

Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa



Oscar Julián Sánchez

Ingeniero Químico, M.Sc. en Biotecnología, Candidato a Ph.D en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Profesor del Departamento de Ingeniería, Universidad de Caldas. Integrante del Grupo de Investigación en Procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y del Grupo de Investigación en Alimentos y Agroindustria, Universidad de Caldas.
osanchez@ucaldas.edu.co

Carlos Ariel Cardona

Ingeniero Químico, M.Sc. en Ingeniería Química de la Síntesis Orgánica, Ph.D en Ingeniería Química. Profesor del Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Integrante del Grupo de Investigación en Procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
ccardonaal@unal.edu.co

Diana Lucía Sánchez

Ingeniera Ambiental. Especialista en Evaluación Técnica y Económica de Impactos Ambientales.
dsancheztoro@gmail.com.

Resumen

En el presente artículo se destaca la importancia de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida para la evaluación del desempeño ambiental de procesos de la industria química. Se describen las diferentes fases involucradas en la aplicación del análisis de ciclo de vida de un proceso. Igualmente, se ilustra el papel crucial que juega el análisis de ciclo de vida en la síntesis de procesos. Se enuncia la estrategia general de optimización de procesos sujeta a criterios económicos y ambientales. Mediante un estudio de caso, se proporciona una aproximación cualitativa para la aplicación del análisis de ciclo de vida durante el diseño del proceso de producción de alcohol carburante a partir de caña de azúcar. Con este fin, se utilizó información secundaria para el análisis de la etapa de cultivo de la caña. Para las etapas del proceso en la planta de producción, se tuvieron en cuenta datos obtenidos de la simulación de la conversión de caña en etanol empleando Aspen Plus. La cuantificación de los impactos ambientales se realizó mediante el software WAR GUI. Se destacan las principales ventajas del análisis de ciclo de vida durante el diseño de procesos amigables ambientalmente, así como sus limitaciones más importantes cuando se aplica esta metodología en las condiciones de Colombia.

Life Cycle Assessment and its application in the production of Bio-ethanol: a qualitative approximation

Abstract

This article shows the importance of Life Cycle Assessment (LCA) methodology for the environmental evaluation of the processes of the chemical industry. It describes the different phases involved in the application of the Life Cycle Assessment in a process. Also, it shows the crucial role of the Life Cycle Assessment in the synthesis of the processes. It mentions the general strategy for processes optimization subject to economic and environmental criteria. By means of the study of a case, it grants a qualitative approximation for the application of the Life Cycle Assessment during the design of the production process of carburating alcohol from sugarcane. With this purpose, we used secondary information for the analysis of the sugarcane growing stage. For the stages of the process in the production plant, we considered data obtained from the simulation of the conversion of sugarcane into ethanol using Aspen Plus. The quantification of the environmental impacts was done with WAR GUI software. The main advantages of the Life Cycle Assessment during the design of environmental friendly processes must be highlighted, as well as its most important limitations when this methodology is applied under the Colombian conditions.

Palabras Clave

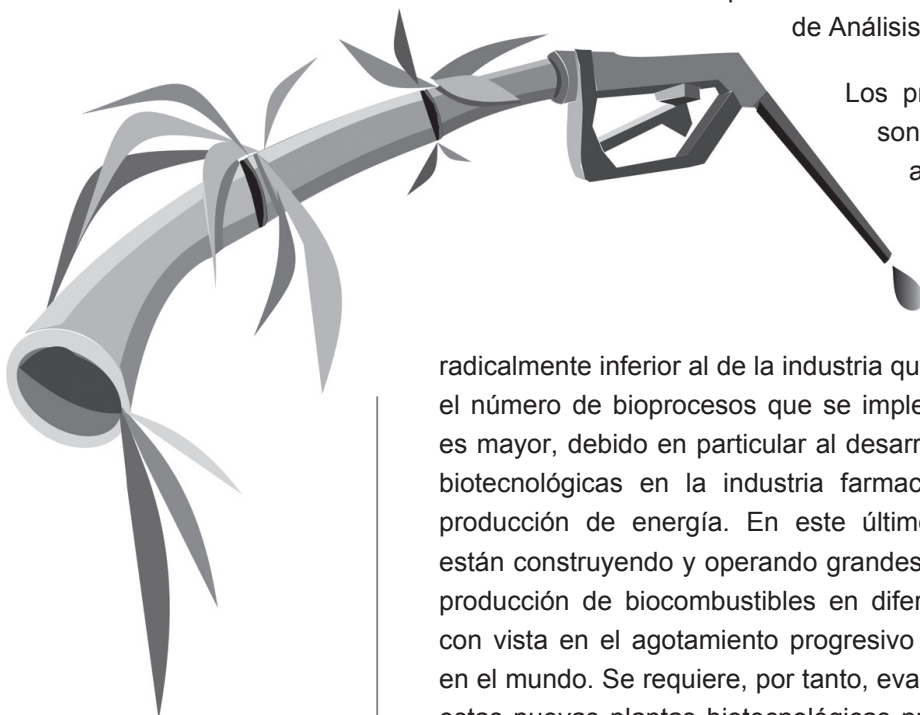
Análisis de ciclo de vida
Impacto ambiental
Optimización de procesos
Alcohol carburante
Caña de azúcar

Palabras Clave

Life cycle assessment
Environmental impact
Process optimization
Fuel ethanol
Sugarcane

Introducción

La preocupación mundial por la degradación del medio ambiente ha llevado a una intensa presión por parte de las comunidades, las ONG y la opinión pública en general por los efectos de las actividades económicas sobre el entorno natural y sobre la sostenibilidad del desarrollo global. La industria química ha estado permanentemente bajo la mira debido a que es una de las mayores contaminantes del aire y de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Los gobiernos han implementado poco a poco una legislación cada vez más exigente que regula ante todo el vertido de contaminantes. Sin embargo, estas disposiciones reguladoras no han considerado el medio ambiente desde una perspectiva global, por lo que en muchos casos la reducción de descargas en una zona implica la sobreexplotación de un recurso natural en otra. Se hace necesario, entonces, considerar el impacto que sobre el medio ambiente tiene la producción de diferentes artículos, materiales y servicios, a partir de un enfoque holístico, es decir, que considere todos los componentes involucrados desde la extracción de las materias primas hasta la disposición de los productos. Precisamente para ello se ha desarrollado la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.



Los procesos biotecnológicos no son ajenos a la problemática ambiental a pesar de su carácter biológico. Este carácter conllevaría a pensar erróneamente que su impacto ambiental es

radicalmente inferior al de la industria química básica. Cada vez más el número de bioprocesos que se implementan a escala comercial es mayor, debido en particular al desarrollo de nuevas aplicaciones biotecnológicas en la industria farmacéutica, de alimentos y de producción de energía. En este último sector, en particular, se están construyendo y operando grandes plantas industriales para la producción de biocombustibles en diferentes países (Berg, 2004), con vista en el agotamiento progresivo de los combustibles fósiles en el mundo. Se requiere, por tanto, evaluar el verdadero efecto que estas nuevas plantas biotecnológicas puedan tener sobre el medio ambiente.

El objetivo de este artículo es mostrar la importancia del Análisis de Ciclo de Vida en el diseño de procesos químicos y bioquímicos. Para ello y desde un enfoque cualitativo, se relaciona un estudio de caso aplicado a un bioproceso: la producción de alcohol carburante a partir de caña de azúcar.

1. Fundamentos del Análisis de Ciclo de Vida

Según la Sociedad de Toxicología y Química Ambientales cuyas oficinas administrativas se localizan en Bruselas (Bélgica), la Evaluación de Ciclo de Vida, o como se conoce más en la literatura española, Análisis de Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*, LCA), es:

un proceso para evaluar las descargas ambientales asociadas con un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando los materiales y la energía utilizada y los residuos liberados al ambiente; para evaluar el impacto del uso de esos materiales y energía y de las descargas al ambiente; y para identificar y evaluar oportunidades para efectuar mejoras ambientales (Azapagic, 1999).

Una característica fundamental del LCA frente a otras metodologías de evaluación ambiental, es el análisis de un sistema (por ejemplo, un proceso para la obtención de un producto en particular) en todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción y procesamiento de las materias primas hasta la disposición de los productos considerando sus efectos sobre todo el medio ambiente circundante (por ejemplo, sobre el calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono, etc.).

En contraste, la mayoría de los métodos de evaluación ambiental se enfocan solamente en los efectos inmediatos que tiene el sistema sobre sus alrededores como son los vertidos y las emisiones, por lo cual existe la posibilidad de que al tomar algunas medidas para reducir éstas en un proceso determinado, se aumenten las mismas o distintas emisiones en otras etapas del ciclo de vida del producto obtenido en el proceso.

Varias compañías han utilizado el LCA para mejorar el desempeño ambiental de sus actividades productivas a través del análisis correspondiente de productos y procesos (Bretz y Frankhouser, 1996; Dahllöf, 2003). El LCA se constituye, así, en una herramienta de apoyo

para las empresas en la toma de decisiones tanto durante el diseño y optimización de sus sistemas productivos como durante la operación de sus procesos. El LCA se ha aplicado también para mejorar la competitividad en el mercado mediante la adopción de políticas y prácticas que mejoren o incrementen la sostenibilidad (Mohammed, 2000). De manera específica, se pueden mostrar las ventajas ambientales de un producto determinado a sus potenciales consumidores. Sin embargo los altos costos y la incertidumbre sobre los posibles beneficios económicos limitan la aplicación del LCA en las empresas.

