

**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”**

**BIBIAN HELENA AMAYA RAMÍREZ  
SILVIA MILENA BECERRA BAYONA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2008**

**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”**

**BIBIAN HELENA AMAYA RAMÍREZ  
SILVIA MILENA BECERRA BAYONA**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de  
Ingeniero Químico**

**Director  
LEONARDO ACEVEDO DUARTE  
Ingeniero Químico Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2008**

A mis padres por su amor, sus enseñanzas y por siempre estar ahí.

A mi hermana por estar a mi lado y ser mi amiga, sin ti

no hubiera sido lo mismo

*Bilhan*

*A mi madre "Lucía Bayona B." y a mi padre "Carlos Julio Becerra O."  
por todo el amor y confianza que siempre han depositan en mí,  
por guiar cada uno de mis pasos y por el sacrificio hecho  
durante toda mi carrera.*

*A mi hermana "Laura Marcela Becerra B."  
quien llevo en el alma por todos sus consejos y bromas.*

*Silvia Milena Becerra Bayona*

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestras familias por el amor y el apoyo brindado

A Dios por regalarnos el don de la vida y darnos claridad en los momentos difíciles

A nuestros amigos por estar siempre allí y por todos los momentos compartidos porque cada día con ustedes fue un aprendizaje continuo, el hecho de haberlos conocido hizo que nuestras vidas fueran diferentes.

Al Dr. Leonardo Acevedo Duarte por la orientación y la confianza

A la Ingeniera Paola Andrea Acevedo Pabón por estar siempre dispuesta a ayudarnos

Al Dr. Alejandro Navas porque a pesar de la distancia su apoyo fue incondicional

Al Dr. Liv Soares por su aporte académico

Al Dr. Pedro Benjumea por su ayuda desinteresada

A nuestra querida UIS por abrimos sus puertas y permitirnos vivir unos de los mejores años de nuestras vidas

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	16
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	18
1.1.1 Definición del análisis del ciclo de vida	18
1.1.2 Metodología del análisis del ciclo de vida	18
2. DEFINICIÓN DEL ALCANCE Y OBJETIVOS DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	21
2.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS	21
2.2 DEFINICIÓN DEL ALCANCE	21
2.2.1 Función del sistema del producto	21
2.2.2 Unidad funcional	22
2.2.3 Sistema del producto a estudiar	22
2.2.4 Límites de los sistemas funcionales	22
2.2.5 Reglas de asignación	23

2.2.6 Tipos de impacto y metodología de evaluación	24
2.2.7 Requisitos de los datos	24
3. ANÁLISIS DE INVENTARIO	25
3.1 ACTIVIDAD AGRÍCOLA E INTEGRACIÓN DE LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS	25
3.1.1 Actividad Agrícola	25
3.1.2 Integración de los ciclos biogeoquímicos	26
3.1.3 Resultados del inventario para la actividad agrícola	28
3.2 EXTRACCIÓN DE ACEITE DE RICINO	28
3.2.1 Descripción general	28
3.2.2 Aplicación de las reglas de asignación	29
3.2.3 Resultados del inventario para la extracción del aceite de ricino	30
3.3 TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO	30
3.3.1 Descripción general	30
3.3.2 Aplicación de las reglas de asignación	31
3.3.3 Resultados del inventario	31
3.4 DISTRIBUCIÓN Y USO DEL BIOCOMBUSTIBLE	32

3.4.1 Descripción general	32
3.4.2 Resultados del inventario	32
3.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE INVENTARIO	32
4. EVALUACIÓN DE IMPACTO E INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	33
4.1 SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO	33
4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL INVENTARIO	35
4.3 CARACTERIZACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	35
4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	37
5. CONCLUSIONES	39
6. RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS	54

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Factores de asignación másica para la extracción	30
Tabla 2. Factores de asignación másica para la transesterificación	32
Tabla 3. Resultados obtenidos del análisis del inventario	33
Tabla 4. Definición de las categorías de impacto	34
Tabla 5. Asociación de las diferentes emisiones a las categorías de impacto	35

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema del ciclo de vida de un producto o servicio	19
Figura 2. Fases del ACV de acuerdo a la ISO 14040	20
Figura 3. Esquema de los procesos implicados en el sistema de estudio	22
Figura 4. Diagrama de la actividad agrícola	25
Figura 5. Ciclo de Carbono para la cadena de producción de biodiesel a partir de higuera	27
Figura 6. Ciclo de Nitrógeno para el cultivo de higuera	28
Figura 7. Esquema general del proceso de extracción	29
Figura 8. Esquema general del proceso de transesterificación	30
Figura 9. Perfil medioambiental para el ACV	36
Figura 10. Variación del CCI con el porcentaje de fijación de CO <sub>2</sub>	38
Figura 11. Variación del EI con la cantidad de nitrógeno fijada	38

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Sistemas de evaluación ambiental	54
Anexo B. Fundamentos de la higuera	63
Anexo C. Extracción de aceite de ricino	66
Anexo D. Transesterificación del aceite de ricino	69
Anexo E. Emisiones de la combustión	74
Anexo F. Resultados detallados del análisis del ciclo de vida	76
Anexo G. Descripción de la hoja de cálculo elaborada en Excel®	81

## RESUMEN

**TÍTULO:** 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” \*

**AUTOR:** Bibian Helena Amaya Ramírez, Silvia Milena Becerra Bayona\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Análisis del ciclo de vida, Biodiesel a partir de higuierilla, Impacto ambiental, Higuierilla, Metodología de la cuna a la cuna.

**DESCRIPCIÓN:** el carácter no renovable de los combustibles fósiles ha llevado a la búsqueda de fuentes alternas y a la implementación de herramientas que permitan evaluar el impacto ambiental que éstas generan. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) cuantifica 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 mismo, metodología conocida como “de la cuna a la tumba”.

En este trabajo se propone una nueva metodología llamada “de la cuna a la cuna” donde se evalúan los impactos ambientales generados en la producción del biodiesel obtenido a partir de aceite de higuierilla 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 colectaron los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema de producción en estudio; se integraron 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 identificaron las etapas del proceso en las cuales el consumo de energía y las emisiones al medio ambiente fueron las más relevantes mediante el cálculo de los indicadores de categoría.

Las categorías de impacto estudiadas para producir 80.000 ton/año de biodiesel durante el tiempo horizonte del ACV fueron: cambio climático, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos, efectos respiratorios y energía no renovable dando como resultado el perfil medioambiental a partir del cual se plantearon soluciones orientadas a la reducción del consumo de energía y emisiones generadas en el ciclo de vida del biodiesel.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Leonardo Acevedo Duarte. PhD.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR THE PRODUCTION OF BIODIESEL FROM CASTOR OIL USING THE METHODOLOGY “FROM CRADLE TO CRADLE” \*

**AUTOR:** Bibian Helena Amaya Ramírez, Silvia Milena Becerra Bayona\*\*

**KEY WORDS:** Life cycle assessment, biodiesel from castor oil, environmental impact, castor, methodology from cradle to cradle.

**DESCRIPTION:** the non-renewable nature of fossil fuels has led to the search of alternative energy sources and the implementation of tools that allow to evaluate the environmental impact that such mechanisms generate. The Life Cycle Assessment (LCA) quantifies the input flows and environmental burdens associated with the life cycle of a product, process or service, from the extraction of raw materials to the final disposal of the residues. This methodology is known as “from the cradle to the grave”.

In this work, a new methodology, known as "from the cradle to the cradle", is performed and used 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. For this, 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 transformations, the use as biofuel and the residue disposal. Finally, the stages of the process in which energy consumption and emissions to the environment were the most significant were identified by means of the calculation of the different category indicators.

The categories of impact analyzed to produce 80.000 ton/year of biodiesel during the time projected for the study were: global warming, acidification, eutrophication, photochemical smog formation, respiratory effects and non-renewable energy. This gave as a result the environmental profile from which solutions were proposed oriented to reducing energy consumption and emissions generated throughout the life cycle of biodiesel

---

\*Degree Work

\*\*Physical-Chemical Faculty. Chemical Engineering Department. Director: Dr. Leonardo Acevedo Duarte. PhD.

## INTRODUCCIÓN

El progreso de la sociedad humana se ha basado en los sistemas naturales, que han sido fuente de recursos y sumidero de residuos, pero a medida que los pueblos fueron creciendo e industrializándose, la explotación de los ecosistemas se volvió intensiva, generando importantes problemas ambientales; siendo uno de los mayores contribuyentes la industria química, a pesar de los grandes beneficios que ha traído a la humanidad. Estos problemas se han venido reflejando en la disminución de la capa de ozono, extinción de especies, disminución de fuentes hídricas y en el aumento de la temperatura en el planeta; teniendo uno de los mayores porcentajes de participación en dicha problemática, el uso intensivo de los combustibles fósiles en las actividades industriales y en el transporte.

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 en el mundo la investigación sobre fuentes alternas de combustibles, especialmente de origen agrícola; no obstante, los biocombustibles y sus residuos no son totalmente amigables con el ambiente. Es clara, entonces, la importancia de trabajar con esfuerzos conjuntos para la búsqueda de nuevas herramientas que permitan la evaluación y el planteamiento de soluciones con el fin de mitigar el impacto ambiental de los mismos.

Una de las herramientas disponibles actualmente 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 grandes limitaciones en lo que se refiere a la definición de los límites del análisis, es decir, la ubicación de la cuna y la tumba en un determinado proceso se realiza arbitrariamente, dependiendo de la entidad encargada de llevar a cabo la investigación; además, esta metodología 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” permitirá 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 J. *et al.* (1998); el Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de Biodiesel y Diesel llevado a cabo por CIEMAT (2006); el Análisis de Ciclo de vida de productos energéticos desarrollado por Rainer Zah, *et al.* (2007); 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 biocarburante 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 (capítulo 2). 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 (capítulo 3); 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 (capítulo 4, 5 y 6)

## 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos básicos relacionados con la herramienta de evaluación ambiental conocida como Análisis del Ciclo de Vida.

### 1.1 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

A lo largo del ciclo de vida de un producto, ocurren distintas interrelaciones entre el entorno ambiental, los flujos de material y energía y las emisiones ubicadas dentro de los límites del sistema considerado. Todas estas interrelaciones son cuantificadas mediante distintos métodos fiables que se complementan unos con otros (Cardim de Carvalho Filho, 2001). (Anexo A)

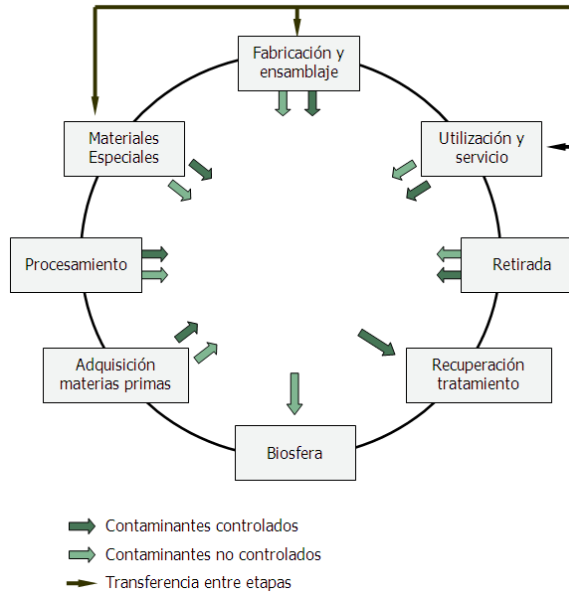
**1.1.1 Definición del análisis del ciclo de vida.** El SETAC-Society for Environmental Toxic and Chemistry (1999) define el análisis de ciclo de vida como: “aquel proceso que sirve para evaluar las cargas medioambientales asociadas a un producto, proceso, o actividad mediante la identificación y cuantificación del consumo de energía y materiales y de los residuos vertidos al medio ambiente, y para identificar y evaluar las alternativas que puedan suponer mejoras medioambientales. Dicho análisis abarca la totalidad del ciclo de vida del producto, desde la extracción y procesamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, la utilización, el mantenimiento y el reciclado, hasta llegar a la disposición final del mismo”.

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”.

En la figura 1 se muestra un esquema en donde se pueden observar las diferentes etapas que conforman el ciclo de vida de un producto o servicio.

**1.1.2 Metodología del análisis del ciclo de vida.** De acuerdo con la normativa ISO

Figura 1. Esquema del ciclo de vida de un producto o servicio



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.

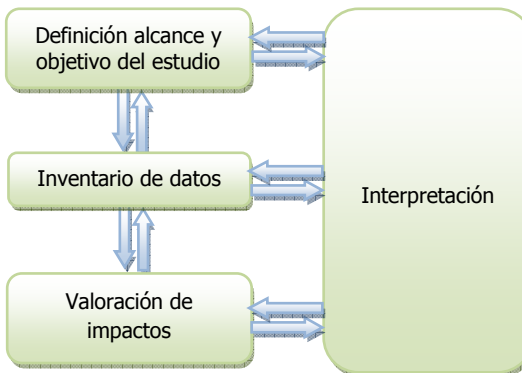
Los cuatro elementos que estructura el ACV no solo son secuenciales, sino también son iterativos entre sí, como puede observarse en la figura 2.

➤ **Definición de los objetivos y alcance del ACV.** El objetivo de un estudio de ACV debe aclarar las metas a las cuales se desea llegar, junto con el destinatario a quién se va a comunicar los resultados. Por otra parte, en la definición del alcance del ACV, se deben precisar varios aspectos, tales como: las funciones del sistema del producto, la unidad funcional, 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 de impacto, así como la interpretación a realizar, los requisitos de los datos, las hipótesis, las limitaciones y los requisitos iniciales de calidad de los datos (ver anexo A).

➤ **Análisis de inventario de ciclo de vida.** “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” (ISO 14041, 1998). (ver anexo A)

➤ **Evaluación de impacto de ciclo de vida.** Tiene por objeto valorar los resultados

Figura 2. Fases del ACV de acuerdo a la ISO 14040



Fuente: ISO 14040, 1998

del análisis del 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 caracterización 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.

Al terminar de realizar la caracterización se obtiene el perfil medioambiental al que se le puede realizar el siguiente tratamiento:

- Cálculo de la magnitud del indicador de categoría resultante con respecto a valores de referencia, denominado normalización.
- Agrupación de las diferentes categorías empleando indicadores.

Los anteriores elementos no son obligatorios, aunque permiten la comparación de los resultados obtenidos con estudios realizados anteriormente (ver Anexo A).

➤ **Interpretación de ciclo de vida.** Es la fase en la que 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.

## **2 DEFINICIÓN DEL ALCANCE Y OBJETIVOS DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA**

La metodología del presente estudio está basada en las normas internacionales ISO 14040 - 14044 adaptadas a la metodología “de la cuna a la cuna”, la cual fue descrita en el capítulo anterior.

A continuación se presentan los objetivos que se desean cubrir en el análisis del ciclo de vida, junto con la definición del alcance, donde se establece la unidad funcional del estudio, los sistemas y tipos de impacto a evaluar, los límites del sistema y los requisitos de los datos.

### **2.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS**

El propósito de este estudio es examinar la sostenibilidad ambiental del sistema de producción del biodiesel a partir del aceite de higuera a través de la técnica de Análisis de Ciclo de Vida mediante la metodología de la cuna a la cuna con la que se pretende integrar 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 en una mezcla B10 y de la disposición de residuos. Además, se busca obtener una aproximación de la información ambiental de todo el ciclo de vida del proceso en estudio. Con este trabajo se intenta: contribuir con los estudios que se realizan actualmente en la Universidad Industrial de Santander como parte del desarrollo de una tesis doctoral; ser punto de partida en la implementación de la metodología de la cuna a la cuna en los análisis de ciclo de vida y permitir la difusión del presente texto a través de la publicación del mismo

El destinatario de este informe es cualquier persona interesada en la metodología del Análisis del Ciclo de Vida.

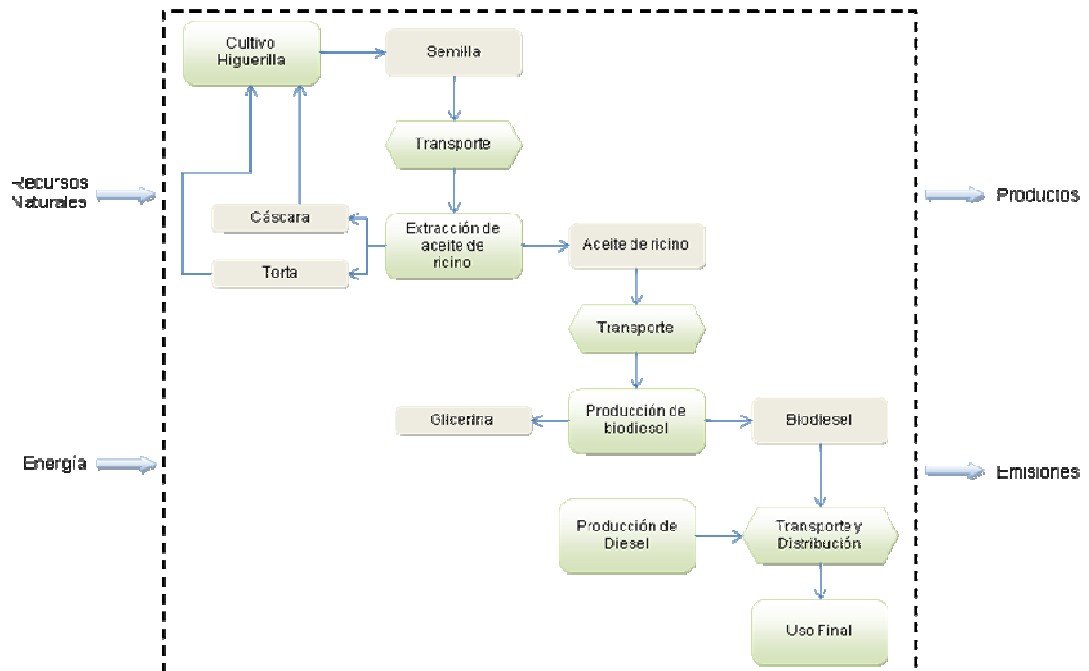
### **2.2 DEFINICIÓN DEL ALCANCE**

**2.2.1 Función del sistema del producto.** Servir como combustible para un vehículo que trabaje con mezclas de diesel de origen fósil y de origen vegetal.

**2.2.2 Unidad funcional.** En este estudio se tomó como unidad funcional la capacidad de producción de la planta de biodiesel que es de 80.000 toneladas/año (aproximadamente 220 toneladas/día).

**2.2.3 Sistema del producto a estudiar.** Los sistemas funcionales involucrados en el ACV del biodiesel son: actividad agrícola e integración de los ciclos biogeoquímicos, extracción del aceite de ricino, transesterificación del aceite de ricino y distribución y uso del biocombustible (ver figura 3).

Figura 3. Esquema de los procesos implicados en el sistema de estudio



**2.2.4 Límites de los sistemas funcionales.**

- **Límites geográficos.** El estudio se limitó al uso del biodiesel en Colombia; además, se desarrolló teniendo en cuenta que el cultivo de higuera, la planta extractora de aceite y la planta productora de biodiesel se encuentran ubicados en el departamento del Meta (Puerto Gaitán y alrededores).
- **Límites temporales.** Se tomó como horizonte temporal 60 años, con el fin de

comparar el análisis de ciclo de vida del biodiesel obtenido a partir de aceite de higuera con los estudios sobre este producto obtenido a partir de otros cultivos oleaginosos

➤ **Límites para el proceso.** En el presente estudio solo se tomó un escenario para analizar, el cual está conformado por los siguiente parámetros:

- Terreno a cultivar: sabana
- Localidad: Llanos Orientales
- Tipo de semilla de higuera a cultivar: roja (CORPOICA-MADR, 2007). El

Anexo B contiene información acerca de la higuera y su cultivo.

