

“MODELACIÓN DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA EN LA EMPRESA AZUCARERA HERIBERTO DUQUES”

Autores: Pérez Gil, Maylier¹; Contreras Moya, Ana Margarita¹; Rosa Domínguez, Elena²; Espinosa Rodríguez, Vianka¹.

¹Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV). Facultad de Química-Farmacología.

²Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV). Centro de Estudios de Química Ambiental.

1,2 Carretera a Camajuaní, km 5 ½ , Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
maylier@uclv.edu.cu

anama@uclv.edu.cu erosa@uclv.edu.cu vespinoza@uclv.edu.cu

Resumen

En este trabajo se realiza la modelación del inventario del ciclo de vida de la producción de azúcar crudo en la Empresa Azucarera “Heriberto Duquesne”; lo cual permite evaluar los impactos ambientales asociados al proceso en diferentes escenarios de operación y detectar las variables operacionales que mayor incidencia tienen sobre cada una de las categorías de impacto que se analizan.

Mediante el árbol del proceso se identifican todas las corrientes de entrada/salida correspondientes a cada una de las operaciones unitarias del proceso. Con el uso del software SimaPro 7.1 se realiza la edición y configuración de los parámetros del inventario, mediante balances de materiales y energía, identificándose la jerarquía de los mismos a nivel de unidad de procesos para construir y comparar diferentes escenarios.

Se evalúan diferentes escenarios de producción variando parámetros de entrada y salida, usando la metodología del Eco-indicador 99, lo cual constituye una opción para el análisis de sensibilidad de las variables manejadas y puede ser utilizado para la modelación de cualquier escenario de similares características en la industria azucarera.

Palabras Claves: ACV, modelación, parámetros, sensibilidad, bases de datos, Eco-indicador 99, azúcar.

In this work is performed the modeling the life cycle inventory of crude sugar production from in the “Heriberto Duquesne” Sugar Company; which allows assessing the environmental impacts associated with the process in different operation scenarios and identify major operational variables that have

impact on each of the impact categories analyzed.

By means the tree of process are identified all current input/output for each unit operations of the process.

SimaPro 7.1 software is used for editing and configuration of the inventory parameters through material and energy balances, is identified the hierarchy of the same unit-level processes to build and compare different scenarios.

Different production scenarios are evaluated by varying input parameters and output, using the methodology of the Eco-indicator 99, which is an option for sensitivity analysis of the variables, involved and can be used for modeling any scenario with similar characteristics in the sugar industry

Key words: LCA, modeling, parameter sensitivity, databases, Eco-indicator 99, sugar.

Introducción

Para cuantificar la sostenibilidad de tecnologías se han implementado varias herramientas como el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). La metodología del ACV integra todos los impactos ambientales ocurridos a lo largo del ciclo de vida del producto y los relaciona con problemas ambientales específicos; además, permite establecer prioridades para definir las estrategias preventivas de mejoramiento del desempeño ambiental. (Fullana, 2002; PNUMA, 2003; Iglesias, 2005; NC ISO 14040, 2005; Gaudreault et. al., 2006; Sánchez y col., 2007; Althaus et. al., 2007)

Para la aplicación de un ACV se definen cuatro etapas, en correspondencia a los estándares ISO especialmente designados, que en Cuba se corresponden con las NC ISO 14040 a la NC ISO 14043: definición del objetivo y alcance del estudio, análisis de inventario, evaluación de los impactos ambientales e interpretación del estudio. (Sáenz y Zufía, 1999; Fullana, 2002; NC ISO 14040, 2005; SAIC, 2006; Sánchez y col., 2007)

Para la aplicación de esta metodología se han desarrollado diferentes programas computacionales como el SimaPro, que muestran avances en la facilidad y eficacia del método, siendo el software más usado en ACV. (Goedkoop and Oele, 2004; PRÉ Consultants, 2006a,b)

Este trabajo tiene como objetivos, modelar el inventario de la industria azucarera, definir y configurar los parámetros del inventario y evaluar diferentes escenarios en función de la variabilidad de las condiciones de operación.

