaluación se realiza abarcando el ciclo de vida completo del proceso o actividad bajo estudio, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, su industrialización, transporte, distribución, uso, reciclado, reutilización y disposición final (Consoli *et al.*, 1993). Por lo tanto, el LCA consiste en un tipo de contabilidad ambiental en la que se atribuyen a los productos los efectos ambientales adversos, debidamente cuantificados, generados a lo largo de su ciclo de vida. Tradicionalmente, este enfoque suele llamarse "de la cuna a la tumba".

Los estudios de LCA conducidos en la Argentina sobre biocombustibles se refieren mayormente a biodiésel (Asal *et al.*, 2006; Panichelli *et al.*, 2009; Piastrellini *et al.*, 2015), mientras que los conducidos sobre la producción de bioetanol son recientes. Algunos aportes relevantes en este último punto corresponden a la Universidad Nacional de Tucumán (Mele *et al.*, 2011; Amores *et al.*, 2013) en cuanto a etanol de caña; el etanol de maíz argentino fue considerado por Pieragostini *et al.* (2014). Sin embargo, en estos trabajos no se aborda explícitamente la comparación con combustibles fósiles.

Existen numerosas contribuciones importantes referidas a la producción de bioetanol en otros países. Brasil se destaca en la aplicación del bioetanol como combustible principal para los automóviles; es así que los análisis ambientales comparativos de las industrias brasileñas de etanol versus petróleo son abundantes (ej.:

Luo *et al.*, 2009; Ometto *et al.*, 2009; Cavalett *et al.*, 2013). También hay estudios comparativos en otros países. En México, por ejemplo, se ha realizado el cálculo de las emisiones de GEI y los balances energéticos de la producción de etanol de caña de azúcar y su comparación con el caso brasileño y la producción de nafta (García *et al.*, 2011). En España, un trabajo técnico del Ciemat (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) aborda el LCA comparativo del biodiésel y el diésel (Lechón *et al.*, 2007). En todos estos casos, con ciertas diferencias metodológicas, se usa la técnica del LCA. Sin embargo, estos estudios no son comparables al caso de la Argentina, ya que analizan situaciones y prácticas geográficamente específicas.

Dado el potencial de la Argentina para la producción de bioetanol carburante, el objetivo de este trabajo es comparar el perfil ambiental del bioetanol de caña de azúcar elaborado en la provincia de Tucumán (Argentina), la nafta (de origen fósil) y distintas mezclas entre ellos. Para esto se presenta un estudio comparativo de LCA de cuatro casos en los que el porcentaje se refiere al contenido de etanol en la mezcla combustible: nafta 0%, mezcla 10%, mezcla 85% y etanol 100%, utilizando un automóvil mediano. Como automóvil mediano se considera un sedán, inspirado específicamente en un Chevrolet Classic, con motor a nafta de cuatro cilindros 1.4 L (1389 cm³) y 94 CV.

El estudio evalúa un conjunto de impactos ambientales relevantes y analiza los ciclos de vida completos del bioetanol y la nafta, que incluyen producción y transporte de materias primas, producción del combustible y uso de este. Se espera con esto arrojar luz sobre las medidas a tomar para aumentar la sustentabilidad del bioetanol producido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis de ciclo de vida

Un estudio de LCA comprende cuatro fases interrelacionadas que se describen en la norma ISO 14040: (Fase 1) Definición del objetivo y alcance del estudio; (Fase 2) Análisis de inventario del ciclo de vida; (Fase 3) Evaluación de impacto del ciclo de vida; y (Fase 4) Interpretación.

Al ser un estudio que requiere una gran cantidad de datos, además de la resolución de balances de materia y energía, se ha trabajado con el soporte de SimaPro® (PRé Consultants, 2014), una herramienta muy difundida y específica para el desarrollo de estudios de LCA, cuya estructura se adecua a la norma ISO 14040. El programa permite gestionar el LCA mediante la utilización de bases de datos, ya sea creadas por el propio usuario o de otro origen; entre estas últimas se destaca Ecoinvent v3.1 (Ecoinvent, 2014) como una de las más extensas. La

herramienta incluye además la información necesaria para la implementación de diversos métodos de evaluación de impacto: Eco-indicator 99, CML 2001, ReCiPe, etc.

Fase 1. Definición del objetivo y alcance del estudio.

Se definió como objetivo del estudio cuantificar y comparar el impacto ambiental de utilizar diferentes mezclas etanol-nafta en el motor de combustión interna de un automóvil estándar.

El impacto del proceso de producción de nafta se tomó de la base de datos Ecoinvent v3.1 (Ecoinvent, 2014): Petrol, unleaded, at refinery /RER U, al igual que en otros trabajos relacionados (Cavalett *et al.*, 2013). Este abarca los procesos en la refinería, incluido el tratamiento de aguas residuales y las emisiones del proceso multiproducto. Los valores corresponden al promedio de relevamientos de refinerías europeas, con datos estadísticos para los rendimientos y volúmenes de producción del año 2000.

Los límites del sistema considerado para el bioetanol se muestran en la Figura 1 y comprenden desde el cultivo de la caña y la fabricación de azúcar y alcohol, hasta el uso del biocombustible en los automóviles en forma de mezclas con nafta. Este enfoque se llama “de la cuna a la rueda”, puesto que no incluye las etapas de fin de vida del producto bajo estudio.

El estudio es de alcance provincial. Los datos son promedios correspondientes a las campañas 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011, 2011/2012 y 2012/2013 y son representativos de Tucumán (Argentina). Se consideró el horizonte temporal de un año.

