



EVALUACIÓN EMERGY Y LCA EN LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA DE VERACRUZ, MÉXICO

Emergy and LCA evaluation of sugar industry in Veracruz, Mexico

Noé Aguilar-Rivera✉, Jorge Alejandro-Rosas y Rubén Espinosa-López

ABSTRACT. The sugar industry in Veracruz Mexico participates with 37,3 % of the national production of sucrose and integrates agricultural activities as growing, harvesting and transportation of sugarcane with industrial production in sugar mills. However, it faces challenges related to the fall in agricultural productivity practices derived from conventional crop management, the climate change and other socio-economic issues that threaten the conversion and diversification of sugar industry. So it requires innovative methodologies of analysis to determine critical points that threaten the environmental and economic sustainability. The goal of this term paper was to evaluate the production of the sugarcane in the supply areas of Veracruz Mexico by emergy analysis and LCA by analyzing several non-renewable and natural inputs related to the production of sugarcane per hectare. It was determined that the environmental and economic inputs for sugarcane system in Veracruz demand is high for nitrogen and phosphate fertilizer with a percentage of 27,2 %, labor 12,1 % and services 40,78 % of the total. The remaining 19,92 % is in order of the importance to fuels and operation of agricultural machinery in the process of planting and management, pesticides and potassium fertilization, and the stage of harvesting and transportation are the most significant with 64,65 % of total CO₂ emissions which establishes the need of restructuring the sugarcane crops field to reduce production costs and environmental impacts to increase profitability.

Key words: sugar, soil productivity, profitability, fertilization, agricultural machinery

RESUMEN. La agroindustria azucarera de Veracruz, México participa con el 37,3 % de la producción nacional de azúcar e integra actividades agrícolas, de cosecha y de transporte de caña de azúcar con la producción industrial en ingenios azucareros. Sin embargo, enfrenta retos relacionados con la caída de la productividad agrícola derivados de las prácticas convencionales de manejo del cultivo, el cambio climático y otros aspectos socioeconómicos que ponen en riesgo la reconversión de la agroindustria, por lo que requiere metodologías multidisciplinares de análisis para determinar puntos críticos que amenazan la sostenibilidad ambiental y económica. El objetivo de este trabajo fue evaluar la producción de caña de azúcar en las zonas de abastecimiento de los ingenios de Veracruz, México por el análisis emergy y LCA mediante el análisis de los insumos naturales y no renovables por hectárea de caña de azúcar. Se determinó que la carga ambiental y económica del sistema cañero veracruzano es elevada en la demanda de fertilización nitrogenada y fosfórica con un porcentaje de 27,2 %, mano de obra 12,1 % y servicios 40,78 % del total. Posteriormente, el 19,92 % corresponde en orden de importancia a combustibles y operación de maquinaria agrícola en la etapa de siembra y manejo, pesticidas y fertilización potásica y las etapas de cosecha y transporte que son las más significativas al totalizar el 64,65 % de emisiones de CO₂, lo que establece la necesidad de reestructurar el campo cañero veracruzano para disminuir costos de producción y la carga ambiental para incrementar la rentabilidad.

Palabras clave: azúcar, productividad del suelo, rentabilidad, fertilización, maquinaria agrícola

INTRODUCCIÓN

La agroindustria azucarera, como sistema socio-ecológico, es una de las empresas más importantes en el mundo, de alto impacto social, económico y

espacial por la obtención de un producto básico para la alimentación humana de alta calidad y pureza, además de la diversificación del uso de la caña de azúcar y subproductos de procesamiento como biorefinerías y por su contribución con la generación de empleo especialmente en áreas rurales, con el desarrollo sostenible y las economías nacionales. Sin embargo, el aumento progresivo de los costos de producción de campo, cosecha y fabricación de azúcar en el sector azucarero, los retos de competitividad global, regional

Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, km. 1 carretera Peñuela-Amatlán S/N. C.P. 94945, Córdoba Veracruz México.

✉ naguilar@uv.mx

y local (productividad, diversificación, innovaciones, gestión, servicios ambientales, I+D+I etc.), el necesario desarrollo de proyectos de biorefinerías, diversificación y reconversión productiva en centrales o ingenios azucareros, destilerías y unidades de producción cañera y los impactos ambientales en suelo, aire y agua de esta agroindustria, hacen necesaria la búsqueda de nuevas alternativas de producción eficaz, de nuevo conocimiento y el desarrollo de nuevas tecnologías que contribuyan significativamente a su sostenibilidad, las cuales incluyan el establecimiento de nuevos sistemas de producción de caña de azúcar y nuevos enfoques de estructura organizacional y análisis del sector para la formulación de alternativas de acción a mediano y largo plazos y políticas públicas diferenciadas (1) (Figura 1).

En este sentido, el cultivo es atractivo desde el punto de vista de las potencialidades de obtención de energía eléctrica, alimentos, biocombustibles y productos químicos, derivados de manera renovable a través del azúcar, etanol y la cogeneración eléctrica, debido a la alta eficiencia de esta gramínea C4 en la producción de biomasa, a partir de la energía solar. Sin embargo, la productividad primaria de la materia prima caña de azúcar (*Saccharum spp.*)

está restringida por múltiples factores ambientales y socioeconómicos y en este caso, las metodologías convencionales de análisis de sostenibilidad de la economía neo clásica con sus resultados obtenidos, no han logrado alcanzar la productividad potencial (>150 t ha⁻¹), es decir, la investigación sobre la interacción de estos efectos multicausales son aún precarios en las regiones cañeras de México, por lo tanto la determinación de puntos críticos del sistema agroindustrial es fundamental para tomar decisiones en el corto y mediano plazo.

En este sentido, los sistemas agrícolas en general, así como la caña de azúcar, en lo particular, dependen de las aportaciones de la naturaleza (precipitación, suelo, radiación, vientos, etc.) y de la economía de la agricultura intensiva (insumos como agroquímicos, mano de obra, maquinaria agrícola, combustibles y otros) por lo general, de alta calidad, importados y no renovables, por lo tanto, es necesario para tener en cuenta, la necesidad de instrumentos metodológicos de comparación de los recursos e insumos de los diferentes sistemas agrícolas, para tener una visión holística e integradora de los insumos aplicados y los factores limitantes de gran dispersión espacial e impacto (sociales, culturales, económicos, energéticos, biológicos, climáticos, geofísicos) (2, 3, 4, 5).

