

Análisis de Sensibilidad de un Caso del Noroeste Argentino de Ciclo de Vida de la Industria del Azúcar y del Bioetanol de Caña de Azúcar

Andrea Lorena Nishihara Hun¹ & Fernando Daniel Mele

(1) *Departamento de Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.*
anishihara@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta un análisis de sensibilidad del análisis de ciclo de vida de la producción de azúcar y bioetanol según las prácticas de la región noroeste de la Argentina. De los resultados se desprende que el sistema de estudio no es sensible a los cambios en el consumo de agua y poco sensible al parámetro consumo de gas natural, pero sí demuestran ser muy sensibles a las variaciones en las emisiones al aire

1 INTRODUCCIÓN

La producción de energía es vital para el crecimiento económico y la reducción de la pobreza. No obstante, es de conocimiento general que ante el inevitable agotamiento de las fuentes de energía no renovables del planeta y la contaminación generada por el uso de estas fuentes, urge redefinir conceptos y elaborar políticas energéticas sustentables.

En la actualidad, los combustibles fósiles proveen algo más del 90% del total de las necesidades globales de energía, con el petróleo como fuente líder. En las últimas décadas, las reservas de petróleo no han aumentado significativamente, mientras que el consumo aumenta en los países desarrollados y en las grandes naciones en vías de desarrollo. Siendo el transporte la actividad humana de mayor consumo de energía, este sector ha alcanzado hoy un volumen de actividad tal que los problemas ambientales generados son cada vez más importantes: dependencia casi total del petróleo, baja eficiencia energética y producción de gases de efecto invernadero (GHG).

La introducción de biocombustibles en el sector del transporte es una de las medidas propuestas para paliar este problema. Son una fuente de energía autóctona, técnicamente viable, y que tiene el potencial de reducir sustancialmente las

emisiones de CO₂ (Lechón y otros, 2006). Muchos países han implementado políticas para regular la producción de biocombustibles y la Argentina no es una excepción. En 2006 se aprobó la Ley 26.093 –marco para el régimen de regulación y promoción de la producción y uso de biocombustibles–, exigiéndose inicialmente una cuota de 5% de bioetanol y biodiesel para la nafta y el gasoil, respectivamente, a partir del año 2010. Así, la industria sucroalcoholera se vio ante el reto de producir con alta calidad para satisfacer la demanda de los consumidores.

Sin embargo, los productores argentinos necesitan estudiar el desempeño ambiental de su producto para cumplir con criterios de sostenibilidad (Farrell et al. 2006). La Argentina como productora de etanol de caña de azúcar podría no resultar competitiva desde el punto de vista ambiental, a menos que se implementen medidas específicas. Estas medidas tienen que ver con evitar la deforestación, aplicar técnicas agrícolas sustentables, usar pesticidas de baja toxicidad y mejorar las tecnologías para reducir y tratar los grandes volúmenes de aguas residuales (vinazas) generados.

El propósito de este trabajo es el de enriquecer el trabajo que el grupo de investigación al que pertenecen los autores (Nishihara Hun et al 2013) ha venido realizando para obtener un perfil



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



ambiental fiable de la industria argentina del azúcar y del bioetanol de caña de azúcar utilizando como herramienta el Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Con esto será posible identificar las actividades del ciclo de vida que causen los principales impactos. Además, surgirán algunas pautas para la mejora ambiental de la industria.

2 ANTECEDENTES

A pesar de los beneficios potenciales del bioetanol derivado de la caña de azúcar, hay algunos inconvenientes asociados con este biocombustible, tal como la competencia con los alimentos por la tierra, el impacto asociado al sector de transporte durante las tareas agrícolas y logísticas, y la generación de grandes cantidades de vinazas durante el proceso. Este marco complejo plantea desafíos significativos tanto para profesionales como para investigadores. En particular, uno de los aspectos claves que no se ha tenido en cuenta hasta ahora es la evaluación del impacto ambiental de la producción de etanol en la Argentina desde la perspectiva del LCA, tal como se ha hecho en el caso de la producción argentina de biodiesel. Como ejemplos de aplicaciones al caso de biodiesel argentino de soja se encuentran los trabajos de Asal et al. (2006), Panichelli et al. (2009), y Tomei y Upham (2009). Con respecto al LCA aplicado al etanol de caña de azúcar, algunas contribuciones relevantes que aparecen en la literatura se refieren a la producción en otros países (Sánchez y otros, 2007, Ometto et al. 2009; Renouf et al. 2011). El primer trabajo presenta una aproximación cualitativa del LCA de la producción del etanol de caña de azúcar en Colombia, mientras que los dos restantes se refieren a casos de estudio en Brasil y Australia, respectivamente.