En todo estudio de LCA debe definirse lo que se conoce como “unidad funcional”, es decir una referencia con la cual normalizar, en un sentido matemático, los datos de entrada y salida. La unidad funcional en este trabajo se define como 1 MJ de energía generada (Cavalett *et al.*, 2013) por la combustión del combustible en el motor del automóvil convencional mediano mencionado en la Introducción. Al fijar las características de este motor, la unidad funcional escogida resulta equivalente a cierta distancia recorrida, tal como se usa en muchos trabajos de comparación ambiental de combustibles (ej.: Luo *et al.*, 2009; Panichelli *et al.*, 2009).

En la práctica, el etanol se utiliza de dos maneras como combustible para vehículos: (1) sin modificaciones en los motores: mezclas con nafta, típicamente 5-20% en volumen y (2) con modificaciones en los motores: por lo general 85% a 100% en volumen.

El primer caso corresponde a la mezcla vigente en la Argentina, mientras que pueden encontrarse ambos casos en Brasil, en vehículos flex-fuel, los cuales funcionan con nafta, etanol o con mezclas de ambos en distintas proporciones. Poseen un software en el sistema de control electrónico que detecta la proporción presente en la

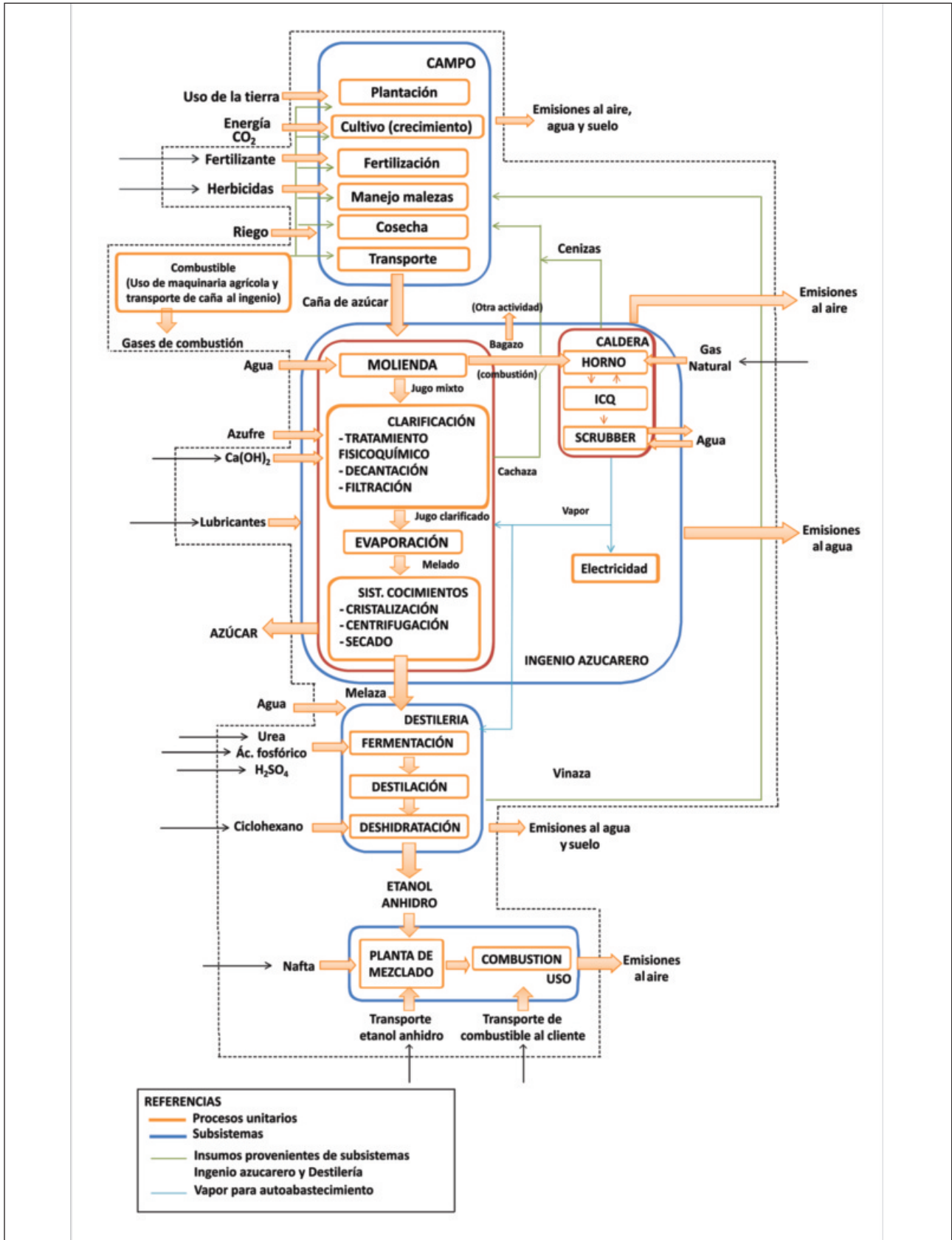


Figura 1. Límites del sistema estudiado.

mezcla de los dos combustibles. En este estudio se ha considerado la utilización del etanol en ambos sentidos, como mezclas de etanol-nafta con 10% de etanol en volumen (denominado E10), y con 85% de etanol en volumen (denominado E85). Como una alternativa de referencia, también se tiene en cuenta un caso hipotético de etanol 100% (E100). Por lo tanto, las alternativas de combustible son la nafta 100%, E10, E85 y E100, en cantidades necesarias para entregar la misma cantidad de energía "a las ruedas".