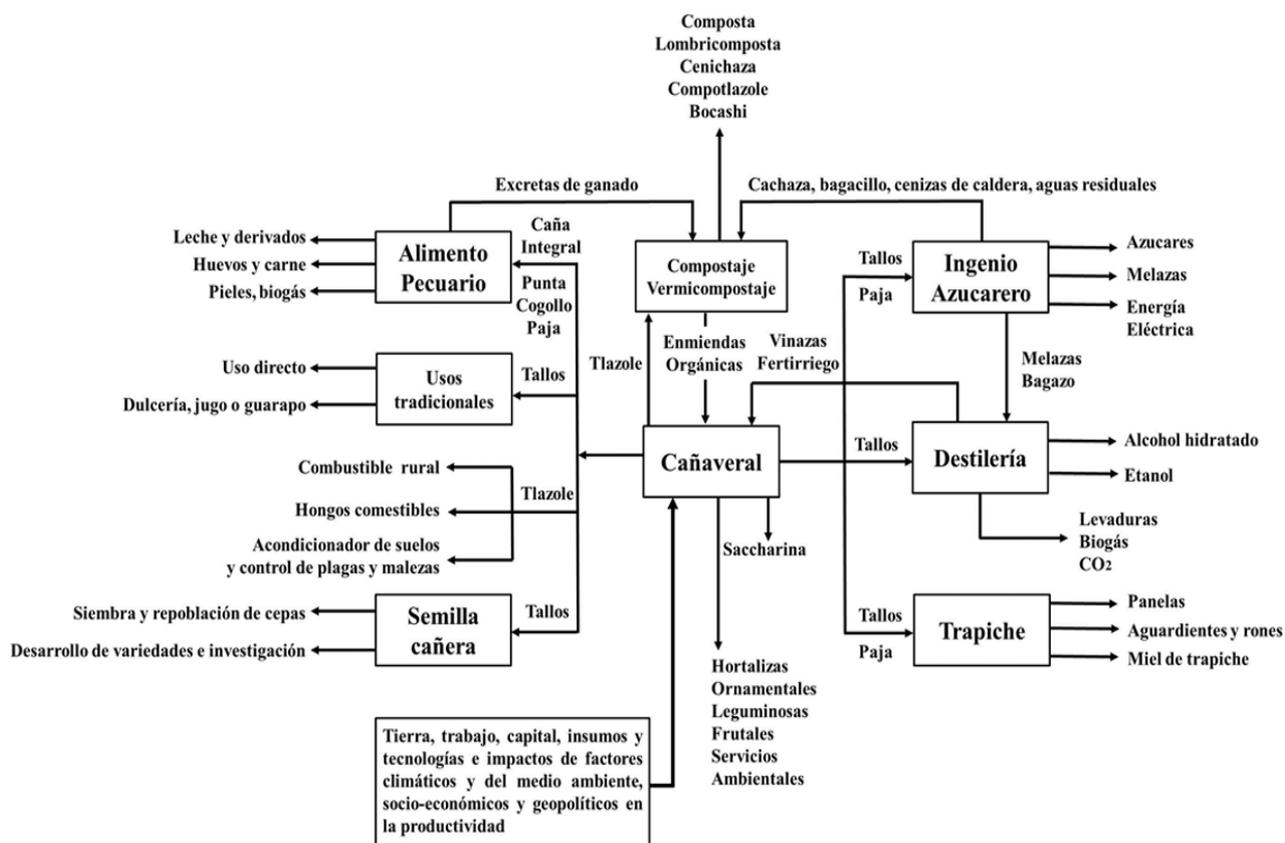


Figura 1. Integración productiva en la agroindustria de la caña de azúcar.

Así un paso fundamental para maximizar las oportunidades y las ventajas comparativas y competitivas regionales basadas en la diversificación o reconversión productiva, es dar seguimiento a los procedimientos de evaluación como instrumentos decisivos para la toma de decisiones. En este sentido, la Economía Ecológica es una ciencia que usa la Teoría General de Sistemas, la Ecología Sistémica, y la Termodinámica de los Sistemas Abiertos para analizar la realidad, explicitar su complejidad y mostrar su dinámica a través de diversas metodologías como *Emergy* o síntesis emergética, análisis de ciclo de vida (LCA) y Evaluación Multicriterio (EMC) entre otros.

En la agroindustria azucarera, el objetivo de estas metodologías de gestión ambiental es analizar la producción de caña de azúcar con criterios energéticos para identificar sistemas más sustentables con menos insumos y emisiones, identificando oportunidades en las etapas de plantación, cultivo, cosecha y transporte en caña planta, soca y resoca, cultivo, cosecha y transporte, así mismo llevando a cabo un inventario de insumos energéticos usados, convertidos a su equivalente en energía y valores de eficiencia energética, comparando sistemas de tipo tradicional (cosecha integral con quema, plantación manual y uso de agroquímicos), de caña verde (cosecha integral sin quema, plantación manual, uso de rastrojos para cobertura y biofertilizantes), energético (cosecha integral sin quema, plantación mecánica y uso de cachaza y biofertilizantes) y ecológico para la producción de panela y otros derivados (6).

La síntesis emergética o *eEmergy*, se fundamenta en el estudio de los flujos biogeofísicos y socio-económicos de materia y energía que se intercambian

entre los elementos constituyentes de los sistemas socio-ecológicos bajo una misma base (7, 8). Es decir, el término *EMergia* se define como la cantidad de energía que ha sido empleada de forma directa o indirecta en la generación de un determinado bien o servicio con el objetivo de analizar las diferentes contribuciones de flujos energéticos (naturaleza y economía) bajo una unidad común el emjoule *solar* (seJ).

La Intensidad Emergética equivale al valor real del producto, o sea, toda la *emergia* utilizada en la producción de una determinada cantidad del producto.

Existen tres principales tipos de Intensidad Emergética: Transformidad (en seJ J⁻¹), *Emergia* Específica (en seJ g⁻¹) y *Emergia* por Unidad Monetaria (en seJ \$⁻¹). La transformidad de un producto mide la calidad de energía y su posición jerárquica en la *emergia* universal, la cual se obtiene a partir de la suma de todas las entradas de *emergia* solar del proceso (en seJ) y se divide por la *emergia* proveniente del producto final (en J).

Cuanto mayor sea el número de transformaciones de energía necesaria para la elaboración de un producto o la ejecución de un proceso, mayor será el valor de su transformidad, siendo mayor también la importancia del recurso para los ecosistemas y para los seres humanos (9). Este abordaje posibilita visualizar y cuantificar de forma dinámica los flujos de los recursos naturales, servicios ambientales provenientes de la naturaleza y de los impactos de actividades antrópicas, permitiendo la comprensión de los límites en cada ecosistema y el establecimiento de metas y objetivos para garantizar la capacidad de soporte, es decir, determina la sustentabilidad de los sistemas (Figura 2).

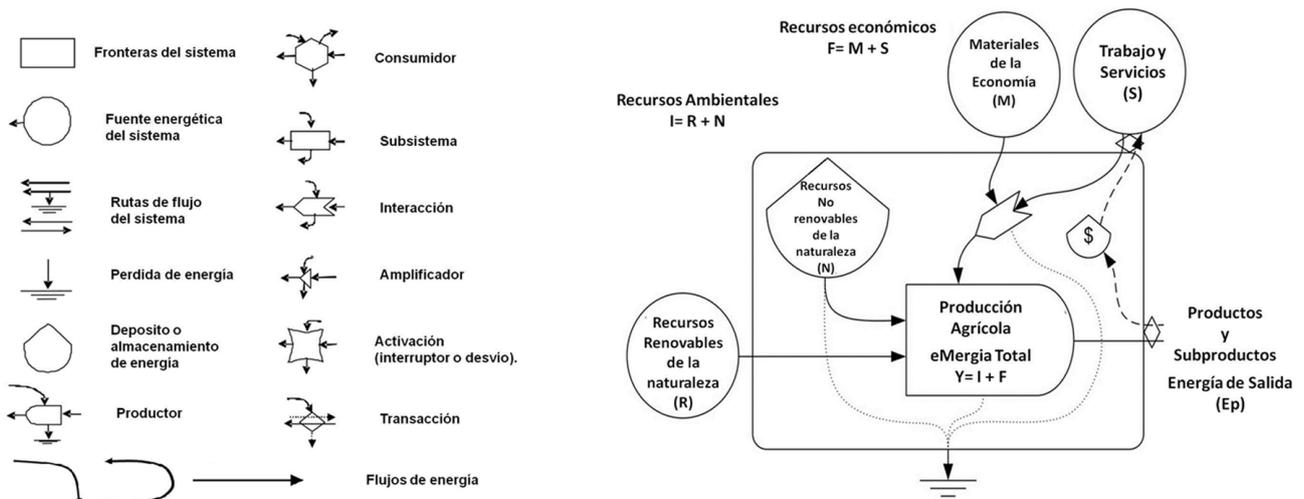


Figura 2. Símbolos y diagrama emergético de sistemas agrícolas^A (10).

^A Huertas, P.L.L. *Aportaciones de la síntesis emergética a la evaluación multi-escalar del empleo de los servicios de los ecosistemas a través de casos de estudio* [Disertación Doctoral], Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España, 2009, 269 p.

Para caña de azúcar, los estudios de análisis emergéticos^{B, C}(11, 12, 16) se han enfocado en su mayoría a la producción de etanol con el sistema agrícola convencional.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (LCA)

Diversas metodologías han sido desarrolladas en el área de gestión ambiental, como el concepto de ciclo de vida (LCA) que involucra el análisis, documentación y cuantificación de las cargas ambientales de la vida completa de un producto y su servicio asociado. La metodología LCA, además de permitir un seguimiento sobre cada uno de los pasos del proceso de producción de caña de azúcar y sus derivados determina cuáles son los impactos más significativos para cuantificar y les asigna un ecopuntaje (huella ecológica); por lo tanto, LCA proporciona una evaluación holística e integral del impacto ambiental de bienes, procesos y productos, considerando las emisiones gases de efecto invernadero, potencial de acidificación, eutrofización equivalente por tonelada de caña, para identificar los puntos críticos del sistema y en el caso particular de la agroindustria azucarera, con fines de diversificación productiva y transición a biorefinerías (13, 14, 15, 16, 17, 18, 19).

AGROINDUSTRIA AZUCARERA DE VERACRUZ, MÉXICO

La agroindustria azucarera de Veracruz, México, integra actividades agrícolas de crecimiento, cosecha y transporte de caña de azúcar con la producción industrial en ingenios azucareros. Sin embargo, enfrenta retos relacionados con la caída de la productividad agrícola derivados de las prácticas convencionales de manejo del cultivo, el cambio climático y otros aspectos socioeconómicos que ponen en riesgo la seguridad alimentaria y la reconversión de la agroindustria en biorefinerías, en relación a este carbohidrato básico para la población.