Métodos

El Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) es la etapa más exigente en el ACV, esta comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (uso de recursos) y las salidas (productos, co-productos, emisiones al aire, agua y suelo) de un sistema de producción. Para esto se colectan datos del uso de recursos y emisiones de todos los procesos, utilizando distintas fuentes de datos (Bases de datos de ACV, reportes, artículos científicos, investigaciones en el lugar, conocimientos de expertos); construir un modelo del sistema y calcular el uso de recursos y emisiones del producto

estudiado. Mediante los cálculos se puede detectar en qué fase del ciclo de vida del producto objeto de estudio, se dan las mayores entradas, salidas e impactos ambientales. (Llanes y col, 2005; Björklund y Finnveden, 2006; SAIC, 2006; Sánchez y col., 2007)

Para la modelación del ICV se deben realizar las siguientes acciones:

1. Recoger los datos en correspondencia a un formato de recolección de los mismos.
2. Parametrizar los datos que se desean modelar.
3. Confeccionar el diagrama de flujo identificando todas las corrientes de entradas (materias primas y energía) y salidas (productos, co-productos y emisiones).
4. Identificar todas las reglas de cálculo a emplear para los parámetros variables (balances de masa y energía).
5. Realizar la asignación de cargas ambientales en correspondencia a los co-productos que se tienen en el proceso.
6. Analizar la sensibilidad de los datos del ICV para identificar la incertidumbre ha obtener en un ACV debido a los efectos acumulativos de imprecisiones en los datos de entrada.

Mediante la parametrización se definen los parámetros necesarios para una especificación completa de un modelo u objeto geométrico, se utilizan datos de varios tipos y permite aplicar el mismo algoritmo a tipos de datos diferentes.

Al usar parámetros para modelar un proceso se emplean reglas de cálculo en vez de datos fijos para construir el modelo, las cuales se pueden usar en diferentes etapas y procesos. Posibilita construir modelos variando los parámetros de entrada y salida del proceso, además de realizar comparaciones entre dos o más escenarios.

Resultados y Discusión

La Empresa Azucarera “Heriberto Duquesne” se encuentra ubicada en el municipio de Remedios, Villa Clara, con una capacidad de molida diaria de aproximadamente veinte toneladas. El proceso de producción de azúcar crudo comienza desde que llega la caña de azúcar al central y es descargada en el basculador. La caña proviene de diferentes unidades de producción por lo que hay variabilidad

de la calidad de la materia prima en función de las condiciones de cultivo, cosecha, limpieza y tiempo transcurrido desde el corte de la misma hasta su recepción en la fábrica lo cual incide en su procesamiento.

De forma general, el proceso responde a las características de un proceso convencional de producción de azúcar crudo donde se destacan cinco etapas: extracción del jugo, purificación (calentamiento, alcalización y clarificación), concentración (evaporación y cocción del azúcar), cristalización y centrifugación del azúcar. Es importante destacar que del total del jugo mezclado que se obtiene en el tándem de molinos solo el 85% es destinado a la producción de azúcar crudo, el resto se utiliza en la destilería anexa a la fábrica unido al jugo de los filtros y a la miel B. En la etapa de evaporación se dispone de pre-evaporación y un triple efecto; además se cuenta con un sistema de dos masas cocidas (masa cocida A y B).

El bagazo producido en la etapa de extracción es usado como combustible para cogenerar energía y las reglas de cálculo empleadas para las corrientes involucradas en este proceso auxiliar están en correspondencia a lo planteado por Pérez (2009).

En la figura 1 se representa el árbol de procesos para la obtención del azúcar, que no es más que el modelo para el inventario de los datos.