Los datos usados han sido en su mayoría recolectados directamente de campo, ingenio y destilería, a través de entrevistas con expertos tanto de la industria como de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) y de publicaciones.

En un estudio de LCA, cada una de las entradas al sistema tiene asociado su proceso productivo con su respectivo consumo de materiales y energía, y la correspondiente liberación de emisiones. A modo de ejemplo, si el sistema bajo estudio requiere urea, con este material se estarán incorporando al inventario del ciclo de vida las emisiones debidas a los procesos de producción y transporte de la urea, que a su vez incluye el proceso de fabricación de amoníaco y CO₂ utilizados como materia prima, y así sucesivamente. De manera que en el desarrollo del LCA se tienen en cuenta los impactos producidos por todos los procesos relacionados. Muchas veces esta información no está disponible a nivel local o es bastante incompleta e inexacta, por lo cual para el presente estudio se adoptaron procesos similares a los locales de bases de datos internacionales (ej.: Ecoinvent v3). También se realizaron balances de materia y energía para estimar ciertos valores como las emisiones GEI en la combustión de combustibles fósiles y de la mezcla etanol-nafta, entre otros. El origen de los datos se ha documentado apropiadamente durante el desarrollo de la etapa de inventario.

De manera similar a estudios previos (Mele *et al.*, 2011), el sistema global analizado se ha dividido en cuatro subsistemas:

- 1.CAMPO
- 2.INGENIO AZUCARERO
- 3.DESTILERÍA
- 4.USO

El subsistema CAMPO corresponde al sistema de producción de caña de azúcar convencional usado en la provincia de Tucumán y comprende la plantación manual, agroquímicos convencionales, cosecha integral en verde y transporte de caña de azúcar al ingenio azucarero. Una vez producida la caña de azúcar también se obtiene materia verde residual disponible o RAC (residuo agrícola de cosecha). Una fracción del RAC puede servir de cobertura al suelo aportándole materia orgánica, favoreciendo el reciclado de nutrientes, evitando

emergencia de maleza y dando humedad al suelo. El resto se podría trasladar al ingenio para su combustión en calderas. No obstante, esta situación no se considera en el presente estudio, por lo que el RAC no es un flujo de salida del subsistema.

El subsistema INGENIO AZUCARERO corresponde a la etapa de producción de azúcar y comprende la molienda de la caña de azúcar, el tratamiento físico-químico del jugo, la evaporación y un sistema de tres cocimientos con producción de melaza, siendo esta última la materia prima en la etapa de obtención de bioetanol. El bagazo -residuo de la molienda- es quemado en calderas para generar vapor y energía eléctrica para autoabastecimiento del ingenio. Estas necesidades energéticas se cubren con el 27% de caña y el 3% de caña restante se destina a otra actividad. Las cenizas de la combustión del bagazo y la cachaza (residuo del proceso de clarificación, rica en materia orgánica e inorgánica) se disponen en el campo.

El subsistema DESTILERÍA abarca la etapa de producción de etanol anhidro (99°GL) a partir de melaza, considerando que toda la melaza producida se convierte en mosto. Comprende las etapas de fermentación, destilación y deshidratación usando ciclohexano como agente deshidratante. La fermentación es del tipo "batch" con cubas abiertas. La etapa de destilación utiliza dos columnas: destiladora y rectificadora, siendo todo el alcohol producido (buen gusto y mal gusto) destinado a deshidratación para luego ser utilizado para combustible. La vinaza, residuo de este proceso productivo, se dispone en el campo como fuente de nutrientes y mejorador de las condiciones del suelo.

Por último, el subsistema USO comprende la utilización energética de combustibles de origen renovable y no renovable en el motor de un automóvil estándar.

Fase 2. Análisis de inventario de ciclo de vida.

En esta etapa del LCA es importante elaborar un inventario con los recursos utilizados y las emisiones liberadas al ambiente del sistema bajo estudio.

El subsistema INGENIO AZUCARERO es un sistema de múltiples salidas con valor económico (bagazo, azúcar y melaza). En este caso la metodología del LCA establece asignar las cargas ambientales a cada producto en base a una relación física. Cabe destacar que la norma ISO 14040 recomienda evitar tanto como se pueda la asignación de cargas expandiendo o subdividiendo el sistema, lo cual no es posible en este caso particular por dos razones fundamentales: (i) no se puede identificar la asociación directa de los ítems del inventario con cada producto y (ii) no existen productos de sustitución de los productos obtenidos. Es así que el método de asignación usado se basa en el criterio del contenido de masa. Así, teniendo en cuenta que por cada kg de azúcar se producen

0,4 kg de melaza y 0,3 kg de bagazo, los factores de asignación resultantes para azúcar, melaza y bagazo son de 59%, 23% y 18% respectivamente.

En el subsistema USO, para el transporte de los combustibles tanto de las destilerías a las plantas de mezclado como al cliente (estaciones de servicios), se consideraron vehículos de tres ejes con carga de 20 a 28 t (Ecoinvent v3). La distancia recorrida fue ponderada tomándose un valor de 40 km para el tramo destilería-planta de mezclado y 6 km desde esta última al cliente. Para el cálculo de las emisiones se consideró combustión completa en el motor y consumo específico de 0,38 kg nafta/kWh. Además se consideró el mismo rendimiento efectivo y el mismo volumen de aire + combustible para todos los combustibles analizados.

A continuación se describe cómo se ha calculado cada uno de los ítems de la tabla de inventario. A modo de ejemplo se ilustra el procedimiento con el caso del CO₂.