Hay varias razones para evaluar el etanol de caña de azúcar en la Argentina desde el punto de vista del LCA: (i) El etanol combustible derivado de la caña de azúcar se basa en recursos renovables, en contraste con otros tipos de combustible; (ii) La caña de azúcar da lugar a una de las principales actividades económicas en las zonas rurales del NOA, con muchas implicaciones ambientales y sociales; (iii) Un enfoque local específico es crucial en la evaluación de los impactos ambientales de los sistemas de bioenergía

mediante LCA: las condiciones locales, tales como las prácticas agrícolas, el cambio en el uso del suelo y las infraestructuras de transporte, tendrán un impacto importante en el desempeño ambiental del sistema; (iv) muchas etapas del ciclo de vida del etanol en la Argentina han permanecido inalteradas desde hace mucho tiempo por lo cual la mejora potencial es sustancial; es posible cogenerar electricidad a partir del residuo sólido, y reciclar parte de las corrientes de desecho; (v) los productores de etanol argentinos necesitarán evaluar el desempeño ambiental de su producto para cumplir con los criterios de sustentabilidad que se les imponga.

Los pasos posteriores al estudio de LCA son su extensión mediante la realización de un análisis de sensibilidad de parámetros, un análisis de incertidumbre y el uso de los resultados en el marco de un problema de optimización (multiobjetivo) en el que se consideren los criterios económicos y ambientales al mismo tiempo. Como antecedentes de esta última línea se encuentran los trabajos de Zamboni y col. (2009) y Mele y col. (2011).

Otras aplicaciones de LCA a la industria del etanol de caña de azúcar se encuentran en los trabajos de Lechon y otros (2005), Arvidsson y otros (2012), Wiloso y otros (2012), Kiatkittipong y otros (2009), Grillo Renó y otros (2011) y Zah y otros (2009).

3 IMPORTANCIA DEL TEMA

El análisis de sensibilidad busca investigar los efectos producidos por los cambios del entorno sobre el sistema.

El propósito general es identificar los parámetros relativamente sensibles, con el fin de estimarlos con mayor precisión y así tener una idea cuantitativa de la influencia que tendrá la incertidumbre de esos parámetros en los resultados del perfil ambiental que surge de un estudio de LCA.

Los valores de entrada de un estudio de LCA (flujos de energía y materiales, y factores de caracterización), la mayoría de las veces son estimaciones; por lo tanto es necesario investigar



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



o tener en cuenta más de un conjunto de casos posibles.

El análisis de sensibilidad mide cuánto pueden llegar a afectar a los resultados de un estudio de LCA variaciones relativamente pequeñas en los valores de los parámetros.

Uno de los presupuestos básicos del análisis de sensibilidad, y que no tiene por qué cumplirse en todos los casos, es que el papel que cada parámetro tiene en el modelo es una representación razonable de su papel en el sistema. De este modo la sensibilidad del modelo al parámetro será equivalente a la sensibilidad del sistema al parámetro.

El análisis de sensibilidad suele hacerse ejecutando el modelo para diversos valores del parámetro cuya sensibilidad quiere calcularse dejando fijos todos los demás. Sin embargo la sensibilidad a un parámetro dependerá de los valores adoptados por los demás parámetros, con lo que puede ser más complejo hacer un análisis de sensibilidad. Otra consideración importante es que si el modelo es muy sensible a un parámetro pero este varía muy poco en la realidad (o la incertidumbre asociada es muy pequeña), dicha sensibilidad no va a ser relevante.

METODOLOGÍA

Los datos utilizados en el presente trabajo provienen de un complejo industrial ingenio-destilería del NOA. Éste está integrado por una planta que fabrica azúcar (ingenio) acoplada a una planta que produce etanol (destilería) a partir de melaza.

