

Sorgo azucarado: estudio ambiental y potencial uso para producción de bioetanol

L. Patricia Garolera De Nucci, Javier Tonatto, M. Emilia Iñigo Martínez, Guillermo De Boeck, Gerónimo Cárdenas, Eduardo Romero

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es estimar el perfil ambiental de la producción de sorgo azucarado en la provincia de Tucumán. Para ello, se empleó la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Los resultados muestran que la mayor contribución al impacto ambiental se debe principalmente a la producción de diésel y herbicidas utilizados. Esto constituye un avance en la dirección de generar a futuro un inventario de ciclo de vida (LCIA) del bioetanol de sorgo azucarado.

A partir de este análisis y dada la factibilidad de industrializar sorgo azucarado para producción de un biocombustible, surge la necesidad de realizar estudios de LCA del bioetanol de sorgo azucarado, y evaluar así la sustentabilidad de este biocombustible. Estas iniciativas de investigación servirán para que el sector agroindustrial de Tucumán y el NOA pueda diversificarse y concretar objetivos claros para obtener nuevas fuentes de energía renovable.

Palabras clave: cultivos energéticos, Análisis de Ciclo de Vida, biocombustibles.

ABSTRACT

Sweet sorghum: environmental study and potential use for bioethanol production

The aim of the present study is to estimate the environmental profile of the agricultural production of sweet sorghum in the province of Tucumán. For this purpose, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology is used. Results showed that the main contribution to the environmental impact was due mainly to the production of diesel and herbicides. In addition, some progress is made in the production of bioethanol from sweet sorghum for the generation of a life cycle inventory (LCI) of this biofuel.

Based on this analysis and the feasibility of industrializing this new feedstock for biofuel production, there is a need to carry out LCA studies on the bioethanol of sweet sorghum, and to evaluate the sustainability of biofuels. These research initiatives will help agroindustrial actors of Tucumán and the Argentine Northwestern Region to diversify and specify clear objectives to obtain new sources of renewable energy.

Key words: energy crops, Life Cycle Assessment, biofuels.

Fecha de recepción: 27/11/2018 - Fecha de aceptación: 04/02/2020

INTRODUCCIÓN

La inestabilidad del precio del petróleo afecta las economías del mundo exigiendo una disminución de la explotación de los hidrocarburos y una permanente búsqueda de fuentes sustitutas. Además, las políticas de mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI), a los que el transporte contribuye en gran medida, ponderan el uso de los biocombustibles líquidos como fuente de energía renovable, a partir del aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos (Pieragostini, 2014).

Existen antecedentes que demuestran el elevado potencial de producción de biomasa de ciertos cultivos energéticos tales como caña de azúcar (60-90 t/ha) y sorgo azucarado¹ (50-80 t/ha). Particularizando para sorgo azucarado, la cantidad de etanol (alcohol de 1° generación) por hectárea obtenible alcanza valores de 2500 L/ha, siendo éste alrededor de un 50% del etanol producido a partir de caña de azúcar. Otros estudios han demostrado niveles de producción más elevados (entre 3200 L/ha y 4750 – 5220 L/ha) en donde se emplea todo el potencial de éste cultivo energético (Ahmad Dar *et al.*, 2018; Romero *et al.*, 2012).

En la última década, la Argentina buscó replantear su matriz energética incorporando y promoviendo el consumo de bioenergía, especialmente de biocombustibles líquidos, lo que conlleva promover el desarrollo rural y reducir emisiones de GEI, dándoles un valor agregado a las diferentes cadenas agroindustriales regionales (Chidiak *et al.*, 2015).

Para el caso particular de Tucumán, el bioetanol se produce a partir de la caña de azúcar en destilerías anexas a ingenios azucareros que utilizan mieles, jugos y otras materias azucaradas del proceso de fabricación de azúcar como materia prima. El bioetanol generado se mezcla con nafta en las proporciones establecidas por ley para utilizarse en el sector de transporte.

