

EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA EMPLEANDO LA METODOLOGÍA “DE LA CUNA A LA CUNA”

B. AMAYA RAMÍREZ*; S. BECERRA BAYONA*; P. ACEVEDO PABÓN**

*Ingeniera Química, Universidad Industrial de Santander.

**Estudiante doctorado, Universidad Industrial de Santander.

bibian164@gmail.com , silvie0102164@gmail.com , paolaacevedo@gmail.com

Fecha Recepción: 3 de Marzo de 2008

Fecha Aceptación: 29 de Abril de 2008

RESUMEN

En este trabajo se propone una nueva metodología para el análisis de ciclo de vida (ACV) conocida como “de la cuna a la cuna” donde se evalúan los impactos ambientales generados en la producción del biodiesel obtenido a partir de aceite de higuera y se tiene en cuenta que un porcentaje de los residuos vertidos al medio ambiente son fijados por la naturaleza gracias a los diferentes ciclos biogeoquímicos. Se colectaron datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema de producción en estudio; se integraron los ciclos biogeoquímicos junto con los modelos correspondientes a las etapas de los cultivos, de las transformaciones industriales, del uso como biocombustible y de la disposición de residuos. Las categorías de impacto estudiadas fueron: cambio climático, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos, efectos respiratorios y energía no renovable dando como resultado el perfil medioambiental del sistema en estudio.

Palabras claves: ACV, biocombustible, B10, emisiones, impacto ambiental.

ABSTRACT

In this work, a new methodology, known as “from the cradle to the cradle”, is proposed for the life cycle assessment (LCA). The environmental impacts generated in the production of biodiesel from castor oil are evaluated, taking into account that a percentage of the total residues is fixed by the nature thanks to the different biogeochemical cycles. Data and calculation procedures were collected to quantify the environmentally relevant material and energy flows of the system in study; also, the biogeochemical cycles were integrated along with the models pertaining to the different phases of the cultivation, the industrial transformation, the use as biofuel and the residue disposal. The categories of impact studied were: global warming, acidification, eutrophication, photochemical smog formation, respiratory effects and non-renewable energy. This gave as a result the environmental profile of the system in study.

Keywords: LCA, biofuel, BD10, emissions, environmental impact

INTRODUCCIÓN

La preocupación general por el carácter no renovable de los combustibles fósiles y la contaminación atmosférica que su uso conlleva, se ha convertido en la fuerza que está impulsando la investigación sobre fuentes alternativas de combustibles,

especialmente de origen agrícola; no obstante, los biocombustibles y sus residuos no son totalmente amigables con el ambiente. Actualmente, se han desarrollado diferentes herramientas que permiten la evaluación del impacto ambiental generado por la producción y uso de combustibles renovables y no renovables.

Una de las herramientas disponibles es el Análisis del Ciclo de Vida cuyo objetivo es cuantificar las corrientes de entrada y emisiones medioambientales asociadas con la vida de un producto, desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final de los residuos generados a lo largo de la vida del producto, metodología conocida como “de la cuna a la tumba”. Cabe notar que aunque esta herramienta ha sido útil para el estudio de diferentes productos y servicios, aún presenta limitaciones en lo que se refiere a la definición de los límites, olvida que la renovación de los procesos exigiría estudiar la contabilidad “desde la tumba hasta la cuna”, analizando los impactos de reposición en un estado en que los residuos vuelven a ser útiles en algún punto del proceso anterior y no involucra la naturaleza como una etapa más en la vida del producto impidiendo el cierre de los ciclos.

Por lo tanto, la aplicación del análisis de ciclo de vida utilizando la metodología “de la cuna a la cuna” permite identificar los impactos ambientales relevantes que se causan en el ciclo de vida de un producto o servicio, además de servir como punto de referencia en la toma de decisiones y en la comparación de las diferentes alternativas disponibles para la producción.

En distintos países se han desarrollado estudios de análisis de ciclo de vida dirigidos a biocombustibles entre los que se destacan: Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus por Sheehan et al. (1998) [15]; el Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de Biodiesel y Diesel llevado a cabo por Lechón (2006) [14]; el Análisis de Ciclo de vida de productos energéticos desarrollado por Zah et al. (2007) [18]; entre otros.

Este proyecto abarca la evaluación del análisis del ciclo de vida del biodiesel a partir de aceite de higuera empleando la metodología “de la cuna a la cuna”, donde se evalúan los impactos ambientales generados en la producción de este biocombustible y se tiene en cuenta que un porcentaje de los residuos vertidos al medio ambiente son fijados por la naturaleza gracias a los diferentes ciclos biogeoquímicos. Para tal fin, se colectan los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema de producción en estudio; se integran los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza junto

con los modelos correspondientes a las etapas de los cultivos, de las transformaciones industriales, del uso como biocombustible y de la disposición de residuos; y finalmente, se identifican las etapas del proceso en las cuales el consumo de energía y las emisiones al medio ambiente son las más relevantes para así plantear posibles soluciones que contribuyan a la reducción del impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del biodiesel producido a partir de aceite de higuera.