También diferentes gobiernos han utilizado el LCA para definir políticas ambientales, pero, generalmente, se han enfocado a evaluar un limitado número de descargas (vertidos) de sistemas específicos y una o dos etapas de la vida útil de los mismos. Se espera que en el futuro el LCA sea clave para la adopción de decisiones con relación a la calidad del medio ambiente en el que viven los ciudadanos. Se considera que esta metodología es una herramienta muy adecuada para el desarrollo de estándares ambientales y para identificar dónde la intervención del gobierno o de las autoridades ambientales será más efectiva asegurando que todos los impactos sean tenidos en cuenta apropiadamente (DEFRA, 2000).

La mayoría de reportes sobre el LCA han sido enfocados hacia productos (Bovea y Vidal, 2004; Ardente *et al.*, 2005; De Monte *et al.*, 2005). No obstante, son cada vez más evidentes las grandes ventajas de aplicar el LCA a la selección, diseño y optimización de procesos.

2. Fases del Análisis de Ciclo de Vida

El marco metodológico para llevar a cabo el LCA comprende cuatro fases (Azapagic, 1999): definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impactos e identificación de soluciones (análisis de mejoras).

La primera fase comprende la definición del sistema a estudiar. Se trata el medio ambiente desde un enfoque termodinámico como todo lo que rodea

al sistema, es decir, el universo excluyendo el sistema que se estudia. El sistema produce bienes y servicios, que son examinados como salidas; para generar estas salidas, se necesitan entradas de materiales y energía. El LCA no reduce a la planta de producción la delimitación del sistema, pues éste incluye todas las descargas e impactos que se originan en el ciclo de vida completo del producto o proceso que se estudia: desde que se extraen las materias primas, se transforman en el producto, se utiliza el mismo, se reutiliza o recicla parcial o totalmente, hasta que se dispone como residuo o emisiones. En esta primera fase se define también la unidad funcional que sirve de base para la comparación y análisis de los sistemas; tal unidad es una medida cuantitativa de la función del sistema, es decir, de la salida de productos o servicios que el sistema entrega al ambiente (Mellor *et al.*, 2002).

Cuando se definen las fronteras del sistema, también se definen dos subsistemas (Azapagic, 1999): primario y secundario. El primero está definido por el conjunto de procesos que está directamente relacionado con el objeto de estudio y que entrega una unidad funcional. El subsistema secundario es el que suministra la energía y los materiales al subsistema primario, generalmente mediante un mercado homogéneo, por lo que las plantas y operaciones individuales no se pueden identificar.

Una actividad, generalmente una operación de procesamiento o transporte, que involucra a las materias primas, se trata como una actividad primaria y, en principio, se describe por datos específicos de proceso. Las emisiones ambientales de una actividad primaria se denominan descargas directas. En el análisis se incluyen también las descargas ambientales asociadas al suministro de energía y de materiales auxiliares que aunque se consumen en las actividades primarias no llegan a ser parte del flujo material del proceso (como combustibles y lubricantes). Las entradas de recursos secundarios y las emisiones del (sub)sistema secundario son llamadas descargas ambientales secundarias o indirectas. Éstas se describen por datos industriales genéricos, los

cuales se obtienen de bases de datos, comerciales o públicas, de inventarios de ciclo de vida. Se incluye también la recuperación de energía o materiales como resultado de los tratamientos de residuos del (sub)sistema primario.

En la fase de análisis de inventario se ejecutan los balances de masas y energía y se cuantifican las descargas. Éstas se definen mediante el consumo de energía y las emisiones al aire y al agua así como los residuos sólidos.

Posteriormente, en la fase de evaluación de impactos y una vez se ha compilado la tabla de inventario, se clasifican (agregan) las descargas en un número de categorías reconocidas de impacto ambiental y se caracterizan a través de la evaluación de sus impactos potenciales, es decir, se cuantifican mediante una unidad estándar de medida. Los impactos se pueden agregar en una función única de impacto ambiental mediante la asignación de ponderaciones a los mismos a fin de indicar su importancia relativa. Este procedimiento se conoce como valoración (Azapagic, 1999).

La fase final de identificación de soluciones se orienta a identificar las posibilidades para mejorar el desempeño del sistema. Esta fase puede incluir, además, una identificación de las principales etapas del ciclo de vida que contribuyen a los impactos, un análisis de sensibilidad y las correspondientes recomendaciones.

3. Análisis de Ciclo de Vida y Diseño de Procesos

Con el fin de optimizar los procesos teniendo en cuenta su desempeño ambiental, se han empleado varios enfoques que buscan ante todo la minimización de los residuos: generación de la menor cantidad posible de aguas residuales, reducción de los costos de tratamiento de los residuos y empleo del concepto de Cero Contaminación Evitable (Azapagic, 1999). Sin embargo estas visiones se orientan de nuevo a analizar los efectos de la planta sobre los alrededores sin considerar el ciclo de vida del proceso. La incorporación del LCA en la optimización de procesos conduce a la formulación

de una función multiobjetivo en la cual, además de una función de costos o de utilidades, se incluyen metas ambientales tales como la minimización de las descargas y de los impactos (Azapagic, 1999). Los resultados se obtienen en forma de superficies de Pareto que permiten considerar varios grados de compromiso entre los diferentes óptimos. Una forma de simplificar este problema es la formulación de una única función objetivo que considere en forma ponderada el peso de cada uno de los criterios, entre ellos los económicos y los ambientales.

El LCA se puede acoplar con la optimización multiobjetivo para crear una herramienta útil en la síntesis de procesos. La metodología de Diseño de Productos/Procesos basado en el Ciclo de Vida (*Life Cycle Product/Process Design*, LCPD), permite realizar el análisis de múltiples alternativas tecnológicas para un proceso considerando las etapas del ciclo de vida del mismo. Lo anterior facilita, por ejemplo, la evaluación de distintas materias primas en aras de seleccionar el mejor proceso con base en varios criterios. Para ello, se lleva a cabo la optimización multiobjetivo de las diferentes variantes obteniéndose una gran cantidad de superficies de Pareto, las cuales posibilitan la elección de la mejor opción (Azapagic y Clift, 1999). Azapagic (1999) anota que a través de la integración del LCA al marco de optimización de procesos, se logra una descripción más completa del impacto ambiental del proceso, en lugar del método tradicional que se enfoca sólo a la reducción de residuos.

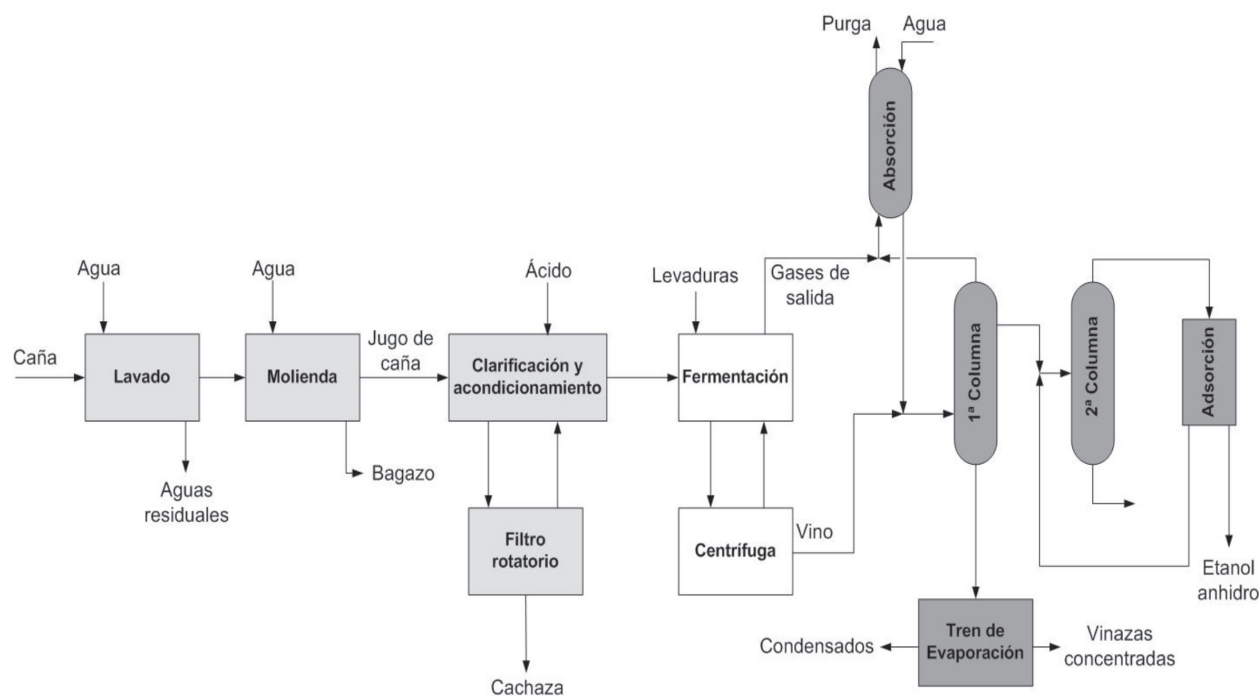
4. Estudio de caso: Producción de Bioetanol Anhidro