En la zafra 2013/2014, constituye el principal cultivo perenne y agroindustrial del estado y aporta el 37,7 % (20,506,054 t) del total nacional de la producción de caña de azúcar, 40,7 % de la superficie cosechada (322,324 ha) y 37,3 % (2,244,154 t) del azúcar producido a nivel nacional en la última década; con un rendimiento de campo de 63,56 t ha⁻¹. Se localiza en 173 municipios y 50,596 unidades de producción que constituyen 22 zonas de abasto cañero para ingenios azucareros y trapiches piloncilleros del estado de Veracruz, y municipios vecinos de San Luis Potosí y Oaxaca (Figura 3); sin embargo, a nivel nacional en la década actual presentó una productividad de media a baja (Tabla I).

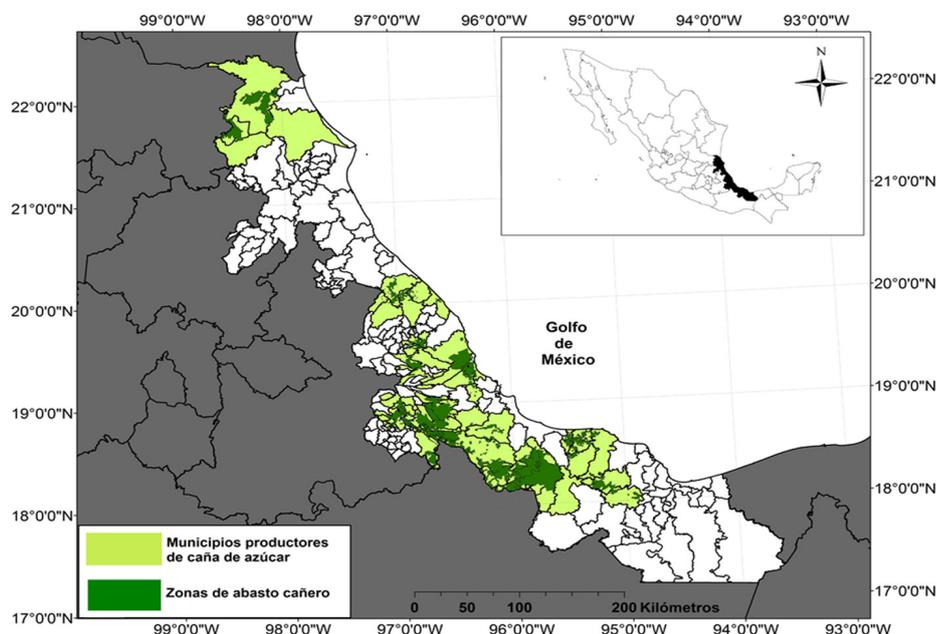


Figura 3. Zonas productoras de caña de azúcar en Veracruz, México.

^BAlonso-Pippo, W.; Rocha, J.D. y Mesa-Pérez, J.M. “Emergy evaluation of bio-oil production using sugarcane biomass residues at fast pyrolysis pilot in Brazil”, *Proceedings of IV Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies”*, Unicamp, Campinas, SP, Brazil, 2004, pp. 401–408.

^COmetto, A.R.; Roma, W.N.L. y Ortega, E. “Emergy life cycle assessment of fuel ethanol in Brazil” [en línea], (eds. Ortega, E. y Ulgiati, S.), En: *Proceedings of IV Biennial International Workshop «Advances in Energy Studies»*, Unicamp, Campinas, SP, Brazil, 2004, pp. 389–399, [Consultado: 15 de junio de 2015], Disponible en: <<http://www.unicamp.br/fea/ortega/energy/Ometto-1.pdf>>.

Tabla I. Indicadores de productividad de la industria azucarera en Veracruz^D.

Indicador/Zafra	2000/2001	2010/2011	Diferencia (%)
Ingenios	22	19	-13,64
Rendimiento de campo (t ha ⁻¹)	74,17	59,707	-19,50
Rendimiento agroindustrial (t ha ⁻¹)	8,111	6,984	-13,89
Superficie cosechada (ha)	241,256	270,902	+12,29
Sacarosa en caña (%)	13,490	13,982	3,65
Fibra en caña (%)	13,14	13,495	2,70
Operación del campo			
Frentes de corte (#)	21	19	-9,52
Cortadores (#)	1,732	1,719	-0,75
Vehículos de acarreo (#)	270	329	21,85
Caña cosechada mecánicamente (%)	7,110	9,709	36,55
Caña alzada mecánicamente (%)	76,281	85,309	11,84
Precio de caña neta (\$/Ton)	308,26	719,48	133,40
Fabrica de azúcar			
Caña molida neta (t)	17,262,712	15,618,455	-9,52
Perdidas de sacarosa (%)	2,25	2,318	3,02
Eficiencia de fábrica (%)	82,883	83,429	0,66
Rendimiento de fábrica (%)	11,01	11,70	6,27
Tiempos perdidos totales (%)	25,90	17,33	-33,09
Producción de derivados de la caña de azúcar (coproductos y subproductos)			
Sacarosa (t)	1,956,940	1,892,096	-3,31
Refinado (t)	807,053	696,354	-13,72
Estandar (t)	1,121,062	1,150,391	2,62
Mascabado (t)	28,825	45,351	57,33
Etanol (L)	41,778,451	5,196,380	-87,56
Rendimiento Etanol (L/t de miel)	290,75	231,695	-20,31
Melazas (t)	618,105	577,929	-6,50
Mieles a 85° Brix por tonelada de caña	36,048	35,730	-0,88
Mieles a 85° Brix a fabricación de alcohol (t)	70,907	22,428	-68,37
Cachaza (t)	741,761	742,867	0,15
Cachaza en caña (%)	4,487	4,593	2,36
Bagazo (t)	5,175,583	4,740,284	-8,41
Bagazo industrializado (t)	437,117	603	-99,86
Energía eléctrica por quema de bagazo (KWH)	268,846,821	272,440,824	1,34
Generación de vapor por quema de bagazo (t)	10,664,242	9,370,163	-12,13
Balance térmico y energético			
Consumo de energía eléctrica de CFE (KWH)	15,031,898	11,074,065	-26,33
Consumo de combustible externo (L petróleo)	296,437,388	65,441,521	-77,92
Petróleo consumido en fábrica por tonelada de caña (L)	13,575	3,490	-74,29
Consumo de energía eléctrica externa por tonelada de caña	16,527	17,528	6,06
Consumo de vapor por tonelada de caña	0,610	0,579	-5,08

Es decir, para el éxito de la reconversión a biorefinerías en Veracruz México, es necesario tomar como punto de partida el sector primario de la producción; es decir, el campo cañero, donde la problemática del sector rural en la agroindustria de la caña de azúcar de forma genérica, presenta un fenómeno que, entre otras cosas, muestra los siguientes rasgos: bajos ingresos y rendimientos por unidad de producción; fertilización deficiente; agricultores cañeros de unidades productoras

pequeñas (3 ha/productor); resistencia al cambio tecnológico, consecuencia de sus valores culturales y creencias; relaciones sociales; falta de aplicación de reglamentos y normatividad fitosanitarios, así como la forma de organización que determinan la presencia del círculo vicioso de bajos rendimientos - bajos ingresos - pobreza - marginación social, económica, ambiental y política. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la aplicación de metodologías de gestión ambiental y economía ecológica: eMergy y ciclo de vida (LCA) para el análisis de la sostenibilidad de zonas productoras de caña de azúcar en el estado de Veracruz.

^DSistema Infocaña [en línea], 2014, [Consultado: 15 de junio de 2015], Disponible en: <<http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/reportes/reportes.php?tipo=AVANCE>>.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se localiza en las 22 zonas de abasto cañero de Veracruz México (El Potrero, El Modelo, Providencia, Tres Valles, Zapoapita, La Gloria, Central Motzorongo, El Higo, Mahuixtlan, Central Progreso, Constanca, San Miguelito, San Nicolás, San Cristóbal, San José de Abajo, San Pedro, El Carmen, Cuatotlapam, Nuevo San Francisco, Independencia, La Concepción y San Gabriel), donde el clima es semicálido húmedo, con temperatura media anual de 25 °C. La precipitación pluvial media anual presenta un gradiente entre 1,200 y 2,000 mm. La humedad se distribuye principalmente durante el verano. El período de lluvias inicia a partir de mayo y termina en octubre. El mayor volumen pluvial se capta entre junio y septiembre, donde el mes de agosto es el que presenta la mayor precipitación.