El sorgo azucarado (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), otro cultivo energético de alta eficiencia fotosintética y productividad, es viable de ser cultivado en Tucumán. Es un material que presenta las condiciones para industrializarse en los ingenios azucareros del Noroeste Argentino (NOA), para usarse como cultivo de rotación de la soja y especialmente para ser cultivado en áreas donde la caña de azúcar presenta limitaciones hídricas o suelos de alto contenido salino. A nivel industrial, este cultivo incrementaría el abastecimiento de materia prima azucarada para la producción de bioetanol gracias a su importante contenido en azúcares fermentescibles en el jugo de sus tallos. Además, produciría energía eléctrica de fuentes renovables por la elevada generación de biomasa durante la cosecha (residuos agrícolas) y la industrialización (bagazo), sin modificaciones en equipos y procesos normalmente utilizados, tanto en el campo como en ingenios azucareros, para cosechar, transportar e industrializar la caña de azúcar. Estas ventajas ayudarían a las empresas sucroalcoholeras a disminuir sus costos fijos de producción y reducir el consumo de combustibles no renovables derivados del petróleo (Romero *et al.*, 2012).

Este potencial fue comprobado en una experien-

cia a nivel industrial realizada en el año 2016 por un ingenio azucarero de Tucumán que procesó sorgo dulce en sus instalaciones y logró obtener bioetanol por fermentación de jugo clarificado².

De esta manera, el sorgo azucarero puede cumplir un papel importante complementando el aprovechamiento agro-energético de la caña de azúcar, cadena agroindustrial ya establecida en el NOA.

Existen antecedentes que afirman que la producción agrícola es la principal fuente de diversas emisiones importantes. Es así como Nemecek and Kági (2007) sostienen que el uso excesivo de recursos tales como el empleo intensivo de agroquímicos, las mejoras en técnicas de manejo de cultivos, la mecanización y el desarrollo de nuevas tecnologías han dado lugar a problemas ambientales tales como eutrofización o toxicidad. Brentrup *et al.* (2004) evalúan el impacto de las emisiones y el consumo de recursos asociados con la producción de cultivos herbáceos, por ejemplo el cultivo de trigo, en los siguientes efectos ambientales: agotamiento de recursos abióticos, uso de la tierra, cambio climático, toxicidad, acidificación y eutrofización. Concluye que los principales impactos ambientales del sistema de producción están relacionados con las actividades en el campo (por ejemplo, la aplicación de fertilizantes), mientras que la producción y el transporte de insumos agrícolas tienen un efecto mucho menor. Este enfoque de pensamiento de ciclo de vida permite la detección de “hot spots” ambientales en todo el sistema de producción. Los “hot spots” o puntos críticos son puntos o etapas del proceso cuyo impacto ambiental es relevante y deben ser analizados para su reducción. La bibliografía científica también destaca que el sorgo puede generar biomasa de manera sustentable por su alta eficiencia en el uso de recursos (Amaducci *et al.*, 2016), y mejorar aun más su sustentabilidad con la disponibilidad de distintos genotipos de sorgo. En relación a esto último, Serra *et al.* (2017) evaluaron el impacto ambiental y el rendimiento energético de una central eléctrica de mediana escala a partir de tres genotipos de biomasa de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Todos los genotipos lograron al menos una reducción de GEI del 47,7% en comparación con un sistema de gas natural.

El sorgo dulce tiene un alto balance neto de energía de 3,63 en comparación con el sorgo granífero (1,50) y el maíz (1,53). Aproximadamente, 1,0-22 kg de CO₂ equivalentes podrían ahorrarse en función del rendimiento del cultivo, los métodos de producción y la naturaleza del suelo antes de sembrar el cultivo de sorgo dulce (Ahmad Dar *et al.*, 2018).

Cabe destacar que la sustentabilidad energética y ambiental de una cadena de suministro como la del bioetanol depende en gran medida del rendimiento y la eficiencia energética de la producción de materia prima (Garofalo *et al.*, 2018).