Por otra parte, no se tuvo en cuenta la etapa de construcción ni el mantenimiento de la infraestructura de la planta, no porque carezcan de importancia, sino por ser éste un estudio cuyo enfoque va dirigido a la parte productiva del biocombustible. Además, no se incluyeron factores económicos (como costos), factores sociales (como trabajo infantil), y fenómenos naturales catastróficos (como incendios, inundaciones, entres otros).

Para el caso de los insumos empleados en el proceso diferentes a los provenientes de la cadena de higuera, las cargas ambientales obtenidas en su producción se cuantificaron sin tener en cuenta las emisiones asociadas a las materias primas para su producción, es decir, para estos insumos se estableció una cuna y una tumba, así, la metodología de la cuna a la cuna solo se aplicó para la cadena de producción de la higuera.

Por último, ciertos impactos ambientales no fueron cubiertos en su totalidad, debido a la dificultad en la recolección de datos de las condiciones locales (consumo y uso del agua).

**2.2.5 Reglas de asignación.** Partiendo del concepto que una regla de asignación se aplica cuando de un proceso resultan varios productos (co-productos); y por ello, cada uno tiene una participación tanto en las entradas como en las salidas que se generen a lo largo de dicho proceso, se siguió el procedimiento propuesto por la norma ISO 14040 para la extracción y la transesterificación del aceite (subsistemas estudiados donde se obtienen co-productos) donde se aplicó el método de asignación másica (regla de asignación basada en las fracciones presentes de cada co-producto en el flujo total de salida de un sistema).

**2.2.6 Tipos de impacto y metodología de evaluación.** Siguiendo la metodología reportada por Antón (2004), 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.

**2.2.7 Requisitos de los datos.** Al ser este estudio de objetivo académico, no se desestimaron datos; sin embargo, se reconoce el grado de incertidumbre inherente a ellos. También, se buscaron datos recientes y adaptados al área geográfica donde se consideró estarían ubicados los distintos subsistemas. Cabe anotar que 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 J. *et al.*, 1998; CIEMAT, 2006; Cardim de Carvalho Filho, 2001; Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2007; EPA, 2004; ECETOC, 1994; Sinha y Haldar, 2006.

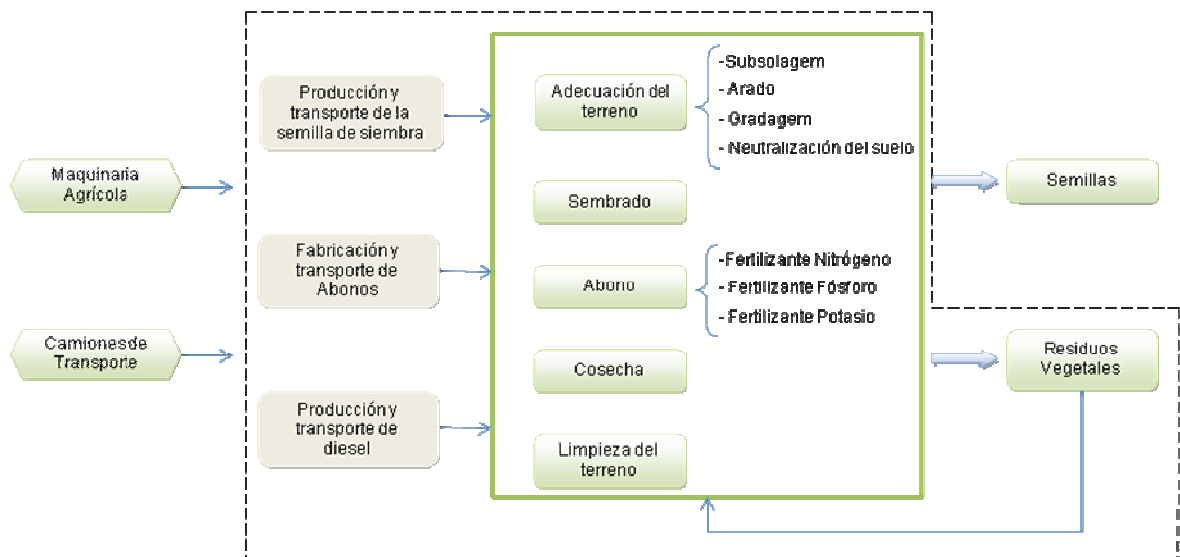
### 3. ANÁLISIS DE INVENTARIO

En este capítulo se reportan los datos de los impactos medioambientales y el consumo de energía de las diferentes materias primas y procesos involucrados en el ciclo de vida del biodiesel obtenido a partir de higuierilla; para esto, se construyeron los diferentes diagramas con el fin de apreciar los flujos de materia y energía de los sistemas en estudio.

#### 3.1 ACTIVIDAD AGRÍCOLA E INTEGRACIÓN DE LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

**3.1.1 Actividad Agrícola.** La etapa de la actividad agrícola involucra la identificación y contabilización de los flujos ambientales y energéticos asociados con la producción de la semilla de higuierilla, y tiene en cuenta todas las labores relacionadas con la parte agrícola, así como todos los procesos de producción y transporte de los insumos agrícolas (diesel, fertilizantes, entre otros). En la figura 4 se puede observar el diagrama correspondiente a esta etapa.

Figura 4. Diagrama de la actividad agrícola



➤ **Limitaciones y consideraciones generales.** La actividad agrícola involucra un gran

número de variables que al ser combinadas dan como resultado una variedad de escenarios a evaluar; de esta forma, solo se tomó uno de éstos, el cual considera:

- El terreno en el cual se desarrolló el cultivo es tipo sabana y no presenta 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. Se mantuvo un cultivo alterno para suplir la producción de semilla que se dejó de obtener mientras el terreno estaba en reposo

- La siembra se realizó mecanizadamente, pero con el fin de garantizar mayor densidad de higuierilla por hectárea la recolección de las semillas fue manual.

- Los fertilizantes fueron transportados en camiones desde la ciudad de Cartagena hasta el terreno de producción, recorriendo una distancia de 1.355 km. En el caso de las semillas necesarias para la siembra se consideró que su adquisición fue en Medellín, recorriendo una distancia de 694km. Por último, la cal necesaria para la neutralización del suelo se adquirió en el departamento de Santander como cal dolomita recorriendo una distancia de 664 km. Las cantidades empleadas se encuentran en el Anexo F.

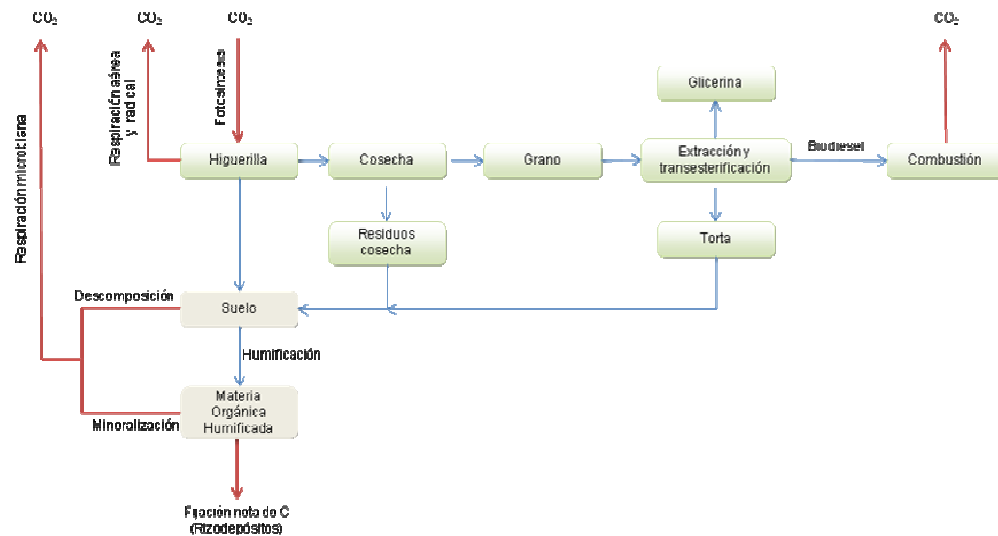
- No se consideraron efectos por el uso de agroquímicos (herbicidas, pesticidas, insecticidas, entre otros) debido a que para el cultivo de la higuierilla aún no se tienen los productos específicos a emplear. Además, no se cuenta con datos referentes a éstos (Audsley, 2003) y según la literatura su aporte es mínimo (Da Costa et.al., 2005).

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

➤ **Ciclo del carbono.** En el desarrollo del cultivo de higuierilla, ésta captura una cantidad de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera, el cual tiene varios destinos: la parte fijada en la biomasa que se cosecha, la parte fijada en la biomasa que queda en el terreno y la parte que retorna a la atmósfera mediante el mecanismo de respiración de la planta. Por lo tanto, la verdadera contribución que tiene la planta en la disminución del CO<sub>2</sub> del

ambiente, se ve reflejada en el carbono que se fija en el suelo en forma de rizodepósitos (“formas inmovilizadas de C que no se transforman de nuevo en CO<sub>2</sub>, y se consideran como una fijación neta de CO<sub>2</sub> atmosférico por el cultivo” (CIEMAT, 2005)).

Figura 5. Ciclo de Carbono para la cadena de producción del biodiesel a partir de higuera

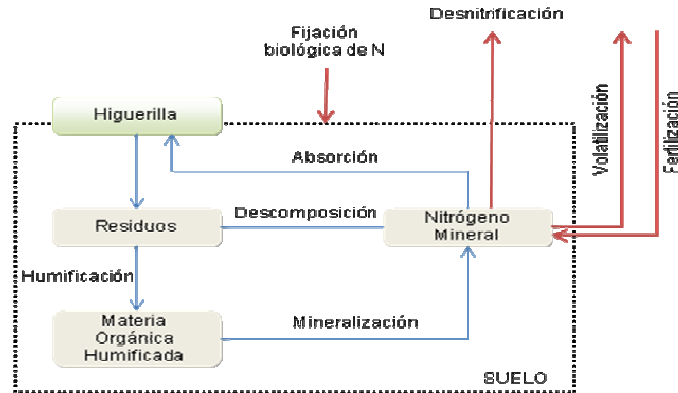


Teniendo en cuenta que la planta ha fijado un carbono previamente en su crecimiento, las cantidades de CO<sub>2</sub> emitidas provenientes de la combustión del biodiesel, del uso del resto de los co-productos y de los diversos mecanismos de respiración no se contabilizaron como emisiones y se han considerado cero (CIEMAT, 2006). Se consideró que existe una fijación neta de C en el suelo representada como un porcentaje del CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> para el rastrojo se consideró de 56,8 % (Kuzyakov, y.Domanski, 2000).

➤ **Ciclo del nitrógeno.** “El nitrógeno se encuentra en varios compartimientos, principalmente, en la planta, en los residuos vegetales, en el nitrógeno mineral y en la materia orgánica humificada (figura 6). 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 el ingreso por lluvia. Las salidas de mayor magnitud son la exportación, volatilización, desnitrificación y lixiviación” (Alvarez, 2006).

Las emisiones debidas al uso de los fertilizantes (N<sub>2</sub>O) se calcularon de acuerdo a lo

Figura 6. Ciclo de Nitrógeno para el cultivo de higuera



planteado en la metodología IPCC (Audsley, 2003); además, para calcular las emisiones de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_x$  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 (Abela, 2004)

**3.1.3 Resultados del inventario para la actividad agrícola.** Con el fin de contabilizar los diferentes impactos para el tiempo de horizonte del ACV, se recolectaron los datos para las distintas entradas y salidas del sistema y se llevaron a Excel® a una hoja de cálculo. Los datos se reportan en la tabla 3.

## 3.2 EXTRACCIÓN DE ACEITE DE RICINO

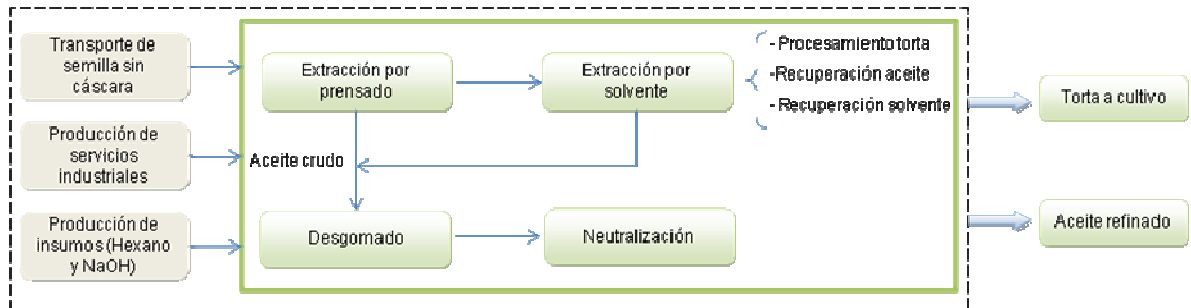
**3.2.1 Descripción general.** Esta etapa tiene como objetivo cuantificar los flujos de materia y energía relacionados con el proceso de obtención de aceite refinado a partir de semillas de higuera, al igual que las emisiones correspondientes a la producción y transporte de las materias primas involucradas. La figura 7 muestra el diagrama considerado para realizar el inventario en esta etapa.

➤ **Limitaciones y observaciones.** Para en la etapa en mención se tomaron las siguientes consideraciones:

- Las semillas provenientes del cultivo se transportaron a la planta procesadora en camiones de capacidad 15,5 ton una distancia promedio de 40 km y, posteriormente,

mediante un sistema de bandas en el interior de la planta.

Figura 7. Esquema general del proceso de extracción



- El hexano para la extracción se transportó desde la ciudad de Barrancabermeja una distancia de 683 km y el NaOH fue adquirido en la ciudad de Cali con una distancia de recorrido de 720 km.

- No se tuvo en cuenta el sistema de descascarado ya que la variedad seleccionada para el caso en estudio es dehiscente.

- Con el fin de obtener el mayor porcentaje de aceite contenido en la semilla, 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 (hexano). Para retirar las impurezas presentes en el aceite crudo, éste se sometió a un proceso de desgomado y neutralización (ver Anexo C).

- Los requerimientos energéticos del precalentador y la prensa (tipo expeller) fueron escalados tomando como referencia Barragán y Cepeda, 1979 y Global Extent, respectivamente.

- Para la extracción por solvente se tomó como referencia el proceso reportado por Sheehan J. et. al., 1998; que incluye la extracción del aceite, el procesamiento de la torta, la recuperación del aceite y la recuperación del solvente.

**3.2.2 Aplicación de las reglas de asignación.** La etapa de extracción da como resultado además del aceite de ricino refinado, algunos co-productos los cuales tienen un porcentaje de participación en las emisiones y en el consumo energético evaluado mediante la asignación másica. La siguiente tabla muestra los factores de asignación para la extracción.

Tabla 1. Factores de asignación másica para la extracción

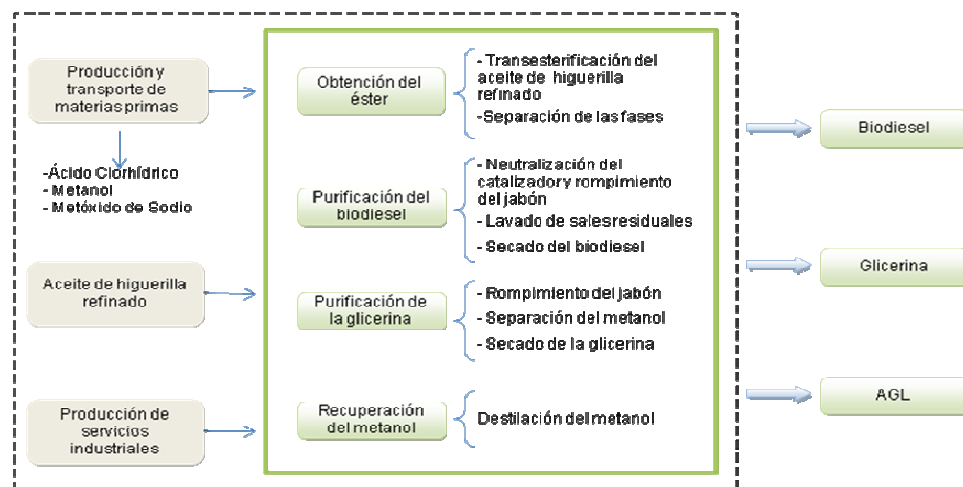
Sustancia	%
Aceite ricino refinado	46,35
Torta	53,65
<i>Total</i>	<i>100</i>

**3.2.3 Resultados del inventario para la extracción del aceite de ricino.** Los datos obtenidos de los balances de masa, de los balances de energía y de la simulación en Hysys® 3.1 (simulación realizada para la etapa de neutralización) se llevaron a Excel®, donde fueron cuantificadas las variables en estudio. La tabla 3 muestra un resumen de las emisiones y requerimientos energéticos.

### 3.3 TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO

**3.3.1 Descripción general.** 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. El análisis de inventario para esta etapa tiene en cuenta las corrientes másicas y energéticas junto con las cargas ambientales asociadas tanto en el proceso de transformación como el transporte y fabricación de materias primas. La figura 8 esquematiza los procesos implicados en la transformación del aceite de higuera a biodiesel.

Figura 8. Esquema general del proceso de transesterificación



➤ **Limitaciones y observaciones generales.** Para estimar el impacto del proceso de obtención del biodiesel se consideró:

- El biodiesel se obtuvo a partir de aceite de higuera empleando transesterificación básica con metóxido de sodio como catalizador, y vía alcoholisis con metanol tomando como referencia las conclusiones expuestas en los trabajos de Plentz *et al.*, 2006; Meher, Sagar y Naik, 2006; Demirbas, 2005; Ma y Hanna., 1999; entre otros.

- Los datos de entrada necesarios en la simulación realizada en Hysys<sup>®</sup> 3.1 para la etapa de obtención del biodiesel fueron el resultado del análisis de una serie de estudios entre los que se destacan: Knothe, Van y Krahl, 2005; CORPODIB, 2003; Haas *et al.*, 2005; Sheehan J. *et al.*, 1998 y Zapata *et al.*, 2006.

- Con el fin de tener una mejor comprensión de los fenómenos y una mayor precisión en la cuantificación másica y energética, el proceso fue dividido en cuatro etapas: obtención del éster, purificación del éster, purificación de la glicerina y recuperación del metanol (ver Anexo D).

- Los requerimientos de materias primas fueron calculados a partir de la simulación en Hysys<sup>®</sup> 3.1 para una planta de producción de 80.000 ton/año de biodiesel.

- Para los insumos que requieren importación (metanol y metóxido de sodio) se consideraron únicamente las emisiones causadas por transporte en los límites geográficos del ACV. El metanol fue transportado en cisternas de capacidad de 15.000 L desde la ciudad de Cartagena una distancia de 1.355 km; el metóxido de sodio recorrió los mismos kilómetros que el metanol, pero se transportó en camiones de 15,5 ton de capacidad y el ácido clorhídrico se transportó en cisternas desde la ciudad de Cali una distancia de 720 km.

**3.3.2 Aplicación de las reglas de asignación.** Las reacciones que se llevan a cabo en la obtención del biodiesel dan como resultado productos secundarios tales como la glicerina y los ácidos grasos, los cuales contribuyen a las cargas ambientales y a los requerimientos energéticos del proceso. Al igual que para la extracción se seleccionó la asignación másica como sistema de asignación. Los factores de asignación hallados a partir de los balances de masa se muestran en la tabla 2.

