

## ***EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR CRUDO MEDIANTE EL ANÁLISIS EMERGÉTICO***

### ***EVALUATION OF THE SUSTAINABILITY OF THE RAW SUGAR PRODUCTION USING EMERGY ANALYSIS***

*Eduardo J. López Bastida<sup>1\*</sup>, Yolanda García Martínez<sup>2</sup> y Alejandro Valdés López<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA). Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas km 3 ½, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba.

<sup>2</sup> Departamento de Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas km 3 ½, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba.

Recibido: Noviembre 6, 2017; Revisado: Diciembre 6, 2017; Aceptado: Enero 29, 2018

#### **RESUMEN**

En el presente trabajo se evalúa la sostenibilidad del proceso de producción de azúcar crudo a partir de la caña de azúcar en la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”. Para ello se utilizó la Metodología Emergética desarrollada por el ecólogo norteamericano Howard T. Odum. Se determinó que el 51,44 % de la emergía del proceso proviene de la economía y que el 48,56 % de los recursos naturales. El índice de sostenibilidad emergética (ESI) calculado fue 1,12 que indica que el proceso no es sostenible a largo plazo, pero sí contribuye moderadamente a la economía. La evaluación permitió conocer las transformidades de los principales productos de la fábrica siendo: 1,2328 E+08 seJ/J para el azúcar crudo y 1,2391 E+07 seJ/J para la electricidad. Se determinó además la emergía específica de otros co-productos importantes como son: 9,5501 E+09 seJ/g para el bagazo, 1,5957 E+10 seJ/g para la miel final y 1,7756 E+10 seJ/g para la cachaza lo que es significativo para posteriores estudios en la industria de derivados. Estos resultados indican que el sistema debe ser reestructurado para mejorar su eficiencia y permitir un mayor aprovechamiento de los recursos. Por ello se identificaron posibles alternativas que pueden contribuir a un mejor desempeño del sistema.

**Palabras Claves:** emergía; industria azucarera; sostenibilidad.

## **ABSTRACT**

The sustainability of the production process of raw sugar from sugar cane in the UEB Fábrica de Azúcar "14 de Julio" is evaluated in present work. To accomplish this the Emergy Methodology developed by the American ecologist Howard T. Odum was used. It was determined that 51.44 % of the emergy of the process comes from the economy and 48.56 % from natural resources. The Emergy Sustainability Index (ESI) calculated was 1.12 which indicates that the process is not sustainable long range however it contributes moderately to the economy. The assessment allowed to know the main factory products transformities which are:  $1.2328 \text{ E}+08 \text{ seJ/J}$  for the raw sugar and  $1.2391 \text{ E}+07 \text{ seJ/J}$  for the electricity. Also, it was determined the specific emergy of other important co-products which are:  $9.5501 \text{ E}+09 \text{ seJ/g}$  for the bagasse,  $1.5957 \text{ E}+10 \text{ seJ/g}$  for the molasses and  $1.7756 \text{ E}+10 \text{ seJ/g}$  for the filter cake which is meaningful for the subsequent studies in the industry of derivatives. These results indicate that the system should be reorganized to improve its efficiency and allow a better resources exploitation. That's why possible alternatives which may contribute to a better performance of the system were identified.

**Key words:** emergy; sugar industry; sustainability.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La industria azucarera ha constituido históricamente el sector principal de la economía cubana. Según Marquetti (2006), ello se explica entre otras razones, por su peso decisivo en la dinámica productiva del país, así como en la definición del patrón histórico de la inserción internacional de la isla. Sin embargo, este desarrollo en la agroindustria azucarera inevitablemente ha traído consigo severos daños al medio ambiente a pesar de los esfuerzos del gobierno revolucionario por su preservación. Por lo tanto, el reto en la actualidad consiste en lograr su sostenibilidad integrando las actividades humanas a los ciclos de la naturaleza.

Ramos (2014) destaca que en este sentido se han realizado varios estudios, entre los más importantes la conversión de las fábricas de azúcar a biorrefinerías. Sin embargo, como estos procesos de reestructuración requieren de inversiones, es de interés conocer en sí misma la sostenibilidad del proceso agroindustrial azucarero existente. Para determinar esto existen varias metodologías entre las que se pueden señalar el Análisis de Ciclo de Vida (LCA), la Huella Ecológica y el Análisis Multivariado; sin embargo, en la actualidad la Síntesis Emergética se ha convertido en una alternativa interesante a esta problemática, una vez que relaciona todas las fuentes de energía, recursos materiales y servicios humanos.