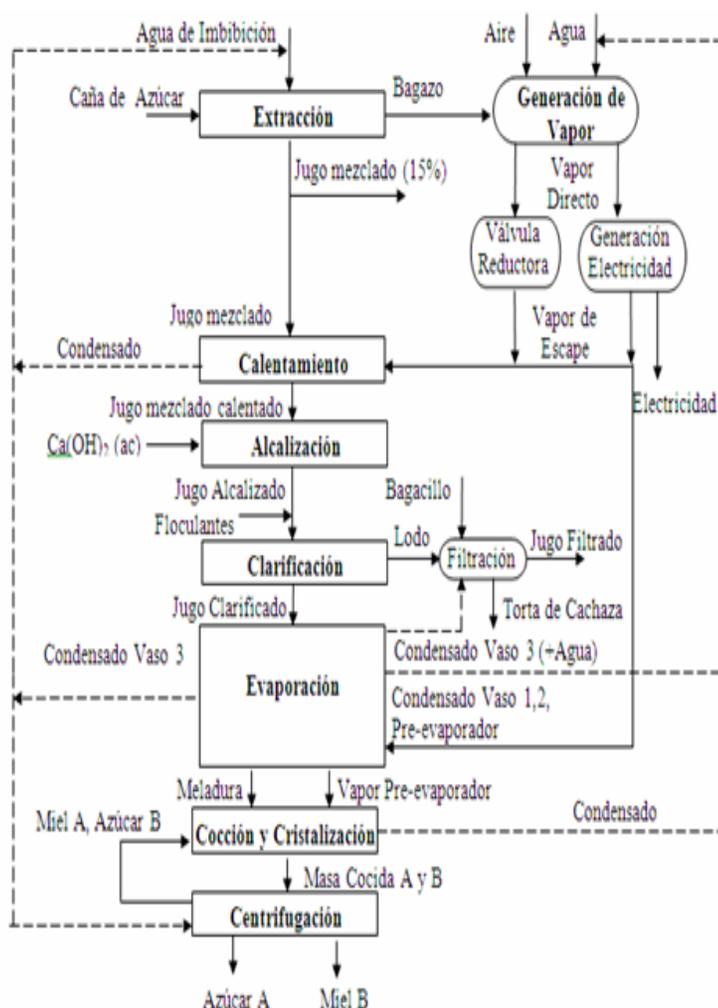


Figura 1: Árbol del proceso del ciclo de vida del azúcar crudo en la Empresa Azucarera “Heriberto Duquesne”.

De acuerdo a la clasificación de los parámetros que se maneja en la literatura se definen los datos del ICV en:

Parámetros de Entrada: datos fijos y se refieren en los reportes de zafra de la fábrica. Están directamente relacionados con propiedades de las corrientes involucradas en cada una de las etapas del proceso.

Parámetros Calculados: se determinan mediante balances de materiales y energía, usando los parámetros de entrada y pueden ser datos de entrada.

Los parámetros editados en función de la clasificación antes especificada y sus reglas de cálculo se

Tabla1. Relación de parámetros.

Nº	Parámetros de Entrada	U ³	Parámetros Calculados	U	Reglas de Cálculo
1.	Caña de Azúcar (CA)	kg	Agua de Imbibición (AI)	m ³	$\frac{pcAI * CA}{100 * dAI}$
2.	Fibra en Caña de Azúcar (FCA)	%	Bagazo (B)	kg	$\frac{FCA * CA}{FB}$
3.	Fibra en Bagazo (FB)	%	Jugo Mezclado (JM)	kg	$(pcU/100)(CA + AI - B)$
4.	Por ciento de Agua de Imbibición (pcAI)	%	Jugo Mezclado a la salida de los calentadores (JMc)	kg	JM
5.	Por ciento de Jugo Mezclado que se destina a proceso (pcU)	%	Calor específico del Jugo Mezclado (CpJM)	$\frac{kJ}{kg * ^\circ C}$	$4,18 - 0,023408 * BxJM$
6.	Densidad del Agua de	$\frac{kg}{m^3}$	Consumo de vapor de	kg	$X \frac{JM * CpJM * [TJMc - TJM]}{landaVE}$

	Imbibición a 60 °C.		escape en los calentadores (Vec)		
7.	Brix del Jugo Mezclado (BxJM)	%	Lechada de cal (Le)	kg	IcLe * CA
8.	Temperatura del Jugo Mezclado (TJM)	°C	Jugo Alcalizado (JA)	kg	JMc + Le
9.	Temperatura del Jugo Mezclado a la salida de los calentadores (TJMc)	°C	Jugo Filtrado (JF)	kg	$\frac{pcJF}{100} * JM$
10.	Calor latente del vapor de escape que entra a los calentadores (landaVE)	$\frac{kJ}{kg * ^\circ C}$	Torta obtenida en la filtración (T)	kg	IT * CA
11.	Factor de pérdidas en los calentadores (X)	-	Agua de Lavado utilizada en la filtración (AL)	kg	$\frac{pcAL}{100} * T$
12.	Índice de consumo de Lechada de cal (IcLe)	$\frac{kgLe}{kgCA}$	Bagacillo empleado en la filtración (Bc)	kg	IBc * CA
13.	Por ciento de Jugo Filtrado (pcJF)	%	Floculantes (F)	kg	$\frac{IF * JA}{dIA}$