METODOLOGÍA

La metodología del presente estudio se basó en la propuesta por las normas internacionales ISO 14040 - 14044 adaptadas a la metodología “de la cuna a la cuna”.

Según la ISO 14040 (1999), “el ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto, compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”.

De acuerdo con la normativa ISO 14040 un estudio de ACV está compuesto por cuatro fases: definición del objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación de resultados.

Los cuatro elementos que estructura el ACV no solo son secuenciales, sino también son iterativos entre sí, como puede observarse en la figura 1.



Fuente: ISO 14040, 1998

Figura 1. Etapas del ACV

Definición de objetivos y alcance del estudio

La definición del alcance y objetivos es la primera etapa del análisis del ciclo de vida, en la cual se busca definir sin ambigüedades cuáles son las metas del estudio. Además, se establece la unidad funcional, las funciones del sistema del producto, el sistema del producto a estudiar, los límites del sistema del producto, las reglas de asignación, los tipos de impacto y la metodología de evaluación y los requisitos de los datos.

El propósito de este estudio fue examinar la

sostenibilidad ambiental del sistema de producción del biodiesel a partir del aceite de higuierilla a través de la técnica de Análisis de Ciclo de Vida mediante la metodología de la cuna a la cuna con la que se pretendió integrar los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza junto con los modelos correspondientes a cada una de las etapas del proceso. La función del producto fue servir como combustible para un vehículo que trabaje con mezclas de diesel de origen fósil y vegetal tomando como unidad funcional la capacidad de producción de la planta de biodiesel (80.000 ton/año).

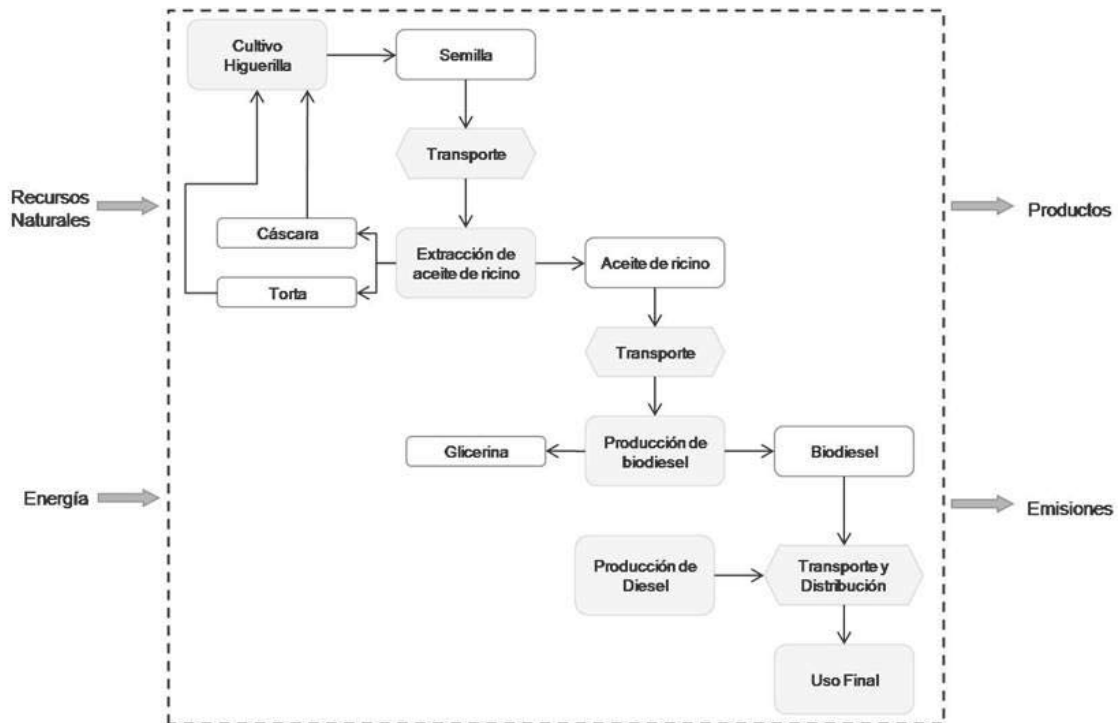


Figura 2. Procesos implicados en el sistema de estudio

Los sistemas involucrados en el ACV del biodiesel fueron: actividad agrícola e integración de los ciclos biogeoquímicos, extracción del aceite de ricino, transesterificación del aceite y distribución y uso del biocombustible (Figura 2).