La elección de la UEB 14 de Julio, en la provincia de Cienfuegos, como caso de estudio se fundamenta por el desarrollo de la agroindustria azucarera en el territorio y por ser una fábrica que se ha mantenido en operaciones incluso cuando otras cerraron por la crisis económica de la década de los noventa.

Por otra parte, aunque se reconoce que para realizar una evaluación de la sostenibilidad del proceso agroindustrial cañero mediante el Análisis Emergético es necesario analizar los procesos agrícola e industrial, e incluso que los resultados del primero tributan al

segundo, para esta investigación se consideró solo el sector industrial. De esta manera se estableció como objetivo de la investigación: evaluar la sostenibilidad del proceso de producción de azúcar de caña en la UEB 14 de Julio mediante el análisis emergético.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

El análisis emergético es un método de contabilidad ambiental desarrollado por Howard T. Odum empleado para evaluar las relaciones de un sistema con el medio ambiente y las actividades antrópicas usando unidades similares (emjoules solares). Esta metodología para el desarrollo de un análisis emergético comienza en definir los límites espacio-temporales del sistema y modelarlo describiendo sus características principales usando la simbología emergética. Posteriormente se realiza un balance energético para construir una tabla en la que se resumen los flujos de las corrientes y se convierten a valores emergéticos usando las transformidades u otras unidades de valor emergético (UEV). Luego se calculan y analizan diferentes indicadores que brindan información en cuanto a la sostenibilidad del sistema, lo que permite comprender sus potencialidades y deficiencias. Estos indicadores sirven para realizar una evaluación del sistema, así como para comparar sistemas similares, posibles alternativas de mejora y su efectividad.

El balance de energía de la fábrica fue realizado con el software Sistema Termo Azúcar STA 4.1 para cuya simulación se recopiló información respecto a los flujos máscicos, temperatura, presión y composición de las corrientes del proceso además de las condiciones de operación de los equipos de la fábrica. Como el software realiza la simulación para el estado estacionario, este no determina los consumos de electricidad por conceptos de arranques y paradas, por lo que para su cálculo se usó el indicador de electricidad consumida de la red toneladas de caña procesada reportado por el Laboratorio de Análisis de la entidad como se muestra en la ecuación 1.

$$Electricidad \left( \frac{J}{año} \right) = \frac{kWh}{t \text{ de caña procesada}} \cdot \frac{t \text{ de caña procesada}}{año} \cdot \frac{3,6 \cdot 10^6 J}{kWh} \quad (1)$$

Se estimó la fracción renovable y no renovable del aire tomando en consideración una combustión completa sin formación de óxidos de nitrógeno y un 15% de aire en exceso. Además, se consideraron las fracciones renovables, no renovables e importadas de la economía para la producción de la caña de azúcar calculadas por Abreu (2017) siendo estas 14%, 8% y 78% respectivamente.

Otras informaciones necesarias para el análisis, como el consumo de insumos y gastos monetarios de la empresa, fueron brindadas por el Laboratorio de Análisis y el Departamento de Economía de la fábrica.