Para el análisis emergético de la zona cañera de Veracruz, México, es decir, el inventario de entradas y salidas o estado e intercambio de materiales y energía, en cada una de las actividades de la producción de caña de azúcar, se basó en un rendimiento de 65 t ha⁻¹ promedio de las últimas cinco zafras y se recopilaron datos de manejo convencional en el sistema de temporal (secano), cañero, ciclo soca, obtenidos en el Manual Azucarero Mexicano de las zafras 2005 a 2012.

Se utilizó la metodología eMergética aplicada en caña de azúcar y que consistió en la recopilación de la información de las zonas de abasto cañero y las transformidades para caña de azúcar; de recursos renovables (luz solar, lluvia,) y no-renovables (suelo erosionado), recursos adquiridos (combustibles, agroquímicos y la mano de obra para la producción, labores anuales realizadas por el agricultor), los rendimientos e ingresos anuales de los sistemas de producción; datos de precipitación y del suelo erosionado por año basados en el muestreo georeferenciado de suelos de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis (NOM-021-RECNAT-2000), reportado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera y el Estudio de Caracterización de Zonas Potenciales de Mecanización en las Zonas de Abasto Cañeras de Colegio de Postgraduados-SAGARPA y las estadísticas de producción cañera^E.

Elaboración del diagrama del sistema emergético o modelado del sistema socio-ecológico, como la representación, a través de diagramas de flujos de materia y energía, utilizando la simbología energética de la interacción entre las fuentes externas e internas del sistema, y los sistemas ecológicos y

socio-económicos, así como los flujos de salida del sistema y la retroalimentación, así como otros flujos que constituyen los factores clave y limitantes como en caña de azúcar en sus componentes, insumos e interacciones.

Cálculo de eMergía y las transformidades cuantificando las entradas anuales de cada sistema, en las unidades básicas (J, horas) para obtener los valores por año (J/año, h/año), los cuales se multiplicaron por el valor de transformidad (en sej/J), dando como resultado el valor de eMergía en julios de eMergía solar por año o sej/año.

Los insumos y productos fueron convertidos en unidades emergéticas (20).

Para normalizar los datos por superficie, se dividió el valor de sej/año entre la superficie del sistema cañero veracruzano para obtener el valor de eMergía en sej/ha por año. Se calcularon los totales de eMergía para cada una de las secciones de recursos renovables y no-renovables, recursos adquiridos (comprados) y recursos exportados.

Las ecuaciones (Tabla II) e índices utilizados fueron:

- ◆ Transformidad (Tr) es la relación entre la emergía total que ingresa en el sistema (Y) y la emergía de los productos que salen (Ep), su unidad es en sej.J. Este índice revela una cualidad del sistema, cuanto mayor Tr más emergía se requiere para generar productos. Puede interpretarse como el valor inverso de la eficiencia de un agroecosistema. (Y) emergía incorporada por el sistema y (E) energía del recurso.
- ◆ Renovabilidad (%R) es la relación entre las entradas renovables de la naturaleza (R) y la emergía total que entra en el sistema (Y), se expresa en por ciento.
- ◆ Razón de Rendimiento Emergético (EYR) es la relación entre la emergía total que entra al sistema (Y) y la contribución de la economía (F). Este índice es adimensional y permite conocer, de manera general, el beneficio neto que el sistema ofrece a la economía global.
- ◆ Razón de Inversión Emergética (EIR) es la relación entre las contribución de la economía (F) y la naturaleza (I), también es adimensional. Es un indicador para comprender la intensidad de emergía "comprada" utilizada en los sistemas agroindustriales.
- ◆ Razón de Carga Ambiental (ELR) es la relación entre la suma de los recursos no-renovables de la naturaleza (N) y los de la economía (F) por los recursos renovables de la naturaleza (R), también es adimensional. Cuando el valor del índice es alto, mayor será el impacto ambiental del sistema. También indica que los costos de producción son más altos, y por lo que su precio final se incrementara, haciendo que el producto o zonas productoras sean menos competitivos en el mercado con una relación de carga ambiental más baja (22).

^EEstadísticas de la Agroindustria [en línea], 2014, [Consultado: 15 de junio de 2015], Disponible en: <<http://www.caneros.org.mx/estadisticas.html>>.

Tabla II. Ecuaciones para el análisis eMergy cañero en sistema convencional en seco (21).

Insumo	Ecuación general: eMergia $\left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) = \text{Energía anual} \left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) \times \text{Transformicidad} \left(\frac{sej}{J}\right)$
Ecuaciones específicas	
Sol	eMergia Sol $\left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) = \text{Energía solar} \left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) \times \text{Transformicidad solar} \left(\frac{sej}{J}\right)$ Energía solar $\left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) = \text{Área cañera (m}^2\text{)} \times \text{insolación promedio} \left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) \cdot 1 - \text{Albedo}$
Lluvia	eMergia Lluvia $\left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) = \text{Potencial energético lluvia} \left(\frac{g}{m^2}\right) \times \text{Transformicidad lluvia} \left(\frac{sej}{J}\right)$ Potencial energético lluvia $\left(\frac{g}{m^2}\right) = \text{Precipitación} \left(\frac{m}{año \cdot ha}\right) \cdot \text{Área cañera (m}^2\text{)} \cdot \text{densidad agua} \left(\frac{g}{m^3}\right) \cdot (1 - \text{coeficiente de escorrentía})$. Energía libre de Gibbs
Evapo transpiración	eMergia por evapotranspiración $\left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) = \text{Energía anual} \left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) \times \text{Transformicidad} \left(\frac{sej}{J}\right)$ Energía anual $\left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) = \text{Evapotranspiración} \left(\frac{m}{año \cdot ha}\right) \cdot \text{Área cañera (m}^2\text{)} \times \text{densidad agua} \left(\frac{g}{m^3}\right)$. Energía libre de Gibbs
Erosión	Perdida de suelo $\left(\frac{g}{año \cdot m^2}\right) = \text{Área sembrada (m}^2\text{)} \cdot \text{tasa de erosión} \left(\frac{g}{año \cdot m^2}\right)$ Materia orgánica en suelo agrícola = Suelo. Materia orgánica (%) Perdida de energía (J) = Perdida de materia orgánica. Energía (J)/materia orgánica (g)
Combustibles	eMergia combustibles $\left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) = \text{Horas promedio de uso de maquinaria} \left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) \cdot \text{Consumo de combustible promedio} \left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) \cdot \text{Energía del combustible} \left(\frac{sej}{kg}\right) \times \text{Transformicidad} \left(\frac{sej}{J}\right)$
Maquinaria agrícola	eMergia maquinaria agrícola $\left(\frac{sej}{año \cdot ha}\right) = \frac{\text{energía Incorporada} \left(\frac{MJ}{año \cdot ha}\right) \times \text{Transformicidad Maquinaria} \left(\frac{sej}{kg}\right)}{\text{Transformicidad Maquinaria incorporada} \left(\frac{MJ}{kg}\right)}$
Fertilización Potásica	Consumo Anual = (g ingrediente activo fertilizante)(78 g/mol K/94 g/mol K ₂ O) eMergia Potasio $\left(\frac{sej}{año}\right) = \text{Consumo anual} \left(\frac{sej}{año}\right) \times \text{energía fertilizante} \left(\frac{sej}{J}\right) \times \text{Transformicidad} \left(\frac{sej}{J}\right)$
Fertilización Fosfórica	Consumo Anual = (g ingrediente activo fertilizante)(31 g/mol P/132 g/mol DAP) eMergia Fosforo $\left(\frac{sej}{año}\right) = \text{Consumo anual} \left(\frac{sej}{año}\right) \times \text{energía fertilizante} \left(\frac{sej}{año}\right) \times \text{Transformicidad} \left(\frac{sej}{año}\right)$
Fertilización Nitrogenada	Consumo Anual = (g ingrediente activo fertilizante)(28 g/mol N/132 g/mol DAP) eMergia Nitrógeno $\left(\frac{sej}{año}\right) = \text{Consumo anual} \left(\frac{sej}{año}\right) \times \text{energía fertilizante} \left(\frac{sej}{J}\right) \times \text{Transformicidad} \left(\frac{sej}{J}\right)$
Pesticidas, fungicidas y herbicidas (agroquímicos)	Consumo Anual $\left(\frac{sej}{año}\right) = \text{Energía} \left(\frac{sej}{año}\right) \times \text{Transformicidad} \left(\frac{sej}{J}\right)$
Mano de obra	Mano de obra (J) = (horas de trabajo/ha/año).(2500 kcal/día por energía metabolizada).(4186J/Cal) / (# personas hrs/día)
Servicios	Servicios \$ por ha = (\$ /año)(sej/\$) eMergia $\left(\frac{sej}{año}\right) = \text{Servicios} \left(\frac{sej}{año}\right) \times \text{Transformicidad} \left(\frac{sej}{\$}\right)$