En un trabajo previo (Cardona *et al.*, 2005) se efectuó el análisis del proceso de producción de alcohol carburante a partir de caña de azúcar. Para ello, se simuló la configuración tecnológica más representativa del proceso respectivo, el cual incluye las etapas de molienda de la caña de azúcar, acondicionamiento del jugo, fermentación, separación del producto y tratamiento de efluentes. El diagrama de proceso contempla unas etapas

iniciales de preparación y acondicionamiento de la materia prima que involucran el lavado inicial de la caña, su molienda para la obtención de jugo de caña y bagazo, la clarificación del jugo (donde se obtiene un material sólido llamado cachaza) y la adición de ácido sulfúrico al jugo clarificado con el fin de favorecer la hidrólisis de la sacarosa en glucosa y fructosa, así como el ajuste de su pH a un valor adecuado para la etapa de fermentación (figura 1). La fermentación se lleva a cabo en forma continua con levaduras de la especie *Saccharomyces cerevisiae* que convierten los azúcares fermentables contenidos en el jugo en alcohol etílico obteniéndose un mosto fermentado (vino) con una concentración de etanol de 8-10% en peso. Los vapores liberados durante la fermentación arrastran una cantidad apreciable de etanol, por lo que éstos se envían a un lavador de gases en donde una corriente de agua en contracorriente absorbe el etanol; la solución diluida de etanol se envía a la etapa de destilación. Las células de levadura se separan por centrifugación enviándose la fracción líquida a una columna de destilación en donde se eleva la concentración de etanol. De esta primera columna (columna de concentración) se retira una corriente líquida con un contenido de etanol de 45-50%, la cual se envía a una segunda columna de destilación (columna de rectificación) en donde se obtiene un destilado con una concentración de alcohol de 90-95% cercana a su punto azeotrópico (alcohol hidratado). Los vapores de la columna de concentración también se envían al lavador de gases con el fin de recuperar etanol. Para su utilización en calidad de aditivo oxigenante de la gasolina, el alcohol carburante debe tener la mínima cantidad posible de agua, por lo cual el alcohol hidratado se somete a deshidratación mediante adsorción empleando un tipo especial de zeolitas denominadas tamices moleculares. Los fondos de la primera columna de destilación representan una solución concentrada de diferentes compuestos como restos de células, otros productos de la fermentación, azúcares no utilizados y materiales no transformados provenientes de la caña; esta corriente recibe el nombre de vinazas y constituye un efluente líquido con una alta carga orgánica. A fin de disminuir el

volumen de las vinazas, este efluente se somete a evaporación como se ilustra esquemáticamente en la Figura 1. Tomando como base del caso de estudio esta configuración, se analizó la posibilidad de aplicar en forma preliminar y cualitativa la metodología de LCA.

Figura 1. Diagrama del proceso de producción de alcohol carburante a partir de biomasa lignocelulósica. Adaptado de Cardona *et al.* (2005)



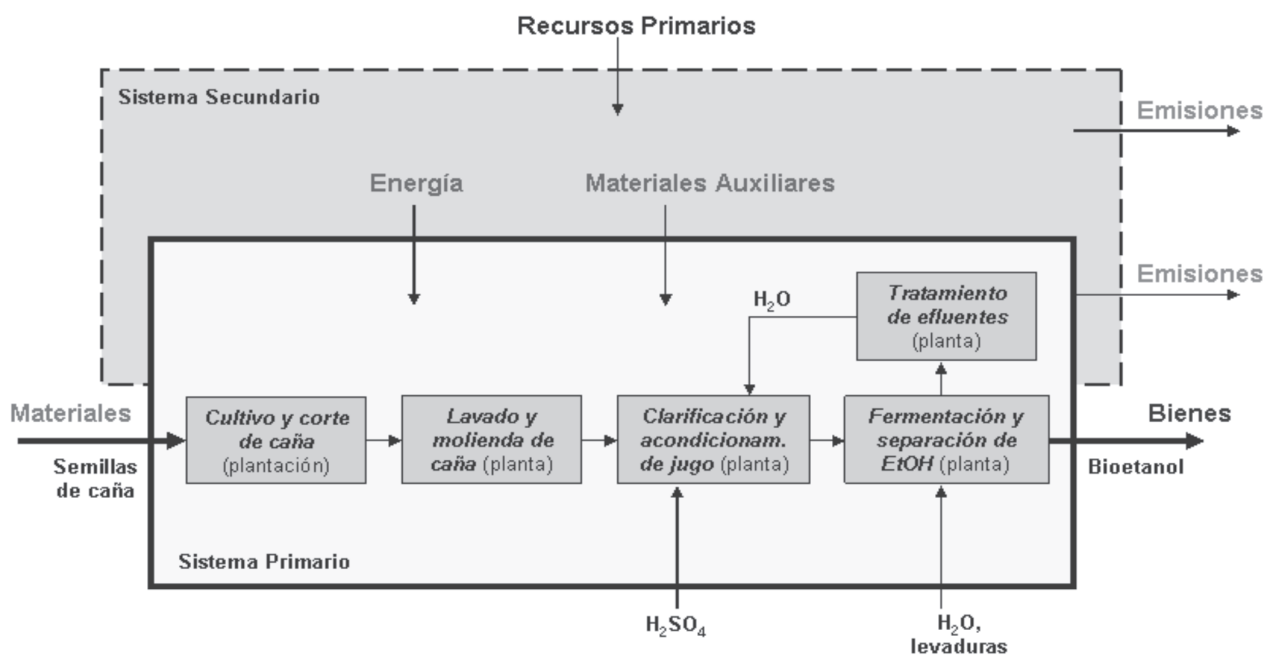
4.1 Definición de objetivos y alcance

El objetivo del estudio de caso es evaluar en forma cualitativa el desempeño ambiental de un sistema tecnológico para la producción de alcohol carburante (alcohol etílico, etanol) a partir de caña de azúcar. El siguiente paso es definir la función del sistema, que es la producción de etanol anhidro con el fin de emplearlo como aditivo oxigenante de la gasolina. Por tanto, la unidad funcional es un kilogramo de alcohol carburante con un contenido de más de 99,5% en peso de bioetanol. El sistema de producción viene determinado por la tecnología de producción de jugo de caña y su posterior fermentación, seguida de una separación y deshidratación del etanol obtenido. Se incluye además un sistema de cogeneración para la combustión del bagazo producido con el fin de obtener vapor y energía eléctrica para la planta de producción. Se considera que el nivel

tecnológico de ésta es alto, partiendo de la premisa que la tecnología utilizada está completamente desarrollada y madura y no presenta limitaciones en este sentido. Se asume que la planta está ubicada en un paraje rural en donde predomina la producción de panela y recibe la materia prima de las plantaciones de caña de azúcar que la rodean, así como de cultivos ubicados a mayor distancia. En este sentido, la planta de producción de etanol se puede considerar como una destilería autónoma como las que se planea construir y montar en regiones como la Hoya del río Suárez entre los departamentos de Santander y Boyacá. Este tipo de plantas contrasta con las destilerías anexas a los ingenios que están en funcionamiento en el valle geográfico del río Cauca y que están asociadas al sector azucarero colombiano. Por consiguiente, se considera que a los cultivos de caña no se les ha aplicado prácticas adecuadas de fertilización como ocurre en las regiones que en

nuestro país se dedican al cultivo de la caña de azúcar para la producción de panela (caña papelera). El sistema y su descomposición se pueden observar esquemáticamente en la Figura 2, donde se definen las fronteras correspondientes.

Figura 2. Secuencia de actividades y subsistemas para el análisis de ciclo de vida de la producción de bioetanol



La determinación del ámbito o alcance considera un límite temporal que corresponde a un año de operación de la planta. Para la definición del límite espacial se utiliza el enfoque *de la cuna a la puerta*, es decir, desde la extracción de la materia prima hasta el despacho del etanol de la planta de producción. Lo anterior, ya que no se tiene en cuenta el uso del producto ni aplica su reutilización o reciclaje por cuanto se quema completamente en los motores de los automóviles que usan la gasolina con bioetanol anhidro como oxigenante. Por eso, para efectos de simplificación, no se emplea el enfoque *de la cuna a la tumba* que subyace en la metodología de LCA.

4.2 Análisis de inventario

Siguiendo las etapas del ciclo de vida del proceso, que en este caso corresponden a las etapas de cultivo de caña, corte y procesamiento, se identifican y cuantifican las entradas y las salidas del sistema. Los recursos que entran al sistema

son de dos clases: los asociados a la producción de componentes tecnológicos y los denominados intrínsecos. En este caso, el primer grupo está representado por la maquinaria, los edificios, los productos requeridos para el mantenimiento de los equipos y utensilios, y demás que sean necesarios para el proceso productivo; estos recursos pertenecen al sistema secundario. Entre los recursos intrínsecos más importantes que demanda el proceso se cuentan el agua, el aire, el suelo, los recursos bióticos (en especial la flora), el ecosistema, el paisaje y demás que estén asociados al lugar de producción (sistema primario). Las salidas de emisiones proceden de la producción de los componentes tecnológicos (en el sistema secundario) y del uso de los mismos (en el sistema primario).