A fin de propiciar un desarrollo agrícola sustentable, la producción de cultivos energéticos debe estudiarse y evaluarse en términos de impacto ambiental. La metodología del análisis de ciclo de vida (Life Cycle Assessment, LCA) es considerada una herramienta útil para apoyar la toma de decisiones ambientales en los sistemas agrícola-

¹ En este trabajo se utilizan las denominaciones de sorgo “azucarado”, “azucarero”, “dulce” o “sacarino”, indistintamente.

² FITS ENERGIA 2012 – BIOCMBUSTIBLES FONARSEC. Título del proyecto: BIOSORGO: Producción comercial de bioetanol y bioelectricidad a partir de sorgo azucarado en Tucumán, cultivo energético complementario de la caña de azúcar.

las. De la misma manera que en Garolera De Nucci *et al.* (2017), la metodología del LCA evalúa todos los impactos ambientales potenciales asociados a un producto, actividad o servicio, contabilizando el consumo de recursos y emisiones a lo largo de todo su ciclo de vida. El conjunto de impactos ambientales o categorías de impacto, como ser el calentamiento global, la pérdida de la biodiversidad, el agotamiento de los recursos fósiles y la acidificación, entre otros, determina el perfil ambiental del sistema estudiado. Cada una de estas categorías refleja la contribución ambiental de cada proceso interviniente en el sistema (fabricación y uso de agroquímicos, combustibles fósiles, entre otros).

Hay contribuciones referidas en su mayoría a LCA de bioetanol de sorgo azucarero en los que se ha analizado previamente la etapa agrícola de producción de sorgo. Cabe destacar un artículo de Olukoya *et al.* (2015), en el que se calcula el impacto ambiental potencial del etanol de sorgo sacarino en EE.UU. usando diferentes opciones de procesamiento en fábrica. Los resultados muestran que la mayoría de los impactos son debidos a emisiones provenientes del cultivo y el transporte de sorgo hasta la planta de producción del biocombustible.

Dadas las condiciones agroecológicas que posee la provincia de Tucumán adecuadas para cultivos de alta producción de biomasa, y con el fin de cumplir con criterios de sustentabilidad (Farrell *et al.*, 2006), el objetivo del presente estudio es estimar el perfil ambiental de la producción agrícola de sorgo dulce en Tucumán para su potencial uso como materia prima azucarada en la producción de bioetanol, empleando como herramienta el LCA. Además, a partir de las experiencias realizadas en un ingenio azucarero, se obtuvieron datos preliminares para la generación de un inventario de ciclo de vida de la producción del bioetanol de sorgo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis de Ciclo de Vida

El estudio se realiza teniendo en cuenta la metodología propuesta por la norma ISO 14040 sobre LCA, la cual comprende cuatro fases interrelacionadas que se describen a continuación.

Fase 1. Definición del objetivo y alcance del estudio.

Se define como objetivo del estudio la estimación del perfil ambiental del sorgo azucarado producido en la provincia de Tucumán.

Para el análisis, se selecciona un productor de la localidad de Graneros en el sudeste de la provincia. El alcance del estudio considera la etapa agrícola, definiéndose como unidad funcional la producción de 1 kg de tallo molible de sorgo dulce. La unidad funcional es una unidad de referencia respecto a la cual se contabilizan los flujos de entrada y salida, necesaria para cumplir la función principal del sistema.

Los límites del sistema considerado se muestran en la Figura 1. El sistema de manejo agronómico planteado comprende las labores de siembra directa y la aplicación de herbicidas pre y post emergentes, así como el control de plagas correspondiente (insecticidas), sin la aplicación de fertilizantes ni agua de riego.

Cabe destacar que el análisis no solo incluye las actividades en el campo, sino también todos los impactos ambientales relacionados con la producción de materias primas como combustibles fósiles, e insumos agrícolas tales como sustancias fitosanitarias y maquinaria usadas en la producción de sorgo. Cada uno de ellos tiene asociado un proceso productivo con su respectivo consumo de materia, energía y liberación de emisiones. Para los casos en que esta información no esté disponible, se han em-