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

En este trabajo se empleó la metodología desarrollada por el panel intergubernamental sobre cambio climático IPCC e impactos ambientales y socioeconómicos asociados^F(17, 23, 24, 25), para el balance de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI's o huella de carbono) en un ciclo productivo promedio de cinco zafras (2007 a 2011) en la etapa de producción de caña de azúcar planta y cuatro ciclos soca hasta la entrada al ingenio azucarero (Figura 4), con estadísticas empleadas en el análisis emergético de la zona cañera de Veracruz, México, considerando las etapas de preparación del campo para el establecimiento del cultivo, siembra, manejo y plantación, producción y transporte de insumos agrícolas, cosecha y transporte de tallos al ingenio azucarero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5 se presenta el diagrama emergético donde se muestra el flujo de las entradas y salidas del sistema del campo cañero en Veracruz México, en donde el flujo demuestra cómo se incorporan en cada proceso insumos de la naturaleza como la luz

del sol, la lluvia y la materia prima, los cuales son recursos renovables obtenidos localmente; y las entradas de la economía (insumos) y la mano de obra, que son recursos importados no-renovables. También se observan los dispositivos de almacenamiento de energía, como el suelo. Las salidas de los sistemas se presentan como suelo erosionado, el cual se considera como un recurso no-renovable, pérdida de energía (por entropía) y en la producción de los sistemas (productos exportados) entre otros.

En la elaboración del diagrama de flujos se identificaron los principales componentes y flujos de energía y capital, que representan la conformación del sistema cañero, durante el período analizado (Tabla III).

En la evaluación energética, llevada a cabo, se demuestra que la carga ambiental del sistema cañero veracruzano ciclo soca, en sus valores emergéticos, son elevados al tener una relación de insumos no renovables/renovables de solo 7 %, sobre todo en la demanda de fertilización nitrogenada y fosfórica con un valor de 429 y 217 E+13 sej/año seguido de los valores de mano de obra con 289 E13 sej/año, y en los costos en servicios 969 E+13 sej/año son extremadamente elevados, esto hace que se refleje en los altos costos de producción de la caña de azúcar en Veracruz México, como se observa en el valor de 13 en la relación de inversión, caso contrario a los pesticidas y herbicidas, lo que establece un bajo combate químico a la fitosanidad del cultivo, que afecta drásticamente la productividad del campo, donde el rendimiento

^F Chohfi, F.M.; Dupas, F.A. y Lora, E.E.S. "Balanço, análise de emissão e seqüestro de CO₂ na geração de eletricidade excedente no setor sucroalcooleiro" [en línea], *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, Campinas, SP, Brasil, 2004, [Consultado: 15 de junio de 2015], Disponible en: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022004000100031&script=sci_arttext&tlng=pt>.

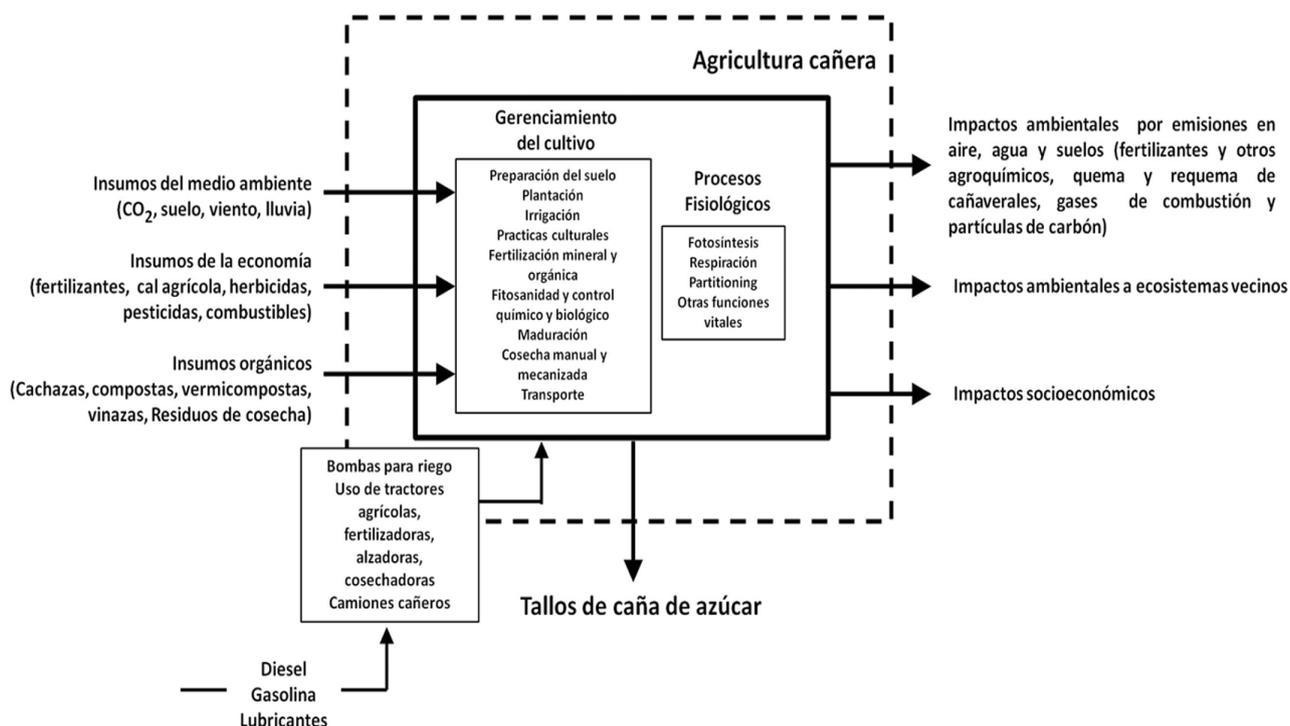


Figura 4. Diagrama conceptual LCA de la producción de caña de azúcar e impactos asociados.

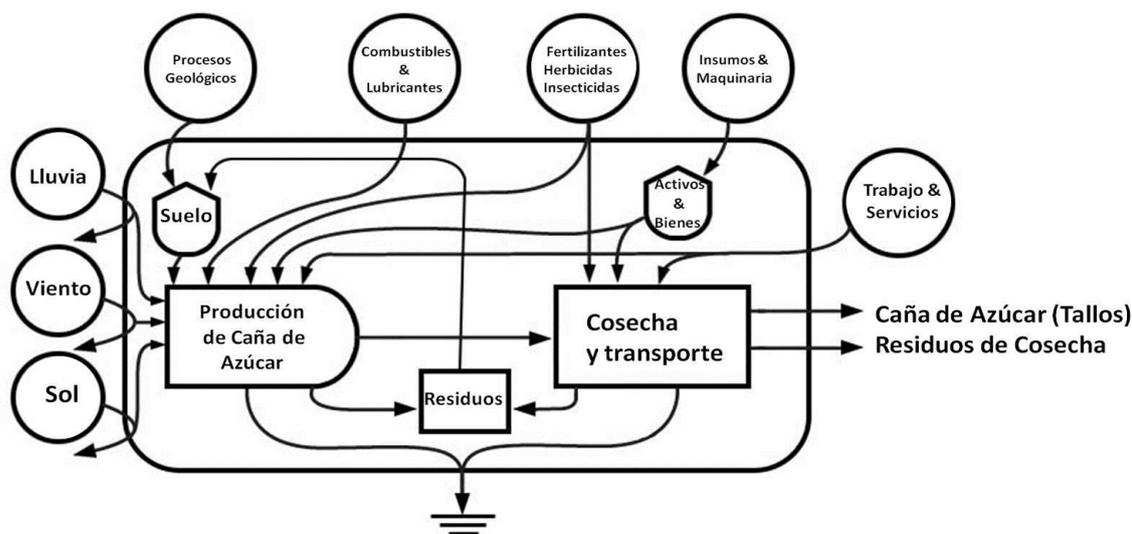


Figura 5. Diagrama de la interfase ecológica-económica de un ecosistema agrícola cañero y flujos de eMergía⁶.

promedio actual ($61,676 \text{ t ha}^{-1}$) en la zafra 2011/2012 ha descendido $12,9 \text{ t caña ha}^{-1}$ (16,9 %) desde la zafra 2000/2001 y se refleja en el incremento en la superficie necesaria para producir una tonelada de azúcar al pasar de 241,256 a 271,884 ha (incremento de 30,628 ha) y en la caída de la producción de azúcar y etanol que no impacta consistentemente el balance local entre “oferta” y “demanda, lo que significa que el sistema cañero presenta pérdida económica y ambiental con Razón de Inversión Emergética (EIR) de 13, ya que un valor más bajo significa un mejor uso de los recursos renovables; es decir, para Veracruz las zonas cañeras entregan más energía que el valor de la energía recibida por el mercado y la naturaleza (presión del sistema económico al medio ambiente a nivel local) y por lo tanto es menos competitivo.