La cuantificación de los flujos de masas y energía que atraviesan las fronteras del sistema demanda la evaluación del consumo de materias primas y de energía, así como la especificación de las corrientes

de producto, coproductos, subproductos y de los servicios proporcionados por éste. La información requerida debe permitir el cálculo de las entradas y salidas con relevancia ambiental para cada etapa del ciclo de vida del proceso incluyendo las emisiones al aire, agua y suelo. La cuantificación de las descargas indirectas del sistema se puede efectuar con base en datos disponibles para diferentes sectores industriales y en otros estudios de LCA, que pueden ser accesibles a través de diferentes entidades y organizaciones (ministerios de medio ambiente a nivel nacional, autoridades ambientales locales, organizaciones gremiales y ambientalistas). Si a nivel nacional no está disponible esta información o no existe en lo absoluto, se puede hacer una primera aproximación a partir de información correspondiente a otros países con normativas y controles más estrictos (como los de la Unión Europea o EUA). Toda la información generada se consolida en una tabla de inventarios, preferiblemente a través de un sistema de información, o en caso contrario en una base de datos.

En este punto se hace evidente una de las grandes desventajas del LCA. Esta metodología es muy exigente en información por lo que su carencia en nuestro medio hace que disminuya su gran potencial. Además, la utilización de bases de datos generados en otros países puede conllevar a imprecisiones importantes. En particular, estas bases de datos ofrecen información sobre emisiones causadas por la utilización de combustibles fósiles para el transporte de materias primas en países europeos, pero en el caso colombiano la calidad de dichos combustibles es notablemente inferior lo que modifica los impactos ambientales correspondientes. De otro lado, aplicaciones de software para LCA como SimaPro (PRé Consultants, Holanda) ofrecen completas bases de datos para más 2.700 procesos industriales, la mayoría de los cuales corresponden a procesos de Suiza y Europa Occidental. El nivel tecnológico de estos procesos es en muchos casos muy diferente a los procesos correspondientes en Colombia, lo que implica un ajuste o adaptación de los datos a nuestras condiciones. Sin embargo, algunas

entidades colombianas están llevando a cabo la recolección de datos nacionales más confiables con base en la información que empresas de diferentes sectores han proporcionado. Una de estas iniciativas la conforma CECODES (Consejo Empresarial Colombiano para el Desarrollo Sostenible) que agrupa a 28 empresas y 3 gremios pertenecientes a los sectores de minería, petróleo, agroindustria, manufactura, construcción, comercio, banca y seguros (CECODES, 2006). A través de la información compartida por las empresas, se puede tener acceso a ciertos indicadores de diferentes procesos industriales. Igualmente, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha venido desarrollando el Sistema de Información Ambiental (SINA) que permite el acceso en línea a una variedad de información ambiental. En particular, el módulo de uso de recursos del sector manufacturero sistematiza la información correspondiente al proceso de captura y análisis de información sobre flujos de masas y energía aplicable a unidades de transformación de cualquier tamaño. Este módulo permite consultar indicadores de uso de los recursos y del impacto ambiental una vez se haya suministrado la información del proceso de transformación dado (IDEAM, 2007).

Para llevar a cabo la cuantificación de los flujos de masas y energía en el caso de la primera etapa del ciclo de vida analizado (denominada cultivo y corte en la Figura 2), se requiere obtener la mayor cantidad posible de información sobre las actividades relacionadas. Éstas comprenden la preparación del suelo, la siembra de la caña, el control de malezas, el riego, la fertilización, la preparación del cultivo para el corte, el corte de la caña y su cosecha, el alce y el transporte hasta la planta de producción. Saavedra y Vargas (2000) utilizaron información del cultivo tradicional de caña de azúcar proveniente de Cenicaña (Centro de Investigaciones para la Caña de Azúcar). Para el caso de los cultivos de caña panelera se debe tener en cuenta que las prácticas agrícolas son diferentes especialmente en lo relacionado con el grado de tecnificación de los cultivos, lo que influye directamente en sus rendimientos por hectárea.

Generalmente los cultivos de caña panelera son intensivos en mano de obra, la utilización de herramientas es mínima, así como el empleo de fertilizantes y agroquímicos. En muchos casos, la utilización de estos agentes es nula como por ejemplo en los cultivos de Cundinamarca. En la Hoya del Río Suárez el costo de los cultivos es más alto que en las demás regiones debido al mayor uso de fertilizantes, herbicidas y mano de obra. Los rendimientos del cultivo de caña panelera son de 68,02 ton/Ha (Espinal *et al.*, 2006) en comparación con las 126,7 ton/Ha de caña de azúcar para los ingenios alcanzadas en 2004.

Lo anterior obliga a ajustar la información suministrada por los gremios y entidades sectoriales; para el efecto se puede realizar un levantamiento de información en fincas representativas productoras de caña panelera. En particular, se deben cuantificar los consumos de energía en cada una de las actividades mencionadas, así como los volúmenes de riego y de insumos y productos químicos utilizados. Entre los residuos sólidos producidos se pueden mencionar desechos del corte de la caña como hojas y cogollos. Por su parte las emisiones gaseosas están representadas en la liberación a la atmósfera de partículas en suspensión durante el corte de la caña. Si se emplea la quema del cultivo de caña antes del corte, práctica muy extendida en las plantaciones de caña del valle geográfica del río Cauca para facilitar el trabajo de los corteros, se emiten a la atmósfera ingentes cantidades de CO_2 y material particulado. Para la cuantificación de las salidas de emisiones se hace necesario identificar también la generación de emisiones de CO_2 , CO, compuestos orgánicos volátiles, NO_x y compuestos sulfurados causadas por la combustión de combustibles fósiles para el transporte de materias primas y materiales a la planta de producción y durante la etapa de cultivo y corte de la caña. Los efluentes líquidos de las actividades analizadas comprenden en especial las aguas de escorrentía de los cultivos de caña, las cuales pueden contener concentraciones importantes de pesticidas y fertilizantes si éstos se utilizan durante el crecimiento de la caña. La

cuantificación de las descargas indirectas de esta primera etapa del ciclo de vida del proceso analizado se puede realizar con ayuda del software SimaPro ajustando los datos pertinentes con información del sector azucarero suministrada por la iniciativa de CECODES sobre indicadores de sostenibilidad y del SINA del IDEAM.

Para la etapa de procesamiento de la caña en planta (Figura 1) correspondiente al lavado y molienda de la caña, la clarificación y acondicionamiento de jugo, la fermentación y separación de etanol, y el tratamiento de efluentes en la Figura 2, se dispone de los resultados de la simulación obtenidos mediante el paquete Aspen Plus (Aspen Technologies, Inc., EUA) los cuales se publicaron con anterioridad (Cardona *et al.*, 2005). La simulación permite la cuantificación de los flujos de producto (alcohol carburante), subproductos (vinazas para fertilización) y descargas, así como del consumo energético y del recurso agua del proceso. Cabe destacar la generación de CO_2 , material particulado y sustancias orgánicas tóxicas que se liberan durante la combustión del bagazo para la cogeneración de vapor de proceso y electricidad. Para el análisis llevado a cabo en este artículo, se complementó la simulación del proceso principal mencionada anteriormente con la simulación del proceso de cogeneración de bagazo a fin de cuantificar las emisiones gaseosas más importantes (principalmente CO_2 y CO). Dentro del proceso de conversión de la caña en etanol también se genera CO_2 como resultado del metabolismo de los microorganismos durante la fermentación. Dentro de los servicios que se producen se cuenta la potencial producción de electricidad, la cual se genera en cantidades mayores a las requeridas por la planta de producción de etanol gracias a la combustión del bagazo obtenido en el proceso. Los residuos sólidos de mayor relevancia durante las etapas del ciclo de vida que se realizan en la planta de producción de etanol anhidro son la cachaza, el exceso de levaduras y las cenizas resultantes de la combustión del bagazo en las calderas. Las aguas residuales representan una emisión a los cursos de agua naturales. El proceso en la planta de producción de etanol requiere cantidades

importantes de agua; además se asume que se cuenta con un sistema eficiente de tratamiento de aguas residuales.

4.3 Evaluación de impactos

En esta fase se identifican los efectos medio-ambientales asociados a las descargas identificadas en la fase anterior. Todas las descargas contribuyen a una o más categorías de impacto ambiental. Bonazzi y Zurita (2005) proponen agrupar los flujos en tres grandes macrocategorías de impacto, las cuales son aplicables enteramente al estudio de caso analizado en este artículo (ver Tabla 1). La macrocategoría de empobrecimiento de recursos naturales se asocia a los flujos de los componentes tecnológicos de entrada; la macrocategoría de desarrollo se relaciona con las interacciones dinámicas de los recursos intrínsecos en el espacio y el tiempo, las cuales se producen esencialmente en el sistema primario; finalmente, la contaminación se asocia a las emisiones y salidas no funcionales (las no relacionadas directamente con la función de producir etanol), cuando éstas no tienen una aplicación o destino concreto.