**3.3.3 Resultados del inventario.** Para esta etapa en particular los balances tanto de

Tabla 2. Factores de asignación másica para la transesterificación

Sustancia	%
Ácidos Grasos	0,42
Biodiesel	88,59
Glicerina	10,99
<i>Total</i>	<i>100</i>

masa como de energía se tomaron de la simulación realizada en el programa Hysys<sup>®</sup> 3.1, estos valores al igual que los obtenidos en la etapas previas fueron llevados a una hoja de Excel<sup>®</sup> donde se procesaron. La tabla 3 contiene el inventario de esta etapa.

### 3.4 DISTRIBUCIÓN Y USO FINAL DEL BIOCOMBUSTIBLE

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

➤ **Limitaciones y observaciones generales.**

- El biodiesel fue transportado hasta los sitios de almacenamiento ubicados en la ciudad de Bogotá (280 km) en cisternas de 15.000 L donde se mezcló con el diesel de origen fósil para obtener un biocombustible con un 10% v/v de biodiesel (B10). El transporte hasta las estaciones de servicio de la ciudad de Bogotá se realizó igualmente en cisternas de 15.000 L.

- Para calcular las emisiones producidas en la combustión del B10 se aplicaron los modelos propuestos por EPA, 2002 (ver Anexo E).

**3.4.2 Resultados del inventario.** En la tabla 3 se observan las emisiones y los requerimientos de energía obtenidos en el inventario de la distribución y uso del biodiesel.

### 3.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE INVENTARIO

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de inventario que fueron agrupados para las diferentes etapas estudiadas en, emisiones en el aire, emisiones en el agua y consumo de energía primaria. El Anexo F contiene las tablas detalladas para cada una de las etapas.

Tabla 3. Resultados obtenidos del análisis de inventario

	Etapa	Adecuación terreno e integración ciclos	Extracción	Transesterificación	Distribución y uso	Total
Emisiones en el aire [kg]	Hidrocarburos	1,301E+06	1,181E+05	1,039E+05	2,838E+08	2,854E+08
	CO	4,178E+06	1,232E+06	5,308E+05	9,527E+08	9,587E+08
	NO <sub>2</sub>	1,251E+07	1,611E+07	2,201E+06	1,792E+09	1,823E+09
	PM <sub>10</sub>	8,648E+05	1,977E+04	8,602E+04	2,345E+08	2,354E+08
	SO <sub>2</sub>	3,011E+06	2,974E+07	1,170E+07	4,059E+08	4,504E+08
	CH <sub>4</sub>	9,092E+05	1,244E+07	2,794E+06	1,201E+08	1,362E+08
	N <sub>2</sub> O	3,286E+06	9,586E+04	1,129E+04	9,916E+06	1,331E+07
	CO <sub>2</sub>	-1,543E+11	5,195E+09	7,826E+08	1,468E+11	-1,461E+09
	Hidrocarburos (sin especificar)	2,075E+05	1,521E+05	1,580E+05	4,162E+07	4,214E+07
	Benceno	2,490E+02	4,024E+00	1,688E+01	4,980E+04	5,007E+04
	Formaldehidos	4,368E+03	5,307E+01	6,370E+02	7,968E+05	8,019E+05
	Partículas (sin especificar)	3,297E+05	2,323E+07	1,345E+06	5,894E+07	8,385E+07
	HCl	1,028E+04	8,909E+05	5,224E+04	1,880E+06	2,834E+06
	HF	1,535E+03	1,113E+05	6,236E+03	2,348E+05	3,538E+05
	NH <sub>3</sub>	2,233E+06	1,716E+02	3,284E-01	3,326E+00	2,234E+06
Emisiones en el agua [kg]	DBO <sub>5</sub>	1,460E+05	2,367E+04	1,083E+04	2,835E+07	2,853E+07
	DCO	1,211E+06	1,999E+05	9,131E+04	2,399E+08	2,414E+08
	Metales (sin especificar)	2,288E+04	1,867E+03	3,364E+03	4,577E+06	4,605E+06
	Amonia (como N)	2,086E+04	5,590E+03	1,690E+03	4,147E+06	4,175E+06
	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	1,605E+01	1,412E+03	7,730E+01	2,727E+03	4,232E+03
Energía (MJ)	Energía Primaria	5,689E+10	8,330E+10	3,068E+10	1,029E+13	1,047E+13
	Energía Fósil	5,181E+10	8,077E+10	3,053E+10	1,029E+13	1,045E+13

## 4. EVALUACIÓN DE IMPACTO E INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Para interpretar los datos del Análisis de Inventario es necesario evaluar el impacto ambiental asociado con las emisiones y usos de las fuentes naturales. De este modo, este capítulo abarca la selección, clasificación y caracterización de los resultados reportados en el capítulo 3, así como también, algunos análisis de sensibilidad que permiten una mejor interpretación del análisis de ciclo de vida.

### 4.1 SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO

Mediante el siguiente modelo se representa la forma general para contabilizar cada una de las categorías de impacto:

$$\text{Indicador de la categoría de impacto} = \sum_i m_i * (\text{factor de caracterización de la categoría})_i \quad (1)$$

donde  $m_i$  es la emisión del recurso utilizado y  $(\text{factor de caracterización de la categoría de impacto})_i$  es propio para cada recurso (Antón, 2004). En la siguiente tabla se especifica el indicador y el factor de caracterización para cada una de las categorías de impacto.

Tabla 4. Definición de las categorías de impacto

Categoría de Impacto	Unidades de Referencia	Indicador de la Categoría	Factor de caracterización
Cambio Climático	kg-eq. CO <sub>2</sub>	CCI	GWP (kg-eq. CO <sub>2</sub> / kg)
Acidificación	kg-eq. H <sup>+</sup>	AI	AP (g-eq. H <sup>+</sup> / g)
Eutrofización	kg-eq. PO <sub>4</sub>	EI	EP (g-eq. PO <sub>4</sub> / g)
Formación foto-oxidantes	kg-eq. etileno	POI	POCP (g-eq. etileno / g)
Efectos respiratorios	kg-eq. PM <sub>2,5</sub>	REI	REP (kg-eq. PM <sub>2,5</sub> / kg)
Energía no renovable	MJ	NREI	NREP (MJ /kg)

Los impactos a evaluar, enumerados en la tabla anterior, se seleccionaron de acuerdo a la disponibilidad de los datos y a la relevancia mostrada por diferentes autores (Güereca, 2006; Josa *et al.*, 2007; Antón, 2004; Bentrup *et al.*, 2000; Zah *et al.*). Ver Anexo A para una mayor información sobre las categorías de impacto.

## 4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE INVENTARIO

En esta etapa cada intervención ambiental se asocia con las categorías de impacto en las que ella tiene un efecto; por ejemplo, el CO<sub>2</sub> está asociado con el cambio climático. La tabla 5 contiene esta asociación junto con los factores de caracterización.

Tabla 5. Asociación de las diferentes emisiones a las categorías de impacto

Sustancia	GWP	AP	EP	POCP	REP	NREP
CO <sub>2</sub>	1	n.c	n.c	n.c	n.c	n.c
CH <sub>4</sub>	7	n.c	n.c	0	n.c	n.c
N <sub>2</sub> O	156	n.c	0,27	n.c	0,1957	n.c
CO	1,57	n.c	n.c	n.c	0,001	n.c
HCl	n.c	0,0279	n.c	n.c	n.c	n.c
HF	n.c	0,05	n.c	n.c	n.c	n.c
NH <sub>3</sub>	n.c	0,059	0,35	n.c	n.c	n.c
NO <sub>2</sub>	n.c	0,022	0,13	n.c	0,1273	n.c
SO <sub>2</sub>	n.c	0,03125	n.c	n.c	0,078	n.c
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	n.c	n.c	0,095	n.c	n.c	n.c
N	n.c	n.c	0,42	n.c	n.c	n.c
NH <sub>4</sub>	n.c	n.c	0,42	n.c	0,1214	n.c
DCO	n.c	n.c	0,022	n.c	n.c	n.c
Benceno	n.c	n.c	n.c	0,11	n.c	n.c
Formaldehidos	n.c	n.c	n.c	0,22	n.c	n.c
Hidrocarburos sin especificar	n.c	n.c	n.c	0,194	n.c	n.c
Hidrocarburos	n.c	n.c	n.c	0,195	n.c	n.c
Partículas sin especificar	n.c	n.c	n.c	n.c	0,1571	n.c
PM <sub>10</sub>	n.c	n.c	n.c	n.c	0,5357	n.c
Crude Oil	n.c	n.c	n.c	n.c	n.c	45,8
Gas Natural	n.c	n.c	n.c	n.c	n.c	40,3

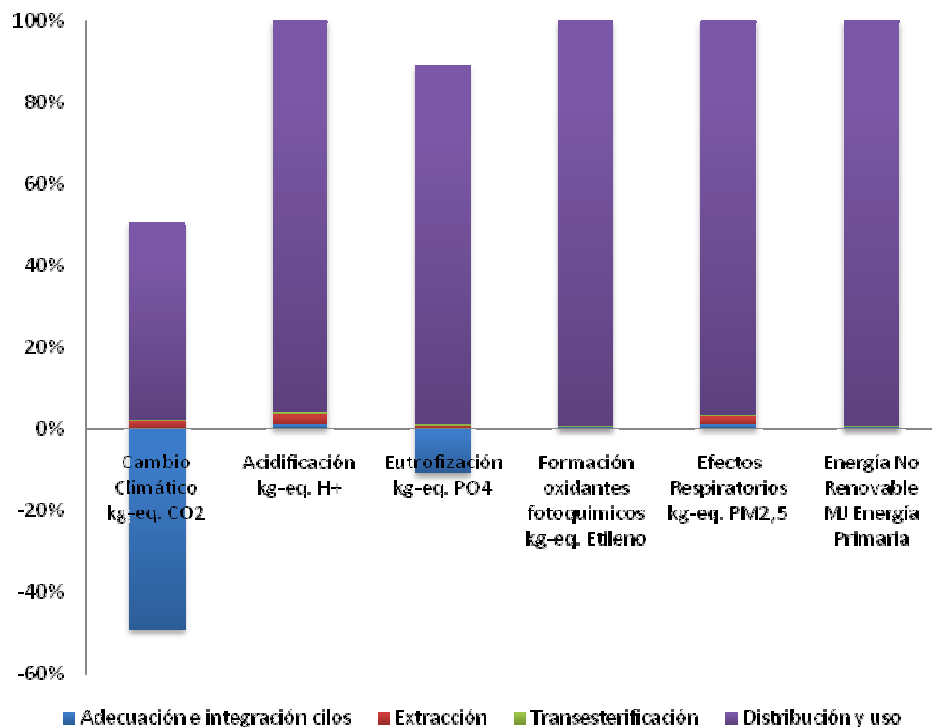
n.c. no contribuye para la categoría  
 Datos tomados de Antón, 2004

## 4.3 CARACTERIZACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez clasificados los datos, se realizó la adición de éstos para cada una de las categorías de impacto empleando los factores de caracterización (tabla 5) y la ecuación (1). 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. En la figura 9 se muestran el perfil medioambiental del ACV que es descrito a continuación.

En el indicador de cambio climático los mayores porcentajes de participación los tienen la

Figura 9. Perfil medioambiental para el ACV



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 CO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera gracias a la fotosíntesis de las plantas, dando como resultado un efecto positivo en el indicador, fenómeno que no se presenta en las demás etapas del proceso ya que éstas participan de manera negativa en el cambio climático.

Por otra parte, el escenario en el que se desarrolla la cadena de producción de la higuierilla 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<sub>x</sub>, a pesar que su AP es más bajo que el reportado para el SO<sub>2</sub>.

Las mismas emisiones de óxidos de nitrógeno antes mencionadas también favorecen al enriquecimiento de nutrientes de las reservas acuáticas y suelos agrícolas, por consiguiente, aumenta la eutrofización como se puede apreciar en la figura 9. 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.

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<sub>4</sub>) producidos en la combustión del B10, y para los efectos respiratorios son el NO<sub>2</sub> 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.

Finalmente, la categoría de impacto para el consumo de energía no renovable deja ver 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.

#### **4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

Teniendo en cuenta la carencia 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 neta de CO<sub>2</sub> que permitió ver como se afecta el perfil medioambiental, específicamente, se analizó el CCI por ser éste el que cuantifica las emisiones de CO<sub>2</sub>. También, se estudió la variación del EI con la cantidad de nitrógeno que fijan las bacterias no simbióticas presentes en el suelo debido a que este valor se encuentra en el intervalo de 1 a 15 kg / ha año. En las figuras 10 y 11 se observan los resultados obtenidos.

En la figura 11 se puede apreciar que el indicador de cambio climático tiene una relación inversamente proporcional con el porcentaje de fijación de CO<sub>2</sub>; de este modo, entre más alto sea éste, el medioambiente se verá favorecido por la disminución del CCI. Además, se observa que cuando el porcentaje alcanza el valor de 60, el indicador toma un valor negativo que indica que la cantidad de CO<sub>2</sub> que se está retirando de la atmósfera es mayor que las emisiones que se están produciendo por los otros contaminantes (CO, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>).

Figura 10. Variación del CCI con el porcentaje de fijación de CO<sub>2</sub>

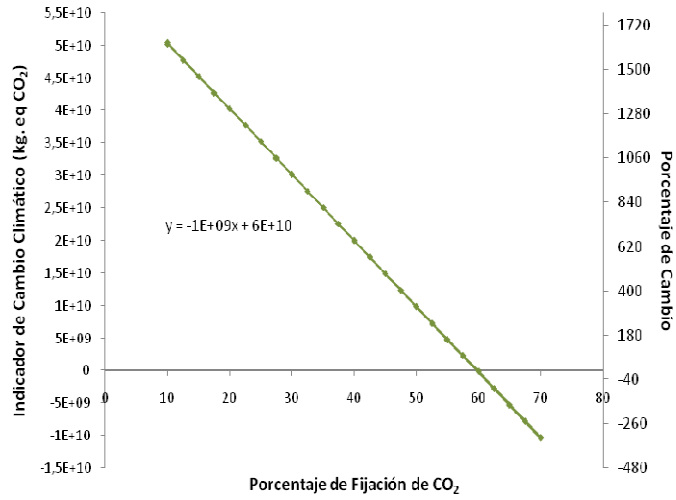
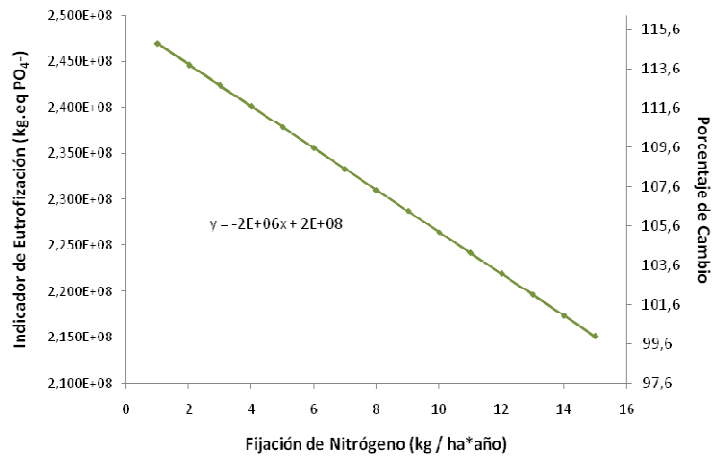


Figura 11. Variación del EI con la cantidad de nitrógeno fijado



Por otra parte, el EI también presenta una relación inversamente proporcional con la cantidad de nitrógeno fijado; sin embargo, ésta no es suficiente para compensar las contribuciones de las demás sustancias.

La relación que representa la variación del indicador con la variable independiente tiene la forma de una ecuación lineal para cada uno de los dos casos estudiados. Cabe anotar que el porcentaje de fijación de CO<sub>2</sub> tiene una mayor influencia en el CCI que la que tiene la fijación de nitrógeno en el EI. Lo anterior se ve reflejado en la pendiente de cada una de las correlaciones.

## 5. 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. De esta forma, la adecuación e integración de los ciclos tiene una alta participación en las emisiones de  $N_2O$  y  $NH_3$  causadas principalmente por el uso de fertilizantes; en la extracción se producen en su mayoría partículas sin especificar, HCl, HF y nitratos ocasionados por el consumo de electricidad; mientras que la transesterificación emite  $SO_2$  y  $CH_4$  originados fundamentalmente en la fabricación del metanol. La distribución y uso del biocombustible por su parte causa una significativa carga ambiental en todas las sustancias contaminantes consideradas en el estudio. Por último, el alto consumo de energía no renovable que se da en las etapas de adecuación, transesterificación y distribución se debe a la elaboración de las materias primas involucradas, y en la etapa de extracción a la producción de electricidad.

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. La diferencia radica en que, para las primeras, el proceso de combustión de biodiesel es aquel que posee la producción de emisiones más alta, mientras que para la categoría de impacto de entrada, la producción de materias primas es el mayor agente contaminante.

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.

## 6. RECOMENDACIONES

Por ser este un proyecto interdisciplinario, resultaría interesante ampliar la investigación en el campo de la fisiología del *Ricinus communis Linnaeus*, en lo que respecta a la fijación de nutrientes tanto en la biomasa del vegetal como en el suelo.

Se considera importante evaluar el efecto del uso de otros cultivos que tengan altos rendimientos de semilla por hectárea y alto contenido de aceite para la obtención de biodiesel con la metodología de la cuna a la cuna, con el fin de realizar estudios comparativos que permitan soportar la toma de decisiones tanto en el aspecto ambiental como en el social.

Elaborar la etapa adicional que proponen las normas ISO 14040 -14044 de normalizar y agrupar en un indicador los resultados obtenidos en el perfil medioambiental, mediante el establecimiento de factores de normalización para las condiciones locales, e incluir un análisis económico de ciclo de vida del biodiesel.

Realizar el análisis de ciclo de vida del biodiesel a partir del aceite de higuera empleando la metodología de la cuna a la cuna para los escenarios que no fueron cubiertos en el presente estudio, incluyendo la presencia de plagas y sus métodos de erradicación para así definir las condiciones en las cuales el proceso de producción tiene el menor impacto en el ambiente.

La implementación de las siguientes propuestas contribuiría a la reducción del impacto ambiental provocado a lo largo del ciclo de vida del biodiesel producido a partir de aceite de higuera:

- Optimizar el uso de fertilizantes nitrogenados para minimizar las emisiones de  $N_2O$  y  $NH_3$ , además de investigar la factibilidad de adecuar bacterias simbióticas en el cultivo de higuera.
- Integrar la producción de bioetanol con la cadena de producción de biodiesel
- Utilizar como combustible en los diferentes medios de transporte mezclas que contengan un porcentaje apreciable de biodiesel.

## BIBLIOGRAFÍA

ABELA, Jose Eduardo. Importancia y función de la fijación biológica de nitrógeno (FBN) en el cultivo de soya. [Online], 2004

AKPAN, U.G; JIMOH A. y MOHAMMED A.D. Extraction, Characterization and Modification of Castor Seed Oil. En : Leonardo Journal of Sciences. Vol. 8 (ene. – jun. 2006); p. 43-52.

ALVAREZ, Roberto. Balance de carbono en los suelos. En : Publicación Miscelánea. No. 105 (2006)

\_\_\_\_\_. Balance de nitrógeno en cultivos de trigo. En : Publicación Miscelánea. No. 105 (2006)

\_\_\_\_\_. Balance de carbono suelos de la pampa ondulada : efecto de la rotación de cultivos y la fertilización nitrogenada. [Online]

AMADO GONZÁLEZ, E.; PEREA ORTEGA, J.C. y LÓPEZ, A.F. Caracterización termoanalítica de semillas de Ricinus cummunis variedades mamona blanca, mamona negra y silvestre : Análisis de las Propiedades Reológicas del Biodiesel. En : Bistua. Vol. 4, No. 1 (2006). 15-20 p.