El agrosistema con un valor de índice de sostenibilidad energética EIS muy inferior a 1 (0,08) y con ESR de 0,072 indica un alto nivel de consumo de insumos de la economía (externos), mientras EIS valores superiores a 1 indican sistemas con la contribución neta sin afectar en gran medida el equilibrio del medio ambiente y aunque tiene una Razón de Rendimiento Emergético EYR mayor que uno (1,07), indica su capacidad para proporcionar energía neta a la economía, pero se produce en detrimento del equilibrio ambiental, indicando un uso intensivo de insumos industriales, equipos y, sobre todo, de los combustibles fósiles y, por tanto, bajos rendimientos.

Estos resultados son importantes cuando se comparan las opciones de biocombustibles. Eso se explica en parte por la no contabilización de los recursos de la naturaleza en Veracruz en esta relación con el mercado y oferta cañera al considerar el sol, lluvia y evapotranspiración y otros servicios ambientales, como ilimitados y gratuitos y se subestiman. Sin embargo, el valor de transformicidad total $2,376 \text{ E}+16 \text{ sej/J}$ es mayor a los valores reportados en Brasil con $9,43 \text{ E}+15 \text{ sej/J}$ y $4,83 \text{ E}+15 \text{ sej/J}$ para sistemas agroecológico y convencional y en Florida $1,11\text{E}+16 \text{ sej/J}$, lo que establece el uso no planificado de los recursos naturales y de la economía con un valor de 13 en la relación insumos externos/naturales (carga ambiental), a pesar del menor uso en Veracruz de maquinaria agrícola y agroquímicos, que se refleja en el uso menor de combustibles, pero un mayor empleo de mano de obra para la gestión del cultivo y cosecha, transporte al ingenio y servicios para producir una tonelada de caña de azúcar (26).

Los indicadores de energía LSR, LER y EER se utilizaron para evaluar la intensidad y características de mano de obra utilizada en la agricultura cañera. LSR es la relación de trabajo de mano de obra al total de los servicios utilizados. El valor de 0,23 indica menor uso de mano de obra por el sistema agroindustrial y, al mismo tiempo, mayor uso de servicios, ya que se caracteriza por un uso intensivo de maquinaria y productos químicos que reemplazan la mano de obra humana y las prácticas o labores culturales de manejo del cultivo. La relación LER es la proporción de mano de obra con el desempeño energético total del sistema cañero. El valor 0,12 indica que la energía derivada del uso de la mano de obra es elevado y debe optimizarse en relación al uso de maquinaria y servicios actuales.

⁶ Lanzotti, C.R.; Ortega, E. y Guerra, S.M.G. “Emergy analysis and trends for ethanol production in Brazil”, (ed. Brown, M.T.), en: *Emergy Synthesis 1: Theory and Applications of the Emergy Methodology, Proceedings of the 1st Biennial Emergy Conference*, edit. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, 2000, pp. 281-288.

Tabla III. Índices energy en la producción de caña de azúcar en Veracruz México.

Insumo	Unidades	unidades/año	Transformicidad	E13 sej/año	%
Recursos Renovables de la Naturaleza (R).					
Sol	J	5,70E+13	1	6	0,240
Lluvia (potencial químico)	J	5,90E+10	3,02E+04	178	7,510
Evapotranspiración	J	6,51E+10	2,59E+04	168	7,086
Total		5,71E+13	5,61E+04	352	14,836
Recursos No Renovables de la Naturaleza (N)					
Erosión (pérdida de suelo)	J	3,16E+08	1,24E+05	4	0,165
Insumos de la Naturaleza (I= R+N)*		6,54E+10	1,50E+05	172	7,251
Materiales de la Economía (M)					
Combustibles fósiles	J	1,57E+10	1,11E+05	174	7,322
Maquinaria Agrícola	g	5,54E+04	1,12E+10	62	2,611
Potasio	g K	1,24E+05	1,85E+09	23	0,968
Pesticidas, fungicidas y herbicidas	g	1,59E+04	2,52E+10	40	1,686
Fósforo	g P	5,87E+04	3,70E+10	217	9,133
Nitrógeno	g N	1,06E+05	4,05E+10	429	18,073
Total		1,57E+10	1,17E+11	945	39,793
Servicios (S _v)	\$	2,40E+03	4,03E+12	969	40,795
Mano de Obra (S _r)	J	6,49E+08	4,45E+06	289	12,152
Servicios de la economía (S = S _r + S _v)		6,49E+08	4,03E+12	1258	52,947
Recursos de la economía (F = M + S)		1,63E+10	4,15E+12	2203	92,74
Energía (Y=I+F)				2376	99,992
Energía (Y)	2,376 E16 sej/año				
Transformicidad (Tr) $ELR = \frac{(N+F)}{R}$	6,58E6 sej/J energía solar equiv./J de caña				
Renovabilidad (%R) $ELR = \frac{(N+F)}{R}$	7				
Razón de Rendimiento Emergético (EYR) $ELR = \frac{(N+F)}{R}$	1,07				
Razón de Inversión Emergética (EIR) $ELR = \frac{(N+F)}{R}$	13				
Razón de Carga Ambiental (ELR) $ELR = \frac{(N+F)}{R}$	13				
Índice de sostenibilidad energética $LER = \frac{Sr}{v}$	0,08				
Relación de Auto-sustentabilidad energética $LER = \frac{Sr}{Y}$	0,072				
Relación energética de servicios laborales $LER = \frac{Sr}{Y}$	0,23				
Relación de potenciación del Trabajo $LER = \frac{Sr}{Y}$	0,12				
Relación de externalidades energéticas $ExER = \frac{Sn}{Y}$	0,41				

*En el cálculo de índices no se considera la contribución del sol y la lluvia porque en el balance energético ambos insumos están considerados en el proceso de evaporación.

La relación entre los factores externos y el desempeño energético ExER indica que el sistema agrícola cañero genera externalidades negativas (0,41), ya que debe tender a cero para ser sustentable; es decir, la producción de caña de azúcar en Veracruz México, presenta en su variación temporal de los índices emergéticos, un alto índice de carga ambiental (ELR), relación auto energética (ESR) bajo y una baja relación de rendimiento de energía (EYR), lo que muestra una débil sostenibilidad, característica de agroecosistema de profunda transición del tradicional intensivo en uso de mano de obra a una agroindustria moderna, basada en el consumo de recursos no renovables (21, 27, 28, 29).

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La metodología empleada presenta un balance global de emisiones en todas las etapas del sistema cañero en Veracruz, México (Tabla IV).

El análisis establece que la producción de caña en Veracruz contribuye en gran medida a la captura de gases de efecto invernadero, debido a que sus valores de emisiones de CO₂ son inferiores a los reportados

por la literatura (30, 31, 32), esto se deriva de la menor superficie productiva y menor uso de tecnología agrícola, principalmente en la plantación y en la cosecha; sin embargo, en Veracruz las etapas de corte, cosecha y transporte son las más significativas al totalizar el 64,65 % de emisiones en el sistema tecnificado.

Las otras etapas no tienen una contribución significativa a los problemas ambientales de la agroindustria, tan solo el suelo y los procesos biológicos con 14,56 %; sin embargo, se requieren acciones diferenciadas para cada ingenio para minimizar el impacto ambiental y transitar a la agricultura cañera agroecológica, como son:

- ♦ Desarrollo de variedades por mejoramiento genético, cada una de ellas específica para un tipo de suelo, y para determinadas condiciones climáticas y la disponibilidad de agua para diversos ambientes productivos, además de ser muy resistentes a las principales enfermedades y con escenarios de cambio climático y el niño y la niña (ENSO), que atenderán necesidades futuras, como producir alcohol a partir de la biomasa cañera.

Tabla IV. Balance de emisiones del cultivo de caña en Veracruz México.