Por otra parte se tomó 60 años como horizonte temporal y un único escenario para el análisis constituido por sabana como tipo de terreno en la localidad de los Llanos Orientales y semilla de higuierilla de tipo roja para cultivar [10]. Además, no se tuvo en cuenta la etapa de construcción ni el mantenimiento de la infraestructura de la planta, no se incluyeron factores económicos, factores

sociales, y fenómenos naturales catastróficos. Para el caso de los insumos empleados en el proceso diferentes a los provenientes de la cadena de higuierilla, se estableció una cuna y una tumba. Ciertos impactos ambientales no fueron cubiertos en su totalidad, debido a la dificultad en la recolección de datos para las condiciones locales. Respecto a las reglas de asignación se siguió la jerarquía propuesta por la norma ISO 14040 y se aplicaron en las etapas de extracción y transesterificación. Siguiendo la metodología reportada por Antón [4], para la evaluación de los diferentes impactos se tuvieron en cuenta las siguientes categorías: cambio climático, formación de oxidantes foto-

químicos, acidificación, eutrofización, efectos respiratorios y energía no renovable teniendo en cuenta que no se desestimaron datos, pero, se reconoce el grado de incertidumbre inherente a ellos.

Para los procesos en los cuales no se encontraron datos primarios, se recurrió al uso de datos de fuentes ya publicadas. Para el caso de las emisiones resultantes y de la energía consumida en los procesos de producción de los insumos, electricidad, y vapor, al igual que los gases de combustión provenientes de los diferentes medios de transporte empleados en las distintas etapas del estudio, se colectaron los datos de fuentes tales como Sheehan et al., 1998 [15]; Lechón, 2006 [14]; Cardim de Carvalho Filho, 2001 [6]; Universidad de Chile, 2007 [17]; EPA, 2004 [8]; ECETOC, 1994 [9]; Sinha & Haldar, 2006 [16].

Análisis de Inventario

"El análisis de inventario comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes de un sistema producto" [12].

En esta etapa del ACV se contabilizaron los flujos ambientales y energéticos de las diferentes materias primas y procesos involucrados en el ciclo de vida del biodiesel obtenido a partir de higuierilla mediante el desarrollo de los balances de masa y energía. Para la recolección de los datos, el ciclo de vida del biodiesel se dividió en cuatro etapas que fueron mencionadas anteriormente.

Actividad agrícola e integración de los ciclos biogeoquímicos

En la etapa de la actividad agrícola se involucró la identificación y contabilización de los flujos ambientales y energéticos asociados con la producción de la semilla de higuierilla, y se tuvo en cuenta todas las labores relacionadas con la parte agrícola, así como todos los procesos de producción y transporte de los insumos. Para esto se consideró que el terreno en el cual se desarrolló el cultivo era tipo sabana y no presentaba vegetación alta. Además, no se realizó rotación con otro cultivo. Durante el tiempo de estudio del ACV se estableció que el terreno sería productivo durante cuatro años, pasado este tiempo, se le realizaría una limpieza, y finalmente, el terreno

entraría en un periodo de recuperación por cuatro años. Este ciclo se repitió hasta terminar el tiempo de estudio del ACV. Por lo tanto, se mantuvo un cultivo alterno para suplir la producción de semilla que se dejó de obtener mientras el terreno estaba en reposo. Adicionalmente, no se consideraron efectos por el uso de agroquímicos (herbicidas, pesticidas, insecticidas, entre otros) debido a que para la higuierilla aún no se tienen los productos específicos a emplear. Además, no se cuenta con datos referentes a éstos [5] y según la literatura su aporte es mínimo [7].

Se consideró la integración del ciclo del carbono y del nitrógeno en la etapa del cultivo de la higuierilla teniendo en cuenta que un porcentaje de los residuos vertidos al medio ambiente son fijados por la naturaleza gracias a los diferentes ciclos biogeoquímicos.

En el desarrollo del cultivo de higuierilla, ésta captura una cantidad de CO₂ desde la atmósfera que tiene varios destinos: una parte se fija en la biomasa que se cosecha, otra parte en la biomasa que queda en el terreno y otra parte retorna a la atmósfera mediante el mecanismo de respiración de la planta. Por lo tanto, la verdadera contribución que se hace es el carbono que se fija en el suelo en forma de rizodepósitos ("formas inmovilizadas de C que se consideran como una fijación neta de CO₂ atmosférico por el cultivo"). De este modo, las cantidades de CO₂ emitidas provenientes de la combustión del biodiesel, del uso del resto de los co-productos y de los diversos mecanismos de respiración no se contabilizaron como emisiones y se han considerado cero [14]. Solo se consideró que existe una fijación neta de C en el suelo representada como un porcentaje del CO₂ incorporado por la planta, no obstante, se realizó un análisis de sensibilidad para este porcentaje tomando como valor inicial 56.8% (media obtenida de estudios para otros cultivos). Cabe anotar que el porcentaje de fijación de CO₂ para el rastrojo se consideró de 56,8 % [13]. (Figura 3).

Respecto al nitrógeno, éste se encuentra principalmente en la planta, en los residuos vegetales, en el nitrógeno mineral y en la materia orgánica humificada. Existen flujos de nitrógeno entre estos componentes y también con el medio fuera de ellos. Las entradas más importantes son: la fijación biológica de nitrógeno, la fertilización y las salidas de mayor magnitud son la volatilización

y desnitrificación [2]. Las emisiones debidas al uso de los fertilizantes (N_2O) se calcularon de acuerdo a lo planteado en la metodología IPCC [5]; además, para calcular las emisiones de NH_3 y NO_x se tomó

como referencia ECETOC, 1994. Por otra parte, se consideró que existe una fijación neta de N en el suelo debida a la presencia de bacterias no simbióticas que no superan los 15 kg/ha año [1].