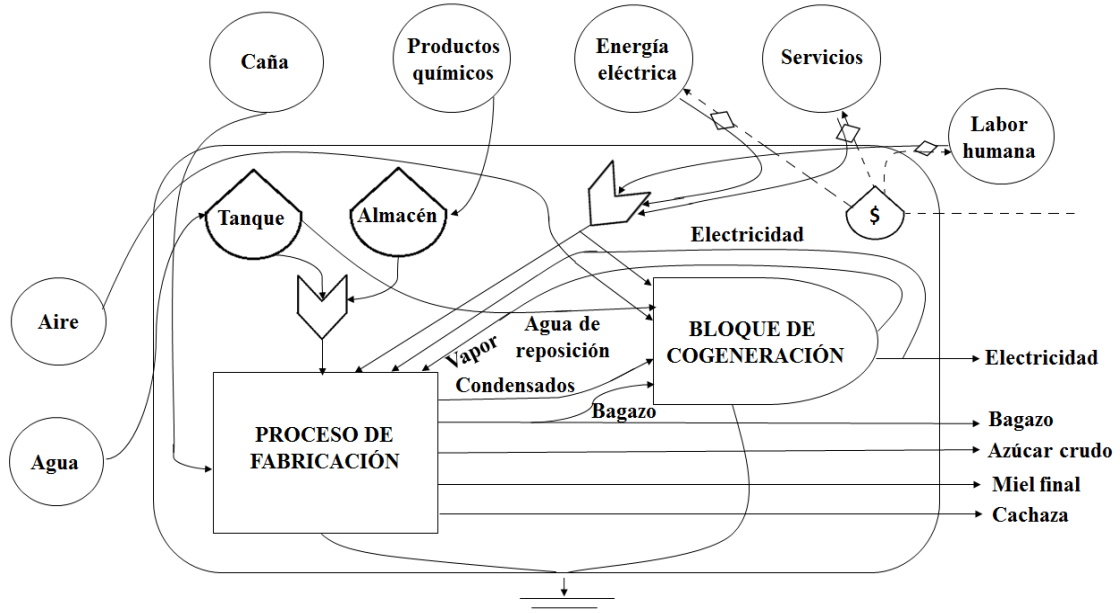
## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### ***3.1 Límites espacio-temporales y modelación del sistema***

El sistema objeto de estudio fue el sector industrial de la UEB 14 de Julio constituido principalmente por el proceso de fabricación de azúcar y el bloque de cogeneración; el espacio de tiempo asumido para el análisis corresponde al período de un año de zafra. Por consiguiente, las corrientes principales de entrada al proceso fueron: caña de azúcar, agua, productos químicos, materiales para el proceso, aire, labor humana y servicios

adquiridos de la economía mientras que las salidas: azúcar, electricidad, bagazo, miel final y cachaza.

Para la modelación se clasificaron las principales corrientes de entradas al sistema en recursos renovables [R], recursos no renovables [N], materiales de la economía [M] y servicios de la economía [S]. Con esta información y las características del esquema tecnológico se construyó el diagrama emergético como se observa en la figura 1.



**Figura 1.** Diagrama emergético de la UEB Fábrica de Azúcar 14 de Julio

Este diagrama permite simplificar las complejidades del sistema para visualizar, de manera sencilla, las interrelaciones de las corrientes de entradas, así como características internas. Se puede observar, por ejemplo, como del proceso de fabricación sale el bagazo hacia el bloque de fabricación lo que permite el autoabastecimiento energético en forma de electricidad y vapor. Sin embargo, aun así, es necesario importar electricidad desde el exterior del sistema.

### 3.2 Balance del sistema

Los datos de la simulación reportan que solo se está aprovechando el 83 % de la capacidad nominal instalada en los turbogeneradores por lo que existe la posibilidad de generar más electricidad. Se identificó que en el área de evaporación existen deficiencias dadas por bajos valores en la tasa de evaporación del quintuple efecto ( $26,61 \text{ kg/h}\cdot\text{m}^2$ ) y en la economía del vapor (1,89). Además, las pérdidas energéticas por vapor expulsado a la atmósfera, sobrante de condensados puros y por deficiencias tecnológicas atentan contra la eficiencia del proceso.

A partir de los resultados de la simulación se construyó la tabla energética para el sistema analizado, como se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Tabla emergética para la UEB Fábrica de Azúcar 14 de Julio