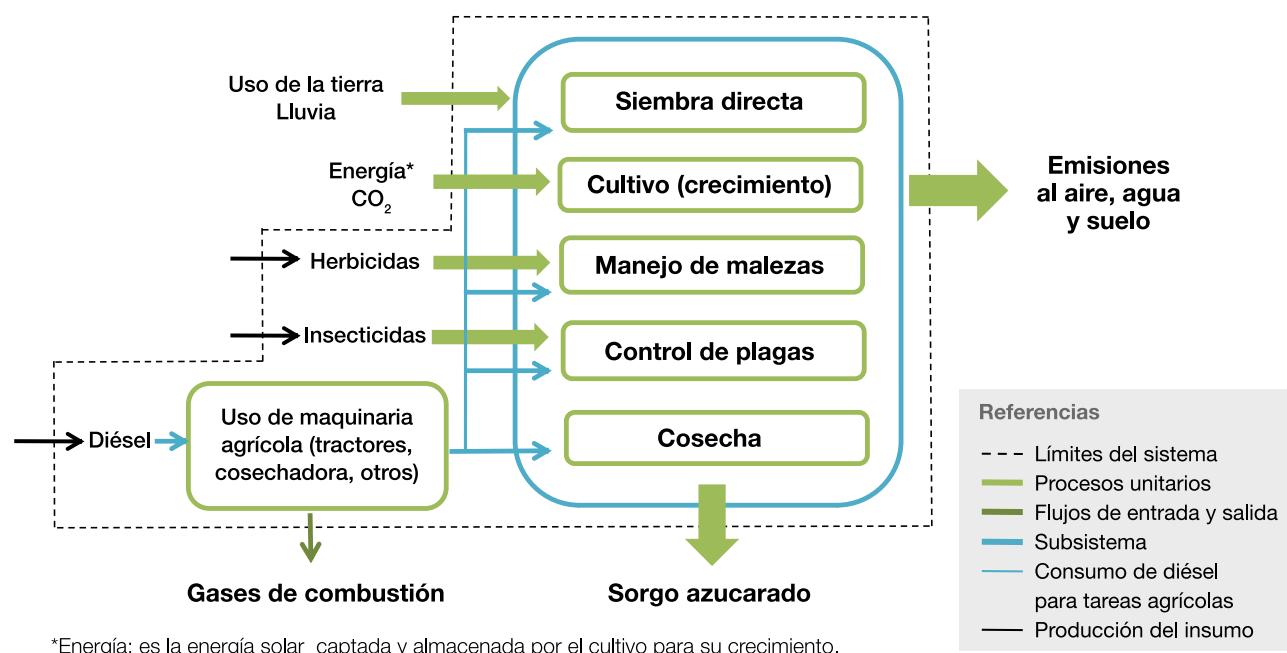


Figura 1. Límites del sistema estudiado.

pleado bases de datos internacionales tales como ecoinvent, las cuales se han adaptado a procesos locales similares.

Las tareas asociadas a la semilla de sorgo (producción, insumos, carga ambiental) no se han tenido en cuenta, ya que son despreciables si se comparan con otras operaciones del campo.

Para las labores agrícolas se ha considerado solo el consumo de combustible diésel sin tener en cuenta la construcción de la maquinaria. Se utilizaron una sembradora de 14 surcos y un tractor de 140 hp, una pulverizadora autopropulsada y una cosechadora mecánica integral de caña de azúcar con todo el equipamiento necesario para el apoyo de estas tareas (tractor y carros autovuelcos).

Los agroquímicos utilizados son 2,4 D, atrazina y metolaclor, entre otros (véase la Tabla 1). El ciclo de este cultivo estival es de 120 días y posee un rendimiento de biomasa promedio de 34,5 t/ha (tallo molible), obtenido a base de ensayos a campo por la EEAOC.

Fase 2. Análisis de inventario de ciclo de vida.

Esta etapa comprende la recopilación de los datos y los cálculos adecuados para cuantificar las entradas y salidas del sistema bajo estudio.