Como límite temporal, se consideró un año de cosecha (zafra), del 28 de mayo al 18 de noviembre de 2010.

Para la definición de los límites espaciales del sistema se utilizó el enfoque “de la cuna a la puerta”, es decir desde el cultivo de la materia prima, caña de azúcar, hasta la obtención del azúcar y del bioetanol como productos terminados.

Este sistema global se dividió en tres subsistemas, a saber: Campo, Ingenio y Destilería.

En el subsistema Campo, se siembra la caña, se suministran fertilizantes para su crecimiento y

herbicidas para el control de plagas, se cosecha la caña y se transporta al ingenio azucarero.

En el subsistema Ingenio azucarero, se obtiene como producto el azúcar y como subproductos el bagazo, cachaza y melaza (miel final agotada). La melaza es enviada a la destilería, la cachaza se recicla al subsistema Campo y el bagazo se reutiliza en el mismo ingenio no constituyendo una salida neta. Se consideró, según la práctica habitual, que el bagazo no es un residuo sino que es quemado en las calderas para generar energía en la propia planta.

En el subsistema Destilería ingresa la melaza y mediante fermentación, destilación y otros procesos se obtiene primero alcohol 96°, y a partir de éste, alcohol absoluto o anhidro de concentración superior a 98 % vol./vol. Por otra parte, la vinaza, principal efluente líquido del sub-sistema destilería, se consideró destinada al fertirriego de los campos de la empresa.

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del LCA, y qué cargas ambientales se estudiarán y a qué nivel de detalle. Como unidad funcional se tomó un 1 mega joule (1 MJ) de energía obtenida a partir del etanol anhidro producido.

Se identificaron y cuantificaron las entradas y salidas de energía y materiales de cada subsistema (fase de inventario del LCA). El 90% de los datos fueron proporcionados por la empresa. El 10% restante, tal como algunas emisiones al aire, agua y suelo con cuya información no se contaba, fueron obtenidos de la bibliografía (Renouf y otros, 2008). Como método de asignación se usó la asignación por masa.

El estudio de LCA se hizo con la ayuda del programa SimaPro® usando como modelo de evaluación de impacto (fase de evaluación de impacto del LCA) el CML 2001 (elaborada por el Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden de los Países Bajos). los resultados del caso base se encuentran publicados en el trabajo de CILCA 2013 antes mencionado y que no se ponen aquí por razones de espacio.

Respecto al análisis de sensibilidad, los parámetros seleccionados para realizar este estudio fueron: consumo de agua, consumo de gas natural y las emisiones al aire de los sub-sistemas Campo e Ingenio. Todos estos parámetros fueron



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



variados en $\pm 20\%$ del valor que se expresan en los inventarios, por lo que se plantearon 6 escenarios a analizar. Ver Tabla 1.

Tabla 1 Escenarios planteados

	Campo	Ingenio	Destilería
Escenario1	-	+20% agua	+20% agua
Escenario2	-	-20% agua	-20% agua
Escenario3	-	+20% gas natural	+20% gas natural
Escenario4	-	-20% gas natural	-20% gas natural
Escenario5	+20% emisiones aire	+20% emisiones aire	-
Escenario6	-20% emisiones aire	-20% emisiones aire	-

4 CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

A continuación se exponen los resultados obtenidos:

- Parámetro “consumo de agua”: se observa que tanto el sistema general como los subsistemas no presentan ninguna modificación en los valores de las categorías de impacto.

- Parámetro “consumo de gas natural”:

o Sub-sistema Campo: no presenta modificaciones, ya que el consumo de este combustible fósil, fue variado para los subsistemas ingenio y destilería.

o Sub-sistema Ingenio: como se observa en la Figura 1 las categorías de impacto que variaron, son las que se muestran en la misma, de todos modos la variación alcanzó valores de hasta 1.01%, correspondiente a la categoría de “abiotic depletion” o agotamiento de recursos abióticos, siguiéndole la categoría “acidification”, con una variación del 0.22%.