<i>Nota</i>	<i>Ítem</i>	<i>Dato</i>	<i>Unidad</i>	<i>UEV (seJ/unidad)</i>	<i>Energía solar (seJ/año)</i>
<b>R</b>					<b>9,2459E+19</b>
1	Aire	7,1726E+16	J/año	9,8200E+02 (a)	7,0435E+19
2	Caña	5,6184E+10	g/año	3,9200E+08 (b)	2,2024E+19
<b>N</b>					<b>3,0369E+19</b>
3	Aire	1,8044E+16	J/año	9,8200E+02 (a)	1,7719E+19
4	Agua*	1,2009E+11	g/año	5,4264E+05 (c)	6,5165E+16
5	Caña	3,2105E+10	g/año	3,9200E+08 (b)	1,2585E+19
<b>M</b>					<b>1,2405E+20</b>
4	Caña	3,1302E+11	g/año	3,9200E+08 (b)	1,2271E+20
5	Cal	3,5615E+08	g/año	1,00E+09 (d)	3,5615E+17
6	Ácido clorhídrico*	1,6281E+07	g/año	6,1152E+09 (e)	9,9564E+16
7	Sosa cáustica*	1,6500E+07	g/año	3,1920E+10 (e)	5,2668E+17
8	Soda ash	1,8000E+06	g/año	1,07E+09 (f)	1,9260E+15
9	Fosfato trisódico	1,9000E+06	g/año	9,35E+09 (g)	1,7765E+16
10	Alcohol	3,5539E+03	L/año	1,10E+12 (h)	3,9093E+15
11	Floculante	1,4632E+03	\$/año	4,60E+12 (i)	6,7307E+15
12	Otros materiales	7,2256E+04	\$/año	4,60E+12 (i)	3,3238E+17
<b>S</b>					<b>6,0706E+18</b>
13	Transporte y almacenaje	3,72E+03	\$/año	4,60E+12 (i)	1,7127E+16
14	Energía eléctrica comprada	1,99E+12	J/año	3,40E+05 (j)	6,7786E+17
15	Otros gastos de la empresa	6,45E+04	\$/año	4,60E+12 (i)	2,9661E+17
16	Labor humana	1,29E+12	J/año	3,93E+06 (g)	5,0790E+18
<b>Energía total [Y]</b>					<b>2,5295E+20</b>

(a)Odum (2000); (b) Abreu (2017); (c) Buenfil (2001); (d) (De-Vilbiss y Brown, 2015); (e) Jarméus (2013); (f) (Simoncini y col., 2009); (g) (Giannetti y col., 2016); (h) (Lima y Ortega, 2009); (i) (Sweeney y col., 2007); (j) (Brown y Ulgiati, 2004)

\* Las UEV de los ítems señalados fueron multiplicadas por 1,68 para llevarlas de la base energética 9,24 E+24 seJ/año a 15,83 E+24 seJ/año.

Se puede observar que el principal flujo emergético al proceso proviene de la economía (1,3012 E+20 seJ/año) representando un 51,44 % de la energía total mientras que el aporte de la naturaleza (1,2283 E+20 seJ/año) representa el 48,56 %. Analizando las cuatro categorías analizadas, los materiales de la economía representan el mayor aporte emergético y los servicios de la economía el menor. El valor bajo de los servicios de la economía está dado principalmente porque el sistema es capaz de producir la mayor parte de la electricidad que necesita, a diferencia de otros procesos. Además, en Cuba existe una estructura empresarial donde la fábrica no comercializa directamente el azúcar por lo que no se incurren en grandes gastos por transportación.

Uno de los recursos que no parece revelador por su aporte emergético (0,03 % de la energía total) es el agua. Este bajo valor está dado porque la transformidad de este insumo no es elevada en consideración al resto de ítems analizados. Además, el objeto de estudio presenta un bajo consumo (0,3 t agua/t de caña molida) en comparación con otros procesos, debido a que la caña de azúcar contiene aproximadamente 70 % de agua, que es empleada mediante la integración de los subprocesos del sistema.

Sin embargo, las pérdidas de energía en los condensadores debido a deficiencias tecnológicas incrementan el consumo de este recurso en el sistema. Por ello, realizar acciones para evitar las pérdidas de energía en los condensadores barométricos es de vital importancia dado que la gestión adecuada del agua es uno de los requisitos más importantes en la eficiencia y calidad de los procesos.

### 3.3 Indicadores emergéticos

Los productos de la fábrica y sus unidades de valor emergético (UEV) se pueden ver en la tabla 2. Hay que destacar que los principales productos del sistema son el azúcar crudo y la electricidad, y que, aunque se consideró el bagazo, la miel final y la cachaza como co-productos, no se deben utilizar sus energías específicas para efectuar comparaciones debido a que todavía necesitan procesamiento para convertirse en productos útiles a la economía. No obstante, conocer estos valores es un aporte significativo para posteriores investigaciones en la industria de los derivados.