El primer paso consiste en clasificar las descargas con el fin de agruparlas sistemáticamente en las macrocategorías y categorías de impacto mencionadas, asignándoseles los valores correspondientes de acuerdo con las diferentes metodologías de medición o cuantificación adoptadas. Estos valores se comparan con la legislación y las regulaciones existentes. Tal clasificación permite observar cómo la entrada al sistema de los recursos necesarios para la producción de los componentes tecnológicos (maquinaria, edificios, productos agroquímicos y químicos, etc.) provoca el empobrecimiento de los recursos abióticos ya que su fabricación implica el consumo de los recursos naturales procedentes del sistema secundario. De otro lado, la contaminación de los recursos naturales se da por el efecto que tienen las descargas del proceso sobre el medio ambiente. En este contexto, el software SimaPro lleva a cabo la clasificación de los impactos (descargas) relacionándolos generalmente con los siguientes problemas ambientales: eutrofización, destrucción de la capa de ozono, ecotoxicidad, efecto invernadero, acidificación, *smog* de verano, toxicidad humana, uso de energía y generación de residuos sólidos (Monroy *et al.*, 1999).

Tabla 1. Clasificación de las categorías de impacto ambiental según diferentes macrocategorías

Empobrecimiento de Recursos Naturales	Desarrollo	Contaminación de Recursos Naturales
Consumo de energía*	Calidad ecológica de los recursos bióticos	Calentamiento global / Efecto Invernadero*
Empobrecimiento de recursos abióticos*	Diversidad ecosistémica	Empobrecimiento de la capa de ozono*
Erosión	Conectividad del paisaje	Toxicidad ecológica*
Empobrecimiento de acuíferos		Toxicidad humana*
Residuos sólidos		Formación de compuestos fotooxidantes *
Uso del territorio		Acidificación *
		Eutrofización*

* Categorías de impacto consideradas en métodos de LCA convencionales.

Fuente: Bonazzi, M. y Zurita, R. (2005). *Desarrollo sostenible del sector olivareo español: Análisis del ciclo de vida*. Universitat de les Illes Balears.

En el caso estudiado, las diferentes descargas generan impactos ambientales diversos que se clasifican en varias categorías de impacto o problemas ambientales. El combustible más utilizado para el transporte de materias primas y materiales para el sistema analizado es el diesel, el cual en Colombia tiene un alto contenido de azufre. La utilización de este combustible genera una serie de compuestos que tienen diferentes impactos: el dióxido de carbono liberado contribuye al calentamiento global debido a su efecto invernadero; el CO emitido presenta toxicidad humana y acuática; los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles son precursores en la formación de ozono troposférico y *smog*, lo que está asociado a problemas de salud; los compuestos sulfurados pueden contribuir a la formación de lluvia ácida lo que implica problemas de acidificación; y el material particulado presenta toxicidad tanto en humanos como en animales. El empleo de gasolina provoca estos mismos efectos, aunque su contenido de azufre es mucho menor que el del diesel. La combustión del bagazo para la generación de energía libera emisiones ricas en CO_2 , y con concentraciones importantes de CO. Además su contenido de lignina implica la liberación de compuestos orgánicos aromáticos que se consideran cancerígenos. La quema de los cultivos de caña antes de su corte, así como de los residuos de la cosecha como las hojas y el cogollo, también provoca problemas ambientales similares a los de la combustión del bagazo; en particular, la quema de la caña emite a la atmósfera polvo o sustancias orgánicas que contribuyen a la formación de *smog*, lo mismo que óxidos de azufre que al sumarse con el agua y el vapor de agua se convierten en SO_4^{2-} que se precipita a la tierra en forma de lluvia ácida contribuyendo así a la acidificación. La utilización de ácido sulfúrico durante el proceso de acondicionamiento del jugo puede provocar filtraciones las cuales contribuyen a la acidificación del suelo. Similarmente, las vinazas pueden aumentar la salinidad del mismo. Debido a su alta carga orgánica, las vinazas son un potente contaminante del agua ($\text{DBO}_5 = 30.000\text{-}50.000$ mg/L) por lo que tienen un efecto importante en la ecotoxicidad, en especial de los cursos de agua

naturales. Así mismo, la utilización indiscriminada de fertilizantes en las prácticas agronómicas conduce a fenómenos de eutrofización. Otra fuente de toxicidad ecológica la constituyen los residuos sólidos no tratados como la cachaza, las levaduras y los lodos formados durante el tratamiento biológico de las aguas residuales.

Después de la clasificación, se lleva a cabo la caracterización, que reviste de gran complejidad. En la actualidad se aplican modelos de cálculo para obtener un valor del impacto asociado a cada categoría con base en la cantidad y calidad de las descargas analizadas. Se emplean herramientas como el vector de impacto ambiental por intervalo de tiempo (Stefanis *et al.*, 1997), con el fin de tener en cuenta las descargas generadas por las actividades que no se llevan a cabo continuamente, como por ejemplo lotes de fermentación para la propagación inicial de las levaduras, u operaciones de cargue y descargue de caña que no se realizan durante las 24 horas del día. Castillo y Mora (2000) han propuesto un modelo matemático para la evaluación ambiental de los impactos causados por procesos químicos que considera los efectos potenciales sobre el medio ambiente causados por los flujos de masas, energía y exergía. Este modelo fue aplicado, en las condiciones de Colombia, a la cadena integrada de producción de ácido nítrico que comprende la planta de producción de amoníaco, las plantas de generación de energía (la red interconectada nacional de electricidad) y el proceso principal de obtención del ácido. Este modelo emplea un enfoque modular acumulativo de tal forma que cuando se completan los análisis individuales de cada etapa se obtiene el impacto ambiental total como una suma ponderada de los efectos parciales. En caso de no disponer de modelos propios se puede emplear aplicaciones de software de LCA como SimaPro. Este paquete convierte las contribuciones a cada problema ambiental (categorías de impacto) a una unidad estándar haciendo uso, entre otras herramientas, de una base de datos de sustancias impactantes para cada problema ambiental con su equivalencia en términos de la unidad estándar de medida (Monroy *et al.*, 1999).

Cuando se obtienen los valores de los impactos para cada categoría y para cada etapa, se procede a su normalización, lo que permite que éstos sean comparables entre sí independientemente de su unidad de medida. Lo anterior se puede hacer dividiendo el impacto absoluto obtenido en cada categoría por el valor más bajo que éste asume en las diferentes etapas del ciclo de vida de la obtención de etanol. De esta manera, se puede evaluar el desempeño relativo de cada etapa para cada categoría de impacto. Los valores de las categorías de impacto normalizados se pueden referir a la unidad funcional.

A partir de los resultados de la normalización, se lleva a cabo la valoración en la que los datos de cada categoría de impacto se agregan para obtener un único índice de impacto ambiental global que facilita la comparación de diferentes sistemas productivos. Para obtener dicho índice se ponderan las categorías de impacto mediante factores de peso que representen sus contribuciones al

impacto global. Chen *et al.* (2002) proporcionan guías de diseño para tener en cuenta en este tipo de análisis. El índice global se puede representar como:

$$(1) I_{PC} = \sum_k I_N^k W_k$$

donde I_{PC} es el índice compuesto del proceso, I_N^k es el índice ambiental normalizado y W_k es el factor de ponderación de la categoría de impacto k . Para el caso de la evaluación ambiental de un proceso de recuperación de compuestos orgánicos volátiles, estos autores proponen los factores de ponderación que se relacionan en la Tabla 2. Este tipo de índice global se puede integrar a un indicador global de desempeño del proceso que incluya criterios tecno-económicos (consumo de energía, función de costos, tasa interna de retorno, valor presente neto, etc.) y ambientales. A su vez, este indicador puede servir como criterio de optimización del proceso conforme se mencionó anteriormente.

Tabla 2. Factores de ponderación de algunas categorías de impacto ambiental

Categoría de Impacto Ambiental	Factor de Ponderación
Calentamiento global	2,5
Formación de <i>smog</i>	2,5
Lluvia ácida	10,0
Toxicidad humana no carcinogénica por inhalación	5,0
Toxicidad humana no carcinogénica por ingestión	5,0
Toxicidad para los peces	10,0

Fuente: Chen *et al.* (2002) "Design guidance for chemical processes using environmental and economic assessment". En: *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol. 41

Como ejemplo ilustrativo de la evaluación de impactos en la etapa de cultivo y corte de caña de azúcar (incluyendo todas las actividades relacionadas), se pueden relacionar los resultados obtenidos por Saavedra y Vargas (2000) quienes emplearon para tal evaluación el software SimaPro. Los mayores impactos ambientales del cultivo tradicional de caña para la producción de azúcar se verifican en las etapas de corte y cosecha, y de manejo de residuos, a las cuales les corresponde el 91,8% del impacto total causado por el cultivo. El impacto de estas etapas se concentra mayoritariamente en la actividad de quema del cultivo con un 64,13% de contribución al *smog* de invierno y un 24,36% a la acidificación. La práctica de manejo de residuos sólidos mediante su requema también contribuye en forma importante a los mismos impactos ambientales que la quema del cultivo. Por su parte, la actividad de riego contribuye con cerca de un 6,3% al impacto total contribuyendo a los problemas de eutrofización y acidificación. Lógicamente, la contribución de la actividad de riego a estos mismos problemas ambientales será menor si se van a analizar los impactos

de la etapa de cultivo y corte de caña panelera, para la cual se emplea una menor cantidad de fertilizantes y otros agroquímicos.