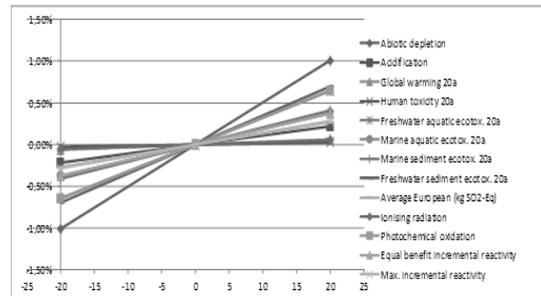


Figura 1 Sub-sistema Ingenio - Sensibilidad Gas Natural

o Sub-sistema Destilería: la categoría “abiotic depletion” presenta una variación más menos 11.2%, siguiéndole la categoría “malodours air”, con un 9.57%, como se observa en la Figura 2

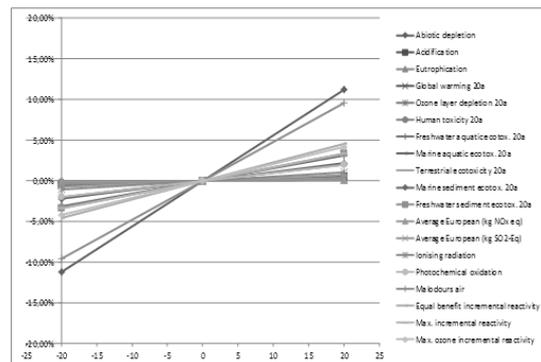


Figura 2 Sub-sistema Destilería - Sensibilidad Gas Natural

- Parámetro “emisiones al aire”:

o Sub-sistema Campo: se observa una variación importante en las siguientes categorías de impacto, “acidificación” con una variación del 15.79%, en “emisiones de NOx” un 17.21%, en “emisiones de SO2” un 15.61% y en “eutrofización” del 8.35%, Ver Figura 3.



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013

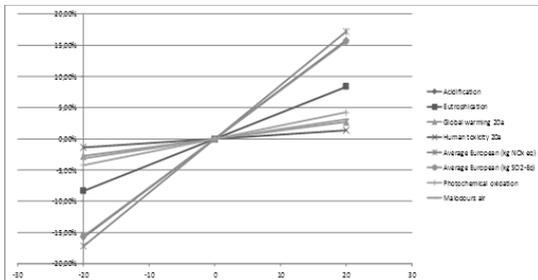


Figura 3 Sub-sistema Campo- Sensibilidad Emisiones al Aire

o Sub-sistema Ingenio: varían considerablemente las siguientes categorías de impacto: “emisiones de NOx” un 17.85%, “emisiones de calentamiento global” 17,18% “acidificación” 17.05%, “emisiones de SO2” un 16.32%, “oxidación fotoquímica” 11.84% y “eutrofización” 9.91%. Figura 4

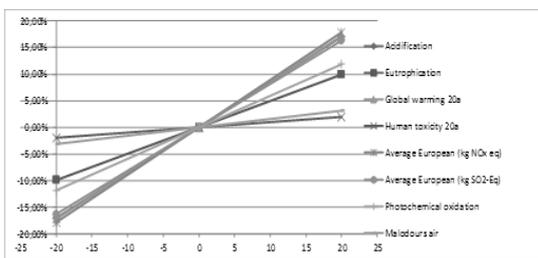


Figura 4 Sub-sistema Ingenio - Sensibilidad Emisiones al Aire

o Sub-sistema Destilería: se destaca la variación de las siguientes categorías de impacto: “emisiones de NOx” 17,69%, “emisiones de SO2” 15.05%, “acidificación” 15.8%, “eutrofización” 9.61%, “emisiones de calentamiento global” 9.45%, “oxidación fotoquímica” 9.28%. Figura 5

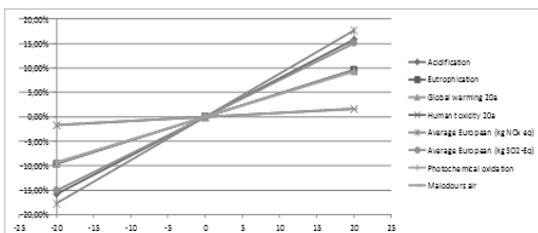


Figura 5 Sub-sistema Destilería - Sensibilidad Emisiones al Aire

5 CONCLUSIONES

De los resultados antes expuestos, se desprende que el sistema de estudio no es sensible a los cambios en el consumo de agua y poco sensible al parámetro consumo de gas natural. En cambio, sí demuestran los resultados del LCA ser sensibles a las variaciones en las emisiones al aire, por lo que estos parámetros son los que deberían continuar estudiando en un subsecuente análisis de incertidumbre.