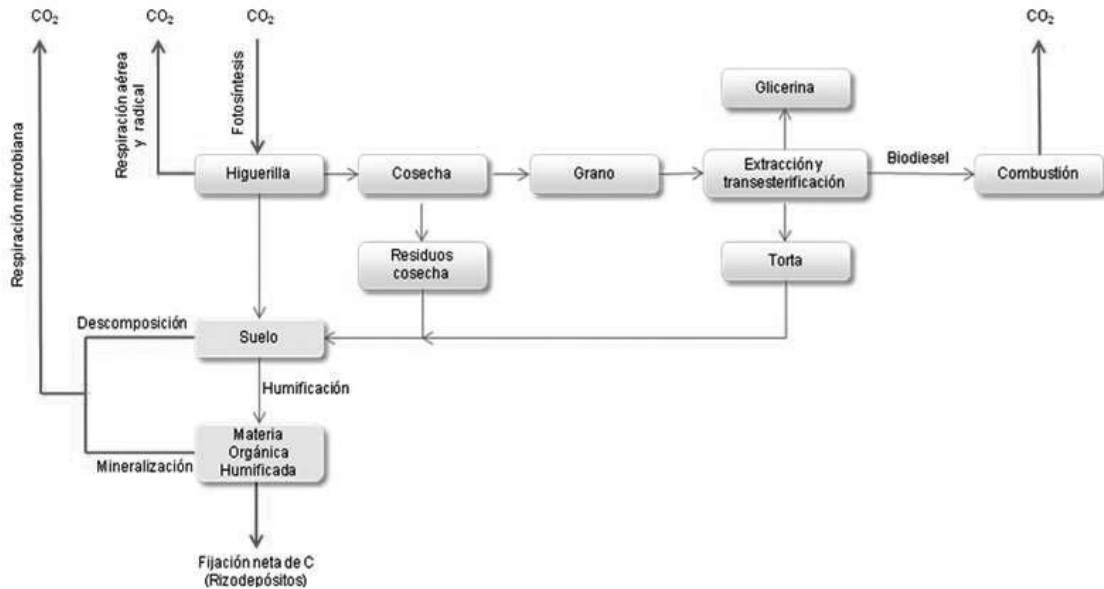
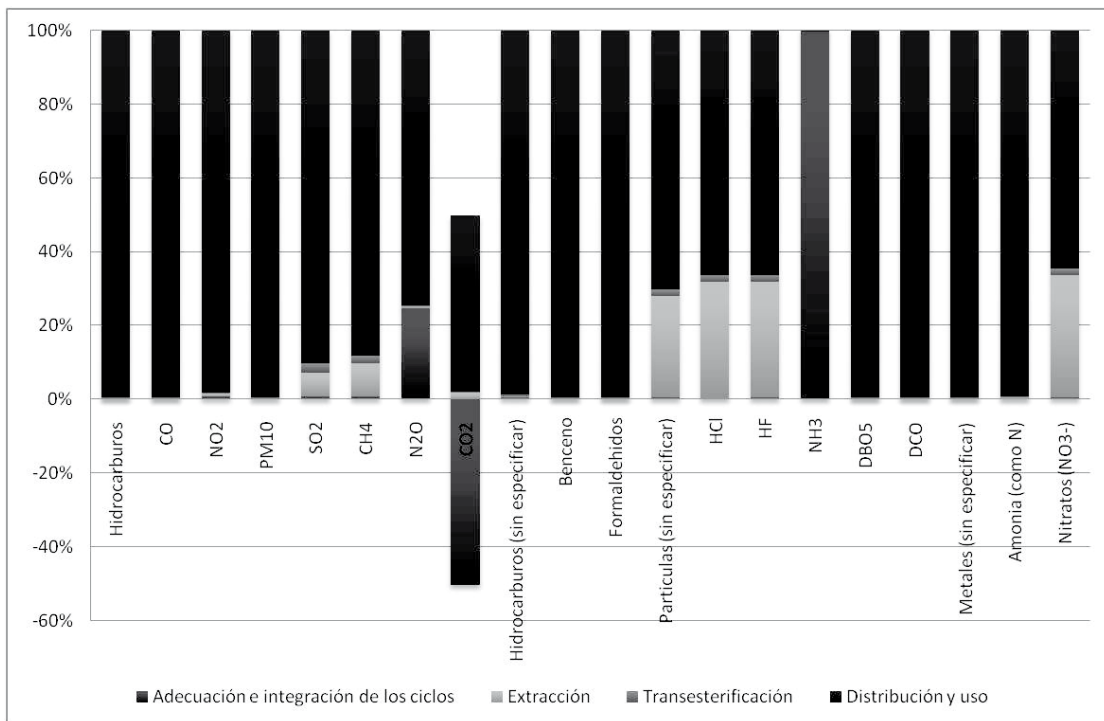