14.	Índice de Torta producida (IT)	$\frac{kgT}{kgCA}$	Lodo del clarificador (L)	kg	IF + T - AL - Bc
15.	Por ciento de Agua de Lavado (pcAL)	%	Jugo Clarificado (JC)	kg	JA + F - L
16.	Índice de consumo de Bagacillo en la filtración (IBc)	$\frac{kgBc}{kgCA}$	Brix del Jugo Clarificado (BxJC)	%	BxJM
17.	Densidad del Jugo Alcalizado (dJA)	$\frac{kg}{m^3}$	Meladura (M)	kg	$\frac{JC * BxJC}{BxM}$
18.	Índice de consumo de Floculantes (IcF)	$\frac{kgF}{m^3 JA}$	Agua evaporada en el múltiple efecto (AE)	kg	JC - M
19.	Brix de la Meladura (BxM)	%	Calor específico del Jugo Clarificado (CpJC)	$\frac{kJ}{kg * ^\circ C}$	4,18 - 0,023408 * BxJC
20.	Calor latente del vapor de escape que entra al Pre-evaporador (landaME)	$\frac{kJ}{kg * ^\circ C}$	Consumo de vapor de escape en el Pre-evaporador (Vpre)	kg	$\frac{JC * CpJC * (Tpre - TJC) + AE * landapre}{landaME}$
21.	Temperatura en el Pre-evaporador (Tpre)	°C	Miel B (MB)	kg	$M \frac{PzM - PzAA}{PzMB - PzAA}$
22.	Temperatura del Jugo Clarificado a la entrada del Pre-evaporador (TJC)	°C	Azúcar A (AA)	kg	M - MB
23.	Calor latente del vapor de escape que entra al Pre-evaporador (landapre)	$\frac{kJ}{kg * ^\circ C}$	Caña de azúcar en arrobas (cam)	@	$\frac{CA * 2,2}{25}$
24.	Pureza de la Meladura (PzM)	%	Consumo de vapor en los Tachos (VT)	kg	0,08523 * cam
25.	Pureza de la Miel B (PzMB)	%	Energía Eléctrica consumida (EEc)	kW - h	Icee * CA
26.	Pureza del Azúcar A (PzAA)	%	Energía Eléctrica entregada al SEN (EEsen)	kW - h	Isen * CA

27.	Índice de consumo de energía eléctrica (Icee)	$\frac{kW-h}{kgCA}$	Energía Eléctrica generada total (EET)	kW - h	EEsen + EEc
28.	Índice de entrega al SEN de energía eléctrica (Isen)	$\frac{kW-h}{kgCA}$	Cenizas de parrilla (Ce)	kg	0,000625 * B
29.	Índice de generación de vapor en el generador de vapor (Ivg)	$\frac{kgV}{kgCA}$	Aire alimentado al generador de vapor (aire)	kg	2,87 * B
30.	Por ciento de pérdidas en el generador de vapor (pcPgv)	%	Material Particulado (MP)	kg	0,011875 * B
31.	Densidad del CO ₂ a la temperatura de salida de los gases de la chimenea T = 260 °C (dCO ₂)	$\frac{kg}{m^3}$	Emisión de Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	0,4385 * B * dCO ₂
32.	Densidad del SO ₂ a la temperatura de salida de los gases de la chimenea T = 260 °C (dSO ₂)	$\frac{kg}{m^3}$	Emisión de Dióxido de Azufre (SO ₂)	kg	0,00028 * B * dSO ₂
33.	Densidad del N ₂ a la temperatura de salida de los gases de la chimenea T = 260 °C (dN ₂)	$\frac{kg}{m^3}$	Emisión de Nitrógeno (N ₂)	kg	1,7504 * B * dN ₂
34.	³ U: Unidad		Alcohol Absoluto (AAB)	kg	0,0000072 * CA
35.			Acido Clorhídrico (HCl)	kg	0,000046 * CA
36.			Vapor generado en el Generador de Vapor (Vg)	kg	Ivg * CA
37.			Agua consumida en el Generador de Vapor (Agv)	m ³	$\frac{Vg + \frac{pcPgv}{100} * Vg}{dAI}$
38.			Consumo de Agua Total (AT)	m ³	AI + Agv

Una vez editados los parámetros se evalúan los impactos ambientales del proceso, mediante el Eco-indicador 99, donde se obtuvo la contribución final del inventario de datos, la red del proceso, los perfiles ambientales por categorías de impacto y de daño en forma gráfica y tabulada, lo que permitió determinar cuáles son las variables que mayor incidencia tienen sobre cada categoría de impacto.

En la Figura 2 se observa que las categorías de impacto que presentan valores negativos (beneficiosos) están asociadas con las emisiones al aire, agua y suelo de compuestos orgánicos (principalmente benceno, dioxinas, tolueno, dicloroetano, cloruro de metileno, tetracloroetileno, ácido fluorhídrico, fenol) y de metales pesados (arsénico, cadmio, níquel, cromo, mercurio, cobre, plomo) las cuales son reducidas por concepto de los productos evitados (electricidad y cenizas para compostaje).