6 REFERENCIAS

- Ardvisson, R., Fransson, K., Fröling, M., Svanström, M., & Molander, S. Energy use indicators in energy and life cycle assessments of biofuels: review and recommendations, *Journal of Cleaner Production*, 31, 54-61, 2012.
- Asal S, Marcus R. & Hilbert JA. Opportunities for and obstacles to sustainable biodiesel production in Argentina, *Energy for Sustainable Development* 10(2): 48-58, 2006.
- Farrell AE, Plevin RJ, Turner BT, Jones AD, O'Hare M. & Kammen DM. Ethanol can contribute to 408 energy and environmental goals, *Science* 311(5781):506-508, 2006.
- Grillo Renó, M.L., Silva Lora, E.E., Escobar Palacio, J.C., Venturini, O.J., Buchgeister, J. & Almazan, O. A LCA (life cycle assessment) of methanol production from sugarcane bagasse, *Energy*, 36, 3716-3726, 2011.
- Kiatkittipong, W., Wongsuchoto, P. & Pasavant, P. Life cycle assessment of bagasse waste management options, *Waste Management, Waste Management*, 29 (5), 1628-1633, 2009.
- Lechón, Y., Cabal, H., de la Rúa, C., Lago, C., Izquierdo, L., Sáez, R. & San Miguel, M. Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte, *Informe Técnico del Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas y del Ministerio de Medio Ambiente*, 2006.
- Mele FD, Kostin A, Guillén-Gosálbez G. & Jiménez L. Multiobjective Model for More Sustainable Fuel Supply Chains. A Case Study of the Sugarcane Industry in Argentina, *Industrial & Engineering Chem. Res.* 50, 4939-4958, 2011.
- Nishihara Hun, A., Mele, F.D. & Hernández M.R. Environmental Study of the Sugar and



IX JORNADAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE FACULTADES DE INGENIERÍA DEL NOA

Santiago del Estero, 3 y 4 de Octubre de 2013



- Bioethanol Industry based on Sugarcane by using a Life-Cycle Assessment Approach. A Case Study in the Northwest of Argentina. *V International Conference on Life Cycle Assessment CILCA*, 261-266, 2013.
- Ometto AR, Hauschild MZ. & Roma, WNL. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. *Int J Life Cycle Assess* 14:236–247, 2009.
- Panichelli L., Dauriat A. & Gnansounou E. Life cycle assessment of soybean-based biodiesel in Argentina for export. *Int J Life Cycle Assess* 14:144–159, 2009.
- Renouf MA., Pagan RJ. & Wegener MK. Life cycle assessment of Australian sugarcane products with a focus on cane processing. *Int J Life Cycle Assess* 16:125–137, 2011.
- Renouf, M.A., Wegener, M.K. & Nielsen, L.K. An environmental life cycle assessment comparing Australian sugarcane with US and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation, *Biomass and Bioenergy*, 32, 1144-1155, 2008.
- Sánchez, O., Cardona, C. & Sánchez, D. Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: una aproximación cualitativa, *Revista Universidad EAFIT*, Vol. 43 N° 146, 59-79, 2007.
- Tomei J. & Upham P. Argentinean soy-based biodiesel: An introduction to production and impacts, *Energy Policy* 37: 3890–3898, 2009.
- Wiloso, E., Heijungs, R. & de Snoo, G. LCA of second generation bioethanol: A review and some issues to be resolved for good LCA practice, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5295-5308, 2012.
- Zah, R., Faist, M., Reinhard, J. & Birchmeier, D. Standardized and simplified life-cycle assessment (LCA) as a driver for more sustainable biofuels, *Journal of Cleaner Production*, 17, S102-S105, 2009.
- Zamboni, A.; Bezzo, F.; Shah, N. Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems. 2. Multiobjective environmental optimization, *Energy Fuels* 23, 5134–5143, 2009.