El CO₂ del subsistema CAMPO (CAM), en kg CO₂/kg caña, viene dado por:

$$CAM = -fot + emis_{CAM} + \sum_{proc} Y_{CAMproc} CO_{2CAMproc}$$

donde fot representa los kg CO₂ captados por fotosíntesis, emis_{CAM} representa los kg CO₂ emitidos por el propio sistema CAMPO, CO_{2CAMproc} representa los kg CO₂ provenientes de cada uno de los procesos conectados a este sistema debido a algún insumo o materia prima que el sistema consume, tales como fertilizantes, diésel, etc. Y_{CAMproc} es un factor de masa expresado en kg insumo/kg caña.

Del mismo modo, el CO₂ del subsistema INGENIO AZUCARERO (ING), en kg CO₂/kg melaza, viene dado por:

$$ING = emis_{ING} + \sum_{proc} Y_{INGproc} CO_{2INGproc}$$

donde emis_{ING} representa los kg CO₂ emitidos por el ingenio por kg de melaza producida, CO_{2INGproc} representa los kg CO₂ provenientes de otros procesos conectados al ingenio tales como producción de cal y azufre, consumo de gas natural, etc. Y_{INGproc} es el factor de kg insumo/kg melaza.

El CO₂ del subsistema DESTILERÍA (DES), expresado en kg CO₂/kg etanol, y el del subsistema USO (USO), en kg CO₂/MJ energía generada en el motor, vienen dados por:

$$DES = emis_{DES} + \sum_{proc} Y_{DESproc} CO_{2DESproc}$$

$$USO = emis_{USO} + \sum_{proc} Y_{USOproc} CO_{2USOproc}$$

con variables análogas a las descritas para los subsistemas anteriores.

Finalmente, el CO₂ total, en kg CO₂/MJ energía generada en el motor, está dado por:

$$CO_{2total} = USO + \frac{kg\ etanol}{MJ} \left[DES + f \frac{kg\ melaza}{kg\ etanol} \left(ING + \frac{kg\ caña}{kg\ melaza} CAM \right) \right]$$

donde se suman las contribuciones de todos los subsistemas al sistema USO. El factor de asignación f tiene en cuenta que INGENIO AZUCARERO es un subsistema multiproducto. En esta ecuación, CAM lleva en sí el CO₂ asociado al subsistema CAMPO y los procesos dependientes a través de los insumos utilizados (agroquímicos, labores agrícolas, maquinaria, combustible, etc.). Esta variable, afectada por un factor que transforma los kg de caña en kg de melaza, se suma a ING para obtener la contribución total de los subsistemas CAMPO e INGENIO en conjunto (kg de CO₂/kg melaza). Multiplicando este resultado por el factor que cambia la referencia de kg de melaza a kg de etanol, se obtiene un término que puede sumarse a la variable DES, para obtener la cantidad de CO₂ debida a los subsistemas DESTILERÍA, INGENIO AZUCARERO y CAMPO en kg CO₂/kg etanol. Finalmente, multiplicando este último valor por el correspondiente cambio de referencia —de kg etanol a MJ generado— y sumándolo a la contribución del subsistema USO, se obtienen los kg de CO₂ totales correspondientes a la unidad funcional escogida, es decir, a 1 MJ de energía generada en el motor, a lo largo de todo el ciclo de vida.

Los datos de las entradas y salidas de los subsistemas se muestran en las Tablas 1 a 4.

Fase 3. Evaluación de impacto del ciclo de vida

En esta fase se traducen los resultados del inventario en impactos ambientales.

Se deben seleccionar categorías de impactos (como ser calentamiento global, acidificación, eutrofización, etc.) a las cuales se asignan los resultados del inventario. Por ejemplo, el CO₂ y el CH₄ se pueden asignar a la categoría “calentamiento global”, mientras que el SO₂ y el NH₃ a la categoría “acidificación”. Luego, los valores de estas cargas ambientales deben multiplicarse por factores de caracterización que surgen de un modelo físico-químico-matemático del impacto de un flujo con respecto a una categoría particular. Un ejemplo del modelo es el del IPCC (“Intergovernmental Panel on Climate Change”) para cambio climático. Los

Tabla 1. Inventario del subsistema CAMPO para 1 t caña de azúcar.

ENTRADAS	Unidad	Cantidad	SALIDAS	Unidad	Cantidad
De la naturaleza			Producto		
Uso de la tierra	ha	0,018	Caña de azúcar	t	1
CO ₂	t	0,440	Emisiones al aire		
Energía	MJ	4947,8	CO ₂	kg	8,8439
De la tecnosfera			SO ₂	kg	0,0114
Urea (como N ₂)	kg	1,3663	NH ₃	kg	0,2049
P ₂ O ₅	kg	0,2824	N ₂ O	kg	0,0582
Atrazina	kg	0,0636	NO _x	kg	0,0122
Ametrina	kg	0,0177	Metano	kg	0,2860
2,4 D	kg	0,0127	Emisiones al agua		
Glifosato	kg	0,0272	Fósforo	kg	0,0158
Agua para Riego	m ³	3,1116	Nitratos	kg	0,0888
Gas oil	kg	2,8612	Atrazina	kg	0,0010
Cachaza (4,5%caña)	t	0,0450	2,4-D	kg	0,0002
			Ametrina	kg	0,0003
			Glifosato	kg	0,0004
			Emisiones al suelo		
			Atrazina	kg	0,0094
			2,4 D	kg	0,0023
			Glifosato	kg	0,0033

factores de caracterización reflejan la contribución relativa de un valor del inventario a una categoría de impacto y este resultado es el indicador de categoría.