Para la evaluación de impactos de las etapas de transformación en la planta de producción de etanol anhidro se empleó el software WAR GUI (Waste Reduction Algorithm - Graphical User Interface) desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de EUA, y que fue modificado en un trabajo anterior (Cardona *et al.*, 2004). Las categorías de impacto evaluadas se agrupan en dos macrocategorías: atmosférica global y toxicológica local. Se realizó la evaluación de los impactos ambientales del proceso que emplea caña de azúcar considerando tres variantes tecnológicas. La primera comprende la utilización del bagazo para la cogeneración de vapor de proceso y energía eléctrica, además del empleo de las vinazas concentradas como fertilizante; esta configuración corresponde al estudio de caso analizado en el presente artículo (caso base). La segunda variante no considera la cogeneración aunque sí el empleo de las vinazas como fertilizante, por lo que el bagazo se acumula como un residuo sólido. La tercera variante no involucra ni la cogeneración ni el empleo de las vinazas como un subproducto. Además se analiza la producción de etanol anhidro a partir de biomasa lignocelulósica mediante un proceso que incluye el pretratamiento de la biomasa con ácido diluido, la sacarificación y co-fermentación simultáneas y la deshidratación del etanol con tamices moleculares. Los datos de la simulación de este proceso se tomaron de un artículo publicado con anterioridad (Cardona y Sánchez, 2006). Para el proceso a partir de biomasa se consideraron dos variantes: con y sin cogeneración por combustión de la lignina obtenida en el proceso. Para estas cinco variantes se obtuvieron los valores normalizados del impacto total del proceso expresado como unidades de impacto ambiental potencial (PEI por sus siglas en inglés) por unidad funcional (kg de etanol producido) (figura 3). El PEI total se calcula a partir de la suma ponderada de las ocho categorías de impacto que evalúa el software WAR GUI, cuyos impactos ambientales potenciales se muestran en la figura

4 para las cinco configuraciones estudiadas. Los factores de ponderación empleados se tomaron de la tabla 2 para las seis categorías de impacto equivalentes en WAR GUI; a las dos categorías restantes (potencial de toxicidad terrestre y potencial de empobrecimiento de la capa de ozono) se les asignó un factor de ponderación de 2,5.

El análisis del ciclo de vida permite no sólo la evaluación de un proceso en particular, sino también la comparación de su desempeño con otras alternativas tecnológicas que incluyan variaciones en la configuración del diagrama de proceso y en la materia prima. Las figuras 3 y 4 muestran precisamente este tipo de comparación. Los resultados obtenidos indican que el empleo de caña como materia prima presenta una mayor amigabilidad ambiental que el proceso que emplea biomasa lignocelulósica. Lo anterior debido a la complejidad del proceso tecnológico de conversión de los materiales lignocelulósicos en etanol. Para tal conversión se requiere de un pretratamiento de la materia prima que involucra la utilización de ácidos inorgánicos a altas presiones; además, se debe llevar a cabo la hidrólisis de la celulosa y su fermentación hasta etanol. Estos procesos implican además un mayor gasto energético. A fin de suministrar la energía necesaria para la conversión de la biomasa, se realiza la combustión de la lignina obtenida dentro del proceso generándose emisiones atmosféricas que contienen CO₂, CO, material particulado e hidrocarburos aromáticos policíclicos, los cuales presentan un impacto ambiental considerable. De hecho los resultados obtenidos indican que el proceso a partir de biomasa con cogeneración presenta un mayor impacto ambiental potencial que cuando la lignina no se quema. Sin embargo cabe destacar que la producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos está aún lejos de implementarse comercialmente a gran escala debido a las dificultades tecnológicas que aún no se han superado completamente (aumento de efectividad en la hidrólisis de la celulosa, mayor conversión de azúcares en alcohol, mejoramiento de los métodos de pretratamiento, entre otras).

Figura 3. Impacto ambiental potencial total de salida por masa de productos para cinco configuraciones del proceso de producción de alcohol carburante. Caña A – producción de etanol y fertilizante (vinazas concentradas) a partir de caña empleando bagazo en el proceso de cogeneración. Caña B – producción de etanol y fertilizante (vinazas concentradas) a partir de caña sin cogeneración. Caña C – producción de etanol a partir de caña sin cogeneración. Biomasa A – producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica sin cogeneración. Biomasa B – producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica empleando la lignina obtenida en el proceso de cogeneración

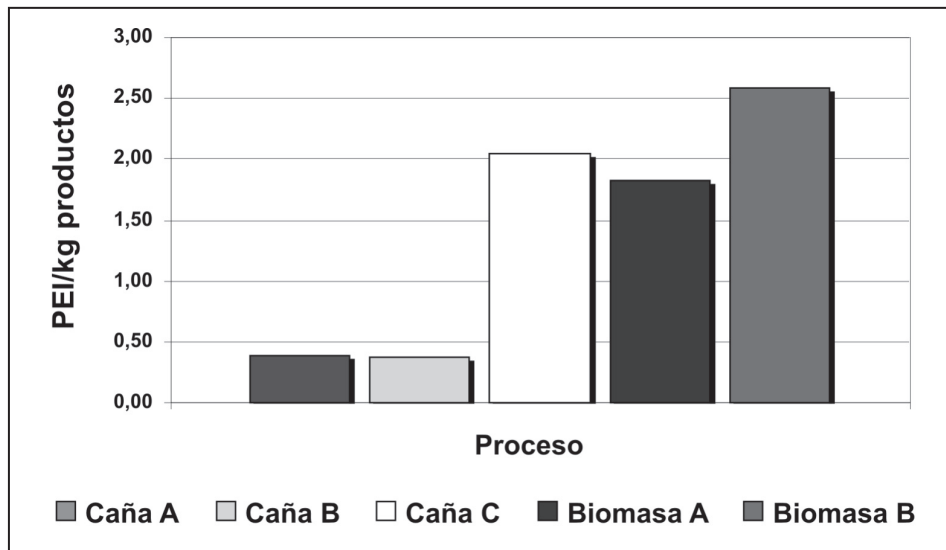
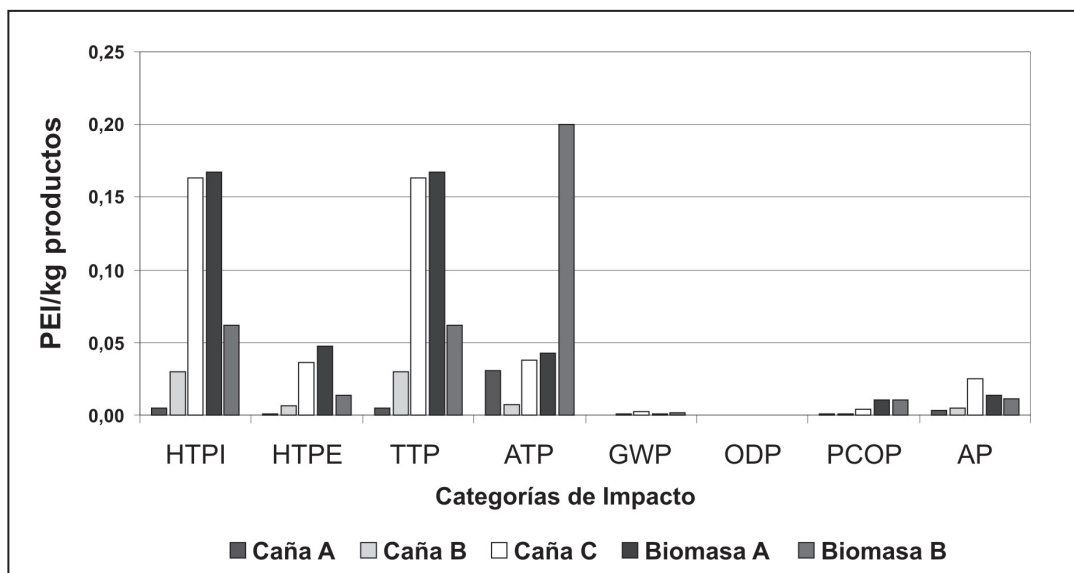


Figura 4. Impactos ambientales potenciales de salida por masa de productos para cinco configuraciones del proceso de producción de alcohol carburante de acuerdo a diferentes categorías de impacto (las configuraciones se enumeran en el epígrafe de la figura 3). *Categorías toxicológicas locales:* HTPI – potencial de toxicidad humana por ingestión, HTPE – potencial de toxicidad humana por inhalación o exposición dérmica, TTP – potencial de toxicidad terrestre, ATP – potencial de toxicidad acuática. *Categorías atmosféricas globales:* GWP – potencial de calentamiento global, ODP – potencial de empobrecimiento de la capa de ozono, PCOP – potencial de oxidación fotoquímica o formación de *smog*, AP – potencial de acidificación o de lluvia ácida



El análisis del proceso a partir de caña muestra que la cogeneración y el empleo de las vinazas concentradas como subproducto es una buena opción para disminuir las descargas sobre el ambiente. Sin embargo y desde el punto de vista ambiental, el esquema que considera el bagazo como residuo sólido y las vinazas como un subproducto muestra indicadores ligeramente más favorables en comparación con el caso analizado en este artículo. Los gases liberados durante la combustión del bagazo tienen mayor contribución al potencial de toxicidad acuática calculado por WAR GUI que los componentes del bagazo; esta diferencia es la responsable del mejor desempeño ambiental relativo del proceso sin cogeneración. No obstante, las consideraciones económicas sí indican una ventaja evidente de quemar el bagazo debido a que no se incurre en gastos para la adquisición de combustibles fósiles (como sí ocurre en el proceso sin cogeneración). Si las vinazas se consideran como un efluente líquido, el potencial ambiental potencial aumenta ostensiblemente como se observa en las Figuras 3 y 4. El PEI total por kilogramo de productos aumenta en un 430% en relación con el caso base representado por la cogeneración y empleo de las vinazas como fertilizante. Este hecho se explica por la altísima carga orgánica de las vinazas que aumentan significativamente los impactos potenciales en las cuatro categorías toxicológicas locales.