**Tabla 2.** Transformidades y energías específicas de los productos del proceso

<i>Producto</i>	<i>Producción</i>	<i>Transformidad (seJ/J)</i>	<i>Energía específica (seJ/g)</i>
Azúcar (g/año)	4,6592 E+10	1,23E+08	5,43E+09
Bagazo (g/año)	2,6487 E+10	-	9,55E+09
Miel final (g/año)	1,5852 E+10	-	1,60E+10
Cachaza (g/año)	1,4246 E+10	-	1,78E+10
Electricidad (J/año)	2,0414 E+13	1,24E+07	-

La segunda regla del álgebra emergética establece que el azúcar y la electricidad poseen igual energía (se ha utilizado igual cantidad de energía para su producción) pero el contenido energético de estos es diferente, siendo mayor para la electricidad. En base a este resultado parece lógico preferencial la producción de electricidad en la fábrica como un elemento imprescindible para lograr mayor eficiencia y sostenibilidad.

Los principales indicadores emergéticos calculados fueron: razón de renovabilidad (%R=36,55), razón de eficiencia emergética (EYR=1,94), razón de carga ambiental (ELR=1,74) y el índice de sostenibilidad energética (ESI=1,12).

La razón de renovabilidad y la razón de eficiencia emergética indican que el proceso explota moderadamente los recursos naturales locales. El valor próximo a dos de EYR manifiesta que, aproximadamente, por cada unidad en energía invertida de la economía se obtiene una unidad de energía de la naturaleza.

Por otra parte, el bajo valor de la razón de carga ambiental (ELR<2) indica que el impacto ambiental de la UEB Fábrica de Azúcar 14 de Julio no es tan elevado en

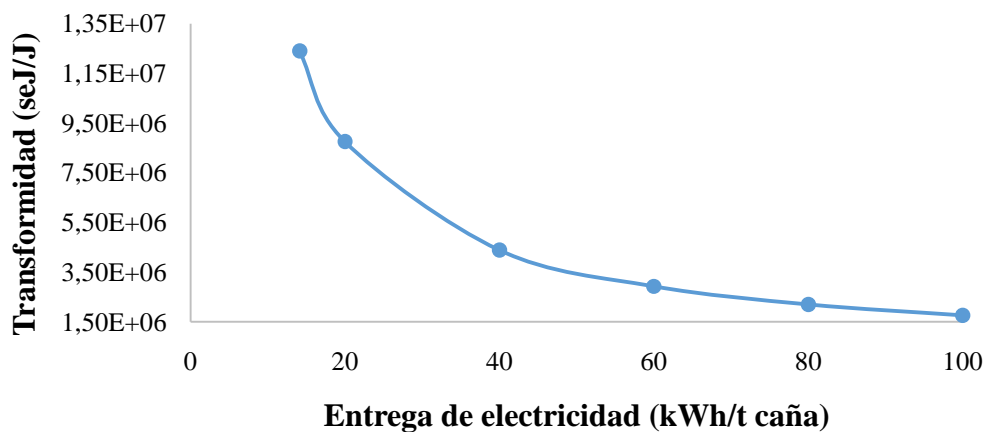
comparación con otros procesos, aunque no se puede descartar la posibilidad de que exista un área considerable para su dilución.

A pesar de esto el índice de sostenibilidad energética (ESI) indica que a largo plazo el sistema no es sostenible por sí mismo ( $ESI < 5$ ). No obstante, el valor obtenido ( $ESI = 1,12$ ) da una medida que el sistema contribuye moderadamente a la economía creando oportunidades para el desarrollo local.

### 3.4 Recomendación de alternativas a valorar para mejorar la sostenibilidad

Se analizaron varias alternativas a valorar como el mejoramiento de la capacidad de los suelos y el incremento de la producción animal, pero destacó el aumento de la producción de electricidad para influir en un mejor desempeño del sistema. Ramos (2014) considera que se puede aumentar positivamente la entrega de electricidad, hasta 100 kWh/t de caña procesada, a través de una explotación más efectiva del bagazo con el uso de turbocompresores y el montaje de un ciclo de condensación (CEST) otorgando incluso mayor flexibilidad del proceso.

En la Figura 2 se puede ver el comportamiento de la transformidad de la electricidad a medida que aumenta la entrega de electricidad al sistema.



**Figura 2.** Comportamiento de la transformidad respecto a la entrega de electricidad al Sistema Electroenergético Nacional (SEN)

Esta figura muestra cómo la transformidad disminuye a medida que se aumenta la entrega de electricidad usando presiones más altas en las calderas. Sin embargo, no es suficiente para que este indicador sea menor que el correspondiente a la electricidad producida convencionalmente (Tabla 3). Entonces, por este concepto, la producción de electricidad en termoeléctricas todavía es más eficiente energéticamente, que la que se puede obtener en la fábrica de azúcar objeto de estudio.