Figura 3. Ciclo de Carbono para la cadena de producción del biodiesel a partir de higuerrilla



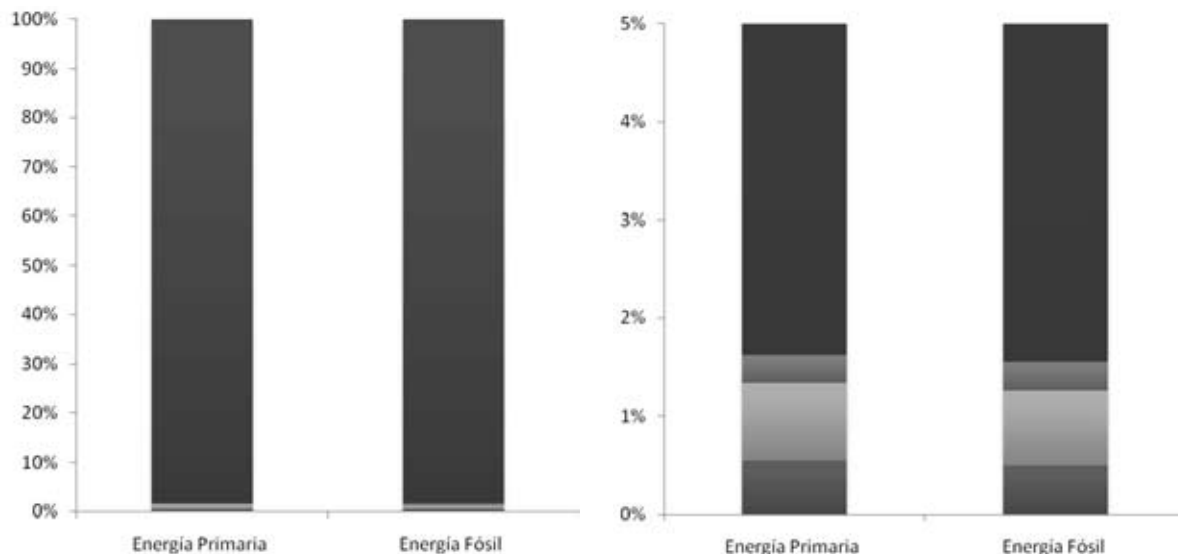


Figura 4. Porcentaje de participación de cada etapa en las emisiones medioambientales y en el consumo de energía

Extracción del aceite de ricino

Se eligió como mecanismo de extracción inicialmente un prensado y, posteriormente para remover el contenido de aceite residual en la torta una extracción con solvente. El aceite crudo obtenido se sometió a un proceso de desgomado y neutralización.

Transesterificación del aceite

El proceso de transformación a biodiesel se fundamenta en la reacción de transesterificación del aceite de ricino con el metanol en presencia del metóxido de sodio como catalizador, la cual da como resultado el ricinoleato de metilo (biodiesel) y la glicerina. Para esto se tuvo en cuenta las siguientes etapas: obtención del éster, purificación del biodiesel, purificación de la glicerina y recuperación del metanol.

Distribución y uso del biocombustible

Incluye los impactos provenientes de la distribución del biodiesel, la mezcla B10 y la combustión de ésta en un vehículo de carga pesada.

Evaluación de impacto

La evaluación de impacto tiene por objeto valorar los resultados del análisis de inventario del producto o servicio en cuestión, cuantificando los impactos medioambientales. El procedimiento a seguir es: seleccionar y definir las categorías de impacto,

donde los indicadores de éstas y los modelos de estimación, buscan precisar los efectos sobre el medio ambiente que causa el sistema en estudio; clasificar las emisiones con el fin de asignarlas a cada una de las categorías de impacto previamente seleccionadas y, caracterizar los datos del inventario para modelarlos mediante los factores de equivalencia a cada una de las categorías de impacto. Cada categoría de impacto se representa por medio del indicador de la categoría, el cual es la adición de diferentes intervenciones ambientales ocasionadas por las diferentes sustancias que la conforman.

Interpretación de ciclo de vida

En la cuarta fase del ACV se combinan los resultados del análisis de inventario con la evaluación de impacto, con el fin de realizar una evaluación de las incertidumbres y generar un informe con las conclusiones y recomendaciones.

RESULTADOS

Los porcentajes de participación de cada una de las etapas en las emisiones liberadas al ambiente y en el consumo de energía no renovable fueron calculados y se muestran en la figura 4.