ANTÓN VALLEJO, M<sup>a</sup> Assumpció. Utilización del análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Barcelona, España, 2004, 231 p. Trabajo de grado (Doctorat Enginyeria Ambiental). Universitat Politècnica de Catalunya.

ARIAS, Andrés Felipe. Los Biocombustibles en Colombia [online]. Santa Marta : Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2007

ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LOS FERTILIZANTES y ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y

ALIMENTACIÓN. Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH<sub>3</sub>, NO, N<sub>2</sub>O proveniente de las tierras agrícolas. Roma : FAO e IFA, 2004. 110 p.

AUDSLEY, Eric *et al.* Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture : Final Report. s.l. : European Commission DG VI Agriculture, 2003. 98 p.

BARBOSA, Reinaldo y FEARNSIDE, Philip. Above-ground biomass and the fate of carbon after burning in the savannas of Roraima, Brazilian Amazonia. En : Forest Ecology and Management. Vol. 216 (2005); p. 295-316

BARRAGÁN RANGEL, Néstor y CEPEDA ORTIZ, Alfonso. Estudio de factibilidad y montaje de una planta productora de aceite de ricino refinado a partir de la higuera, para uso industrial en la ciudad de Bucaramanga. Bucaramanga, 1979, 202 p. Trabajo de grado (Ingeniero Industrial). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Industrial

BARRETO, Aurelir. Quantificação de água necessária para a mamoneira irrigada com base nas constantes hídricas do solo. En : I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. ENERGIA Y SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grande)

BELTRÃO, Napoleão *et al.* Cartilha, 1 : O Cultivo Sustentável da Mamona no Semi-árido Brasileiro. Campina Grande, PB : EMBRAPA ALGODÃO, 2006. 62 p.

\_\_\_\_\_. Coeficiente de migração, produtividade primária e sequestro de carbono pela mamoneira em regime de sequeiro no semi-árido brasileiro. En : I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. ENERGIA Y SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grande)

BENAVIDES, Alirio; BENJUMEA, Pedro y PASHOVA, Veselina. El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diesel. En : Dyna. Vol. 74, No. 153 (nov. 2007); p. 141-150

BORGES DE ARAUJO, Joabson *et al.* Índice de acidez do óleo de quatro cultivares de mamona extraído por mini-prensa laboratorial. En : 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE

MAMONA. (2006 : Sergipe)

BRAUNGART, Michael y McDONOUGH, William. *Cradle to Cradle*. México : McGraw-Hill, 2005. 186 p.

BRENTROP, F. *et al.* Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production : an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilisers. En : *European Journal of Agronomy*. Vol. 14 (2001); p. 221-233

BRICEÑO BUENO, Yolanda y PRADA GÓMEZ, Azucena. Diseño y construcción de una planta piloto para la obtención de aceite de higuera. Bucaramanga, 1980, 140 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química

CARDIM DE CARVALHO FILHO, Arnaldo. Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Barcelona, España, 2001, 317 p. Trabajo de grado (Doctorado en Ingeniería Civil). Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.

CARDOSO, Gleibson Dionízio *et al.* Estudo preliminar de seletividade de herbicidas à cultura da mamona. En : 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. (2006 : Sergipe)

CARRARERRO, C. *et al.* Biodiesel as alternative fuel : Experimental analysis and energetic evaluations. En : *Energy*. Vol. 29 (2004); p. 2195-2211

CASTRO, Pedro *et al.* Radiação potencial disponível para produção de mamona em superfície inclinada. En : 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. (2006 : Sergipe)

CENTRO DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN DE NORTE AMÉRICA, A.C. Ciclo del Nitrógeno. [Online]

CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS. Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el

Transporte. Fase I. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del etanol de cereales y de la gasolina. España : Ministerio de Medio Ambiente-CIEMAT, 2005. 114 p.

\_\_\_\_\_. 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-CIEMAT, 2006. 138 p.

CONCEIÇÃO, Marta M. *et al.* Rheological Behavior of Castor Oil Biodiesel. En : Energy & Fuels. Vol. 19 (2005); p. 2185-2188

\_\_\_\_\_. Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 11 (2007); p. 964-975

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA. Introducción y evaluación de materiales de higuera (*Ricinus communis*), para la producción de biodiesel en diferentes zonas de Colombia. Medellín : CORPOICA-MADR, 2007. 8 p.

CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL DE LA BIOTECNOLOGÍA Y PRODUCCIÓN LIMPIA. Programa Estratégico para la Producción de Biodiesel - Combustible automotriz - a partir de Aceites Vegetales: Informe Final. Bogotá : CORPODIB, 2004. 443 p.

COSTA, Ticiania L. *et al.* Características físico-químicas do óleo de mamona da cultivar BRS-188 Paraguaçu. En : 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. (2006 : Sergipe)

CURI, Samir. *et al.* Evapotranspiração e coeficientes de cultura da mamoneira (*Ricinus communis* L) em Santo Antônio do Leverger-MT. En : I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. ENERGIA Y SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grande)

DA COSTA, Rosélis Ester. The energy balance in the production of palm oil biodiesel - Two case studies : Brazil and Colombia. En : CENIPALMA. (2005); p. 1-5

DE SOUSA LIMA, Jose Romualdo *et al.* Avaliação dos componentes do balanço de energia num solo cultivado com mamona no Brejo Paraibano. En : I CONGRESSO

BRASILEIRO DE MAMONA. ENERGIA Y SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grande)

DELGADO, Federico. Folleto sobre la higuera en Colombia. Medellin : Higueroil, 2008. 32 p.

DEMIRBAS, Ayhan. Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. En : Energy Conversion and Management. (2007); p. 1-6

DEZZO, Nelda y CHACÓN, Noemí. Nutrient fluxes in incident rainfall, throughfall, and stemflow in adjacent primary and secondary forest of the Gran Sabana, southern Venezuela. En : Forest Ecology and Management. Vol. 234 (2006); p. 218-226

DI CIOCCO, C *et al.* Balance de nitrógeno en un cultivo de soja de segunda en la pampa ondulada. En : Ciencias del suelo. Vol. 22 (2004); p.48-51

DÍAZ GONZÁLEZ, Carlos Alirio y LÓPEZ BARRERA, Néstor Alonso. Diseño y construcción de una planta piloto de producción de biodiesel de manera continua. Bucaramanga, 2005, 128 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica

DRUMMOD, Ana Rita *et al.* Metanol e Etanol como Solventes na Extração de Óleo de Mamona. En : 1º CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DO BIODIESEL. (2006 : Brasília - DF)

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions Draft Technical Report. Estados Unidos : EPA, 2002. 126 p.

ESTRADA, Antonio *et al.* Balance de nitrógeno: una herramienta para conocer las pérdidas de nitrógeno en los campos agrícolas drenados. En : 1er. CONGRESO INTERNACIONAL DE SOS EXITOSOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DEL TRÓPICO. (2005 : Voca del Rio, Veracruz, México)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE ALGODÃO. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento : Crescimento e produtividade da mamoneira sob fertilização química em região semi-árida. 2 ed. Campina Grande : 2006. 19 p.

EUROPEAN CENTRE FOR ECOTOXICOLOGY AND TOXICOLOGY OF CHEMICALS. Technical Report 62 : Ammonia Emissions to Air in Western Europe. Belgium: ECETOC, 1994. 200p.

FAGUNDES, F.P *et al.* Avilação das propiedades do óleo de mamona na produção de biocombustível. En : 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. (2005 : Salvador).

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED STATES. Assessment of soil nutrient balance : Approaches and methodologies. Roma : FAO, 2003. 101p.

GALLOWAY, James. The global nitrogen cycle : changes and consequences. En : Environmental Pollution. Vol. 102 (1998); p. 15-24

GARCÍA, Juan Manuel y GARCÍA, José Angel. Biocarburantes líquidos : biodiesel y bioetanol. Madrid : CITME, 2006. p. 32-45

GERPEN, Jon Van. Biodiesel processing and production. En : Fuel Processing Technology. Vol. 86 (2005); p. 1097-1107

GLOBAL EXTENT. Disponible en : <http://www.gx.com.ar/>

GÜERECA HERNÁNDES, Leonor Patricia. Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis del ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Barcelona, España, 2006, 192 p. Trabajo de grado (Doctorado de Ingeniería Ambiental). Universidad Politécnica de Cataluña.

HARDING, K.G. *et al.* A life- cycle comparison between inorganic and biological catalysis for the production of biodiesel. En : Journal of Cleaner Production. (2007); 1-11 p.

HAAS, Michael *et al.* A process model to estimate biodiesel production costs. En : Bioresource Technology. Vol. 97 (2006); p. 671-678

HILBERT, J.A *et al.* Rendimiento comparativo de biodiesel y gasoil en tractores agrícolas. [Online]

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Environmental management - Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva : ISO, 1997. (ISO 14040). Citado por : NORMA CUBANA. Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida – Principios y estructura. Ciudad de La Habana : NC, 1999. 13 p. (NC-ISO 14040:1999)

\_\_\_\_\_. Environmental management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis. Geneva : ISO, 1998. (ISO 14041). Citado por : NORMA CUBANA. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Definición del objetivo y alcance y análisis del inventario. NC, 2000. 34 p. (NC-ISO 14041:2000)

\_\_\_\_\_. Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment. Geneva : ISO, 2000. (ISO 14042). Citado por : REBITZER, G. *et al.* Life cycle assessment. Part 1 : Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. En : Environment International. Vol. 30 (2004); 701-720 p.

\_\_\_\_\_. Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation. Geneva : ISO, 2000. (ISO 14043). Citado por : REBITZER, G. *et al.* Life cycle assessment. Part 1 : Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. En : Environment International. Vol. 30 (2004); 701-720 p.

ISBELL, Terry A. *et al.* Physical properties of triglyceride estolides from lesquerella and castor oils. En : Industrial Crops and Products. Vol. 23 (2006); p. 256-263

JAMES, P; HANSEN, G y TITUS, T. The carbon dioxide cycle. En : Advances in Space Research. Vol. 35 (2005); p. 14-20

JIMÉNEZ, Juan J *et al.* Phosphorus fractions and dynamics in surface earthworm casts

under native and improved grasslands in a Colombian savanna Oxisol. En : Soil Biology & Biochemistry. Vol. 35 (2003); p. 715-727

JOSA, Alejandro *et al.* Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU. En : Cement and Concrete Research. Vol. 37 (2007); 781-788

KEGL, Breda. Effects of biodiesel on emissions of a bus diesel engine. En : Bioresource Technology. (2007); p. 1-11

KIM, Seungdo y DALE, Bruce E. Life cycle assessment of fuel ethanol derived from corn grain via dry milling. En : Bioresource Technology. (2007); 1-11 p.

KNOTHE, Gerhard.; VAN, Jon Gerpen y KRAHL, Jürgen. The Biodiesel Handbook. Illinois : AOCS Press, 2005. 303 p.

KOUTROUBAS, S.D.; PAPAKOSTA, D.K. y DOITSINIS, A. Adaptation and yielding ability of castor plant (*Ricinus communis* L.) genotypes in a Mediterranean climate. En : European Journal of Agronomy. Vol. 11 (1999); 227-237

KUMAR, P. Vijaya *et al.* Influence of moisture, thermal and photoperiodic regimes on the productivity of castor beans (*Ricinus communis* L.). En : Agricultural and Forrest Meteorology. Vol. 88 (1997); p. 279-289

KUZYAKOV, Y. y DOMANSKI, G. Carbon input by plants into the soil. Review. En : Journal of Plant Nutrition and Soil Science. Vol. 163, No. 4 (2000). p. 421-431. Original no consultado. Resumen en: WILEY InterScience.

LAPUERTA, Magín; ARMAS, Octavio y RODRÍGUEZ, José. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. En : Progress in Energy and Combustion Science. (2007); 1-26

LE LIN, Bin *et al.* Modelling a global biogeochemical nitrogen cycle in terrestrial ecosystems. En : Ecological Modelling. Vol. 135 (2000); p. 89-110

LÔBO, Ivon Pinheiro *et al.* Produção de biodiesel a partir do óleo de mamona em planta

piloto. En : I CONGRESSO DE REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DO BODIESEL. (2006 : Brasilia-DF)

LÓPEZ, D. Nutrient dynamics (C, N and P) in termite mounds of *Nasutitermes ephratae* from savannas of the Orinoco Llanos (Venezuela). En : Soil Biology & Biochemistry. Vol. 33 (2001); p. 747-753

LUNDIN, Margareta y MORRISON, Gregory M. A life cycle assessment based procedure for development of environmental sustainability indicators for urban water systems. En : Urban Water. Vol. 4 (2002); 145-152 p.

MA, Fangrui y HANNA, Milford A. Biodiesel production : a review. En : Bioresource Technology. Vol. 70 (1999); p. 1-15

MA, Siyan *et al.* Inter-annual variability in carbon dioxide exchange of an oak/grass savanna and open grassland in California. En : Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 147 (2007); p.157-171

MANLAY, Raphaël J *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agroecosystems of a West African savanna. En : Agriculture, Ecosystems & Environment. Vol. 88 (2002); p.215-232 ; p. 233-248; p. 249-269

MARCHANT, Robert *et al.* Colombian dry moist forest transitions in the Llanos Orientales- A comparison of model and pollen – based biome reconstructions. En : Palaeo. Vol. 234 (2006); p. 28-44

MARCHETTI, J.M.; MIGUEL, V.U. y ERRAZU, A.F. Possible methods for biodiesel production. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 11 (2007); p. 1300-1311

MEHER, L.C.; SAGAR, D. Vidya y NAIK, S.N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification – a review. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 10 (2006); p. 248-268

MENEZES, César *et al.* A produção de mamona no Brasil e o probiodiesel. En : I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA: ENERGIA E SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grande-PB)

MIRANDA, Jaenes. Balanço energético de ésteres metílicos e etílicos de óleo de mamona. En : I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA: ENERGIA E SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grande-PB)

NIEDERL, Anneliese y NARODOSLAWSKY, Michael. Life Cycle Assessment as an engineer's tool?. En : Journal of Cleaner Production. (2006); 1-8 p.

OGUNNIYI, D.S. Castor oil: A vital industrial raw material. En : Bioresource Technology. Vol. 97 (2006); p. 1086-1091

PETERSON, Charles y HUSTRULID Todd. Carbon cycle for rapeseed oil Biodiesel fuels. En : Biomass and Bioenergy. Vol. 14, No. 2 (1998); p. 91-101

PLENTZ, Simoni M. Biodiesel from Castor Oil: A Comparison of Ethanolysis versus Methanolysis. En : Energy & Fuels. Vol. 20 (2006); p. 2262-2265

PLENTZ, Simoni M. *et al.* Obtenção de biodiesel a partir do óleo de mamona : estudo comparativo, entre diferentes catalisadores, na reação de transesterificação empregando-se metanol e etanol. En : I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA: ENERGIA E SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grade-PB)

RAMÍREZ, Luis Enrique y CÁRDENAS, Diego Leandro. Evaluación del proceso de producción de la higuera como alternativa energética de bajo nivel de contaminación ambiental. Bogotá, 2005, 101 p. Proyecto de Monografía (Especialista en Ingeniería Ambiental). Universidad Industrial de Santander. Especialización en Ingeniería Ambiental.

RAMÍREZ, Nelson; DEZZEO, Nelda y CHACÓN, Noemí. Floristic composition, plant species abundance, soil properties of montane savannas in the Gran Sabana, Venezuela. En : Flora. Vol. 202 (2007); p. 316-327

REBITZER, G. *et al.* Life cycle assessment. Part 1 : Framework, goal and scope

definition, inventory analysis, and applications. En : Environment International. Vol. 30 (2004); 701-720 p.

ROLLENBECK, Rütger y ANHUF, Dieter. Characteristics of the water and energy balance in an Amazonian lowland rainforest in Venezuela and the impact of the ENSO-cycle. En : Journal of Hydrology. Vol. 337 (2007); p. 377-390

ROMERO RODRÍGUEZ, Blanca Iris . El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. Tendencias tecnológicas, *s.l.* : *s.n.*, 2003. p. 95

ROY, Poritosh *et al.* Life cycle of rice : Challenges and choices for Bangladesh. En : Journal of Food Engineering. Vol. 79 (2007); p. 1250-1255

SAN JOSÉ, José J y MONTES, Rubén. Resource apportionment and net primary production across the Orinoco savanna – woodland continuum, Venezuela. En : Acta Oecologica. Vol. 32 (2007); p. 243-253

SCHLATTER, Juan y GERDING, Victor. Balance de Carbono en suelos arenosos con plantaciones de *Pinus Radiata*, en Chile Central. [Online], 2001

SCHOLZ, Volkhard y NOGUEIRA DA SILVA, Jadir. Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. En : Biomass and Bioenergy. (2007); p. 1-6

SHAHID, Ejaz M. y JAMAL, Younis. A review of biodiesel as vehicular fuel. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. (2007); p. 1-11

SHEENAN, John *et al.* Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus. Estados Unidos : U.S. Department of Energy, 1998. 286 p.

SILVA DE LIMA, Rosiane de Lourdes *et al.* Avaliação da casca e da torta de mamona como fertilizante orgânico. En : 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. (2006 : Sergipe)

SINHA, Arun D. y HALDAR, Chandan. Renewable Fuel from Castor Oil [online], 2006

SOARES, Liv *et al.* Adubação Química da Mamoneira com Macro e Micronutrientes em Quixeramobim, Ce. En : Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Vol. 61 (2005); p. 1-24

\_\_\_\_\_. Caracterização de sementes de mamona em diferentes faixas de peso. En : I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. ENERGIA Y SUSTENTABILIDADE. ENERGIA Y SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grande)

\_\_\_\_\_. Determinação da área foliar da mamoneira. En : I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. ENERGIA Y SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grande)

\_\_\_\_\_. Poda da mamoneira para cultivo biannual em ASSU, RN. En : I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. ENERGIA Y SUSTENTABILIDADE. ENERGIA Y SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grande)

SOCIETY FOR ENVIROMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. Life Cycle Assessment and Conceptually Related Programmes. Alemanha : SETAC, 1999. Citado por : REBITZER, G. *et al.* Life cycle assessment. Part 1 : Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. En : Environment International. Vol. 30 (2004); 701-720 p

SOUZA, T.F *et al.* Identificação / caracterização de atividade fosfatase em extratos foliares de *Ricinus communis* e análise proteômica em resposta a injúria mecânica. [Online]

THEISEN, Giovani; ANDRES, André y DOS ANJOS, Sérgio. Seletividade de herbicidas à cultura da mamona. En : 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. (2006 : Sergipe)

UNIVERSIDAD DE CHILE. Actualización de factores de emisión para buses y transporte de carga de la región metropolitana. Santiago de Chile : Fundación para la transferencia tecnológica, 2007. 59 p.

VASCONCELOS DOS SANTOS FILHO, Sebastião *et al.* Absorção de nutrientes durante a fase vegetativa mamoneira em três solos da região de Mossoró Rn sob diferentes níveis

de salinidade da água de irrigação. En : I CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA. ENERGIA Y SUSTENTABILIDADE. (2004 : Campina Grande)

ZAH, Rainer *et al.* Lyfe Cycle Assessment of Energy Products : Environmental Assessment of Biofuels - Executive Summary. Bern : Empa, 2007. 18 p.