En el presente estudio se utilizaron las categorías de impacto correspondientes al modelo ReCiPe Midpoint V1.12 (Goedkoop *et al.*, 2008). Este método estima el impacto ambiental a través de 18 categorías de impacto (indicadores de punto medio), que luego podrían ser agrupadas en tres tipos de daños (indicadores de punto final): a la salud humana, a los ecosistemas y a los recursos (ReCiPe Endpoint).

Fase 4. Interpretación

Como parte de esta etapa, los resultados obtenidos en las fases anteriores se analizan mediante la comparación de los cuatro tipos de combustibles planteados desde el punto de vista de su utilización.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se describen los resultados

obtenidos en las fases de evaluación de impacto e interpretación, tanto de la producción como en el uso del etanol anhidro.

La Figura 2 muestra el impacto ambiental asociado a la producción de 1 MJ de etanol anhidro en la provincia de Tucumán. En abscisas se muestran 13 de las 18 categorías de impacto de la metodología ReCiPe Midpoint; y en ordenadas, la contribución de los procesos intervinientes en cada categoría expresada en porcentaje. No se considerarán las categorías “radiación ionizante”, “agotamiento de metal”, “eutrofización marina”, “ecotoxicidad marina” y “agotamiento de agua” por no ser pertinentes para este trabajo. Los colores representan a los diferentes procesos que intervienen directamente en la producción de etanol carburante. Dicha contribución solo es comparable dentro de cada categoría de impacto, es decir el gráfico no muestra cuál es el mayor impacto en el sistema analizado (no hay una cuantificación absoluta del impacto). En todas las categorías predomina la contribución del proceso de fabricación de melaza (en rojo) —co-producto de la producción de azúcar— el cual

Tabla 2. Inventario del subsistema INGENIO AZUCARERO para 1 t de azúcar.

ENTRADAS	Unidad	Cantidad	SALIDAS	Unidad	Cantidad
De la naturaleza			Productos		
Caña de azúcar	t	10	Azúcar	t	1
S	t	0,0046	Bagazo	t	0,30
Agua	m ³	80	Melaza	t	0,40
De la tecnosfera			Cachaza	t	0,45
Cal	t	0,013	Emisiones al aire		
Gas natural	Nm ³	51,55	CO ₂	t	2,0150
Lubricantes	kg	0,58	CO	t	0,0660
			NO	t	0,0006
			Particulado >2,5µm y <10µm	t	0,0014
			Vapor (pérdidas)	t	0,0810
			Purga (calderas)	t	0,1620
			Emisiones al agua		
			DBO	kg O ₂	25,0700
			Sólidos suspendidos	kg	24,6700
			Ca	kg	1,1500
			Mg	kg	0,3700
			Na	kg	0,3700
			K	kg	0,0700
			Dureza total	kg	4,3800
			Particulado (< 10µm)	kg	0,3800
			Agua	t	90

lleva consigo, además del impacto del ingenio mismo, el impacto ambiental heredado de la producción de caña de azúcar (subsistema CAMPO). En este sentido, la contribución al impacto es debida al uso de agroquímicos durante el crecimiento del cultivo. El impacto propio de la destilería (azul) es evidente en la categoría formación de oxidantes fotoquímicos. Esto se debe a la evaporación del etanol de las cubas de fermentación.

La Figura 3 muestra una comparación de los impactos ambientales potenciales del uso de diferentes combustibles. El eje y muestra una escala porcentual, donde el 100% corresponde al combustible con mayor impacto ambiental para cada categoría. Se puede observar que cuatro categorías de impacto muestran cierta "mejora" con la adición de etanol a los combustibles fósiles: cambio climático, agotamiento del ozono, transformación del suelo y agotamiento de los recursos fósiles. En las nueve categorías restantes, la nafta

presenta mejores resultados.

Es interesante notar una mejora apreciable con el agregado de bioetanol al combustible fósil en las categorías cambio climático y agotamiento de recursos fósiles. Esto último es lógico, dada la naturaleza esencialmente renovable (biológica) del bioetanol. En cuanto a la contribución a la categoría cambio climático, esta se debe, en las etapas de fabricación del combustible, al uso y producción del combustible fósil, en el caso de la nafta. Para el etanol (E100), deriva de la producción y uso de combustible fósil en los procesos, y de la aplicación de agroquímicos. En cuanto a la fase de uso, la combustión de nafta y E100 en el motor considerado genera 0,735 kg CO₂eq/MJ y 0,442 kg CO₂eq/MJ, respectivamente. Así se explica que el impacto en cambio climático sea mayor para el combustible fósil que para el biocombustible.

En las categorías de acidificación, ecotoxicidad

Tabla 3. Entradas y salidas del subsistema DESTILERÍA para 1 L de etanol anhidro.

ENTRADAS	Unidad	Cantidad	SALIDAS	Unidad	Cantidad
De la naturaleza			Productos		
Agua (dil y mosto)	L	8,23	Alcohol anhidro	L	1
Agua refrigeración	L	164,53	Emisiones al aire		
De la tecnósfera			CO ₂	kg	2,2620
Melaza	kg	3,48	Etanol (arrastrado con CO ₂)	kg	0,0048
Levadura*	kg	0,00004	Emisiones al agua		
Urea	kg	0,00051	Agua	kg	4,1660
Ácido fosfórico 85%	kg	0,00030	Emisiones al suelo **		
H ₂ SO ₄	kg	0,01850	Carbono (de materia orgánica)	kg	0,0450
Ciclohexano	kg	0,00018	Ca	kg	0,0220
			Mg	kg	0,0070
			Na	kg	0,0120
			K	kg	0,1560

* No considerado en las etapas de inventario y evaluación de impacto.