Para ello se elabora una tabla de LCIA en el que se disponen los datos primarios y secundarios, tomando como referencia la unidad funcional definida anteriormente (Tabla 1). Se priorizaron los datos primarios aportados por las experiencias realizadas en el campo durante el año 2015. La información se completó con datos secundarios de diversas fuentes (entrevistas con expertos y publicaciones especializadas) y bases de datos internacionales como Ecoinvent v3 (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2015). Para estimar las emisiones GEI debidas a la combustión de combustibles fósiles, se realizaron balances de materia y energía. También se utilizaron factores de emisión informados por Renouf et al. (2008) para calcular las emisiones al agua debida a la aplicación de pesticidas.

Fase 3. Evaluación de impacto del ciclo de vida

En esta fase se traducen los resultados del inventario en impactos ambientales clasificados en distintas categorías de acuerdo con la metodología de evaluación de impacto seleccionada. Una categoría de impacto ambiental es un tipo de efecto particular que puede producirse sobre el ambiente según la sustancia emitida (al aire, agua y/o suelo) en un determinado tiempo y área geográfica.

En el presente estudio se usó como método de evaluación de impacto el modelo ReCiPeMidpoint 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 se pueden agrupar en tres tipos de daños (indicadores de punto final): a la salud

Tabla 1. Inventario de ciclo de vida para 1 t de sorgo azucarado.

		Cantidad	Unidad	Fuente
ENTRADA				
Recursos naturales				
	Uso de la tierra	0,0095	ha	Estimado por los autores
	CO ₂	0,4220	t	Ecoinvent
	Energía en biomasa	4,55E+03	MJ	Poder calorífico superior - Ecoinvent
	Lluvia	152,754	m3	Dato primario
Insumos				
Herbicidas	Glifosato	0,0698	kg	Dato primario
	2,4 D	0,0278	kg	Dato primario
	Atrazina	0,0870	kg	Dato primario
	Metolaclor	0,0250	kg	Dato primario
	Coadyuvante	0,0015	kg	Dato primario
Insecticidas	Clorpirifos	0,0111	kg	Dato primario
	Aceite vegetal	0,0270	kg	Dato primario
	Alfamestrina	0,0007	kg	Dato primario
	Benzoilureas + carbamato	0,0035	kg	Dato primario
	Agua	0,1367	kg	Dato primario
	Diésel	3,1732	kg	Dato primario
SALIDA				
Producto				
	Sorgo azucarero	1,0	t	Flujo de referencia
Emisiones al aire				
	CO ₂ fósil	0,2563	kg	Calculado de la reacción de combustión del diésel
	SO ₂	0,0003	kg	
Emisiones al agua				
	2,4-D	0,0004	kg	Renouf, 2008
	Atrazina	0,0013	kg	Renouf, 2008
	Glifosato	0,0010	kg	Renouf, 2008
	Metolaclor	0,0004	kg	Renouf, 2008
	Clorpirifos	0,0002	kg	Renouf, 2008

humana, a los ecosistemas y a los recursos (ReCiPeEndpoint).

Las categorías de impacto seleccionadas para el presente estudio se muestran en la Tabla 2.

Además, se emplearon la perspectiva jerárquica y factores de normalización global para el año de referencia 2010. La etapa de normalización es un proceso opcional que puede llevarse a cabo para complementar un LCIA. Los resultados caracterizados de cada categoría de impacto se dividen por un valor de referencia seleccionado que coloca todos los resultados en la misma escala.

Finalmente, se trabajó con una herramienta informática de soporte, SimaPro® v8.4 (PRéConsultants, 2018), muy difundida y específica para el desarrollo de estudios de LCA, cuya estructura se adecua a la norma ISO 14040. El programa trae incorporadas las bases de datos más importantes como Ecoinvent, ELCD (European Life Cycle Database) y Agri-footprint, entre otras, y permite crear bases de datos propias. La herramienta incluye además diversos métodos de evaluación de impacto: ReCiPe 2016, IPCC 2013, Traci 2.1, etc.

Fase 4. Interpretación

Como parte de esta etapa, se presentan en la siguiente sección los resultados obtenidos en las fases 1, 2 y 3 del estudio.

Tabla 2. Categorías de impacto y clasificación de daños (Huijbregts *et al.*, 2016).