ZIYU, Dai; GERALD, Edwards y KU Maurice. Control of Photosynthesis and stomatal conductance in *Ricinus communis* L (Castor Bean) by leaf to air vapor pressure deficit. En: Plant Physiol. Vol. 99 (1999); 1426-1434

ZAPATA, Carlos David *et al.* Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma : 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos. En : Dyna. Vol. 74, No. 151 (mar. 2007); p. 71-82

## ANEXOS

### ANEXO A. SISTEMAS DE EVALUACIÓN AMBIENTAL

En la siguiente tabla se presentan algunas de las principales herramientas actualmente disponibles para la gestión medioambiental de sistemas de producción.

Tabla A1. Herramientas usadas en los sistemas de gestión ambiental

RA- Risk Assessment	Análisis de Riesgo Ambiental
EIA-Environmental Impact Assessment	Estudio del impacto ambiental
EAu-Environmental Auditing	Auditoría ambiental
EPE-Environmental Performance Evaluation	Evaluación del comportamiento ambiental
SFA-Substance Flow Analysis	Análisis del flujo de sustancia
EMA-Energy and Material Analysis	Análisis de material y energía
ISCM-Integrated Substance Chain Management	Gestión integral de sustancia
PLA-Product Line Analysis	Análisis de línea de producto
LCA-Life Cycle Assessment	Análisis de ciclo de vida

*Fuente: SETAC, 1999*

En la tabla A2 se describen los diferentes usos de cada uno de los anteriores análisis, junto con algunas de sus ventajas y desventajas.

#### ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

“El Análisis de ciclo de vida, realizado de acuerdo con los procedimientos estipulados en la serie de normas ISO 14040, es una herramienta de gestión ambiental que brinda una base sólida para que la dirección de una organización pueda tomar decisiones técnicas adecuadas con base en las cuestiones que podrían plantearse sobre el lanzamiento de un nuevo producto o la modificación de productos existentes, para hacerlos más eficientes en cuanto a su desempeño ambiental y que sigan realizando igualmente la función para la que fueron programados”. (Romero, 2003)

Tabla A2. Generalidades de los análisis empleados en los sistemas de gestión ambiental

Herramienta	Función	Ventaja	Desventaja
RA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluar riesgos ecológicos ocasionados por fuentes puntuales.</li> <li>- Evaluar riesgos para la salud humana.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pronosticar posibles impactos reales</li> <li>- Evaluar los efectos locales y regionales bajo condiciones específicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consumo de mucho tiempo y recursos</li> <li>- No encuentra la ubicación del riesgo a lo largo del ciclo de vida</li> </ul>
EIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigar los cambios ambientales de un sitio específico (gestión de territorios)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Considera los impactos locales de un proyecto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No es capaz de apuntar la ubicación de un efecto global a lo largo del ciclo de vida</li> </ul>
EAu	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar y evaluar evidencias y determinar que aspectos ambientales están conforme criterios previamente definidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proporciona una manera para que una parte independiente compruebe los resultados obtenidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enfatiza en término medio de más débil que de mejoría</li> </ul>
EPE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proporcionar las tendencias del comportamiento medioambiental de las diferentes actividades de una organización</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proporciona coeficientes de desempeño medioambiental</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los coeficientes de desempeño proporcionados son relativos y no absolutos</li> </ul>
SFA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permitir hacer el balance de flujo de una determinada sustancia a lo largo de su ciclo de vida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiene en cuenta un impacto potencial determinado a lo largo del ciclo de vida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apuntar a solo una sustancia puede dirigir a falsos resultados</li> </ul>
EMA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cuantificar los materiales y energías que entran y salen de un sistema determinado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posee un proceso estructurado para la identificación y valoración de un impacto potencial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo hace énfasis en ciertas fases del ciclo de vida</li> </ul>
ISCM	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comparar diferentes opciones con respecto a ciertas mejoras ambientales o económicas de un sistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hace consideraciones integradas entre lo económico y lo ambiental</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El empleo de una valoración simplificada puede conducir a resultados también muy simplificados.</li> </ul>
PLA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluar potencialmente el impacto ambiental de un bien o servicio, incluyendo la parte económica y social en el ciclo de vida de éste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integra aspectos ambientales, económicos y sociales en el mismo análisis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No valora impactos locales</li> </ul>
ACV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar los recursos usados (residuos generados y emitidos a los vectores ambientales) a lo largo del ciclo de vida de un bien o un servicio específico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Considera impactos globales y regionales</li> <li>- Estima impactos que tienen influencia en la salud de la sociedad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No es capaz de apuntar el carácter temporal de un determinado efecto</li> </ul>

**Origen y evolución.** El desarrollo del análisis de ciclo de vida tiene sus orígenes en Estados Unidos y Europa. El primer ACV fue llevado a cabo en 1969 para Coca-Cola por el Midwest Research Institute (MRI) buscando disminuir el consumo de recursos. En la

década de los setenta los estudios continuaron destacándose los realizados por grupos como Franklin Associates Ltd. junto con la MRI quienes emplearon métodos de balance de entradas/salidas e incorporaron cálculos de energía. Entre 1970 y 1974 fueron desarrollados algunos estudios de envases para bebidas por la Environmental Protection Agency (EPA), obteniendo como resultado la sugerencia de no utilizar el ACV en empresas pequeñas debido a los altos costos y al gran consumo de tiempo requerido. La aplicación del ACV se incrementó a partir de los años 80, donde también cambiaron los métodos para cuantificar el impacto del producto y, los estudios de ACV empezaron a estar disponibles para uso público. Así, la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) fue la primera organización que desarrolló y lideró discusiones científicas acerca del ACV. En 1993, formuló el primer Código de Prácticas para el ACV (Code for Life Cycle Assessment), con el fin de establecer una metodología a seguir. Posteriormente, la International Organisation for Standardisation (ISO) apoyó este desarrollo para uniformizar métodos, procedimientos y terminologías, y establecer de esta forma una estructura de trabajo publicando la norma internacional ISO 14040 como un adjunto a la ISO 14000. La serie incluye los estándares para la definición de la meta y el alcance, la evaluación del inventario (ISO 14041, 1998), la evaluación del impacto (ISO 14042, 2000a) y la interpretación (ISO 14043, 2000b); así como una estructura general introductoria (ISO 14040, 1997).

Después de treinta años el Análisis de Ciclo de Vida ha tenido un gran avance, sin embargo, algunas etapas de su metodología aún no se han llegado a homogeneizar, obteniéndose diferentes tipos de estudios. Además, “varios ACV realizados han sido parciales (sólo se ha practicado la fase de inventario) y aplicados mayoritariamente al sector de envases (aproximadamente un 50%), seguidos de los de la industria química y del plástico, los materiales de construcción y sistemas energéticos, y otros menores. Sólo en los últimos años se ha podido introducir la fase de evaluación de impacto en los estudios realizados”. (Romero, 2003)

**Usos y aplicaciones del ACV.** Las aplicaciones del análisis del ciclo de vida pueden ser clasificadas en:

- Identificación de oportunidades para mejorar los aspectos ambientales de productos en varios puntos de su ciclo de vida.

- Toma de decisiones en la industria, en el gobierno, y en las organizaciones no gubernamentales.
- Selección de los indicadores del desempeño ambiental y los procedimientos de medición.
- El marketing, incluyendo esquemas de ecoetiquetado, y la mejora de la imagen corporativa.

Los gobiernos y las organizaciones internacionales utilizan el ACV para la toma de decisiones de diversa índole: decisiones orientadas al producto, decisiones orientadas al mercado (información sobre el producto, adquisición ecológica, entre otros), decisiones orientadas a inversiones y decisiones orientadas a estrategias. Por otra parte, en la industria, el ACV se utiliza principalmente para: decidir sobre los productos a manufacturar junto con la clase de materiales y las fuentes de energía a usar; la gestión de residuos generados; el diseño, la investigación y desarrollo; la comparación de productos que ya existen con alternativas planeadas; la información y la educación de consumidores y de terceros.

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

➤ **Definición de los objetivos y alcance del ACV.** Es una etapa importante porque determina por qué el ACV es realizado (incluyendo el uso previsto de los resultados) y describe el sistema y las categorías de datos a estudiar.

El objetivo de un estudio de ACV debe aclarar las metas a las cuales se desea llegar, es decir, debe indicar la aplicación pretendida para realizar dicho análisis, junto con el destinatario a quién se va a comunicar los resultados. Por otra parte, en la definición del alcance del ACV, se deben definir varios aspectos, tales como:

- *Función y Unidad Funcional.* Se deben especificar las funciones del sistema bajo estudio y establecer la unidad funcional (cuantificación de las salidas funcionales de un sistema del producto) con el fin de proporcionar una referencia para todas las entradas y salidas del proceso.

- *Sistema del producto a estudiar.* Conjunto de procesos que permiten la presencia del producto en el mercado.

- *Límites del sistema.* Los límites del sistema definen los procesos unitarios que deben incluirse dentro del ACV.

- *Requisitos de calidad de los datos.* Especifican en términos generales las características de los datos necesarios para el estudio.

- *Reglas de asignación.* La mayor parte de los procesos industriales dan varios productos, de este modo, los flujos de materiales o de energía así como las descargas que le están asociadas en el medio ambiente deben ser imputados a los diferentes productos conforme a procedimientos claramente establecidos. La norma ISO 14040 señala una jerarquía (CIEMAT, 2006):

1) Siempre que sea posible se evitará la asignación por medio de:

a) La división del proceso en dos o más subprocesos y la recogida de los datos de entrada y salida relacionados con estos subprocesos.

b) La ampliación del sistema producto hasta incluir las funciones adicionales relacionadas con los co-productos. Es lo que se denomina evitar la asignación por extensión de los límites del sistema. Este método consiste en tener en cuenta las cargas ambientales correspondientes al co-producto y restar las cargas ambientales que se producen en un sistema alternativo que proporciona el mismo servicio que el que proporciona el co-producto.

2) Cuando no se pueda evitar la asignación, ésta se realizará de forma que refleje las relaciones físicas existentes entre los diferentes co-productos (asignación en base a relaciones físicas o asignación marginal). Este método de asignación consiste en medir los efectos en las cargas del sistema de cambiar en una pequeña cantidad la salida de un co-producto manteniendo el otro constante. Cualquier cambio que se produzca en las cargas del sistema, se asignará al co-producto que cambia.

3) Cuando no sea posible concretar una relación física, se deben asignar las entradas entre los distintos co-productos de forma que reflejen las otras relaciones que guardan entre sí. En este tipo de asignación se encuentran:

a) La asignación en base a la composición: en este método se determina una propiedad común de los co-productos que es representativa de su función y las cargas ambientales se reparten en función de los valores relativos de esta propiedad.

b) La asignación en base al valor económico: en este método se eligen los valores económicos de los distintos subproductos en el punto en que se separan en el sistema.

➤ **Análisis de inventario de ciclo de vida.** “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”. (ISO 14041, 1998). De una forma genérica se denominan estas entradas y salidas a efectos ambientales conocidos como “carga ambiental”. Ésta se define como la salida o entrada de materia o energía de un sistema causando un efecto ambiental negativo. Con esta definición se incluyen tanto las emisiones de gases contaminantes, como los efluentes de aguas, residuos sólidos, consumo de recursos naturales, ruidos, radiaciones, olores, entre otros.

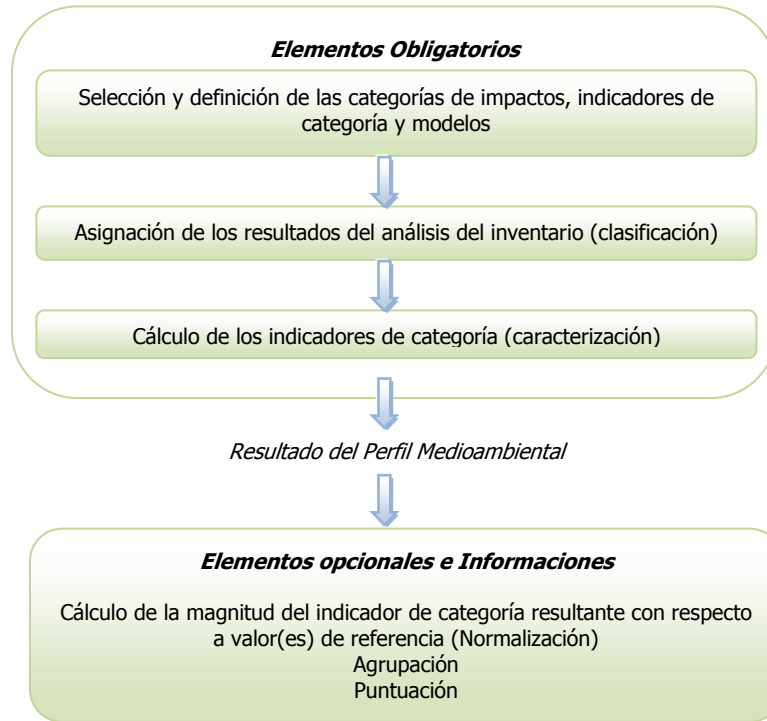
La etapa de análisis de inventario incluye los siguientes pasos prácticos:

- Trazar un diagrama inicial del proceso que permita apreciar de forma gráfica los flujos del sistema con todas sus entradas y salidas más relevantes, reuniéndose, de este modo, los datos necesarios.
- Agregar al diagrama de flujo los procesos adyacentes correspondientes, entre los que se encuentran: los procesos auxiliares, el transporte y el suministro de energía.
- Realizar los refinamientos necesarios en los límites del sistema establecido.
- Compilar de los datos y procedimientos de cálculo.
- Validar los datos con respecto a los objetivos y alcance definidos para el estudio.

➤ **Evaluación de impacto de ciclo de vida.** Este tercer elemento del ACV, tiene por objeto valorar los resultados del análisis del inventario del producto o servicio en cuestión, cuantificando los posibles impactos medioambientales. Consta de una fase técnica, considerada obligatoria por la metodología y, otra opcional (de carácter político), por parte del interesado del proyecto (ver figura A1).

En la selección y definición de las categorías de impacto, indicadores de la categoría y modelos de estimación, se busca seleccionar y definir los efectos sobre el medio ambiente que causan los aspectos medioambientales del sistema en estudio, teniendo en cuenta el impacto potencial que éste pueda generar. El segundo paso se conoce como Clasificación. En ésta, los resultados del inventario se asignan respectivamente a cada

Figura A1. Elementos que componen la valoración del impacto del ACV



Fuente: ISO 14042, 2000

una de las categorías de impactos previamente seleccionadas. El último paso (caracterización) consiste en la modelización mediante los factores de caracterización de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto. Cada categoría de impacto precisa de una representación cuantitativa denominada indicador de la categoría. La suma de diferentes intervenciones ambientales para una misma categoría se hará en la unidad del indicador de la categoría. Mediante los factores de caracterización, también llamados factores equivalentes, las diferentes intervenciones ambientales se convierten a unidades del indicador (Antón, 2004).

También existen una serie de elementos opcionales que pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y alcance del estudio del ACV:

- Normalización: relación de la magnitud cuantificada para una categoría de impacto respecto un valor de referencia ya sea a escala geográfica o temporal.
- Agrupación: clasificación y posible catalogación de los indicadores
- Ponderación: consiste en establecer factores que otorgan una importancia relativa a las

distintas categorías de impacto para después sumarlas y obtener un resultado ponderado en forma de un único índice ambiental global del sistema.

En la tabla A3 se observa la clasificación de las distintas categorías de impacto.

Tabla A3. Clasificación de las categorías de impacto

Categoría de Impacto	Unidades	Escala Geográfica
Agotamiento recursos abióticos (entrada)	kg Sb	Global
Energía (entrada)	MJ / kg	Global
Uso del suelo (entrada)		Local
Cambio Climático (salida)	kg-eq. CO2	Global
Agotamiento Ozono (salida)	kg-eq. CFC11	Global
Acidificación (salida)	kg-eq. SO2	Continental/regioinal/local
	kg-eq. H+	Global
Eutrofización (salida)	kg-eq. PO-3	Continental/regioinal/local
Formación Foto-Oxidantes	kg-eq. etileno	Continental/regioinal/local
Toxicidad humana (salida)	kg-eq. 124 DCB	Continental/regioinal/local
	kg-eq. Pb aire	Global
Toxicidad Terrestre (salida)	kg-eq. 124 DCB	Continental/regioinal/local
	kg-eq. Zinc aire	Global
Acuática marina (salida)	kg-eq. 124 DCB	Continental/regioinal/local
Acuática agua dulce (salida)	kg-eq. 124 DBC	Continental/regioinal/local
	kg-eq. Zinc agua	Global
Sedimento agua dulce (salida)	kg-eq. 124 DCB	Continental/regioinal/local
Sedimento marino (salida)	kg-eq. 124 DCB	Continental/regioinal/local

Fuente: Antón, 2004

A continuación se realiza una breve descripción de las principales categorías.

- *Agotamiento recursos abióticos (AR)*. Se define como la disminución de la disponibilidad de recursos naturales (incluye recursos abióticos y energía).

- *Uso del suelo*. No existe todavía un consenso sobre que indicadores usar. Existen varios estudios que han evaluado diferentes tipos de indicadores que puedan emplearse.

- *Cambio climático (CCI)*. “Se define como el impacto de las emisiones antropogénicas sobre las fuerzas radiactivas de la atmósfera. Esto puede generar efectos adversos sobre los ecosistemas, la salud humana y el estado de los materiales. La mayoría de las emisiones relevantes al clima, enriquecen las fuerzas radiactivas, causando que la temperatura superficial de la Tierra aumente. A esta situación comúnmente se le denomina efecto invernadero”. (Güereca, 2006). El potencial de calentamiento global

(GWP) es el factor encargado de comparar las emisiones de diferentes gases invernaderos.

- *Agotamiento del ozono (ODI)*. La disminución de la capa de ozono provoca un incremento de la cantidad de rayos ultravioleta que llegan a la superficie de la Tierra, lo cual genera el aumento de algunas enfermedades como el cáncer de piel y las cataratas; la afectación de la producción agrícola, la degradación de los materiales plásticos, entre otros.

- *Formación oxidantes foto-químicos (POI)*. Es la generación de compuestos químicamente reactivos formados en la troposfera bajo la influencia de la luz ultravioleta, a través de reacciones de oxidación de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) y monóxido de carbono en la presencia de óxidos de nitrógeno.

- *Acidificación (AI)*. Consiste en la deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógenos y sulfuro en la atmósfera, en el suelo y en el agua, variando la acidez del medio.

- *Eutrofización (EI)*. Tiene en cuenta los impactos ocasionados por un alto nivel de los macronutrientes (nitrógeno y fósforo).

- *Toxicidad*. Se contemplan los efectos sobre los humanos y los ecosistemas acuáticos y terrestres de las sustancias tóxicas existentes en el ambiente. El indicador de toxicidad humana se representa por HTI y el de toxicidad acuático por ATI.

- *Otros indicadores*. Diferentes autores reportan además de las categorías de impacto ya explicadas anteriormente, las que se enuncian a continuación (Güereca, 2006):

- 1) Efectos respiratorios: se ha demostrado que varios compuestos inorgánicos y polvo causan efectos respiratorios en los humanos. Estos compuestos son: material particulado, nitratos y sulfatos, óxidos de azufre, ozono, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

- 2) Efectos carcinogénicos

- 3) Uso de combustibles fósiles

➤ **Interpretación de ciclo de vida.** La interpretación es la fase del ACV en la que se combinan los resultados del análisis de inventario con la evaluación de impacto con el fin de realizar una evaluación de las incertidumbres, valorar la calidad de los datos y generar un informe con las conclusiones y recomendaciones, que pueda dar respuestas a las cuestiones que anticipadamente fueron definidas en los objetivos y alcance del estudio.