Cabe destacar que el mejor desempeño aparente del proceso "Caña B" (Figura 3) se explica en gran parte por los factores de ponderación escogidos. Si se privilegian en forma uniforme las categorías de impacto toxicológicas locales (con un factor de 10) frente a las categorías atmosféricas globales (factor de 2,5), se obtiene un PEI/kg menor para el caso base ("Caña A"): 0,43 para el caso base y 0,74 para el proceso "Caña B". Esta selección de los factores de ponderación implica conferirle una mayor importancia a los efectos locales sobre la salud humana, la flora y la fauna, que los efectos globales sobre la biosfera, lo cual es lógico considerando que estos impactos son más significativos en el corto y mediano plazo.

Lo anterior conduce a uno de los aspectos que generan más imprecisiones durante el LCA:

la definición y ponderación de los impactos ambientales. De nuevo, la utilización de modelos foráneos puede conducir a resultados inesperados o a la sobrevaloración de impactos ambientales que pueden no ser los de mayor interés para el medio colombiano. La herramienta de software SimaPro permite seleccionar diferentes métodos estándar de determinación de impactos, los cuales están constituidos por entre 10 y 20 categorías de impacto (PRé Consultants, 2006) con sus respectivos factores de ponderación. Sin embargo estos métodos están diseñados considerando las prioridades de los países europeos en el marco de las normas ISO 14000. No obstante, este paquete permite la creación de métodos de determinación de impactos completamente nuevos. Aprovechando esta característica del software, se han desarrollado métodos que consideran las prioridades de regiones específicas de nuestro país. Así, se han realizado comparaciones de LCA para un mismo proceso empleando un método estándar de determinación de impactos y un método desarrollado para la región de influencia de Bogotá en el caso de la producción de papel (van Hoof, 2005). Los resultados mostraron diferencias significativas entre el método europeo y el colombiano. Los datos obtenidos muestran también las limitaciones del método colombiano debido a que éste no tiene la misma cantidad de variables que determinan los mismos problemas que el método europeo. Otra de las dificultades está relacionada con los factores de normalización que requiere SimaPro. Estos factores se calculan con el total de los impactos (energía, materia prima, emisiones al aire, agua o suelo, desechos sólidos) del país, pero los sistemas de información con datos nacionales no están completos. Estas consideraciones se deben tener en cuenta al momento de aplicar paquetes de aplicación como SimaPro a la producción de alcohol carburante a partir de caña. Se necesita, por tanto, la definición de métodos de determinación de impactos y factores de ponderación que prioricen los problemas ambientales nacionales; tal definición de prioridades exige la participación de expertos que trabajen en diferentes disciplinas, así como de representantes de las entidades reguladores ambientales y del sector productivo.

4.4 Evaluación de mejoras

Una primera etapa en la evaluación de mejoras tiene que ver con la mitigación de los impactos ambientales causados por el proceso. En este caso se podría valorar la posibilidad de no quemar los residuos sólidos resultantes luego de las actividades de corte, cosecha y alce de la caña. Para ello, Saavedra y Vargas (2000) proponen incorporar estos residuos al campo en lugar de realizar la requema. Este procedimiento mejoraría la nutrición del suelo y reduciría la cantidad de agua requerida por el cultivo debido al contenido de humedad presente en estos materiales. En las etapas del proceso en la planta de producción, se puede reducir la presión sobre el recurso agua mediante la implementación de corrientes de recirculación de este líquido que disminuyan su consumo global. En particular, los vapores condensados del tren de evaporación se pueden reciclar a la etapa de lavado y molienda de la caña donde se genera el jugo de caña. Para la minimización de las emisiones de CO₂ se podría emplear el dióxido de carbono generado durante el proceso de fermentación para la carbonatación de bebidas de manera similar a como se ha venido haciendo en algunas empresas que producen alcohol etílico para fines industriales a partir de melazas. De esta manera, se lograría la disminución de la contribución al problema del calentamiento global, pero esta solución está atada a consideraciones de tipo económico relacionadas con la posible saturación del mercado. Otra de las opciones de mitigación consiste en la sustitución parcial de los fertilizantes químicos con las vinazas concentradas. De hecho, estas vinazas pueden contribuir a un mejoramiento de los rendimientos de la caña panelera considerando el bajo nivel de tecnificación de estos cultivos. Lo anterior implica un mejor aprovechamiento de los recursos agrícolas por cuanto se puede lograr mayor cantidad de caña por hectárea o la reducción del área cultivada en caña. De hecho, las experiencias de fertilización con vinazas realizadas en Colombia han mostrado indicios de incrementos en la productividad de caña de azúcar cercanos al 6% y reducciones en los costos de la fertilización del 2% (Gnecco,

2003). Para los cultivos de caña circundantes a la planta de producción se pueden emplear vinazas no evaporadas, lo que disminuye el volumen de agua para riego y el consumo energético en la etapa de evaporación, con los consiguientes beneficios ambientales. Sin embargo se debe considerar que las vinazas aumentan la salinidad del suelo y pueden provocar la contaminación de las aguas subterráneas cuando se aplican en forma indiscriminada (Navarro *et al.*, 2000). En general, el mejoramiento de las prácticas agronómicas indudablemente redundará en un aumento de los rendimientos, una reducción de los desechos no procesables y, por lo tanto, un menor deterioro y agotamiento del ecosistema al disminuir la cantidad de materia prima necesaria por unidad funcional (kg de producto).

En una segunda etapa se lleva a cabo una evaluación de alternativas bajo varios escenarios que incluyan mejoras sustanciales de los procesos o inclusive cambios en la tecnología de procesamiento. Por ejemplo, la modificación de las operaciones de cosecha y corte mediante la sustitución del corte manual por un corte mecanizado permite eliminar la quema previa del cultivo de caña, lo cual trae enormes beneficios ambientales. Para facilitar el corte mecanizado es indispensable sembrar variedades que tengan un deshoje natural durante su etapa de crecimiento y desarrollo y que posean poca hoja y cogollo. Saavedra y Vargas (2000) anotan que la eliminación de la quema del cultivo y la requema de los residuos sólidos permite una reducción de 99,4% en el *smog* de invierno y 90,5% en la acidificación para la etapa de cultivo y corte. De manera similar, se disminuyen otros impactos ambientales como la eutrofización, el efecto invernadero y el *smog* de verano.

Al proceso de evaluación de alternativas contribuye en gran medida el análisis de sensibilidad de aquellos factores ya identificados que inciden directamente sobre la generación de descargas en todo el ciclo de vida del proceso. En particular, la implementación de la recirculación de vinazas puede representar importantes ventajas tanto ambientales como económicas. Una fracción de las vinazas (del 30 al 75%) se puede reciclar

directamente a la etapa de fermentación. Este procedimiento permite disminuir el volumen de agua utilizada en el proceso, lo que a su vez reduce el volumen de las vinazas a evaporar, pero la cantidad total de materia orgánica en las vinazas (medida como DQO) no se ve afectada ya que la “fuerza” de las mismas se incrementa con la cantidad de vinazas recicladas (Wilkie *et al.*, 2000). Valiéndose de la simulación con Aspen Plus se pueden evaluar diferentes fracciones de recirculación de vinazas, lo que implica entonces un análisis de sensibilidad cuando se realiza el LCA correspondiente a cada una de las opciones de reciclaje analizadas.

Otra alternativa para mejorar el proceso la constituye la aplicación de la tecnología *pinch*, la cual permite el diseño de una red de intercambiadores de calor óptima de tal manera que se aproveche el calor de las corrientes calientes dentro del proceso para calentar las corrientes frías (integración térmica). Esto posibilita la disminución en los requerimientos tanto de vapor de proceso como de agua de enfriamiento, lo cual conlleva a una disminución de los impactos ambientales debido a menores consumos energéticos. En un trabajo previo se

demonstró la conveniencia de este enfoque para el rediseño de la red de intercambiadores de calor de las etapas de fermentación, destilación del vino, deshidratación del etanol y evaporación de vinazas correspondiente al proceso de obtención de alcohol carburante (Grisales *et al.*, 2005).

La optimización del proceso bajo criterios ambientales permitirá reducir los impactos negativos de todas las etapas del ciclo de vida que se consideren. En particular, una mejor definición de las condiciones de operación en la planta de producción de etanol anhidro puede repercutir en mayor medida sobre el proceso global. El análisis de alternativas innovadoras, vía simulación, puede dar la pauta para la implementación de tecnologías más amigables con el medio ambiente. En este punto, la implementación de la tecnología de membranas, la intensificación de los procesos de separación y la integración térmica son alternativas potenciales que podrían incrementar notablemente el desempeño ambiental de la producción de alcohol carburante a partir de caña de azúcar.