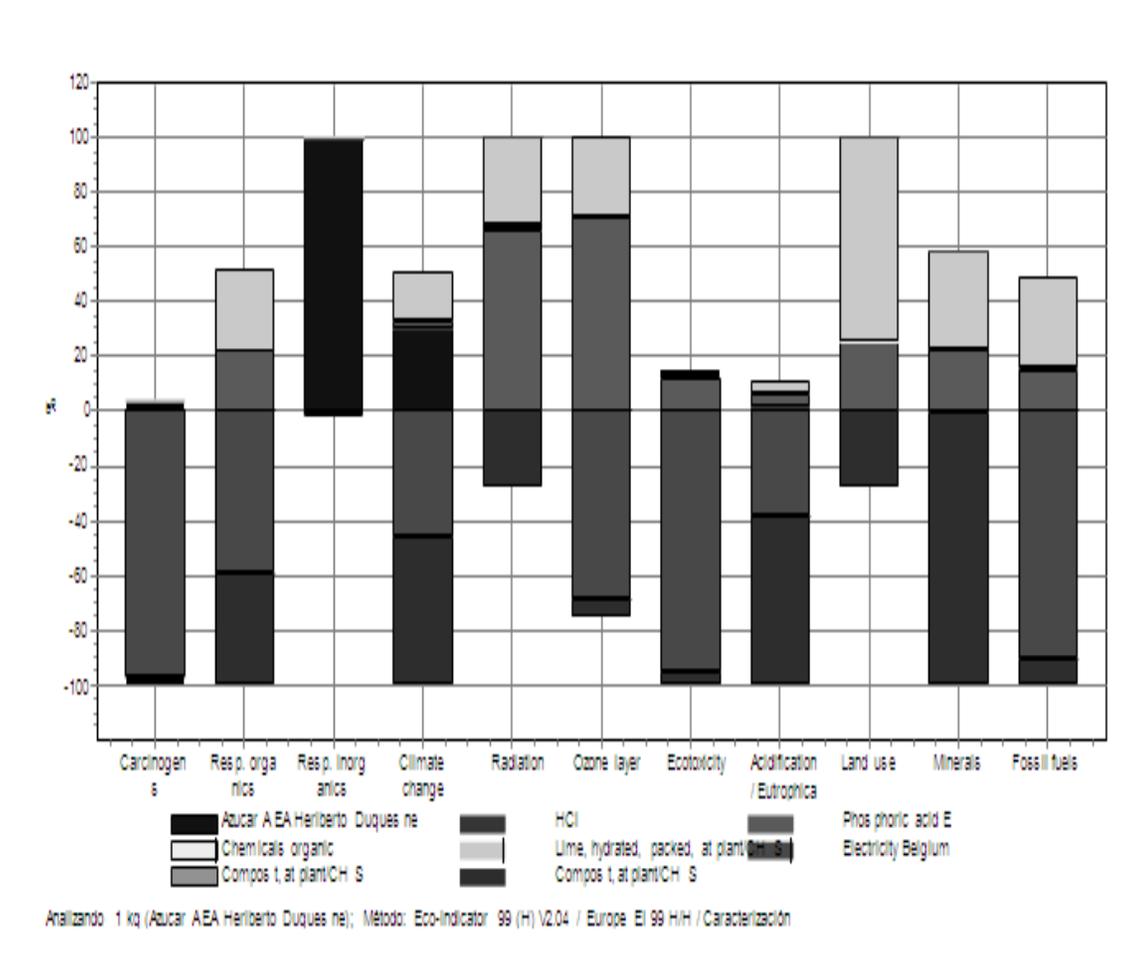


Figura 2. Perfil ambiental por categorías de impacto/caracterización.

En la Figura 3 se observa que la categoría de impacto, efectos respiratorios de compuestos inorgánicos, presenta los mayores valores perjudiciales para el medio ambiente, justificado por la emisión de material particulado (MP-10, MP-2.5), óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre como los principales contribuyentes producidos en la generación de vapor a partir de bagazo.