Para interpretar los datos obtenidos del análisis de inventario fue necesario evaluar el impacto ambiental asociado con las emisiones y usos de las fuentes naturales. Cada categoría de impacto se

representó por medio del indicador de la categoría, el cual es la adición de diferentes intervenciones ambientales ocasionadas por las diferentes sustancias que la conforman. En la clasificación de las emisiones cada intervención ambiental se asoció con las categorías de impacto en las que ella tiene un efecto; por ejemplo, el CO₂ está asociado con el cambio climático. Una vez clasificados los datos, se realizó la adición de éstos para cada una de las categorías empleando los factores de equivalencia y la siguiente ecuación:

$$Ind. \text{ categoría impacto} = \sum_i m_i * (\text{factor de equivalencia})_i$$

Donde m_i es la emisión del recurso utilizado y $(\text{factor de equivalencia})_i$ es propio para cada recurso [4]. Con los resultados obtenidos se calculó el porcentaje de participación que tiene cada una de las etapas consideradas para la producción del

biodiesel en las diferentes categorías de impacto. El perfil medioambiental refleja que la distribución y uso es la etapa que tiene una mayor participación en todas las categorías sin olvidar que las otras etapas contribuyen en una menor proporción, como se aprecia en la figura 5.

Cambio Climático

En el indicador de cambio climático los mayores porcentajes de participación los tienen la distribución y uso y, la adecuación e integración de los ciclos; sin embargo, el efecto que tiene cada una de éstas es opuesto. La adecuación del terreno e integración de los ciclos disminuye los kg-eq. de CO₂ emitidos a la atmósfera gracias a la fotosíntesis de las plantas, dando como resultado una reducción en el indicador, fenómeno que no se presenta en las demás etapas del proceso.

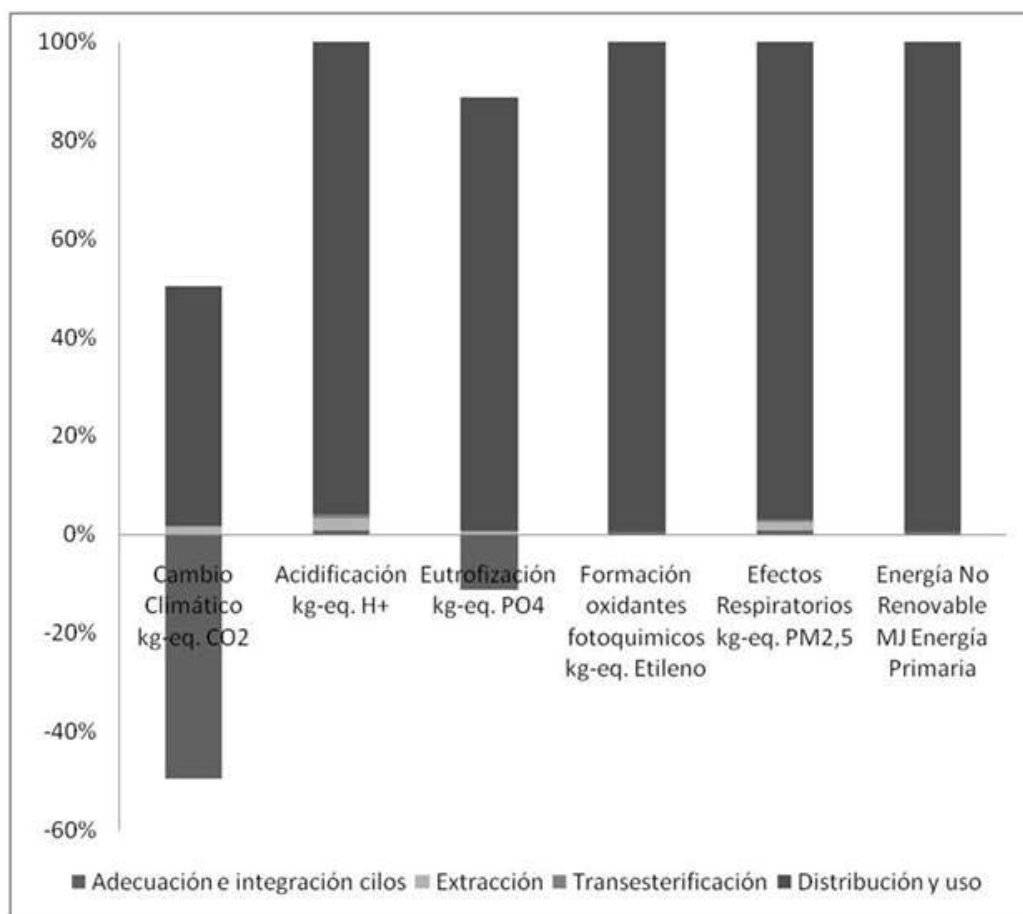


Figura 5. Perfil medioambiental obtenido del sistema

Acidificación

El escenario en el que se desarrolló la cadena de producción de la higuera promueve la acidificación, categoría generada principalmente por las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno producidas por el consumo de combustibles fósiles en la distribución y uso de la mezcla B10, presentando un mayor aporte el NO_x , a pesar que su potencial de acidificación es más bajo que el reportado para el SO_2 .