Conclusiones

La aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida a la obtención de alcohol carburante, sin duda, proporcionó una valiosa herramienta de evaluación del desempeño ambiental de este proceso biotecnológico, el cual está destinado a ser el motor de desarrollo de muchas comunidades, especialmente en países en vías de desarrollo. El estudio de caso analizado en el presente artículo demostró la pertinencia de evaluar cada una de las etapas del ciclo de vida involucradas en la producción de este biocombustible. La metodología aplicada permitió detectar las mayores fuentes generadoras de descargas con alto impacto ambiental, teniendo en cuenta el valor agregado que ofrece el estudio de todas las etapas requeridas para la producción de bioetanol desde la extracción de la materia prima hasta su disposición final. Así mismo, el LCA hizo posible la consolidación de indicadores útiles para la cuantificación de los efectos ambientales del bioproceso estudiado. El gran aporte del LCA se evidenció, además, durante la comparación del efecto que pueden tener diferentes alternativas tecnológicas sobre el desempeño ambiental de este bioproceso. De esta manera, dicha metodología proporcionó indicaciones y guías sobre cómo se pueden evaluar diferentes sistemas de producción a partir de diversas materias sobre una base común de impacto ambiental global. Además, este marco metodológico permitió esclarecer problemas técnicos de ciertas etapas del proceso que se deben resolver con el fin de mejorar los indicadores de impacto ambiental y económico en la producción del biocombustible estudiado. Sin embargo, para que se pueda aprovechar todo el potencial de este sistema de evaluación ambiental, se deben encaminar esfuerzos tendientes a la creación de métodos de determinación de impactos ambientales que estén en concordancia con los

problemas ambientales más prioritarios en nuestro medio; igualmente, la recolección de información debe incorporar, en la medida de lo posible, datos e indicadores obtenidos de procesos realizados en las condiciones colombianas. Afortunadamente, algunas entidades en nuestro país han empezado a acometer acciones y generar iniciativas en este sentido.

En general, la utilidad de la metodología empleada se potencia considerablemente si durante la síntesis de procesos para la selección del mejor esquema tecnológico de producción de bioetanol, se incorporan los criterios del LCA en los algoritmos de optimización a emplear. Al respecto se recomienda una evaluación que tenga en cuenta las etapas finales del ciclo de vida del alcohol carburante (*de la cuna a la tumba*), lo cual es de primordial importancia si se tiene en cuenta el carácter renovable de este producto. De esta manera, las plantas diseñadas bajo estos criterios exhibirán indicadores ambientales y económicos óptimos durante todo el ciclo de vida del proceso y podrán perdurar en el tiempo como modelos de eficiencia económica y amigabilidad ambiental.

Finalmente es necesario destacar que el enfoque holístico que involucra el LCA posibilita la determinación de los impactos que tiene este proceso, no solamente sobre los alrededores inmediatos a la planta de producción, sino también sobre el planeta como un todo. Este hecho permite, entonces, definir estrategias de mejoramiento para minimizar los impactos desde la etapa del diseño conceptual inicial. Tal definición se debe hacer bajo el convencimiento que implementar comercialmente procesos contaminantes acarrea consecuencias en materia ambiental (y también económica), que tarde o temprano afectarán a todos los habitantes de la Tierra.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, Colciencias, a la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y a la Universidad de Caldas por su apoyo durante la realización de este trabajo.

Bibliografía

Ardente, F.; Beccali, G.; Cellura, M. y Lo Brano, V. (2005) "Life cycle assessment of a solar thermal collector". En: *Renewable Energy*. Vol. 30. pp. 1031–1054.

Azapagic, A. (1999) "Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation". En: *Chemical Engineering Journal*. Vol. 73. pp. 1-21.

Azapagic, A. y Clift, R. (1999) "Life cycle assessment and multiobjective optimisation". En: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 7. pp. 135–143.

Berg, C. (2004). *World Fuel Ethanol. Analysis and Outlook*. Kent, Reino Unido, F.O. Licht. <<http://www.distill.com/World-Fuel-Ethanol-A&O-2004.html>> (febrero 2005).

Bonazzi, M. y Zurita, R. (2005). *Desarrollo sostenible del sector olivarero español: Análisis del ciclo de vida*. Universitat de les Illes Balears - Fundació Càtedra Iberoamericana. <http://www.uib.es/catedra_iberamericana/publicaciones/seae/mesa9/desarrollo_sostenible.html> (mayo 2005).

- Bovea, M.D. y Vidal, R. (2004) "Increasing product value by integrating environmental impact, costs and customer valuation". En: *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 41. pp. 133-145.
- Bretz, R. y Frankhouser, P. (1996) "Screening LCA for large numbers of products: Estimation tools to fill data groups". En: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 1. No. 3. pp. 139-146.
- Cardona, C.A.; Marulanda, V.F. y Young, D. (2004) "Analysis of the environmental impact of butylacetate process through the WAR algorithm". En: *Chemical Engineering Science*. Vol. 59. No. 24. pp. 5839-5845.
- Cardona, C.A.; Sánchez, O.J.; Montoya, M.I. y Quintero, J.A. (2005) "Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz". En: *Scientia et Technica*. Vol. 28. pp. 187-192.
- Cardona, C.A. y Sánchez, O.J. (2006) "Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass". En: *Energy*. Vol. 31. pp. 2447-2459.
- Castillo, E.F. y Mora, M. (2000) "Mathematical modelling as a tool for environmental evaluation of industrial sectors in Colombia". En: *Waste Management*. Vol. 20. pp. 617-623.
- CECODES. (2006). *CECODES, Capítulo colombiano del WBCSD*. Bogotá, Consejo Empresarial Colombiano para el Desarrollo Sostenible (CECODES). <<http://www.cecodes.org.co/cecodes.htm>> (junio 2007).
- Chen, H. et. al. (2002) "Design guidance for chemical processes using environmental and economic assessments". En: *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol. 41. pp. 4503-4513.
- Dahllöf, L. (2003) *Life Cycle Assessment (LCA) applied in the textile sector: the usefulness, limitations and methodological problems – A literature review*. ESA-Report 2003:9. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology. 16 p.
- De Monte, M.; Padoano, E. y Pozzetto, D. (2005) "Alternative coffee packaging: an analysis from a life cycle point of view". En: *Journal of Food Engineering*. Vol. 66. pp. 405-411.
- DEFRA. (2000). *The Government's Response to the Royal Commission on Environmental Pollution's 21st Report*. Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA), United Kingdom. <<http://www.defra.gov.uk/environment/rcep/21/05.htm>> (septiembre 2006).
- Espinal, C.F.; Martínez, H.J.; Ortiz, L.; Acevedo, X. y Beltrán, L.S. (2006). *La cadena agro-industrial de la panela en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991- 2005*. Documento de Trabajo No. 103. Bogotá: Observatorio Agrocadenas Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 23 p.
- Gnecco, J.G. (2003) "Alternativas de disposición de vinaza". En: *III Jornada Técnica de Ingeniería Química*, Manizales, Colombia.
- Grisales, R.; Cardona, C.A.; Sánchez, O.J. y Gutiérrez, L.F. (2005). "Heat integration of fermentation and recovery steps for fuel ethanol production from lignocellulosic biomass". En: *2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering and 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering, ENPROMER 2005*. Rio de Janeiro, Brazil.
- IDEAM (2007) *Sistema de Información Ambiental*. Bogotá, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). <<http://www.ideam.gov.co/sistema/ingreso.htm>> (junio 2007).

Mellor, W. *et. al* (2002) "A mathematical model and decision-support framework for material recovery, recycling and cascaded use". En: *Chemical Engineering Science*. Vol. 57. pp. 4697 - 4713.

Mohammed, M. (2000) "The ISO 14001 EMS implementation process and its implications: A case study of Central Japan". En: *Environmental Management*. Vol. 25. No. 2. pp. 177-188.

Monroy, N.; van Hoof, B. y Espinosa, J.C. (1999) "LCA (Life Cycle Analysis): Una herramienta de la industria para conciliar la crisis ambiental y el desarrollo empresarial". En: *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*. Vol. 9. pp. 44-51.

Navarro, A.R.; Sepúlveda, M.d.C. y Rubio, M.C. (2000) "Bio-concentration of vinasse from the alcoholic fermentation of sugar cane molasses". En: *Waste Management*. Vol. 20. pp. 581-585.

PRé Consultants (2006). *Introduction to LCA with SimaPro 7*. Amersfoort, Holanda: PRé Consultants. 82 p.

Saavedra, J.F. y Vargas, O.R. (2000) "Estimación del impacto ambiental del cultivo de caña de azúcar utilizando la metodología del análisis del ciclo de vida (Acv) ". En: *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*. Vol. 12. pp. 61-67.

Stefanis, S.K.; Livingston, A.G. y Pistikopoulos, E.N. (1997) "Environmental impact considerations in the optimal design and scheduling of batch processes". En: *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 21. No. 10. pp. 1073-1094.

Van Hoof, B. (2005). *El desarrollo de eco-indicadores para la industria colombiana basada en el concepto de ciclo de vida*. Memos de Investigación. <<http://triton.uniandes.edu.co:5050/dspace/handle/1992/138>> (junio 2007).

Wilkie, A.C.; Riedesel, K.J. y Owens, J.M. (2000) "Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks". En: *Biomass and Bioenergy*. Vol. 19. pp. 63-102.