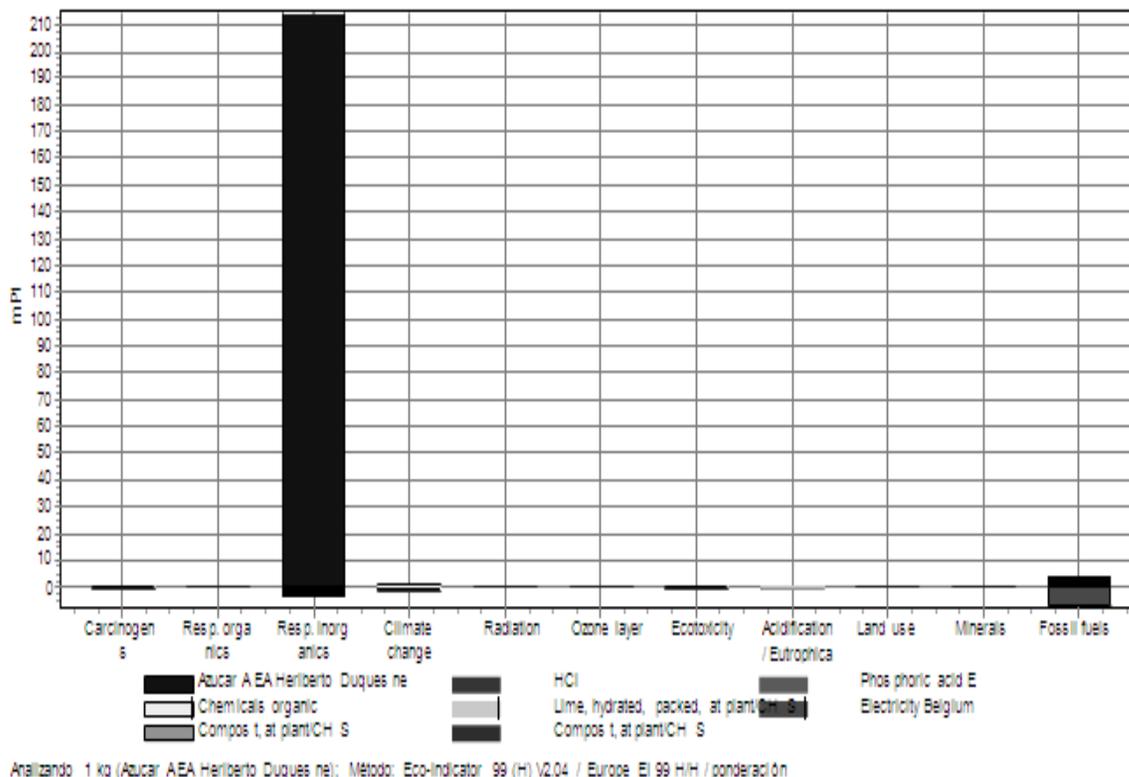


Figura 3. Perfil ambiental por categorías de impacto/ponderación.

Si se analiza el impacto por categoría de daño se evidencia, en la Figura 4, que el mayor impacto perjudicial es sobre la Salud Humana, fundamentado por los resultados de la categoría de efectos respiratorios por compuestos inorgánicos explicada con anterioridad. Mientras, el menor efecto se produce sobre los Recursos debido al consumo de electricidad generada por el propio proceso de producción.

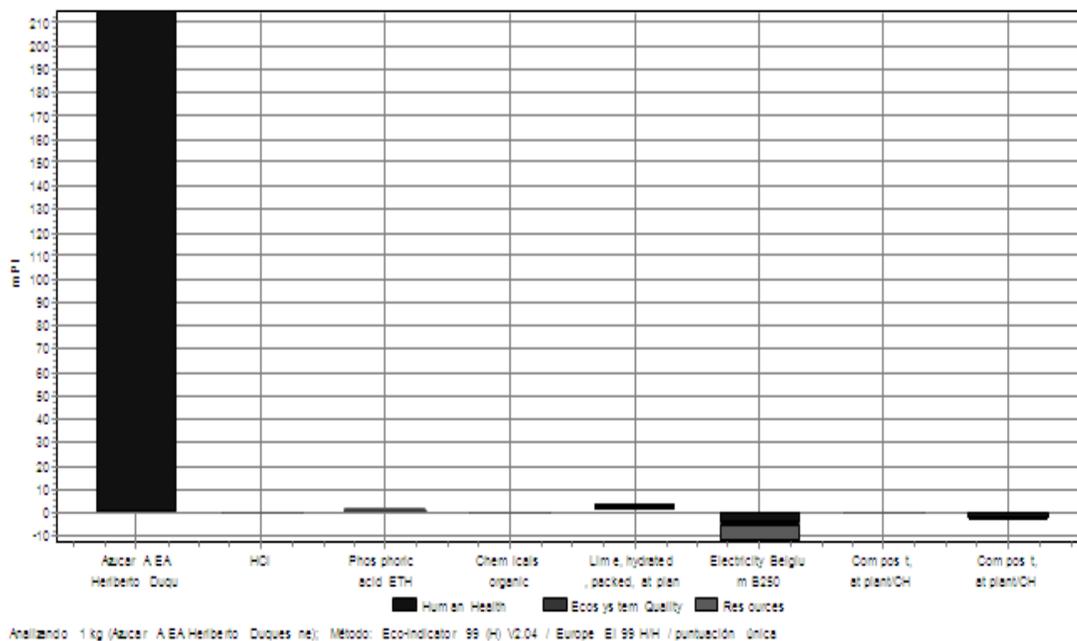


Figura 4. Perfil ambiental por categorías de daños/puntuación única.