## ANEXO B. FUNDAMENTOS DE LA HIGUERILLA

### DEFINICIÓN

La Higuera es una planta oleaginosa cuyo nombre científico es *Ricinus communis* Linnaeus, pertenece a la familia Euphorbiaceae, y generalmente se encuentra en estado silvestre alcanzando una altura entre los 2- 4 metros, está conformado principalmente por: un tallo hueco y ramificado, hojas en forma de estrella, flores de color blanco y frutos.

### CONDICIONES DE CULTIVO

El desarrollo del cultivo se ve influenciado fundamentalmente por variables climatológicas, y requerimientos de nutrientes, la tabla B1 detalla los intervalos óptimos para un buen desenvolvimiento de la higuera, los cuales han sido tomados de los estudios desarrollados por Ramírez y Cárdenas, 2005 y EMBRAPA.

Tabla B1. Condiciones cultivo de higuera

Variable	Descripción
Altitud	300 - 2500 msnm
Clima	Calientes y secos
Temperatura	24- 30 °C
Precipitaciones	600 a 1500mm
Humedad relativa	Baja
Suelo	Franco – arenosos, franco – arcillosos y franco – limosos pH >5,5
Brillo solar	7 horas diarias
Periodo de cosecha	180 días

Debido a que la planta tiene poca capacidad de protección contra la erosión ésta debe ser sembrada en terrenos con una inclinación inferior al 15%. Además de esta característica, el suelo debe ser suelto, bien drenado y con una composición de nutrientes que garantice una fertilidad alta (Soares, 2006).

La cosecha se planifica de tal forma que la siembra se dé al inicio y fin del periodo de lluvioso y así aprovechar las precipitaciones para favorecer el crecimiento, proyección que

igualmente beneficia la etapa de madurez y recolección del fruto ubicada en el periodo seco.

Previo a la siembra se debe realizar una preparación del terreno ya sea mecanizada o manual a fin de airear, retirar la maleza presente y suplir las deficiencias de nutriente existentes en él.

La primera cosecha de la planta se da entre los 140 y 180 días de sembrada; la higuerrilla da cosecha por tres años o más dependiendo la variedad y las condiciones geográficas. Sin embargo el cultivo puede ser sometido a un proceso de renovación el cual consiste en una poda a 25 cm de la base del tallo, técnica que se debe realizar después de 1,5 a 2 años. (Delgado, 2008).

La recolección de los frutos está determinada en gran parte por la tecnificación del cultivo y la variedad (indehiscente o dehiscente), sin embargo para que la semilla pueda entrar al proceso productivo debe ser sometida a una etapa de secado y descascarado. La composición aproximada de una semilla de higuerrilla se muestra en la tabla B2.

Tabla B2. Componentes de la semilla

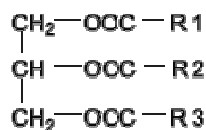
Compuesto	%
Aceite	46,58
Almidón	20
Fibras leñosas	20
Agua	7,09
Goma	4,32
Resinas brutas y principios amargos	1,51
Albúmina	0,5

*Fuente: Ramírez y Cárdenas, 2005*

## **ACEITE DE RICINO**

El aceite de ricino o aceite de castor como es conocido proviene de las semillas que se encuentran contenidas dentro de las capsulas de los frutos; tiene como característica principal que casi el 90% de su composición corresponde triglicéridos del ácido ricinoleico (ver tabla B3).

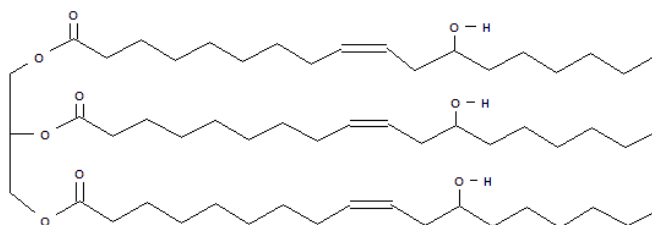
La fórmula molecular para el aceite es  $C_{57}H_{104}O_4$ , sin embargo, la representación general para la estructura molecular se muestra a continuación.



donde R1, R2 y R3 están dadas por  $-(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CHOH}(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$

La figura B1 muestra la estructura fundamental del aceite de higuera.

Figura B1. Estructura fundamental del aceite de higuera



Por otra parte, el aceite de ricino cuenta con una serie de propiedades gracias a su composición química (presencia de triglicéridos), entre las que se encuentran su elevada densidad y viscosidad, además de su solubilidad en alcohol, benceno, cloroformo y bisulfuro de carbono y, en pequeñas proporciones en éter de petróleo y aceites minerales; otras de las características del aceite de castor es que resiste muy bajas temperaturas sin congelarse lo que hace posible el uso en motores de altas revoluciones en los cuales se requiere resistencia a las variaciones de presión y temperatura.

Tabla B3. Composición del aceite de higuera

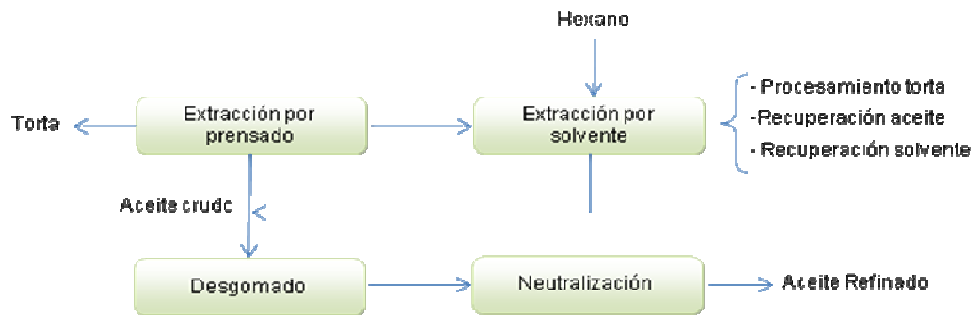
Ácidos	% Peso
Ricinoleico	85-90
Linoleico	4-5
Oleico	3
Palmítico	1
Esteárico	1
Otros	1,3

Fuente: Conceição, 2007

## ANEXO C. EXTRACCIÓN DE ACEITE DE RICINO

El aceite que contienen las semillas que entran al proceso se obtuvo mediante extracción mecánica (prensado tipo expeller) y posterior extracción por solvente del aceite residual de la torta. De esta forma, el aceite extraído por los dos tipos de extracciones se sometió a un proceso de desgomado y neutralización con el fin de refinarlo (ver figura C1)

Figura C1. Diagrama de flujo de la extracción del aceite de ricino



### DESCRIPCIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE RICINO

Las semillas de higuierilla producidas en la cosecha se someten a un proceso de descascarado y secado. Al ser el tipo de semilla sembrado dehiscente (la cáscara exterior de la semilla se cae sin necesidad de someterla a fricción), ésta no requiere de máquinas descascaradoras; así, las semillas se secan aprovechando la energía suministrada por la luz solar durante un tiempo de aproximadamente 36 horas. Las semillas ya secas se transportan hasta la planta de extracción en donde se llevan a cabo las operaciones que se describen a continuación.

**Calentamiento.** Tiene por objeto hacer más frágil y más fácil de comprimir la semilla al dilatar sus membranas celulares. En este proceso las semillas (181.000 ton/año) se ponen en contacto con aire caliente con el fin de incrementar su temperatura hasta 60°C.

**Extracción por prensado.** Las semillas se llevan a una prensa tipo expeller en donde se comprimen para extraer el aceite en bruto que es bombeado hasta los tanques de

almacenamiento de crudo. La torta resultante es enviada a la extracción por solvente debido a que deja la prensa con un contenido de aceite de 18%.

**Extracción por solvente.** Se realiza por medio de extracción con hexano (principal solvente utilizado en la industria) en un sistema en contracorriente de varias etapas donde la torta se pone en contacto con la miscela (mezcla de aceite y hexano) en la primera etapa, y a medida que va pasando por las diferentes etapas, es puesta en contacto con miscelas de concentración de aceite inferior a la etapa anterior, para que así, en la última etapa, sea lavada con solvente puro. La torta que deja la extracción tiene un contenido de 0,9% de aceite de ricino.

**Procesamiento de la torta.** La torta se pone en contacto con vapor con el fin de inhibirle algunas enzimas que lleva y retirarle el hexano que arrastra de la extracción con solvente. Además, es enfriada con aire y enviada a la sección de almacenamiento. La torta almacenada se utiliza como abono orgánico para el cultivo de higuierilla.

**Recuperación de aceite.** La cantidad de aceite presente en la miscela resultante de la extracción por solvente es concentrada por medio de evaporadores de efecto múltiple, dando un aceite de higuierilla crudo con pequeñas trazas de hexano y agua.

**Recuperación del solvente.** El hexano proveniente de las etapas de procesamiento de la torta y de recuperación de aceite es enviado a un tanque sedimentador. De esta forma, el solvente recuperado (fase liviana) es bombeado al tanque de almacenamiento del hexano puro, mientras que la fase pesada (agua) es bombeada a la sección de tratamiento de agua de la planta.

**Desgomado del aceite.** El material no saponificable (gomas) y los fosfátidos presentes en el aceite crudo deben ser removidos. Esto es hecho al mezclar el aceite con agua caliente, seguido por una remoción continua de las gommas hidratadas en una centrífuga. El aceite se seca al vacío y se envía a la neutralización. Las gommas colectadas en la fase acuosa son separadas del agua y retornadas al procesamiento de la torta.

**Neutralización.** Los ácidos grasos libres (AGL) presentes en el aceite son perjudiciales para la química de la transesterificación porque ellos pueden conducir a la formación de



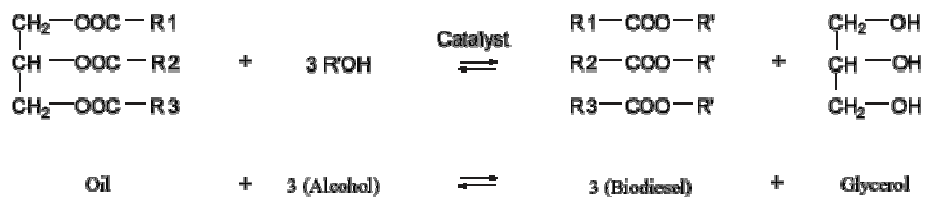
## ANEXO D. TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO

“La definición de biodiesel propuesta por las especificaciones ASTM lo describe como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión.” (García y García, 2006)

El proceso más utilizado para la producción de biodiesel es la transesterificación, la cual implica tres grupos diferentes de reacciones según un éster reaccione con un alcohol (alcoholólisis), con un ácido carboxílico (acidólisis) o con otro éster (interesterificación).

Para el caso de los aceites vegetales, el mecanismo usado es aquel en el cual una molécula de triglicérido reacciona con un alcohol, generalmente ligero, bajo la acción de un catalizador, para producir una mezcla de ésteres de ácidos grasos y glicerina. Esta reacción es conocida como alcoholólisis (ver figura D1)

Figura D1. Reacción de Transesterificación



*Fuente: Harding, 2007*

En la reacción de transesterificación se utiliza un catalizador para mejorar la velocidad de reacción y el rendimiento final, sin el cual no sería posible esta reacción. Los catalizadores pueden ser ácidos homogéneos (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, R-SO<sub>3</sub>), ácidos heterogéneos (Zeolitas, Resinas Sulfónicas, SO<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>), básicos heterogéneos (MgO, CaO, Na/NaOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), básicos homogéneos (KOH, NaOH) o enzimáticos (Lipasas: Candida, Penicillium, Pseudomonas); de todos ellos, los catalizadores que se suelen utilizar a escala comercial son los catalizadores homogéneos básicos ya que actúan mucho más rápido y además permiten operar en condiciones moderadas (García y García, 2006).

## DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL BIODIESEL

Para la obtención del biodiesel se parte del aceite de higuera refinado que se encuentra en un sistema de almacenamiento para luego ser llevado a un par de reactores donde se lleva a cabo la reacción de transesterificación; los productos de ésta son sometidos a una separación, seguida de una serie de procesos de recuperación y purificación que dan como productos biodiesel, glicerina y ácidos grasos libres.

A continuación se detalla cada una de las etapas del proceso mostrado en la figura D2.

**Almacenamiento del aceite refinado.** El aceite proveniente de la extracción es almacenado en tanques provistos de un sistema de calentamiento y agitación que garanticen temperatura del aceite alrededor de 40°C y homogeneidad del mismo.

**Sistema transesterificación.** Se lleva a cabo la reacción de transesterificación del triglicérido proveniente del aceite de higuera con metanol (relación molar 1:6), en presencia de metóxido de sodio como catalizador (0,35% peso aceite que entra al proceso), bajo condiciones de temperatura de 60° C. El sistema de reacción presenta un rendimiento del 99%, y está conformado por dos reactores, cada uno de ellos con un 90% de rendimiento y un tiempo de residencia de 1 hora para ambos casos. En el primer reactor se agrega el 90% de la mezcla alcohol – catalizador realizada previamente y todo el aceite proveniente de almacenamiento; la corriente de salida es llevada a un sistema de separación (decantadores) para separar la fase ligera (biodiesel + aceite que no reaccionó), y la fase pesada (glicerina y otros). La fase ligera es llevada al segundo reactor donde es añadido el catalizador y el metanol restante, con el fin de que el aceite de ricino refinado que no logro reaccionar en la primera reacción lo haga en este reactor. El flujo de salida del reactor es introducido a un sistema de separación que permite obtener una corriente rica en biodiesel y otra compuesta por los productos colaterales de la reacción. La figura D3 ilustra las reacciones para el sistema de transesterificación.

**Neutralización.** Esta etapa tiene como objetivo neutralizar el catalizador y romper los jabones formados en la etapa anterior, para esto, la corriente del segundo reactor es mezclada con ácido clorhídrico al 10%, originando metanol y sal (figura D4), los cuales junto con el biodiesel son llevados a una sección de lavado.

Figura D2. Diagrama transesterificación del aceite de ricino

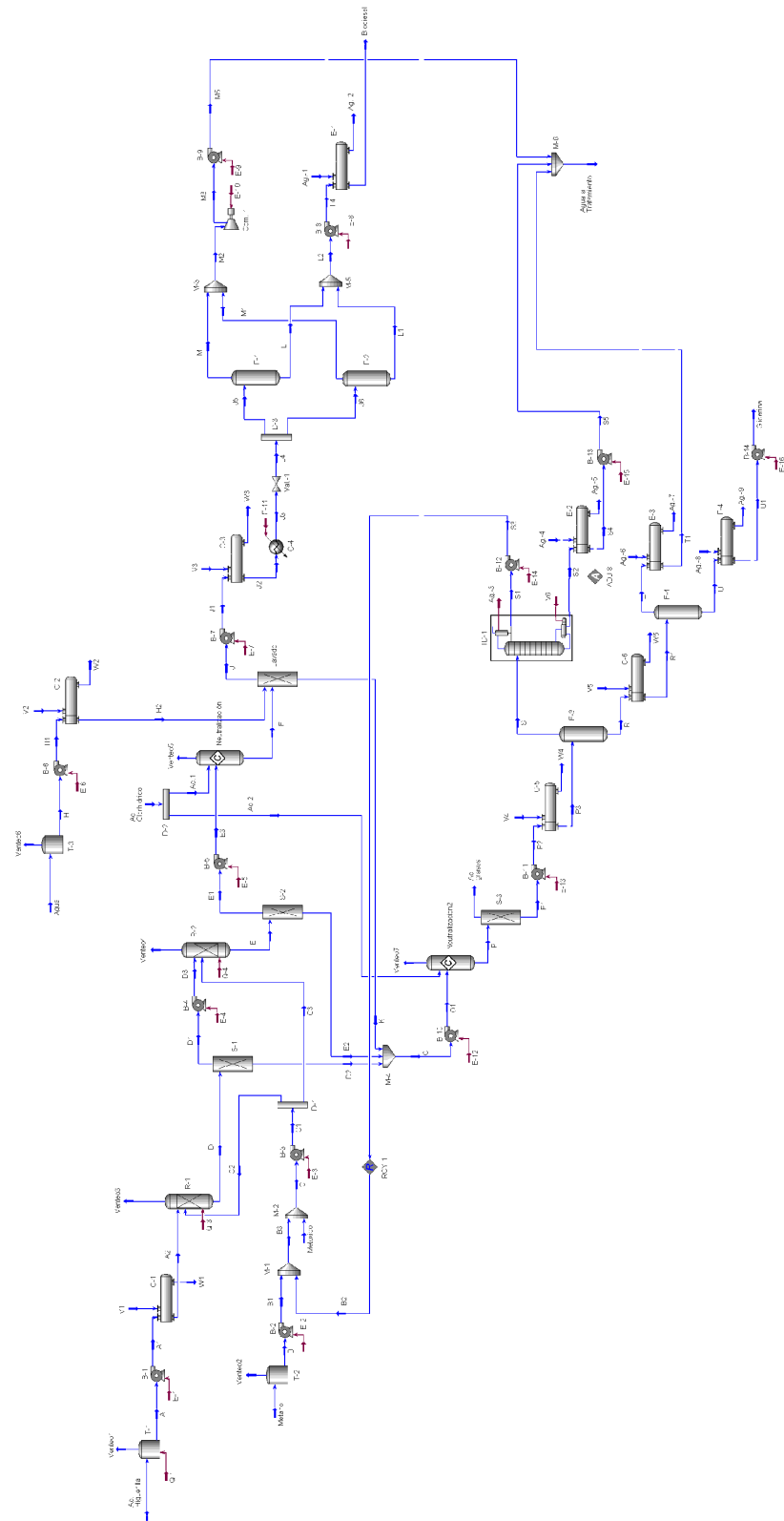


Figura D3. Reacciones para el sistema de reacción

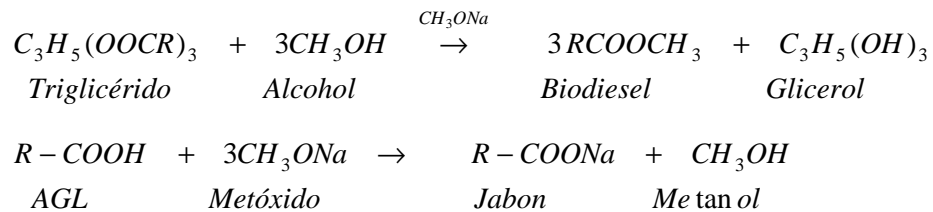
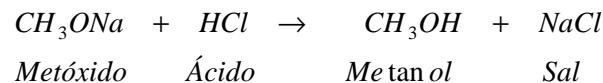


Figura D4. Reacción de neutralización

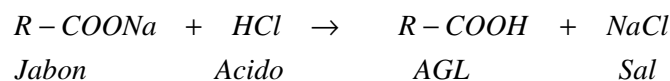


**Lavado.** La corriente rica en biodiesel se lava con agua a 70°C en un sistema contracorriente para retirar las sales presentes y las impurezas solubles aprovechando la diferencia de densidad existente.

**Purificación del diesel.** Está conformada por un par de evaporadores instantáneos que tiene como objetivo dejar el biodiesel con una composición final de agua de 0.05% tal como lo exigen los estándares internacionales; previo al paso por los evaporadores el fluido es llevado a un sistema de calentamiento y a una válvula para garantizar la vaporización. El vapor de agua obtenido por el tope de los evaporadores es comprimido y posteriormente enviado al sistema de tratamiento.