** Análisis de vinaza: sólo se reportan los componentes disponibles en las bases de datos de SimaPro®.

En la contabilización total de emisiones de CO₂ se tuvo en cuenta el CO₂ debido al carbono contenido en la materia orgánica de la vinaza que no se fija en el suelo.

Tabla 4. Entradas y salidas del subsistema USO.

	Nafta 100%	E10	E85	E100
ENTRADAS				
Nafta, kg	0,0238	0,0222	0,005	-
Etanol 99, kg	-	0,0026	0,0295	0,0374
Transporte, tkm	0,0001	0,0003	0,0015	0,0007
SALIDAS				
Energía, MJ	1	1	1	1
Emisiones al aire				
CO ₂ , kg	0,7345	0,7052	0,4854	0,4416

terrestre y de agua dulce y eutrofización, en cambio, la relación es la opuesta. Se ha podido rastrear que la contribución del uso de bioetanol a estas categorías proviene del aporte del subsistema CAMPO, debido a las emisiones (volatilización y lixiviación) de algunos agroquímicos (herbicidas y fertilizantes) y de otras sustancias provenientes de diferentes procesos conectados con este subsistema (producción de fertilizantes y consumo de diésel, principalmente).

Otro efecto negativo en el uso del bioetanol está relacionado con las emisiones de material particulado

emitido por los ingenios azucareros y por el proceso de producción de urea usada como fertilizante en el campo. Estos efectos pueden observarse en las categorías correspondientes a formación de oxidantes fotoquímicos y material particulado.

Por otra parte, también se observa que la diferencia porcentual no es considerable entre nafta y E10 debido a que la concentración de etanol en la mezcla es muy baja y por lo tanto prevalecen las características de la nafta.

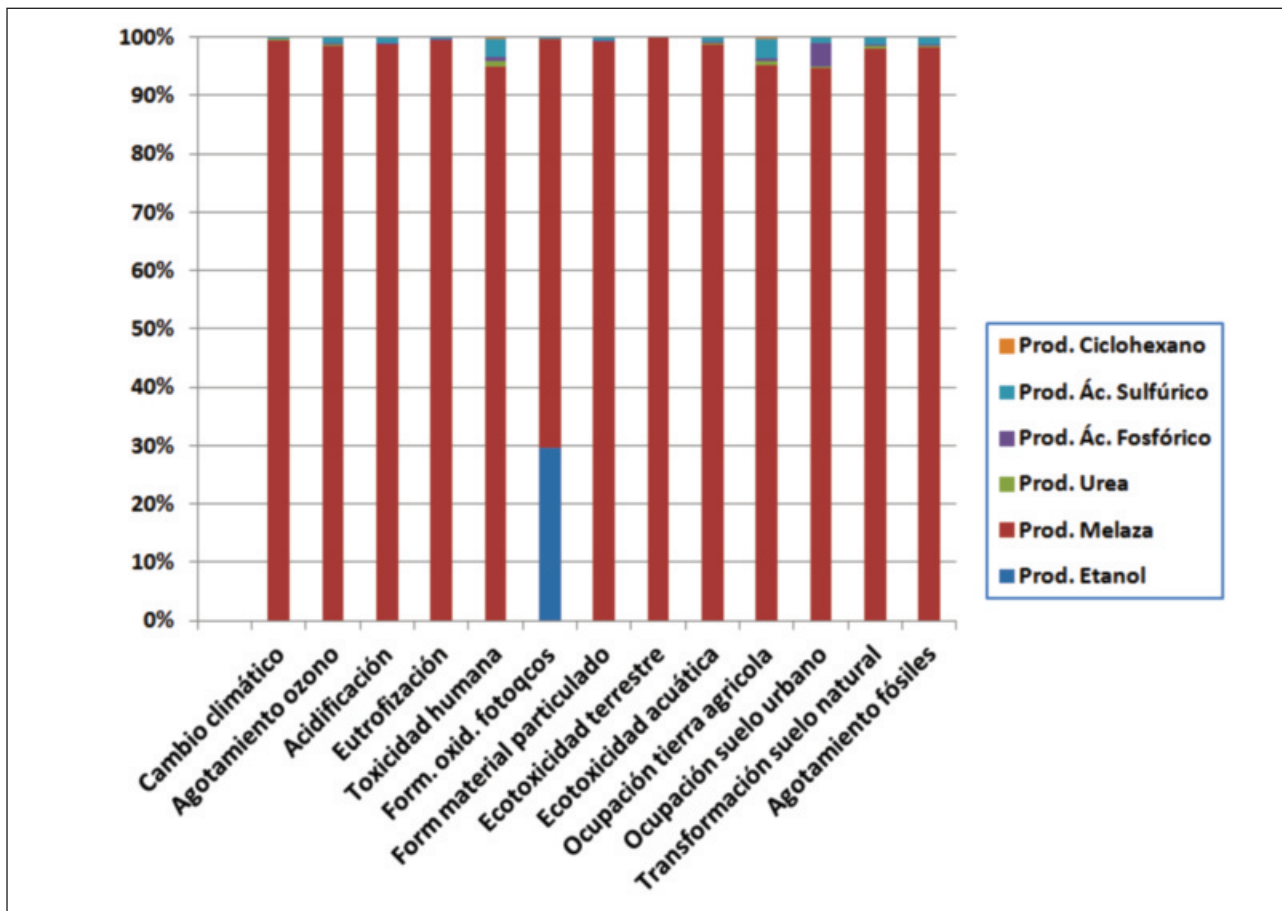


Figura 2. Perfil ambiental de la producción de bioetanol de caña de azúcar en Tucumán. No se incluyen los impactos asociados al subsistema USO).