Para la comparación de escenarios se escogieron 15 días de zafra y se hacen variar tres parámetros (caña de azúcar molida, fibra en caña de azúcar y sólidos solubles totales en el jugo mezclado) lo cual permite establecer comparaciones y determinar la influencia de cada uno de estos parámetros sobre las diferentes categorías de impacto evaluadas.

En la Figura 5 se evidencia que en la categoría de efectos respiratorios de compuestos inorgánicos es donde se obtiene variabilidad en los resultados pues está directamente relacionada con dos de los parámetros variados (caña de azúcar molida y fibra en caña de azúcar) y los mayores resultados son directamente proporcionales al producto de estos dos parámetros en función de la regla de cálculo usada para determinar la emisión de material particulado (depende del bagazo producido). Mediante la opción de comparación se puede determinar cuáles son las categorías de impacto más afectadas en función de los parámetros analizados y los escenarios (días) que presentan los mayores daños sobre el medio ambiente.

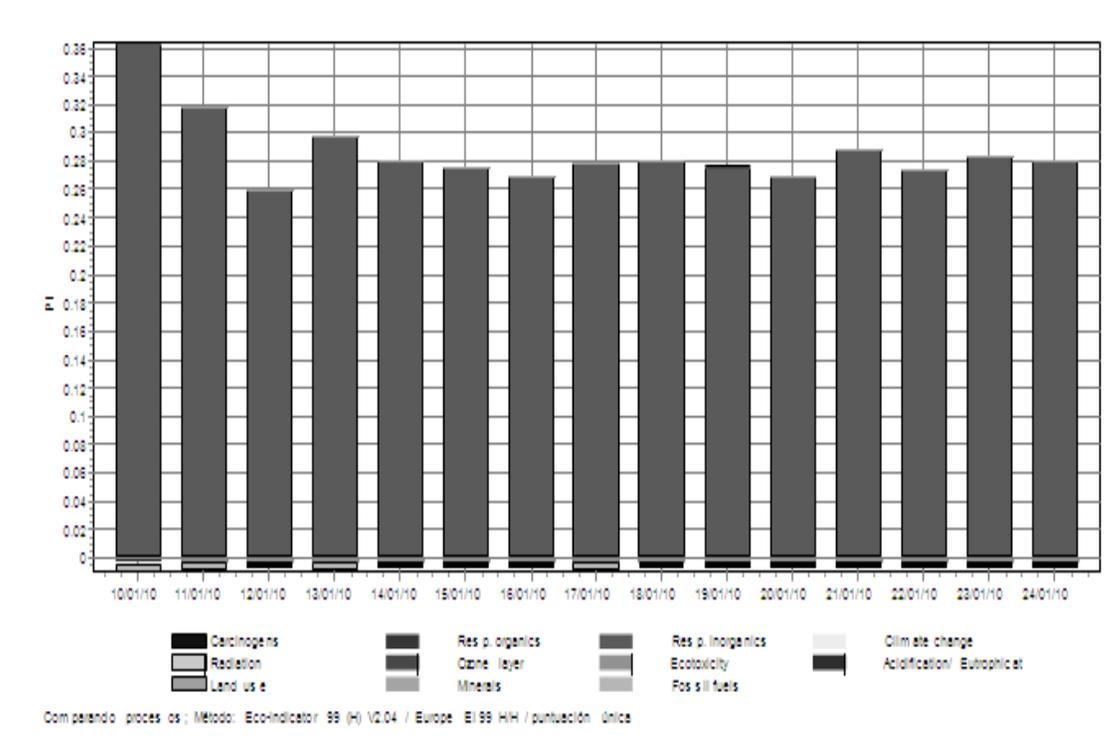


Figura 5. Comparando escenarios. Perfil ambiental por categorías de impactos/puntuación única.