**Obtención de los ácidos grasos.** Los fondos de los sistemas de separación ubicados después de cada reactor y los fondos provenientes del lavado son mezclados con una corriente de ácido clorhídrico (10%) con el fin de convertir los componentes jabonosos en ácidos grasos libres, los cuales son sometidos a una separación y retirados como co-producto del proceso. La otra corriente saliente del sistema de separación se lleva a un calentador que le suministra las condiciones necesarias de la corriente de entrada del evaporador instantáneo.

Figura D5. Reacción para la obtención de AGL



**Recuperación del metanol.** Para evitar que la reacción de transesterificación se devuelva se eligió separar hasta esta instancia el metanol de los demás componentes de las corrientes. La tecnología de recuperación seleccionada fue la destilación, mecanismo que debe garantizar que la composición del metanol de salida sea de 99%.

**Purificación de la glicerina.** La glicerina y el agua provenientes del evaporador son calentadas en un intercambiador de tubo y carcaza para luego ser el alimento de un sistema de separación de donde sale una corriente de glicerina con una composición de 80% y una corriente de tope de agua, las cuales son sometidas a enfriamiento para enviarlas a los respectivos destinos finales.

Finalmente, en la simulación hecha en Hysys<sup>®</sup> 3.1 se utilizó como paquete termodinámico NRTL por ser el más adecuado teniendo en cuenta la naturaleza de las sustancias en estudio y, los componentes no encontrados en la librería del programa, fueron creados usando la herramienta Hypo-manager.

## ANEXO E. EMISIONES DE LA COMBUSTIÓN

### EMISIONES DE LA COMBUSTIÓN DEL DIESEL

Las emisiones producidas por la combustión del diesel varían dependiendo del tipo de medio de transporte en el cual se estén originando. Así, en la tabla E1 se reportan las emisiones generadas en un camión de carga pesada.

Tabla E1. Emisiones de combustión del diesel para un camión de carga pesada

Contaminante	Emisión ( g / MJ quemado)
Hidrocarburos	0,085
CO	0,32
NO <sub>x</sub>	0,89
PM10	0,041
SO <sub>2</sub>	0,12
CH <sub>4</sub>	0,042
N <sub>2</sub> O	0,0019
CO <sub>2</sub>	75,5

*Fuente: Universidad de Chile, 2007*

### EMISIONES DE LA COMBUSTIÓN DEL BIODIESEL

En un estudio llevado a cabo por la EPA sobre las emisiones producidas a causa de la combustión del biodiesel en diferentes medios de transporte; la EPA evaluó para el transporte pesado las correlaciones básicas de emisiones de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), del material particulado (PM), del monóxido de carbono (CO) y de los hidrocarburos (HC).

Las correlaciones obtenidas por la EPA involucran la concentración del biodiesel con el porcentaje de cambio en las emisiones, y fueron de la siguiente forma:

$$\% \text{ Cambio en emisiones} = \{ \exp [ a * (\% v / v \text{ biodiesel}) ] - 1 \} * 100$$

La tabla E1 reporta los valores del coeficiente “a” para cada uno de los cuatro contaminantes. Además, la figura E1 presenta la representación gráfica de las diferentes

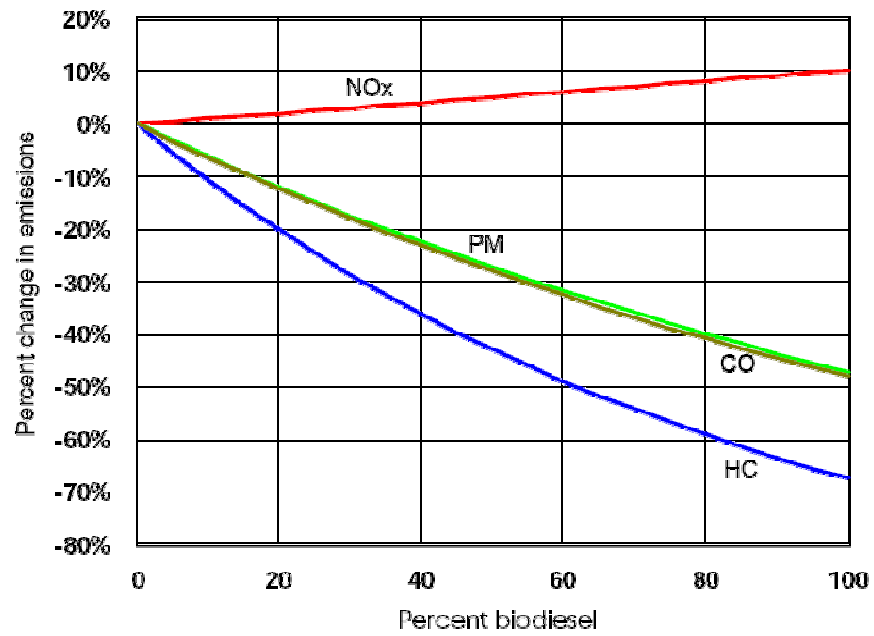
correlaciones

Tabla E1. Coeficientes para las correlaciones de emisión

Contaminante	Coeficiente "a"
NO <sub>x</sub>	0,0009794
PM	-0,006384
HC	-0,011195
CO	-0,006561

Fuente: EPA, 2002

Figura E1. Correlaciones de Emisión



Fuente: EPA, 2002

## ANEXO F. RESULTADOS DETALLADOS DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

### ANÁLISIS DE INVENTARIO

Tabla F1. Resultados obtenidos para la adecuación e integración de los ciclos

Etapa		Combustión	Producción	Cultivo
Emisiones aire (kg)	Hidrocarburos	6,837E+05	4,808E+05	1,363E+05
	CO	2,506E+06	1,159E+06	5,131E+05
	NO <sub>2</sub>	5,899E+06	4,845E+06	1,764E+04
	PM <sub>10</sub>	4,432E+05	3,599E+05	6,574E+04
	SO <sub>2</sub>	5,675E+05	2,251E+06	1,924E+05
	CH <sub>4</sub>	1,987E+05	6,432E+05	6,735E+04
	N <sub>2</sub> O	8,988E+03	5,442E+04	3,222E+06
	CO <sub>2</sub>	4,931E+08	1,424E+09	-1,562E+11
	Hidrocarburos (sin especificar)	0	2,075E+05	0
	Benceno	0	2,490E+02	0
	Formaldehidos	0	4,368E+03	0
	Partículas (sin especificar)	0	3,297E+05	0
	HCl	0	1,028E+04	0
	HF	0	1,535E+03	0
	NH <sub>3</sub>	0	2,434E+05	1,990E+06
Emisiones agua (kg)	DBO <sub>5</sub>	0	1,460E+05	0
	DCO	0	1,211E+06	0
	Metales (sin especificar)	0	2,288E+04	0
	Amonia (como N)	0	2,086E+04	0
	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0	1,605E+01	0
Energía (MJ)	Energía Primaria	0	5,689E+10	0
	Energía Fósil	0	5,181E+10	0

Tabla F2. Resultados obtenidos para la extracción de aceite de ricino

Etapa		Combustión	Producción Vapor	Producción electricidad	Producción materia prima
Emisiones aire (kg)	Hidrocarburos	2,043e+04	3,893e+02	4,145e+04	5,546e+04
	CO	7,200e+04	1,137e+04	1,133e+06	5,523e+03
	NO <sub>2</sub>	1,226e+05	4,629e+04	1,586e+07	3,753E+04
	PM <sub>10</sub>	1,808E+04	8,173E+02	0	1,040E+02
	SO <sub>2</sub>	0	2,623E+05	2,914E+07	8,415E+04
	CH <sub>4</sub>	0	5,621E+04	1,232E+07	9,650E+03
	N <sub>2</sub> O	0	1,558E+02	9,439E+04	1,165E+03
	CO <sub>2</sub>	9,865E+06	3,406E+07	5,112E+09	6,708E+06
	Hidrocarburos (sin especificar)	0	2,324E-01	1,348E+05	1,728E+04

	Etapa	Combustión	Producción Vapor	Producción electricidad	Producción materia prima
Emisiones aire (kg)	Benceno	0	0	0	4,024E+00
	Formaldehidos	0	3,244E-11	2,661E-04	5,307E+01
	Partículas (sin especificar)	0	2,073E+01	2,322E+07	1,302E+04
	HCl	0	1,100E-02	8,904E+05	4,693E+02
	HF	0	1,375E-03	1,113E+05	1,850E+01
	NH <sub>3</sub>	0	6,363E-06	6,066E+00	1,655E+02
Emisiones agua (kg)	DBO <sub>5</sub>	0	1,380E-02	2,133E+04	2,344E+03
	DCO	0	1,166E-01	1,804E+05	1,955E+04
	Metales (sin especificar)	0	6,774E-04	1,347E+03	5,198E+02
	Amonia (como N)	0	2,041E-03	5,255E+03	3,351E+02
	Nitratos (NO <sub>3</sub> -)	0	1,745E-05	1,412E+03	2,144E-01
Energía (MJ)	Energía Primaria	0	1,171E+09	8,108E+10	1,049E+09
	Energía Fósil	0	1,171E+09	7,855E+10	1,047E+09

Tabla F3. Resultados obtenidos para la transesterificación del aceite de ricino

	Etapa	Combustión	Producción Vapor	Producción electricidad	Producción materia prima
Emisiones aire (kg)	Hidrocarburos	8,570E+04	2,542E+03	2,035E+03	1,365E+04
	CO	3,021E+05	7,423E+04	5,562E+04	9,886E+04
	NO <sub>2</sub>	5,142E+05	3,033E+05	7,787E+05	6,063E+05
	PM <sub>10</sub>	7,585E+04	5,336E+03	0	4,840E+03
	SO <sub>2</sub>	0	1,712E+06	1,431E+06	8,558E+06
	CH <sub>4</sub>	0	3,670E+05	6,052E+05	1,822E+06
	N <sub>2</sub> O	0	1,017E+03	4,635E+03	5,642E+03
	CO <sub>2</sub>	4,139E+07	2,224E+08	2,510E+08	2,678E+08
	Hidrocarburos (sin especificar)	0	1,517E+00	6,621E+03	1,514E+05
	Benceno	0	0	0	1,688E+01
	Formaldehidos	0	2,117E-10	1,307E-05	6,370E+02
	Partículas (sin especificar)	0	1,354E+02	1,140E+06	2,043E+05
	HCl	0	7,183E-02	4,372E+04	8,519E+03
	HF	0	8,979E-03	5,465E+03	7,701E+02
	NH <sub>3</sub>	0	4,154E-05	2,979E-01	3,047E-02
	Emisiones agua (kg)	DBO <sub>5</sub>	0	9,006E-02	1,047E+03
DCO		0	7,612E-01	8,858E+03	8,245E+04
Metales (sin especificar)		0	4,422E-03	6,616E+01	3,297E+03
Amonia (como N)		0	1,332E-02	2,581E+02	1,432E+03
Nitratos (NO <sub>3</sub> -)		0	1,139E-04	6,932E+01	7,982E+00
Energía (MJ)	Energía Primaria	0	3,926E+09	3,981E+09	2,277E+10
	Energía Fósil	0	3,926E+09	3,857E+09	2,274E+10

Tabla F4. Resultados obtenidos para la distribución y uso

Etapa		Producción	Combustión	Uso
Emisiones aire (kg)	Hidrocarburos	3,279E+07	6,783E+05	2,508E+08
	CO	2,575E+07	2,391E+06	9,259E+08
	NO <sub>2</sub>	9,125E+07	4,070E+06	1,700E+09
	PM <sub>10</sub>	1,289E+06	6,003E+05	2,329E+08
	SO <sub>2</sub>	4,065E+08	0	0
	CH <sub>4</sub>	1,202E+08	0	0
	N <sub>2</sub> O	9,930E+06	0	0
	CO <sub>2</sub>	2,486E+10	1,011E+08	1,219E+11
	Hidrocarburos (sin especificar)	4,168E+07	0	0
	Benceno	4,987E+04	0	0
	Formaldehidos	7,980E+05	0	0
	Partículas (sin especificar)	5,903E+07	0	0
	HCl	1,883E+06	0	0
	HF	2,351E+05	0	0
	NH <sub>3</sub>	3,331E+00	0	0
Emisiones agua (kg)	DBO <sub>5</sub>	2,839E+07	0	0
	DCO	2,402E+08	0	0
	Metales (sin especificar)	4,584E+06	0	0
	Amonia (como N)	4,153E+06	0	0
	Nitratos (NO <sub>3</sub> -)	2,731E+03	0	0
Energía (MJ)	Energía Primaria	1,031E+13	0	0
	Energía Fósil	1,030E+13	0	0

## EVALUACIÓN DE IMPACTO

Figura F1. CCI para cada una de las etapas

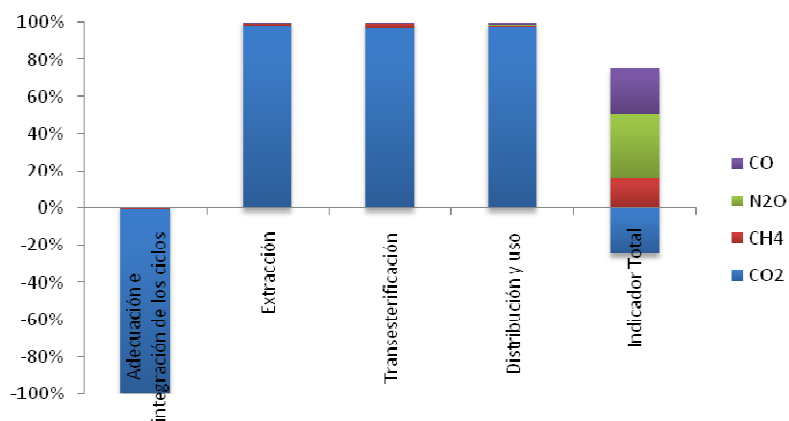


Figura F2. AI para cada una de las etapas

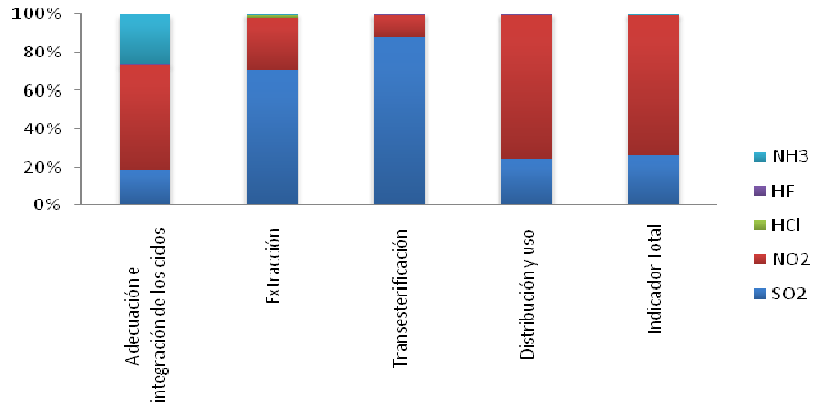


Figura F3. El para cada una de las etapas

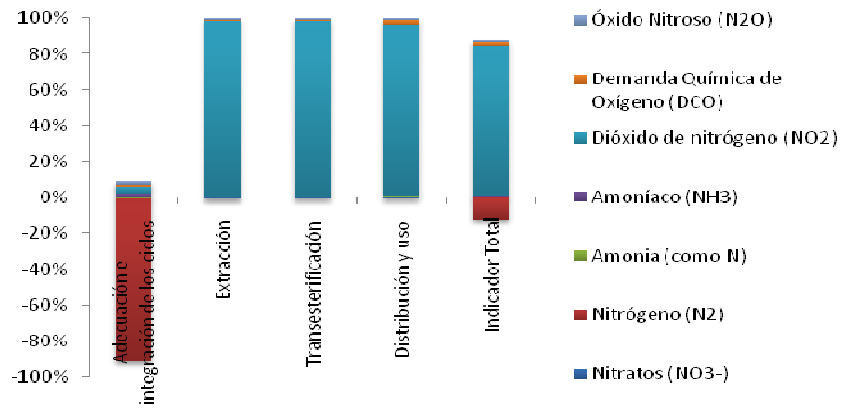


Figura F4. POI para cada una de las etapas

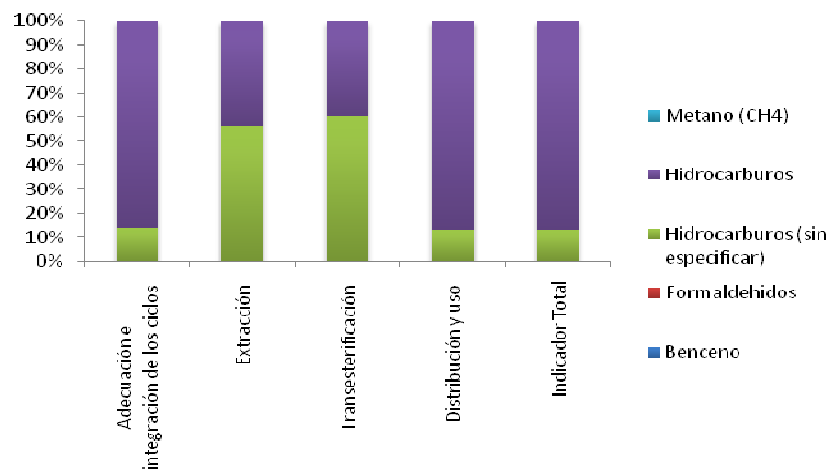


Figura F5. REI para cada una de las etapas

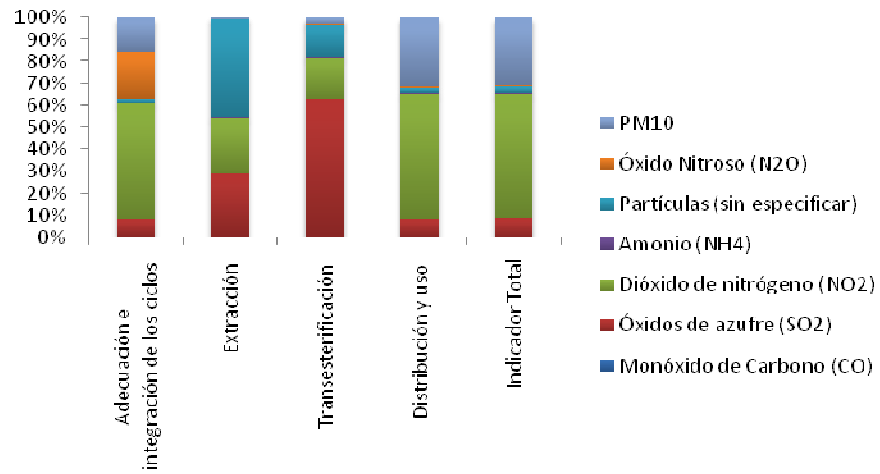
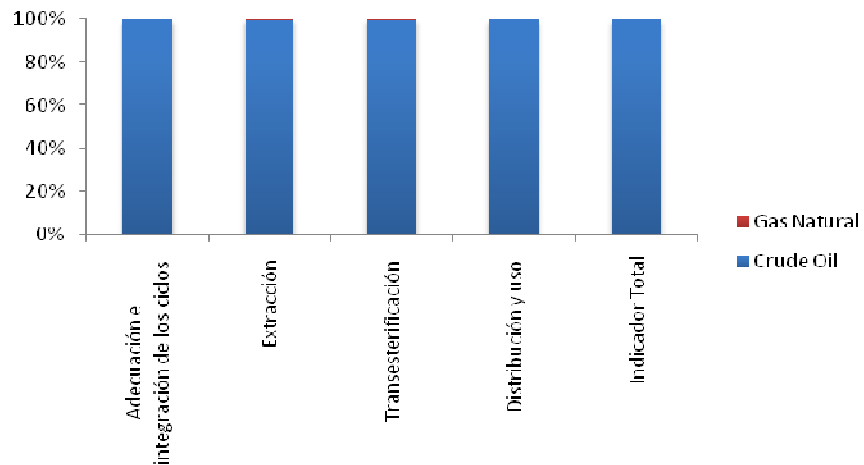