CONCLUSIONES

Este trabajo contribuye en un ámbito en continuo desarrollo como lo es la comparación a nivel regional de los perfiles ambientales de las mezclas de nafta-etanol impulsadas por la Ley 26.093. Esta evaluación se ha realizado por medio de una herramienta idónea para estos fines: el LCA.

Los combustibles analizados son una alternativa para la reducción de las emisiones de CO₂, así como también para disminuir el grado de dependencia del petróleo. Es importante exponer que una de las limitaciones encontradas fue la falta de un inventario de ciclo de vida para la producción de nafta en la Argentina. Esto fue subsanado parcialmente tomando un proceso regional europeo, sin información clara sobre los límites del sistema. Aparece así una limitación en la comparación que sin embargo no invalida el estudio realizado, en cuanto es la mejor referencia que puede tenerse al presente.

Del análisis realizado surge que la percepción de sustentabilidad de los biocombustibles respecto de los

combustibles fósiles no es absoluta y depende en gran medida de las acciones y desarrollos tecnológicos que se instrumenten para paliar el impacto ambiental de las etapas de producción de biocombustibles.

A partir de los resultados de este estudio puede concluirse que en términos de agotamiento de combustibles fósiles y emisiones de GEI, las mezclas con etanol son mejores opciones que la nafta. Esto favorece el uso de recursos naturales renovables nacionales y contribuye a disminuir la contaminación. Actualmente el porcentaje de alcohol en nafta es del 12% y se prevé que continúe en aumento. Sin embargo, esta concentración tiene una limitación técnica, ya que un motor que funciona con nafta puede ser alimentado con mezclas de etanol-nafta hasta un 25% de alcohol en la mezcla sin realizar modificaciones en el mismo. La concentración de etanol puede ir incrementándose a medida que haya disponibilidad de alcohol en el mercado interno.

Este estudio no refleja el impacto ambiental producido por la vinaza (principal efluente de la etapa de destilación), el cual debe estudiarse específicamente

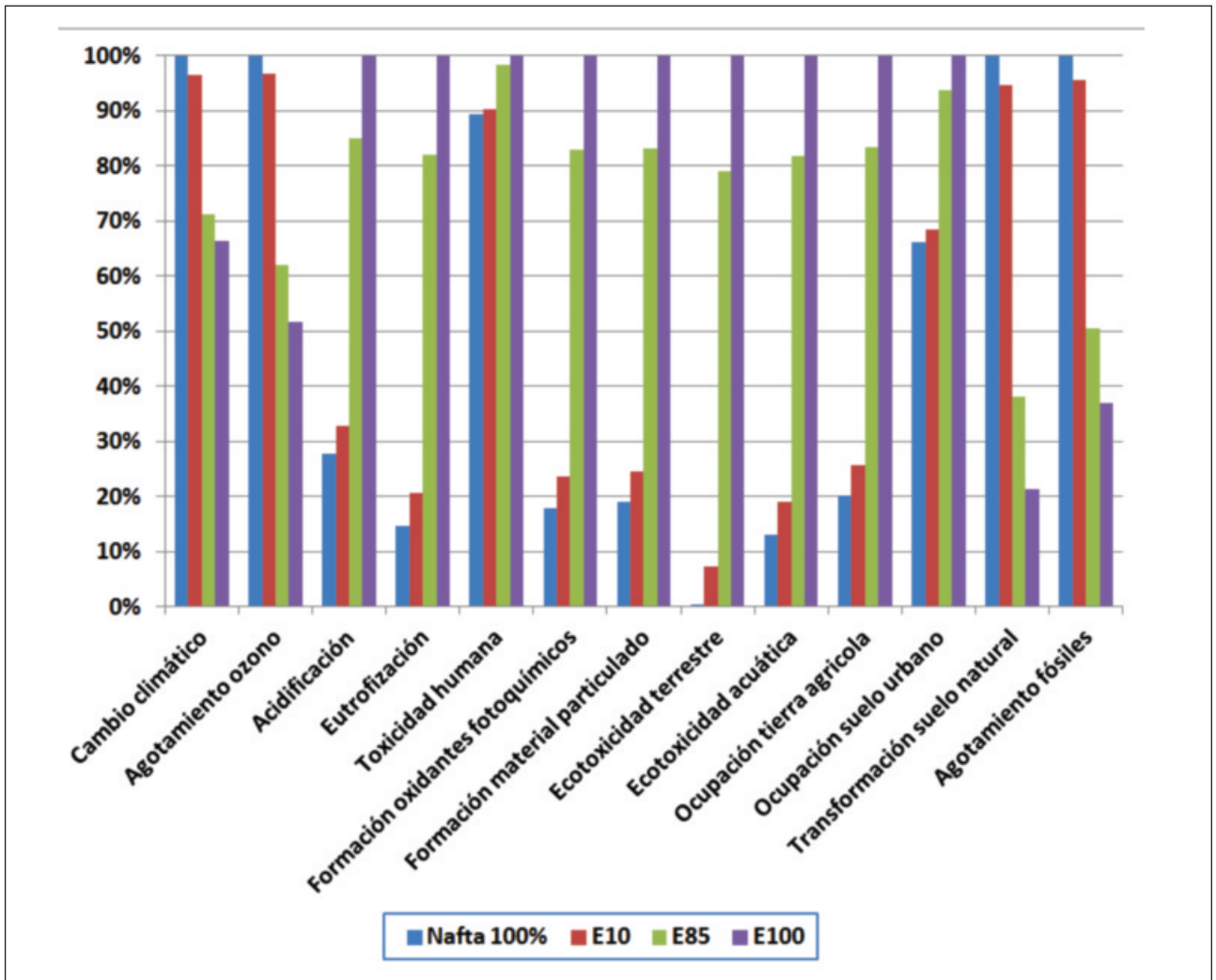


Figura 3. Perfil ambiental comparativo del uso de los diferentes combustibles.