Eutrofización

Las mismas emisiones de óxidos de nitrógeno también favorecen el enriquecimiento de nutrientes de las reservas acuáticas y suelos agrícolas, por consiguiente, aumenta la eutrofización como se puede apreciar en la figura 5. Cabe resaltar, que la integración de los ciclos en el ACV contribuye a la disminución del anterior fenómeno por medio de la captura del nitrógeno atmosférico por parte de los microorganismos presentes en el suelo.

Formación de oxidantes fotoquímicos y efectos respiratorios

En las categorías de formación de oxidantes fotoquímicos y efectos respiratorios, nuevamente las mayores contribuciones son debidas a la distribución y uso de la mezcla, aunque las fuentes generadoras son diferentes; para el

caso de la formación de oxidantes, los mayores contribuyentes son los hidrocarburos (no incluye CH_4) producidos en la combustión del B10, y para los efectos respiratorios son el NO_2 y el PM emitidos principalmente al ambiente en las etapas de adecuación, extracción y distribución por el gasto de combustible de origen fósil y el consumo de electricidad.

Consumo de energía no renovable

La categoría de impacto para el consumo de energía no renovable reflejó que su mayor participante es la etapa de distribución y uso, resultado esperado por el amplio requerimiento de petróleo para la producción del diesel presente en la mezcla B10.

Análisis de sensibilidad

Teniendo en cuenta la falta de datos que existe en lo referente a la cantidad de carbono neto fijado por la higuera, se realizó una variación en el porcentaje de fijación de CO_2 que permitió ver cómo se afecta el indicador de cambio climático (CCI). Se observa que cuando el porcentaje alcanza valores superiores a 60, el indicador toma un valor negativo que revela que la cantidad de CO_2 que se está retirando de la atmósfera es mayor que las emisiones que se están produciendo por los otros contaminantes (Figura 6).

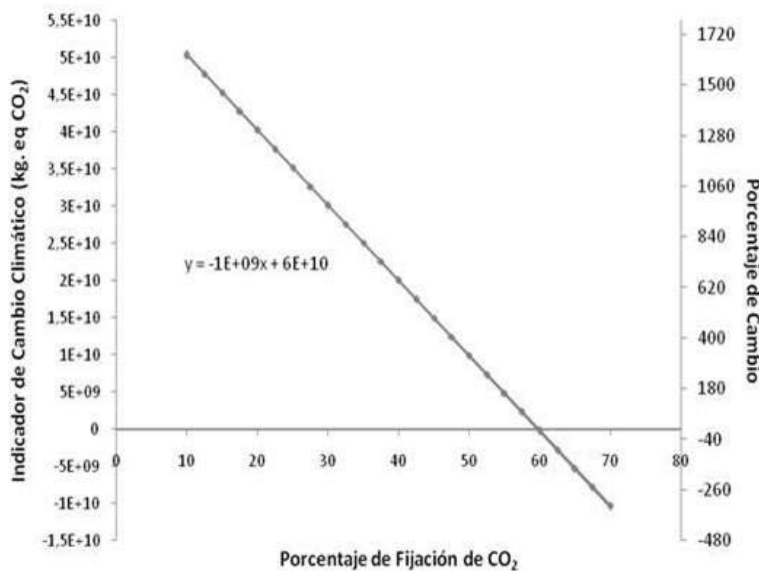


Figura 6. Variación del CCI con el porcentaje de fijación de CO_2

También, se estudió la variación del indicador de eutrofización (EI) con la cantidad de nitrógeno que fijan las bacterias ya que este valor se encuentra en el intervalo de 1 a 15 kg / ha año. Sin embargo, la cantidad de nitrógeno fijado no es suficiente para compensar las contribuciones de las demás

sustancias como se aprecia en la figura 7.

De las pendientes obtenidas para cada una de las correlaciones se concluye que el porcentaje de fijación de CO₂ tiene una mayor influencia en el CCI que el que tiene el de nitrógeno en el EI.