**Tabla 3.** Comparación de las transformidades de la electricidad

<i>Planta</i>	<i>Capacidad instalada (MW)</i>	<i>Energía entregada (J/año)</i>	<i>Transformidad (seJ/J)</i>	<i>ELR</i>
Convencional de oil	1280	2,35 E+16	3,54 E+05	23,26
Eólica	2,5	1,35 E+13	1,10 E+05	0,22
Geotermal	20	3,28 E+14	3,35 E+05	0,96

Hidroeléctrica	85	3,94 E+14	1,12 E+05	0,55
Caso de estudio	6,5	1,44 E+14	1,24 E+07	1,74

**Fuente:** Elaborado a partir de (Brown y Ulgiati, 2004)

No obstante, la producción de electricidad mediante la combustión del bagazo es menos dañina ambientalmente como se observa en la menor razón de carga ambiental (ELR), e incluso menor para las plantas a partir de fuentes renovables. Por este motivo hay que valorar más estas tecnologías, tomando en consideración también que los recursos que utilizan como materias primas son obtenidos localmente mientras que el petróleo es un recurso importado y sus precios dependen del escenario político internacional.

#### 4. CONCLUSIONES

1. El análisis emergético es una herramienta novedosa para valorar la sostenibilidad de los procesos industriales, existiendo poca información de la misma aplicada a la industria azucarera cubana.
2. Los principales indicadores calculados indican que el sistema, aunque no es sostenible a largo plazo, contribuye moderadamente a la economía local.
3. El aumento de la producción de electricidad con la introducción de nuevas tecnologías es la alternativa más atractiva para disminuir la transformidad del sistema y así aumentar la eficiencia emergética.

#### REFERENCIAS

- Abreu, C., Evaluación emergética del proceso agrícola para la obtención de caña de azúcar en la UEB “14 de Julio”, Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico en la Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2017.
- Brown, M., y Ulgiati, S., *Emergy Analysis and Environmental Accounting*, Encyclopedia of Energy, Cleveland (Ed.) Oxford (United Kingdom): Elsevier., 2004, pp. 329-354.
- Buenfil, A., *Emergy evaluation of water.*, University of Florida, Gainesville. Retrieved from <http://cfw.essie.ufl.edu/Publications/pdfs/Buenfil.A.>, Dissertation.pdf, 2001.
- De-Vilbiss, C., y Brown, M., New method to compute the emergy of crustal minerals., *Ecological Modelling*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.04.007>, 2015.
- Giannetti, B., Prevez, L., Agostinho, F., y Almeida, C., Greening A Cuban Local Mango Supply Chain: Sustainability Options and Management Strategies., *Journal of Environmental Accounting and Management*, Vol.4, No. 3, 2016, pp. 251-266.
- Jarméus, C., *Emergy Analysis of Biodiesel and Biogas Production from Baltic Sea Macro Algae.*, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2013.
- Lima, C., y Ortega, E., *Emergy Assessment of Ethanol Production from Sugarcane in Brazil.*, Paper presented at the Proceedings from the Fifth Biennial Emergy Conference, Gainesville (Florida), 2009.
- Marquetti, H., Los retos de la recuperación de la industria azucarera., *Estructura económica de Cuba*, Vol. 2, Editorial Félix Varela, 2006, pp. 70-81.



- Odum, H., *Emergy of Global Processes Handbook of Emergy Evaluation., A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios* Gainesville (Florida): Center for Environmental Policy, Folio # 2, 2000, pp. 12-13.
- Ramos, F., *Metodología de evaluación para la conversión de fábricas de azúcar a biorrefinerías mediante lógica difusa., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2014.*
- Simoncini, E., Coppola, S., Borsa, S., y Pulselli, F., *Honey and sugar as surrogate products: an emergy evaluation., Int. J. of Design and Nature and Ecodynamics, Vol. 4, No. 2, 2009, pp. 143–153.*
- Sweeney, S., Cohen, M., King, D., y Brown, M., *Creation of a Global Emergy Database for Standardized National Emergy Synthesis., Paper presented at the Proceedings from the Fourth Biennial Emergy Conference, Gainesville (Florida), 2007.*