Fase emisora, proceso, operación o actividades que emite CO ₂	Ciclo de primer corte (kgCO ₂ /ha 1º corte)	Ciclo de 5 cortes (kgCO ₂ /ha)	Emisión total (kgCO ₂ /ha/ciclo de vida)	%
1) Preparación del campo para plantío				
1.1) Producción y mantenimiento de equipo y máquinas agrícolas	3,675		3,675	2,44
1.2) Tractores y máquinas agrícolas	0,947		0,947	0,63
2) Plantío o siembras nuevas				
2.1) Transporte de semilla cañera a la ubicación de la plantación	2,274		2,274	1,51
2.2) Operaciones de plantío	0,254		0,254	0,17
3) Gerenciamiento y manejo del cultivo y plantación				
3.1) Aplicación (tractores y maquinaria agrícola)				
Cal agrícola	0,020		0,020	0,01
Herbicidas	0,020	0,098	0,117	0,08
Cachaza	1,332		1,332	0,88
Vinazas	1,723	8,605	10,327	6,85
Fertilizantes	0,449		0,449	0,30
3.2) Producción de insumos agrícolas				
Cal agrícola	0,820		0,820	0,54
Herbicidas	1,762	8,810	10,571	7,01
Insecticidas	0,098		0,098	0,06
3.3) Transporte de insumos agrícolas				
Cal agrícola	0,029		0,02	0,02
Herbicidas	0,029	0,146	0,12	0,12
Cachaza	0,029		0,02	0,02
Vinazas	0,029	0,146	0,12	0,12
Fertilizantes	0,029		0,02	0,02
Insecticidas	0,029		0,02	0,02
3.4) Emisiones del suelo			21,963	14,56
4) Cosecha				
4.1) Maquinaria (alzadoras y cosechadoras)	0,225	1,635	1,860	1,23
4.2) Camiones transportadores de tallos	14,871	61,862	75,855	50,29
5) Transporte de tallos de caña				
5.1) Transporte al ingenio	3,299	16,496	19,796	13,13
Total			150,826	100 %

- ◆ Incremento de la productividad en predios y zonas de abasto para cubrir las necesidades de molienda de ingenios azucareros y tener excedentes para otras producciones en las unidades productivas cañeras y otras empresas; es decir, crecimiento vertical de la producción de caña de azúcar (más producción en la misma área plantada).
- ◆ Siembra mecanizada para reducir el volumen necesario de semilla y los costos de transporte y el consumo de combustibles fósiles y derivados del petróleo.
- ◆ En el área agrícola, incrementar la eficiencia de insumos, maquinaria y mano de obra para producir más, con calidad y con el menor costo posible, es decir, rediseñar y redimensionar campos cañeros.
- ◆ Fertirrigación, uso sostenible de agua y vinazas e incorporación de buenas prácticas de manejo para ampliar la vida útil y productiva del cañaveral.
- ◆ Favorecer el control de plagas, malezas y enfermedades del cultivo a través de técnicas mecánicas y fitotécnicas, así como el control biológico, con sus enemigos naturales, y el químico, con insecticidas de baja toxicidad.
- ◆ Utilizar las técnicas de agricultura de precisión (Percepción Remota, GPS y SIG) para determinar la aptitud de tierras al cultivo de caña de azúcar; con esta información llevar a cabo adecuación agroecológica de zonas de abasto, direccionar los sistemas de riego, mecanización (sobre todo la cosecha), fertilizantes, usos de compostas y abonos verdes, gestión de plagas y malezas con el uso de software especializado, el control biológico, con sus enemigos naturales, y el químico, con insecticidas de baja toxicidad; hacer extensivos los procesos gerenciales que permitan a los agricultores cañeros incrementar la productividad de materia prima con mayores ventajas relativas o, al menos, las menores desventajas derivadas de los factores físicos (climáticos, edafológicos y otros) y biológicos y las fuerzas económicas, que limitan las posibilidades de las unidades productivas cañeras como empresa.
- ◆ Cosecha verde, mecanización, reducción de la compactación del suelo, eliminar quema y requema, optimización del proceso de recolección de la caña con la paja con centros de acopio y desarrollo de sistemas de almacenamiento para el posterior uso de esta última como acolchado para el control de plagas y malezas y en la industria como fuente de energía como combustible rural o en la cogeneración o, incluso, en un futuro próximo, la generación adicional de etanol, furfural o tableros.
- ◆ El empleo masivo de contenedores metálicos en la cosecha reduce el impacto que ocasiona la tierra y demás materias extrañas en la fábrica: desgaste de molinos, bombas, ventiladores, y una drástica reducción de pérdidas de POL en cachaza e indeterminadas.
- ◆ Incorporar al diagnóstico, gestión y gerenciamiento de la agroindustria azucarera herramientas como análisis FODA, producción más limpia (P+L), buenas prácticas de manejo (BPM), análisis de ciclo de vida (LCA), huella ecológica o de carbono y de agua, eMergy, cartografía participativa, plataformas de vigilancia y monitoreo, entre otros, en sinergia a los métodos econométricos convencionales para establecer los puntos críticos del sistema agroindustrial a escalas local, regional y nacional, para la reducción de costos, recomendar tecnologías diferenciadas y maximizar la rentabilidad.
- ◆ Mejorar la infraestructura logística en caminos, brechas, terracerías, carreteras, así mismo incentivar el transporte de caña vía ferrocarril para disminuir costos y renovar camiones de transporte.
- ◆ Reconversión a Ingenios sucroalcoholeros flexibles (producción simultánea de diversos tipos de azúcares como mascabado, refinado, blancos, etc. y alcoholes como hidratado y anhidro, cogeneración eléctrica y compostas para la horticultura) asociada en los ingenios que tengan potencial y capacidad teniendo en cuenta la fuerte contracción de la demanda del mercado, principalmente en el sector alimentos y refrescos, debido a la sustitución de la sacarosa por fructosa de maíz y edulcorantes no calóricos, mayormente de importación para ajustarse rápidamente a los cambios de precios nacionales e internacionales.
- ◆ Implementar la cogeneración eléctrica (primeramente para autoabastecer necesidades eléctrica-mecánica y térmica) en todos los ingenios mediante la reconversión de calderas de combustóleo a bagazo y residuos de cosecha y de baja a alta presión de trabajo para abastecer las redes eléctricas locales de forma continua durante todo el año y que los ingenios sean autosuficientes durante el periodo de zafra.

CONCLUSIONES

- ◆ Los instrumentos metodológicos evaluados permitieron describir con mayor precisión la sostenibilidad de la agroindustria azucarera de Veracruz como sistema complejo y establecen que esta debe hacer grandes retos en materia de protección ambiental, productividad, diversificación productiva y competitividad para reconvertirse en el mediano plazo, y debe llevar a cabo análisis prospectivos por cada planta industrial para insertarse en nuevos esquemas productivos empleando metodologías de gestión ambiental, como el análisis de ciclo de vida (LCA), análisis exergético y energético, huella ecológica y de agua, entre otros, junto a las convencionales abordajes econométricos.