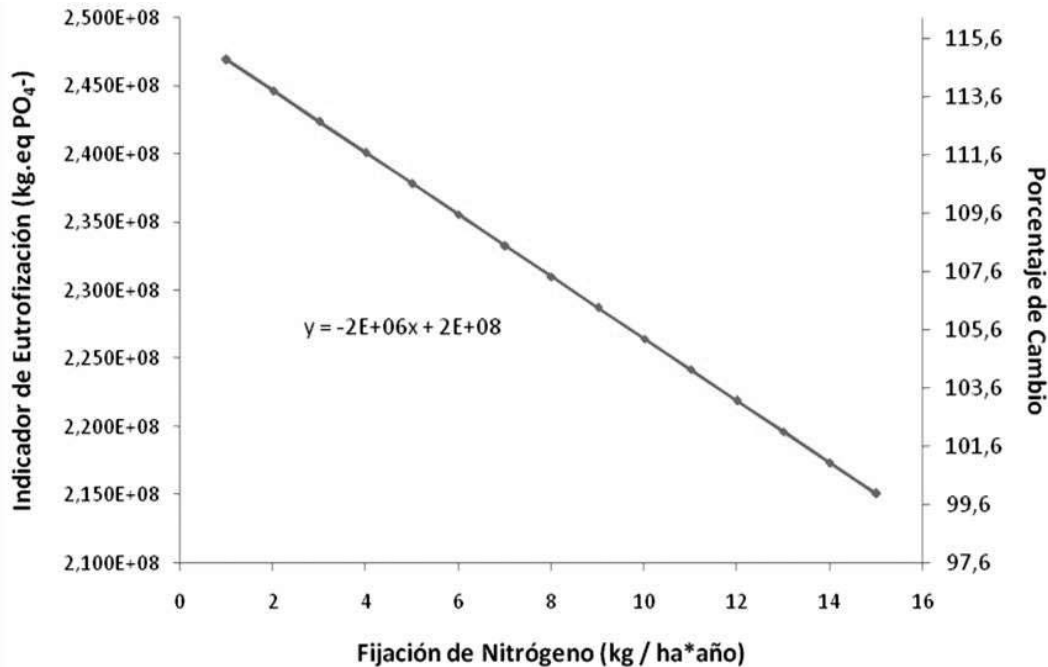


Figura 7. Variación del EI con la cantidad de nitrógeno fijado

CONCLUSIONES

El análisis del ciclo de vida para la producción de biodiesel obtenido a partir de aceite de higuera empleando la metodología de la cuna a la cuna ha conducido a las siguientes conclusiones:

- Al integrar como una etapa más los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza, la implementación de la metodología de la cuna a la cuna en el ACV permitió evaluar el impacto real en el ambiente que tiene la producción de biodiesel a partir de aceite de ricino.

- A través de la cuantificación de los flujos de entrada y salida en las diferentes etapas del proceso se pudo conocer las emisiones más relevantes en cada una de ellas junto con el consumo energético asociado.

- El perfil medioambiental elaborado refleja que la etapa de distribución y uso de la mezcla B10 es aquella que ejerce mayor influencia tanto en

las categorías de impacto de salida como en la categoría de impacto de entrada.

- En la medida que la planta tenga una mayor fijación neta de C y N en el suelo, se podrá contribuir significativamente con la disminución del impacto relacionado con las categorías de cambio climático y eutrofización, respectivamente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ABELA, J. E. (2004). *Importancia y función de la fijación biológica de nitrógeno (FBN) en el cultivo de soya* [Versión electrónica].
- [2] ÁLVAREZ, R. (2006). Balance de nitrógeno en cultivos de trigo [Versión electrónica]. Publicación Miscelánea, 105.
- [3] AMAYA, B. y BECERRA, S. (2008). Evaluación del Análisis del Ciclo de Vida para la Producción de Biodiesel a partir de Aceite de Higuera empleando la Metodología "de la cuna a la

- cuna". Tesis de Pregrado para la obtención del título de Ingeniero Químico, Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia.
- [4] ANTÓN, M. A. (2004). Utilización del análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Tesis de Doctorado para la obtención del título de Doctor en Ingeniería Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
- [5] AUDSLEY, E. et al. (2003). Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture: Final Report [Versión electrónica]. European Commission DG VI Agriculture.
- [6] CARDIM DE CARVALHO FILHO, A. (2001). Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Tesis de Doctorado para la obtención del título Doctor en Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Barcelona, España.
- [7] DA COSTA, R. E. (2005). The energy balance in the production of palm oil biodiesel -Two case studies: Brazil and Colombia [Versión electrónica]. CENIPALMA, 1-5.
- [8] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2002). A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions Draft Technical Report. Estados Unidos: EPA.
- [9] EUROPEAN CENTRE FOR ECOTOXICOLOGY AND TOXICOLOGY OF CHEMICALS. (1994). Technical Report 62: Ammonia Emissions to Air in Western Europe. Belgium: ECETOC.
- [10] FRANCO, G. et al. (2007). Introducción y evaluación de materiales de higuera (Ricinus communis), para la producción de biodiesel en diferentes zonas de Colombia. Medellín: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- [11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1997). Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework. Geneva: ISO 14040.
- [12] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (1998). Environmental management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis. Geneva: ISO 14041.
- [13] KUZYAKOV, Y. y DOMANSKI, G. (2000). Carbon input by plants into the soil. Review [Abstract]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 163 (4), 421-431.
- [14] LECHÓN, Y. et al. (2006). Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. (Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de Biodiesel y Diesel). España: Ministerio de Medio Ambiente - Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
- [15] SHEENAN, J. et al. (1998). Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus. Estados Unidos: U.S. Department of Energy.
- [16] SINHA, A. D.; HALDAR, C. (2006). Renewable Fuel from Castor Oil [Versión electrónica].
- [17] UNIVERSIDAD DE CHILE. (2007). Actualización de factores de emisión para buses y transporte de carga de la región metropolitana. Santiago de Chile: Fundación para la transferencia tecnológica.
- [18] ZAH, R. et al. (2007). Life Cycle Assessment of Energy Products: Environmental Assessment of Biofuels - Executive Summary. Bern: Empa.