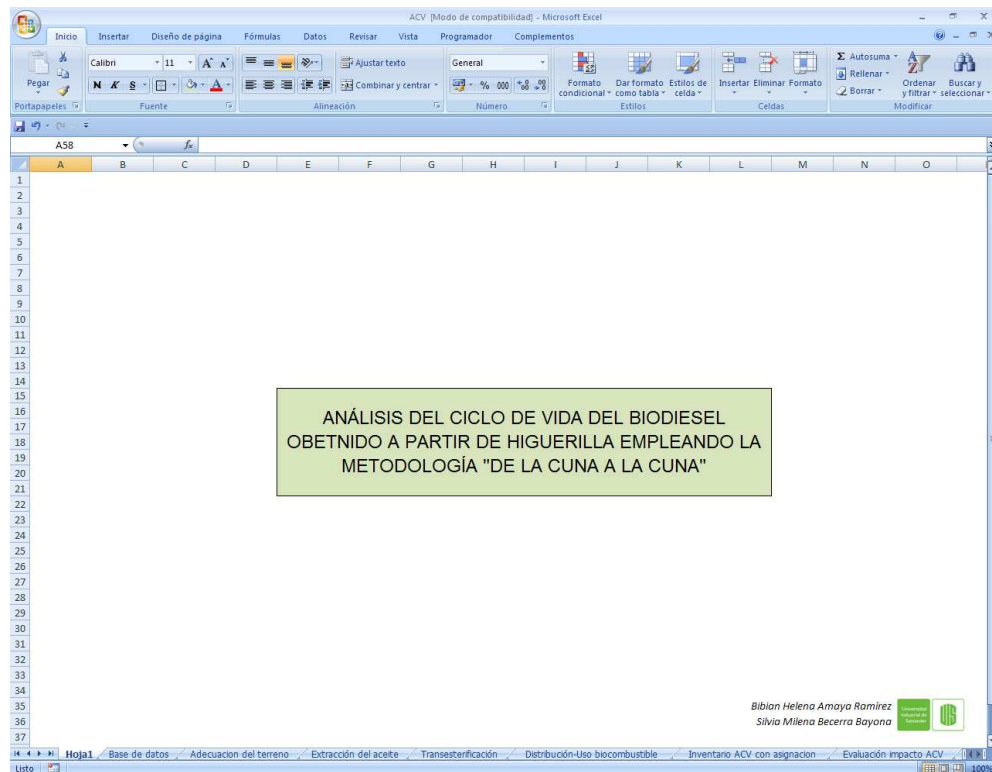
Figura F6. NREI para cada una de las etapas



## ANEXO G: DESCRIPCIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO ELABORADA EN EXCEL®

Las diferentes etapas involucradas en el análisis del ciclo de vida del biodiesel obtenido a partir de aceite de higuera empleando la metodología de la cuna a la cuna fueron desarrolladas con ayuda de Excel®, en donde se elaboraron una serie de hojas de cálculo contenidas en el mismo libro que se describen a continuación.

Figura G1. Vista general de las hojas de cálculo



### HOJA 1: BASE DE DATOS

En esta hoja se encuentran los datos recolectados de fuentes internacionales y diversas publicaciones que son indispensables para el desarrollo del presente proyecto. La hoja está dividida en cuatro grandes secciones, datos de fabricación, datos de combustión, propiedades de las sustancias y factores de equivalencia para las categorías de impacto. A su vez, la sección referente a los datos de fabricación fue dividida en emisiones en el

aire, emisiones en el agua y consumo de energía para tener una mayor claridad en el manejo de la información.

Figura G2. Vista parcial de la hoja base de datos

DATOS DE LAS CORRIENTES DE ENTRADA										
Datos de la fabricación										
Emisiones en el Aire										
Sustancia	Unidades	Hidrocarburos	CO	NOx	PM10	SO2	CH4	N2O	CO2	Hidrocarburos (sin especificar)
Fertilizante Nitrogeno	g /kg N	1,907E-04	3,648E-01	4,364E-01	7,063E-02	8,871E-01	2,048E-01	5,093E-04	1,135E+02	
Fertilizante Fosforo	g/kg P2O5	5,060E-02	1,192E-02	7,872E-02	1,230E-02	9,520E-02	6,341E-02	8,282E-04	2,423E+01	
Fertilizante Potasio	g/kg K2O	8,070E-05	2,267E-03	2,387E-02	0	5,590E-02	1,990E-02	1,305E-04	8,990E+00	
Cal Dolomita	g/kg cal dolomita	2,200E-01	5,084E-01	3,179E+00	2,505E-01	7,579E-02		3,432E-03	9,389E+02	
Extracción del crudo	g/kg crudo	1,494E-01	6,668E-02	2,627E-01	2,120E-03	1,407E+00	4,957E-01	4,432E-02	4,663E+01	
Transporte de crudo (oleoducto)	g/kg crudo	9,000E-05	2,465E-03	3,451E-02	0	6,342E-02	2,682E-02	2,050E-04	1,112E+01	
Refinación del crudo	g/kg diesel	2,720E-03	2,503E-01	7,534E-01	8,464E-03	2,555E+00	3,098E-01	7,280E-03	3,604E+02	
Transporte diesel (poliducto)	g/kg diesel	5,640E-05	1,540E-03	2,157E-02	0	3,965E-02	1,677E-02	1,300E-04	6,954E+00	
Datos de Combustion										
Sustancia	Unidades	Hidrocarburos	CO	NOx	PM10	SO2	CH4	N2O	CO2	
Diesel (Tractor)	g/MJ quemado	8,500E-02	3,200E-01	8,900E-01	4,100E-02	1,200E-01	4,200E-02	1,900E-03	7,550E+01	
Diesel (Camión)	g/km	1,537E+00	5,417E+00	9,220E+00	1,360E+00				7,422E+02	

## HOJA 2: ADECUACIÓN DEL TERRENO E INTEGRACIÓN DE LOS CICLOS

La hoja de adecuación del terreno incluye el cálculo de: las hectáreas necesarias de cultivo de higuierilla para producir 80.000 ton de biodiesel al año, la cantidad de combustible consumido (diesel) por la maquinaria empleada en las diferentes labores agrícolas y en los medios de transporte de los insumos, la cantidad de los fertilizantes suministrada al terreno (cálculo realizado mediante los factores tecnológicos), y, la cantidad de carbono y nitrógeno fijada en el suelo por parte de la higuierilla y el rastrojo. En la figura G3 se puede apreciar una vista parcial de la hoja 2.

## HOJA 3 Y 4: EXTRACCIÓN Y TRANSESTERIFICACIÓN

Comprende todos los flujos de masa y energía asociados a estas etapas del proceso, las especificaciones de los equipos y de los vehículos empleados para el transporte de materias primas; además permiten calcular los requerimientos de vapor, energía eléctrica y combustible y presentan un total de los flujos de insumos y productos necesarios para

llevar a cabo la asignación másica.

La figura G4 deja ver una vista parcial de la hoja de extracción y la figura G5 muestra la hoja correspondiente a la transesterificación.

Figura G3. Vista parcial de la hoja de Adecuación del terreno e integración de los ciclos

DETERMINACIÓN DE LAS HECTÁREAS						
Datos de entrada		Cantidad	Unidades	Datos de salida		
Aceite de higuerrilla requerido		86042.57	Ton/Año	Aceite de ricino		
Rendimiento global de la transesterificación		99	%	Metanol		
Contenido de aceite en la torta de prensado		18	%	Glicerina		
Contenido de aceite en la torta de la extracción con solvente		0,9	%	Aceite de ricino extraído		Del Prensado
Aceite contenido en las semillas		48	%	De la torta por solvente		
Productividad		4	Ton. semilla/ha/año	Torta		Del prensado
Densidad de las plantas		28000	plantas/ha	De la extracción con solvente		
Semillas por kg.		1200	semillas/kg	Cantidad de semillas		
Relación alcohol/aceite de ricino		6		Tamaño del terreno		
Diesel obtenido a partir de un kg de crudo		18	%	Kilogramos de semillas		
				Factor de corrección		
FERTILIZANTES	Sustancia	Unidades	Cantidad	Fertilizante Agregado (kg/aplicación)	Total para el tiempo del estudio del ACV (kg)	
	Fertilizante Nitrogeno	kg N/ha	1,500E+01	6,789E+05	8,147E+07	
	Fertilizante Fosforo	kg P2O5/ha	6,000E+01	2,716E+06	3,259E+08	
	Fertilizante Potasio	kg K2O/ha	4,000E+01	1,810E+06	2,172E+08	
	Cal Dolomita	Ton cal/ha	2,000E+00	9,052E+07	1,358E+09	
TRANSPORTE	Distancia	Unidades	Cantidad	Diesel consumido [L/aplicación]	Total para el tiempo del estudio del ACV (L)	
	Transporte fertilizantes	km	1,355E+03	2,857E+05	3,428E+07	
	Transporte semillas	km	6,940E+02	1,340E+04	2,010E+05	
	Transporte Cal Dolomita	km	6,640E+02	1,099E+06	1,648E+07	
	Transporte combustible maquinaria	km	1,940E+02	4,403E+04	6,605E+05	
	Total	km	2,907E+03	1,442E+06	5,163E+07	

## HOJA 5: DISTRIBUCIÓN Y USO DEL BIOCOMBUSTIBLE

Esta parte contiene los cálculos necesarios para determinar: la cantidad de diesel requerido para efectuar la mezcla B10 y el combustible consumido en las cisternas de transporte del diesel, biodiesel y de la mezcla hasta sus destinos finales (ver figura G6).

## HOJA 6: INVENTARIO ACV PARA EL TIEMPO HORIZONTE

La hoja de inventario ACV para el tiempo de horizonte abarca el cálculo de las emisiones de las distintas sustancias contaminantes, tanto en el aire como en el agua; además del

cálculo de la energía no renovable gastada (cálculo realizado a partir de los resultados obtenidos en las hojas 2, 3, 4 y 5 y los reportados en la hoja 1). Adicionalmente, se realizaron las gráficas correspondientes de los resultados de cada una de las etapas para una mejor interpretación. La figura G7 muestra una vista general de esta hoja.

Figura G4. Vista parcial de la hoja extracción

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following sections:

- REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS**
  - ENERGÍA ELÉCTRICA**

Proceso	Consumo Energético			Total ACV [Kw.H]
	kW	kJ/año	kw.h/año	
Extracción por prensado	2,722E+04	8,467E+11	2,352E+08	1,411E+10
Extracción por solvente			4,133E+05	2,480E+07
Procesamiento de la torta			2,291E+06	1,375E+08
Recuperación del aceite			4,363E+04	2,618E+06
Recuperación del solvente			5,968E+04	3,581E+06
Tratamiento de agua				0,000E+00
Degomado			1,940E+05	1,164E+07
Neutralización	6,396E-01	1,990E+07	5,526E+03	3,318E+05
<b>Total</b>			2,382E+08	1,429E+10
  - VAPOR CONSUMIDO**

Proceso	Cantidad [Ton/año]	Total ACV [Ton]
Extracción por prensado	0	0,000E+00
Extracción por solvente	0	0
Procesamiento de la torta	1,374E+04	8,243E+05
Recuperación del aceite	1,160E+03	6,961E+04
Recuperación del solvente	0	0
Tratamiento de agua	2404,08	1,442E+05
Degomado	6164,961049	3,699E+05
Neutralización	7175,577486	4,305E+05
<b>Total</b>	3,064E+04	1,839E+06
- ASIGNACIÓN MÁSCA**
  - MATERIAS PRIMAS**

Sustancia	Cantidad [Ton/año]	Cantidad con asignación [Ton/año]	Total ACV con asignación [Ton]
Semillas	1,810E+05	8,391E+04	5,035E+06
NaOH (9,5%)	1,770E+02	8,204E+01	4,922E+03
Hexano	2,760E+02	1,279E+02	7,674E+03
  - CO-PRODUCTOS**

Sustancia	Cantidad [Ton/año]	Total ACV [Ton]
Acetate ricino refinado	8,207E+04	4,924E+06
Torta	9,499E+04	5,700E+06
<b>Total</b>	1,771E+05	1,062E+07

Figura G5. Vista parcial de la hoja transestrificación

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following sections:

- MATERIAS PRIMAS**

Sustancia	Cantidad [Ton/año]	Total ACV [Ton]
Acetate de higuera	8,207E+04	4,924E+06
Metanol	8,777E+03	5,266E+05
Metóxido	2,873E+02	1,724E+04
Ac. Clorhídrico 10%	1,941E+03	1,164E+05
Agua	1,705E+04	1,023E+06
<b>Total</b>	1,101E+05	6,607E+06
- PRODUCTOS**

Sustancia	Cantidad [Ton/año]	Total ACV [Ton]
Acidos Grasos	3,763E+02	2,258E+04
Biodiesel	8,000E+04	4,800E+06
Glicerina	9,925E+03	5,955E+05
Agua o tratamiento	1,982E+04	1,189E+06
<b>Total</b>	1,101E+05	6,607E+06
- TRANSPORTE DE LOS INSUMOS**

Distancia	Unidades	Cantidad	Diesel consumido [L/año]	Total ACV (L)
Transporte Metóxido	km	1,355E+03	7,117E+03	4,270E+04
Transporte Ac. Clorhídrico	km	7,200E+02	7,851E+03	4,711E+04
<b>Total</b>	km	3,430E+03	2,973E+05	1,784E+06
- ASIGNACIÓN MÁSCA**

Especificaciones	Camión cisterna		Camión	
	Cantidad	Unidades	Cantidad	Unidades
Tipo	Mercedes Benz	L 1620/51	Mercedes Benz	L 1620/5
Potencia neta	208	hp	208	h
Revoluciones	2600	rpm	2600	rpm
Consumo de combustible	0,2834	litros/km	0,2834	litros/km
Capacidad	15000	L	15,5	To

Figura G6. Vista parcial de la hoja de distribución y uso del biocombustible

DISTRIBUCIÓN Y USO DEL BIOCOMBUSTIBLE						
ALMACENAMIENTO						
Datos Generales		Unidades	Cantidad			
Destino del Biodiesel			Bogota			
Distancia		km	280			
Cantidad de biodiesel		ton/año	80000			
Biodiesel en la mezcla		%v/v	10			
Cantidad de diesel		Ton/año	647914,6			
Diesel en la mezcla		% v/v	90			
Distancia		Unidades	Cantidad	Diesel consumido [L/año]	Total ACV (L)	
Transporte Biodiesel		km	2,800E+02	4,561E+05	2,737E+07	
DISTRIBUCIÓN A ESTACIÓN DE SERVICIO						
Distancia		Unidades	Cantidad	Diesel consumido [L/año]	Total ACV (L)	
Transporte Mezcla B10		km	3,000E+01	4,887E+05	2,932E+07	

Figura G7. Vista parcial de la hoja de inventario para el tiempo horizonte

Etapas	Etapas	Adecuación del terreno e integración de los ciclos	Extracción del aceite de ricino	Transterificación del aceite	Distribución y uso de biocombustible	Emisiones en el Agua		Energía													
						Agroquímicos (sin especificar) [kg]	DBOs [kg]	DCO [kg]	Metales (sin especificar) [kg]	Amoníaco (como N) [kg]	Nitratos (NO3) [kg]	Energía Primaria	Energía Fósil								
Emisiones (CO2e [kg])	Hidrocarburos	1,301E+06	1,181E+05	1,039E+05	2,838E+05																
	CO	4,178E+06	1,232E+06	5,308E+05	9,527E+05																
	NO2	1,251E+07	1,811E+07	2,201E+06	1,792E+06																
	PM10	8,646E+05	1,977E+04	8,603E+04	3,346E+04																
	SO2	3,011E+06	2,974E+07	1,170E+07	4,208E+06																
	CH4	9,092E+05	1,244E+07	2,794E+06	1,201E+06																
	N2O	3,286E+06	9,586E+04	1,129E+04	9,916E+05																
	CO2	-1,543E+11	5,195E+09	7,826E+08	1,466E+08																
	Hidrocarburos (sin especificar)	2,075E+05	1,521E+05	1,580E+05	4,162E+05																
	Benceno	2,490E+02	4,024E+04	1,688E+01	4,960E+05																
	Formaldehidos	4,366E+03	3,307E+04	6,370E+02	7,966E+05																
	Partículas (sin especificar)	3,297E+05	2,323E+07	1,955E+06	6,894E+05																
	HCl	1,028E+04	8,909E+05	5,224E+04	1,880E+05																
	ETAPAS	ADECUACIÓN Y CICLOS	Combustión	6,837E+05	2,506E+04	5,899E+04	4,432E+04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Producción	4,808E+05	1,159E+06	4,845E+06	3,559E+06	0	1,460E+05	1,211E+06	2,288E+04	2,086E+04	1,605E+01	5,689E+10	5,181E+10	0	0	0	0	0	0	
		Cultivo	1,363E+05	5,131E+05	1,764E+06	6,574E+05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		EXTRACCIÓN	Combustión	2,043E+04	7,200E+04	1,226E+05	1,808E+05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Producción vapor			3,393E+02	1,137E+04	4,623E+04	6,173E+04	0	1,388E+03	3,166E+01	6,774E+04	2,041E+03	1,745E+05	1,171E+09	1,171E+09	0	0	0	0	0	0	
Producción electricidad			4,145E+04	1,133E+06	1,586E+07	0,000E+00	0	2,133E+04	1,804E+05	1,347E+03	5,355E+03	1,412E+03	8,108E+10	7,855E+10	0	0	0	0	0	0	
TRANSFERENCIA		Producción materias primas	5,546E+04	5,523E+03	3,783E+04	1,040E+05	0	2,344E+03	1,955E+04	5,198E+02	3,351E+02	2,144E+01	1,049E+09	1,047E+09	0	0	0	0	0	0	
		Producción vapor	2,542E+03	7,423E+04	3,022E+05	5,336E+05	0	9,006E+02	7,612E+01	4,422E+03	1,332E+02	1,139E+04	3,926E+09	3,926E+09	0	0	0	0	0	0	
		Producción electricidad	2,035E+03	5,562E+04	7,787E+05	0,000E+00	0	1,047E+03	8,859E+03	6,616E+01	2,581E+02	6,932E+01	3,961E+09	3,857E+09	0	0	0	0	0	0	
		Proceso	1,365E+04	9,886E+04	6,063E+05	6,840E+05	0	9,780E+03	8,245E+04	3,297E+03	1,432E+03	7,982E+00	2,277E+10	2,274E+10	0	0	0	0	0	0	
DISTRIBUCIÓN Y USO		Combustión	8,570E+04	3,021E+05	5,142E+05	7,585E+05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Producción	3,274E+07	2,571E+07	9,111E+07	1,287E+08	0	2,835E+07	2,399E+08	4,977E+06	4,147E+06	2,727E+03	1,02944E+13	1,0289E+13	0	0	0	0	0	0	
		Uso	3,074E+05	1,083E+06	1,844E+06	2,720E+06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

## HOJA 7: EVALUACIÓN DE IMPACTO

Muestra los resultados obtenidos al clasificar y asignar las corrientes de salida (emisiones) a cada una de las categorías de impacto. El indicador de cada categoría está cuantificado para cada una de las etapas del proceso de obtención de biodiesel a partir del aceite de higuera y como un total, además cuenta con graficas que ilustran mejor el perfil medioambiental.

Figura G8. Vista parcial de la hoja de evaluación de impacto