En este trabajo se logró determinar con los diversos índices emergéticos que la carga ambiental y económica del sistema cañero veracruzano es elevada en la demanda de fertilización nitrogenada y fosfórica con un porcentaje de 27,2 %, mano de obra 12,1 % y servicios 40,78 % del total. El resto 19,92 % corresponde en orden de importancia a combustibles y operación de maquinaria agrícola (tractores) en la etapa de siembra, pesticidas y fertilización potásica, lo que es determinado, a su vez, por el análisis de ciclo de vida LCA donde las etapas de corte, cosecha y transporte son las más significativas al totalizar el 64,65 % de emisiones de CO₂. Se establece la necesidad de reestructurar y rediseñar el campo cañero veracruzano para disminuir costos de producción y la carga ambiental para incrementar la rentabilidad y competitividad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, R.N. "Reconversión de la cadena agroindustrial de la caña de azúcar en Veracruz México", *Nova scientia*, vol. 6, no. 12, 2014, pp. 125-161, ISSN 2007-0705.
2. Odum, H.T. y Odum, B. "Concepts and methods of ecological engineering", *Ecological Engineering*, vol. 20, no. 5, octubre de 2003, (ser. The Philosophy and Emergence of Ecological Engineering), pp. 339-361, ISSN 0925-8574, DOI 10.1016/j.ecoleng.2003.08.008.
3. Dong, X.; Ulgiati, S.; Yan, M.; Zhang, X. y Gao, W. "Energy and eMergy evaluation of bioethanol production from wheat in Henan Province, China", *Energy Policy*, vol. 36, no. 10, octubre de 2008, pp. 3882-3892, ISSN 0301-4215, DOI 10.1016/j.enpol.2008.04.027.
4. Waclawovsky, A.J.; Sato, P.M.; Lembke, C.G.; Moore, P.H. y Souza, G.M. "Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content", *Plant Biotechnology Journal*, vol. 8, no. 3, 1 de abril de 2010, pp. 263-276, ISSN 1467-7652, DOI 10.1111/j.1467-7652.2009.00491.x.
5. Yang, H.; Chen, L.; Yan, Z. y Wang, H. "Emergy analysis of cassava chips-suitable feedstock for fuel ethanol in China", *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 10, octubre de 2010, pp. 1348-1354, ISSN 0925-8574, DOI 10.1016/j.ecoleng.2010.06.011.
6. Aguilar, R.N.; Galindo, M.G.; Fortanelli, M.J. y Contreras, S.C. "Factores de competitividad de la agroindustria de la caña de azúcar en México", *Región y sociedad*, vol. 23, no. 52, diciembre de 2011, pp. 261-297, ISSN 1870-3925.
7. Odum, H.T. y Bosch, G. *Emergy analysis overview of nations*, edit. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1983.
8. Odum, H.T. *Environmental accounting: EMERGY and environmental decision making*. [en línea], edit. John Wiley & Sons, New York, 1995, p. 384, ISBN 978-0-471-11442-0, [Consultado: 15 de junio de 2015], Disponible en: <<http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471114421.html>>.
9. Plassmann, K.; Norton, A.; Attarzadeh, N.; Jensen, M.P.; Brenton, P. y Edwards-Jones, G. "Methodological complexities of product carbon footprinting: a sensitivity analysis of key variables in a developing country context", *Environmental Science & Policy*, vol. 13, no. 5, agosto de 2010, pp. 393-404, ISSN 1462-9011, DOI 10.1016/j.envsci.2010.03.013.
10. Brown, M.T. y Ulgiati, S. "Emergy Analysis and Environmental Accounting" [en línea], ed. Cleveland, C.J., *Encyclopedia of Energy*, edit. Elsevier, New York, 2004, pp. 329-354, ISBN 978-0-12-176480-7, [Consultado: 15 de junio de 2015], Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B012176480X002424>>.
11. Bastianoni, S. y Marchettini, N. "Ethanol production from biomass: Analysis of process efficiency and sustainability", *Biomass and Bioenergy*, vol. 11, no. 5, 1996, pp. 411-418, ISSN 0961-9534, DOI 10.1016/S0961-9534(96)00037-2.
12. Agostinho, F.; Ambrósio, L.A. y Ortega, E. "Assessment of a large watershed in Brazil using Emergy Evaluation and Geographical Information System", *Ecological Modelling*, vol. 221, no. 8, 24 de abril de 2010, pp. 1209-1220, ISSN 0304-3800, DOI 10.1016/j.ecolmodel.2009.12.019.
13. Contreras, A.M.; Rosa, E.; Pérez, M.; Van Langenhove, H. y Dewulf, J. "Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production", *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, no. 8, mayo de 2009, pp. 772-779, ISSN 0959-6526, DOI 10.1016/j.jclepro.2008.12.001.
14. Luo, L.; van der Voet, E. y Huppes, G. "Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6-7, agosto de 2009, pp. 1613-1619, ISSN 1364-0321, DOI 10.1016/j.rser.2008.09.024.
15. Pereira, C.L.F. y Ortega, E. "Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane", *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, no. 1, enero de 2010, (ser. The Roles of Cleaner Production in the Sustainable Development of Modern Societies), pp. 77-82, ISSN 0959-6526, DOI 10.1016/j.jclepro.2009.09.007.
16. Chauhan, M.K.; Varun; Chaudhary, S.; Kumar, S. y Samar "Life cycle assessment of sugar industry: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 7, septiembre de 2011, pp. 3445-3453, ISSN 1364-0321, DOI 10.1016/j.rser.2011.04.033.
17. García, C.A.; Fuentes, A.; Hennecke, A.; Riegelhaupt, E.; Manzini, F. y Masera, O. "Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico", *Applied Energy*, vol. 88, no. 6, junio de 2011, pp. 2088-2097, ISSN 0306-2619, DOI 10.1016/j.apenergy.2010.12.072.
18. Amores, M.J.; Mele, F.D.; Jiménez, L. y Castells, F. "Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, no. 7, 22 de mayo de 2013, pp. 1344-1357, ISSN 0948-3349, 1614-7502, DOI 10.1007/s11367-013-0584-2.

19. Turdera, M.V. "Energy balance, forecasting of bioelectricity generation and greenhouse gas emission balance in the ethanol production at sugarcane mills in the state of Mato Grosso do Sul", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, marzo de 2013, pp. 582-588, ISSN 1364-0321, DOI 10.1016/j.rser.2012.11.055.
20. Ortega, E.; Cavalett, O.; Bonifácio, R. y Watanabe, M. "Brazilian Soybean Production: Emergy Analysis With an Expanded Scope", *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 25, no. 4, 8 de enero de 2005, pp. 323-334, ISSN 0270-4676, 1552-4183, DOI 10.1177/0270467605278367.
21. Agostinho, F. y Ortega, E. "Energetic-environmental assessment of a scenario for Brazilian cellulosic ethanol", *Journal of Cleaner Production*, vol. 47, mayo de 2013, (ser. Cleaner Production: initiatives and challenges for a sustainable world CP Initiatives & Challenges), pp. 474-489, ISSN 0959-6526, DOI 10.1016/j.jclepro.2012.05.025.
22. Cavalett, O. y Ortega, E. "Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil", *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, no. 1, enero de 2010, (ser. The Roles of Cleaner Production in the Sustainable Development of Modern Societies), pp. 55-70, ISSN 0959-6526, DOI 10.1016/j.jclepro.2009.09.008.
23. Mashoko, L.; Mbohwa, C. y Thomas, V.M. "LCA of the South African sugar industry", *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 53, no. 6, 1 de septiembre de 2010, pp. 793-807, ISSN 0964-0568, DOI 10.1080/09640568.2010.488120.
24. Renouf, M.A.; Pagan, R.J. y Wegener, M.K. "Life cycle assessment of Australian sugarcane products with a focus on cane processing", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, no. 2, 30 de septiembre de 2010, pp. 125-137, ISSN 0948-3349, 1614-7502, DOI 10.1007/s11367-010-0233-y.
25. Renouf, M.A.; Wegener, M.K. y Pagan, R.J. "Life cycle assessment of Australian sugarcane production with a focus on sugarcane growing", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, no. 9, 27 de julio de 2010, pp. 927-937, ISSN 0948-3349, 1614-7502, DOI 10.1007/s11367-010-0226-x.
26. Del Pozo Rodríguez, P.P.; Vallim de Melo, C. y Ortega Rodríguez, E. "El análisis emergético como herramienta para evaluar la sustentabilidad en dos sistemas productivos", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 23, no. 4, diciembre de 2014, pp. 59-63, ISSN 2071-0054.
27. Bergquist, D.A.; Cavalett, O. y Rydberg, T. "Participatory emergy synthesis of integrated food and biofuel production: a case study from Brazil", *Environment, Development and Sustainability*, vol. 14, no. 2, 17 de julio de 2011, pp. 167-182, ISSN 1387-585X, 1573-2975, DOI 10.1007/s10668-011-9314-8.
28. Pereira, L. y Ortega, E. "A modified footprint method: The case study of Brazil", *Ecological Indicators*, vol. 16, mayo de 2012, (ser. The State of the Art in Ecological Footprint: Theory and Applications), pp. 113-127, ISSN 1470-160X, DOI 10.1016/j.ecolind.2011.06.016.
29. Agostinho, F. y Pereira, L. "Support area as an indicator of environmental load: Comparison between Embodied Emergy, Ecological Footprint, and Emergy Accounting methods", *Ecological Indicators*, vol. 24, enero de 2013, pp. 494-503, ISSN 1470-160X, DOI 10.1016/j.ecolind.2012.08.006.
30. Renouf, M.A.; Allsopp, P.G.; Price, N. y Schroeder, B.L. "CaneLCA: a life cycle assessment (LCA)-based eco-efficiency calculator for Australian sugarcane growing", *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, vol. 35, 2013, pp. 1-8, ISSN 0726-0822.
31. Renouf, M.A.; Pagan, R.J. y Wegener, M.K. "Bio-production from Australian sugarcane: an environmental investigation of product diversification in an agro-industry", *Journal of Cleaner Production*, vol. 39, enero de 2013, pp. 87-96, ISSN 0959-6526, DOI 10.1016/j.jclepro.2012.08.036.
32. Guerra, J.P.M.; Coleta, J.R.; Arruda, L.C.M.; Silva, G.A. y Kulay, L. "Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 19, no. 4, 28 de enero de 2014, pp. 814-825, ISSN 0948-3349, 1614-7502, DOI 10.1007/s11367-014-0702-9.

Recibido: 21 de enero de 2014

Aceptado: 16 de diciembre de 2014

¿Cómo citar?

Aguilar-Rivera, N.; Alejandro-Rosas, J. y Espinosa-López, R. "Evaluación emergy y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, México" [en línea]. *Cultivos Tropicales*, 2015, vol. 36, no. 4, pp. 144-157. ISSN 1819-4087. [Consultado: ____]. Disponible en: <-----/>.