para tener un panorama completo de la sustentabilidad del bioetanol.

También surge que gran parte de los impactos de la producción de bioetanol se deben principalmente a la aplicación de agroquímicos en la etapa agrícola, por lo que esta etapa es un “hotspot” detectado a considerar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de PIP 00785 Conicet y CIUNT y la colaboración e información brindada por el Ing. Mec. Federico Franck Colombres y miembros del Subprograma Agronomía de la Caña de Azúcar de la EEAOC, como así también a la Sección Economía y Estadística de esta institución.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Alonso, L. G.; E. R. Romero; S. D. Casen; M. F. Leggio; G. A. Sanzano y H. Rojas Quinteros. 2008.

Evaluación de un biofertilizante como complemento de la fertilización nitrogenada en caña de azúcar. Avance Agroind. 29 (3).

Amores, M. A.; F. D. Mele; L. Jiménez and F. Castells. 2013. Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina. The International Journal of Life Cycle Assessment 18 (7): 1344-1357.

Asal S.; R. Marcus and J. A. Hilbert. 2006. Opportunities for and obstacles to sustainable biodiesel production in Argentina. Energy for Sustainable Development 10 (2): 48-58.

Cavalett, O; M. F. Chagas; J. E. A. Seabra and A. Bonomi. 2013. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. International Journal of Life Cycle Assessment 18 (3): 647-658.

Consoli, F.; D. Allen; I. Boustead; J. Fava; W. Franklin; A. Jensen; N. De Oude; R. Parrish; R. Perriman; D. Postlethwaite; B. Quay; J. Séguin and B. Vigon (Eds). 1993. Guidelines for Life-cycle

- Assessment: A Code of Practice. Setac-Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Bruselas y Pensacola.
- Cremonez, P. A.; M. Feroldi; A. Feiden; J. G. Teleken; D. J. Gris; J. Dieter; E. de Rossi and J. Antonelli. 2015.** Current scenario and prospects of use of liquid biofuels in South America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43: 352–362.
- Ecoinvent. 2014** Swiss Centre for Life-Cycle Inventories. [En línea] Disponible en www.ecoinvent.org.
- Farrell, A. E.; R. J. Plevin; B. T. Turner; A. D. Jones; M. O'Hare and D. M. Kammen. 2006.** Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science* 311 (5781): 506–508.
- García, C.; A. Fuentes; A. Hennecke; E. Riegelhaupt; F. Manzini and O. Masera. 2011.** Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Applied Energy* 88: 2088-2097.
- Goedkoop, M. and R. Spriensma. 2000.** The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report.
- Lechón, Y.; H. Cabal; C. de la Rúa; C. Lago; L. Izquierdo; R. Sáez y M. San Miguel. 2007.** Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Ciemat. Ed. Centro de Pub. Secretaría Gral. Técnica, Ministerio de Medio Ambiente.
- Luo, L; E. van der Voet and G. Huppes. 2009.** Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 1613-1619.
- Mele, F. D.; A. Kostin; G. Guillén-Gosálbez and L. Jiménez. 2011.** Multiobjective Model for More Sustainable Fuel Supply Chains. A Case Study of the Sugarcane Industry in Argentina. *Industrial & Engineering Chem. Res.* 50: 4939–4958.
- Mesquita, D. L. 2009.** O processo de construção da tecnologia Flex Fuel no Brasil: uma análise sob a ótica da "Plataforma de negócio" (Business Platform). Tesis de maestría. Universidade Federal de Lavras.
- OCDE/FAO. 2013.** OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2013-2022, Texcoco, Estado de México, Universidad Autónoma Chapingo. [En línea] Disponible en http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2013-es (consultado el 21 abril de 2014).
- Ometto, A. R.; M. Z. Hauschild and W. N. L. Roma. 2009.** Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. *Int J Life Cycle Assess* 14: 236–247.
- Panichelli, L.; A. Dauriat and E. Gnansounou. 2009.** Life cycle assessment of soybean-based biodiesel in Argentina for export. *Int J Life Cycle Assess* 14:144-159.
- Piastrellini, R.; B. M. Civit and A. P. Arena. 2015.** Influence of Agricultural Practices on Biotic Production Potential and Climate Regulation Potential. A Case Study for Life Cycle Assessment of Soybean (*Glycine max*) in Argentina. *Sustainability* 7 (4): 4386-4410; doi:10.3390/su7044386.
- Pieragostini, C.; P. Aguirre and M. C. Mussati. 2014.** Life cycle assessment of corn-based ethanol production in Argentina. *Science of the Total Environment* 472: 212–225.
- PRé Consultants. SimaPro® v8. 2014.** [En línea] Disponible en www.pre-sustainability.com/simapro-ica-software (consultado el 15 abril de 2014).