Categorías de impacto	Vías de impacto	Daño
1 Cambio climático	Aumento en la temperatura del planeta debido al aumento en la concentración de GEI en la atmósfera.	Salud Humana Ecosistemas terrestres y acuáticos
2 Agotamiento de la capa de ozono	Sustancias que destruyen el ozono estratosférico, disminuyendo el filtrado de rayos UV.	Salud humana (cáncer de piel, cataratas)
3 Acidificación terrestre	Cambios en la acidez del suelo por deposición de sustancias químicas.	Ecosistemas
4 Eutrofización de agua dulce	Aporte excesivo de nutrientes (como P y N) al ecosistema. Consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas.	Ecosistemas
5 Toxicidad	Exposición a sustancias químicas (por inhalación o ingesta).	Salud Humana
6 Formación fotoquímica de ozono	El ozono, a nivel de tropósfera, se forma como resultado de reacciones fotoquímicas de NO _x y compuestos orgánicos volátiles que no son metano (COVNM).	Salud humana Ecosistema terrestre
7 Formación de material particulado	Se ve favorecida por las emisiones de NO _x , NH ₃ , SO ₂ , o partículas menores a 2,5 micrones (PM2.5).	Salud humana
8 Ecotoxicidad acuática	Contaminación de las fuentes de agua dulce y de los océanos.	Ecosistemas acuático
9 Ecotoxicidad terrestre	Contaminación del suelo y de la atmósfera.	Ecosistemas terrestre
10 Ocupación de suelo agrícola	Ocupación y transformación física que sufren las áreas de terreno a raíz de una determinada actividad.	Ecosistemas
11 Ocupación de suelo urbano		
12 Transformación de suelo natural		
13 Agotamiento de metales	El aumento en la extracción de recursos minerales y/o combustibles fósiles causa un aumento en los costos debido a cambios en la producción o al abastecimiento desde una ubicación más costosa	Escasez de un recurso natural
14 Agotamiento de recursos fósiles		

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra cómo se compone el impacto ambiental asociado a la producción de 1 kg de tallo de sorgo azucarado en la provincia de Tucumán. En abscisas se muestran catorce de las categorías de impacto de la metodología ReCiPe-MidpointV1.12; y en ordenadas, la contribución de los procesos intervinientes, en cada categoría, expresada en porcentaje. Los colores representan a los diferentes procesos que intervienen directamente en la producción de sorgo azucarado.

Puede observarse que en todas las categorías de impacto predomina la contribución del proceso de producción de combustible fósil (diésel) y producción de herbicidas (glifosato, 2,4 D, atrazina, metolacolor), principalmente.

En las categorías “agotamiento de ozono” y “agotamiento de fósiles” la producción de diésel (naranja) contribuye en un 75% y 83,6% respectivamente, mientras que la producción de herbicidas (rojo) aporta un 23,5% y 15,3% a las categorías mencionadas.

El impacto propio de la pro-

ducción de sorgo (azul) es evidente en la categoría “cambio climático” y “ecotoxicidad acuática”. En el primer caso, se debe al uso de diésel en las tareas de campo, tales como siembra y cosecha. También contribuyen al cambio climá-