Conclusiones

1. La parametrización del inventario del ciclo de vida del azúcar crudo permite modelar diferentes escenarios variando los parámetros de entrada y salida del proceso.
2. La modelación del inventario del ciclo de vida del azúcar crudo permite comparar dos o más escenarios.
3. La fase de evaluación de impactos reporta los mayores efectos perjudiciales sobre la categoría de efectos respiratorios por compuestos inorgánicos debido a la emisión de material particulado y por tanto para la categoría de daños a la salud humana.
4. La comparación de escenarios reporta variabilidad en la categoría de efectos respiratorios por compuestos inorgánicos debido a la proporcionalidad directa que existe entre la emisión de material particulado y los parámetros variados (caña de azúcar molida y fibra en caña de azúcar).
5. Los impactos beneficiosos sobre las diferentes categorías de impacto están dados por concepto de productos evitados.

Referencias Bibliográficas

1. Althaus, J. H. et. al. (2007). "Overview and Methodology. Data v2.0 (2007)". Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent report No. 1. Dübendorf, December 2007.
2. Björklund, A. and Finnveden, G. (2006) "Welcome to a course in Life Cycle Assessment, Center for Environmental Strategies research". Revisado en Abril, 2006. Disponible en: http://www.infra.kth.se/fms/utbildning/lca/1N1800_F1.pdf
3. Contreras, A. M. (2007) "Metodología para el análisis del ciclo de vida combinado con el análisis energético en la industria azucarera cubana". Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.
4. Cardona, C.A.; Sánchez, D. L.; Sánchez, O. J. (2007) "Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa". Revista Universidad EAFIT, Vol. 43, 1 146. Abril-Junio. Disponible en: <http://www.doaj.org/doaj?func=abstract&id=246696>
5. Deepchand, K. (2005) "Case study on bagasse

energy cogeneration in Mauritius". Paper Presented to the Parliamentarian Forum on Energy Legislation and Sustainable Development, Cape Town, South Africa. Disponible en: <http://www.sidsnet.org/docshare/other/20031104113921>

6. Fullana, P. (2002) "Análisis del Ciclo de Vida". Editorial Rubes. España.
7. Gaudreault, C.; Samson, R.; Stuart, P. R. (2006) "Survey of LCA applications in the pulp and paper industry". Conference Proceedings. 17th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2006. Prague, Czech Republic. ISBN: 80-86059-45-6.
8. Goedkoop, M and Oele, M. (2004) "Introduction to LCA (Life Cycle Assessment) with SimaPro". PRé Consultants. Disponible en: <http://www.pre.nl/download/manuals/UserManual.pdf>
9. Iglesias, D. (2005) "Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de productos y su aplicación en el sistema agroalimentario. Contribuciones a la Economía", ISSN 1696-8360. Disponible en: <http://www.eumed.net/ce/>
10. Llanes, E. y col. (2005) "Propuesta de aplicación de herramienta de gestión ambiental. Análisis de Ciclo de Vida a la actividad agrícola". Revista Ciencias. Código ISPN de la Publicación: EEEykVIFZuXyoXnEbj. Publicado el 16 de Mayo, 2005. Disponible en: <http://www.revistaciencias.com>
11. NC ISO 14040 (2005) "Environmental management. Life Cycle Assessment. Principles and framework". National Office of Normalization. Havana City. Cuba.
12. Pérez, M. (2009) "Evaluación ambiental del proceso de cogeneración con bagazo en la Industria Azucarera Cubana mediante el Análisis del Ciclo de Vida" Tesis presentada en opción al grado científico de Máster en Ingeniería en Saneamiento Ambiental. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.
13. PNUMA (2003) (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). "Life Cycle Initiative". Disponible en: <http://www.uneptie.org/sustain/lcinitiative>
14. PRé Consultants. (2006) "Life cycle tools to improve environmental performance and sustainability". Amersfoort, The Netherlands. Revisado en Enero, 2006a. Disponible en: <http://>

www.pre.nl/pre

15. PRé Consultants. (2006) “SimaPro 6.0. LCA software: the powerful life cycle solution”. The Netherlands. Revisado en Enero, 2006b. Disponible en: <http://www.pre.nl>

16. SAIC (Scientific Applications International Corporation). (2006) “Life Cycle Assessment: principles and practice”. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio 45268. Mayo, 2006. Disponible en: http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/pdfs/chapter1_frontmatter_lca101.pdf

17. Sánchez, O. J. y col. (2007) “Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa”. Revista Universidad EAFIT, Vol. 43, 1 146. Abril-Junio, 2007. Disponible en: <http://www.redalyc.uaemex.mx>

18. Sáenz, M. y Zufía, J. (1999) “Análisis de Ciclo de Vida para la reducción de impactos medioambientales generados por el sector agroalimentario Vasco”. Sociedad pública de gestión ambiental del país Vasco (IHOBE), 1999. Disponible en: <http://www.nasdap.ejgv.euskadi.net/r50-468/es/contenidos>