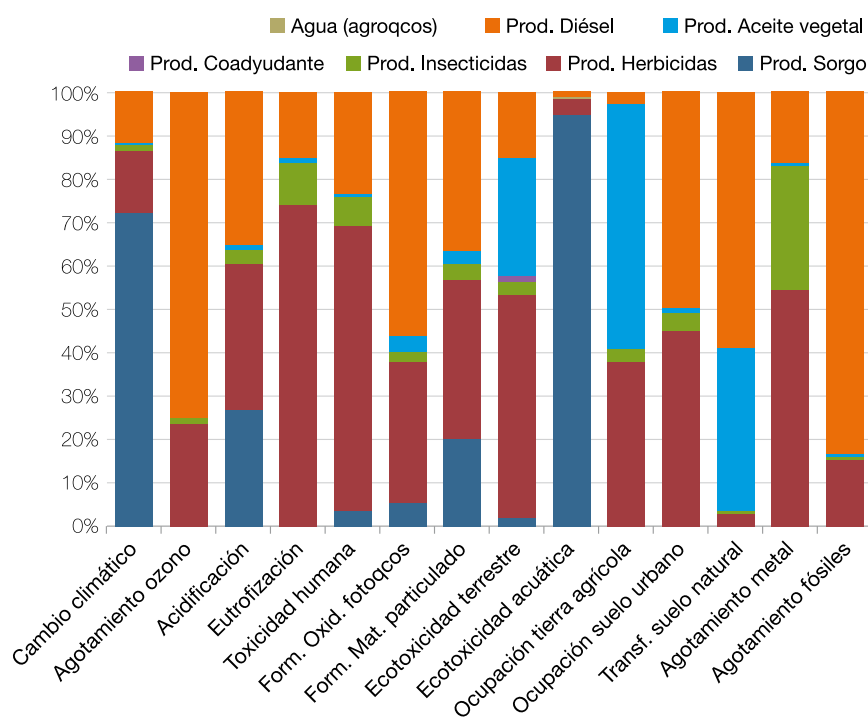


Figura 2. Perfil ambiental del sorgo azucarado en Tucumán, estimado para 1 kg de tallo de sorgo (caracterización).

tico el proceso productivo del combustible fósil y algunos agroquímicos. En la categoría “ecotoxicidad acuática” el impacto es consecuencia de la aplicación de herbicidas e insecticidas y su posible flujo hacia cursos de agua superficial y/o agua subterránea.

El impacto de la producción de insecticidas es evidente en la categoría “agotamiento de metal”.

En cuanto a “eutrofización” y “toxicidad humana”, la producción de herbicidas contribuye en un 74% y 65,6% respectivamente.

Sin embargo, los resultados mostraron en la etapa de normalización que el mayor impacto resulta en la categoría “ecotoxicidad acuática”, debido al proceso productivo de agroquímicos, y en menor medida a la producción del combustible fósil utilizado. Además, la producción de sorgo no presenta una contribución significativa en la categoría “cambio climático”.

CONCLUSIONES

Los resultados expuestos en este estudio permitirán hacer más eficiente el manejo agronómico del cultivo de sorgo azucarado con fines bioenergéticos a través del análisis de los puntos más críticos.

El perfil ambiental estimado permitirá optimizar el uso de agroquímicos, como así también generar cambios en la apreciación y la elección de los mismos, buscando no solo un efecto sanitario sino también generar el menor impacto ambiental posible. Favorecerá también análisis orientados a reducir el número y la duración de labores mecanizadas y mejorar la eficiencia en el uso de la maquinaria (minimización de los tiempos muertos). En este sentido, los resultados obtenidos pueden ser utilizados para la elección de zonas factibles de ser cultivadas en relación a su localización respecto de las industrias

Dada la factibilidad de industrializar el sorgo azucarado para producción de bioetanol, surge la necesidad de realizar estudios de LCA del bioetanol de sorgo, desde la extracción de materia prima (producción agrícola de sorgo) hasta la fabricación del bioetanol (enfoque “de la cuna a la puerta”). Esto constituye un aporte al análisis de la sustentabilidad de los biocombustibles teniendo en cuenta las características de la producción local.

Las experiencias realizadas en un ingenio azucarero proporcionaron los primeros datos para la confección preliminar de un LCIA y la planificación de mediciones de emisiones en una próxima zafra.

Estas iniciativas de investigación servirán al sector productivo tucumano para diversificarse y concretar objetivos claros para obtener una mejor disponibilidad de energía renovable.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Ahmad Dar, R.; E. Ahmad Dar; A. Kaur y U. Gupta Phutela. 2018. Sweet sorghum-a promising alternative feedstock for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 4070-4090

Amaducci, S.; M. Colauzzi; F. Battini; A. Fracasso and A. Perego, 2016. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on the production of biogas from maize and sorghum in a water limited environment. *Eur. J. Agron.* 76: 54-65.

Brentrup, F.; J. Küsters; H. Kuhlmann and J. Lammel.

2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. *Europ. J. Agronomy* 20: 247-264.

Chidiak, M.; L. Panichelli; G. Rabinovich; A. Buyatti; C. Filipello; G. Rozenwurcel; M. Fuchs y R. Rozenberg. 2015. Estudio Piloto: Indicadores GBEP de Sustentabilidad de la Bioenergía en Argentina. Centro iDeAS de la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Bs.As., Argentina. [En línea] Disponible en https://www.agroindustria.gov.ar/sitio/areas/bioenergia/sustentabilidad/_archivos//000001_Indicadores%20de%20Sustentabilidad%20de%20Bioenerg%C3%ADa%20Argentina/000001_Indicadores%20de%20Sustentabilidad%20de%20Bioenerg%C3%ADa%20Argentina.pdf (consultado abril 8 de 2017).

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.

Garofalo, P., P. Campi, A. V. Vonella and M. Mastrorilli. 2018. Application of multi-metric analysis for the evaluation of energy performance and energy use efficiency of sweet sorghum in the bioethanol supply-chain: A fuzzy-based expert system approach. *Applied Energy* 220: 313-324.

Garolera De Nucci, L. P. 2017. Análisis de Ciclo de Vida de la producción de bioetanol en Tucumán. Trabajo final integrador de especialización. UTN, Facultad Regional Tucumán, Tucumán, Argentina.

Goedkoop, M.J.; R. Heijungs; M. Huijbregts; A. De Schryver; J. Struijs and R. van Zelm. 2008. ReCiPe. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition Report I: Characterisation; 6 January 2009. [En línea] Disponible en <http://www.lcia-recipe.net>

Huijbregts, M. A. J.; Z. J. N. Steinmann; P. M. F. Elshout; G. Stam; F. Verones; M. D. M. Vieira; A. Hollander and R. Van Zelm. 2016. ReCiPe2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. RIVM Report 2016-0104. Bilthoven, The Netherlands. [En línea] Disponible en http://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/Downloads/Documents_ReCiPe2017/Report_ReCiPe_Update_2017

Nemecek, T and T. Kägi. 2007. Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production Systems. Final Report ecoinvent2.0 N°15a. Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich and Dübendorf, CH, retrieved from: www.ecoinvent.ch

Olukoya, I.A.; D. Bellmer; J.R. Whiteley and C.P. Aichele. 2015. Evaluation of the environmental impacts of ethanol production from sweet sorghum. *Energy for Sustainable Development* 24: 1-8.

Pieragostini, C. 2014. Diseño y planificación óptimos de la producción de bioetanol a partir de maíz en Argentina incluyendo análisis de ciclo de vida. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Litoral Facultad de Ingeniería Química. Santa Fe, Argentina. [En línea] Disponible en <http://bibliotecavirtual.unl.edu>

- ar:8080/tesis/bitstream/handle/11185/773/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y (consultado abril 10 de 2017).
- PRéConsultants. SimaPro® v8.** [En línea] Disponible en <http://www.pre-sustainability.com/simapro-lca-software> (consultado mayo 22 de 2018).
- Romero, E. R.; G. J. Cárdenas; M. Ruiz; S. Casen; P. Fernández González; A. Sánchez Ducca; B. S. Zossi; G. De Boeck; C. Gusils; J. Tonatto; M. Medina; R. Caro y J. Scandalariis.** 2012. Integración del sorgo azucarado a la cadena de aprovechamiento bioenergético de la caña de azúcar en Tucumán, R. Argentina. *Avance Agroind.* 33(1):13-17.
- Serra, P.; J. Giuntoli; A. Agostini; M. Colauzzi and S. Amaducci.** 2017. Coupling sorghum biomass and wheat straw to minimize the environmental impact of bioenergy production. *Journal of Cleaner Production* 154: 242-254.
- Swiss Centre for Life Cycle Inventories.** 2015. EcoinventDatabase v3.1, Dübendorf, Switzerland. [En línea] Disponible en <http://www.ecoinvent.org> (consultado diciembre 12 de 2015).