

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A  
PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA Y ETANOL**

**ÁLVARO JOSÉ PÉREZ CORTES  
KELLY JOHANA DUMAR OYOLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2011**

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A  
PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA Y ETANOL**

**ÁLVARO JOSÉ PÉREZ CORTES  
KELLY JOHANA DUMAR OYOLA**

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

**Director:**

**Dr. VIATCHESLAV KAFAROV  
Ingeniero Químico Ph.D.**

**Co-Director**

**DIEGO MARTINEZ  
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2011**

*A Dios por guiar y acompañar el transcurrir de mi vida, dándome fortaleza y sabiduría.  
A mi mamá y mi hermana por todo el apoyo incondicional que me han brindado en todos  
estos años de estudio, por alentarme en los momentos más difíciles de mi vida, brindando  
siempre motivos para luchar y seguir adelante.*

*A la memoria de mi padre **Álvaro Alberto Pérez Ortiz** quien me brindo todo su apoyo  
durante mi infancia y adolescencia.*

*Álvaro José Pérez Cortes*

## **AGRADECIMIENTOS**

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

A nuestras familias por el amor y el apoyo brindado

A nuestros amigos por siempre estar allí y por todos los momentos compartidos

Al Dr. Viatcheslav Kafarov por su orientación y confianza.

Al Ingeniero Químico Diego Martínez por su orientación, colaboración y por haber dedicado parte de su tiempo a escucharnos y asesorarnos en el desarrollo de este trabajo

A los miembros del centro de investigación para el desarrollo sostenible en la industria y energía CIDES-UIS

Al profesorado de la escuela de Ingeniería Química por sus enseñanzas, conocimientos y aportes

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

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	16
1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y DEL ALCANCE DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	20
1.1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO.	21
1.2. DEFINICIÓN DEL ALCANCE:	21
1.2.1. Sistema del producto bajo estudio:	21
1.2.2. Funciones del sistema bajo estudio	22
1.2.3. Unidad funcional	22
1.2.4. Límites del sistema	22
1.2.5. Reglas de asignación	23
1.2.6. Tipos de impacto y metodología de evaluación	23
1.2.7. Datos necesarios; requisitos de calidad de los mismos	23
2. ANÁLISIS DE INVENTARIO	24
2.1. ACTIVIDAD AGRÍCOLA.	24
2.2 INTEGRACIÓN DE LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS.	28
2.2.1. Ciclo del carbono	28
2.2.2 Ciclo del nitrógeno	28
2.3. EXTRACCIÓN DE ACEITE DE RICINO	29
2.3.1 Proceso de extracción mecánica.	30
2.3.2 Proceso de extracción química.	31
2.4. TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO	33
2.4.1 Proceso de simulación	34

2.5. DISTRIBUCIÓN Y USO FINAL DEL COMBUSTIBLE	39
2.6. HERRAMIENTA INFORMÁTICA UTILIZADA	39
3. EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	41
4. CONCLUSIONES	47
5. RECOMENDACIONES	48
BIBLIOGRAFIA	49
ANEXOS	58

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Condiciones para el desarrollo de la planta de higuera.	25
Tabla 2. Requerimientos eléctricos y energéticos para el proceso de secado, descascarado y cosecha.	27
Tabla 3. Composición de la semilla de Higuera	30
Tabla 4. Composición del Aceite de Ricino	30
Tabla 5 Datos técnicos de la prensa YZL - 32	31
Tabla 6. Flujos de masa para el proceso de extracción.	33
Tabla 7. Distancias Nacionales [24]	34
Tabla 8. Reporte de propiedades estimadas por el método de Constantinou-Gani de los principales componentes.	35
Tabla 9. Emisiones para el B10 de higuera	39
Tabla 10. Asociación de las diferentes emisiones a las categorías de impacto.	42
Tabla 11. Caracterización del ACV de la mezcla B10	43

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Figura basada en ISO 14040.	20
Figura 2. Esquema de los procesos unitarios involucrados en el sistema bajo estudio.	21
Figura 3. Diagrama de la actividad agrícola. <i>Fuente:</i> autores	24
Figura 4. Diagrama de la extracción del aceite de ricino. <i>Fuente :</i> autores	29
Figura 5. Prensa de la semilla oleaginosa	31
Figura 6. Extracción por solvente. <i>Fuente:</i> Autores a partir de wakelyn, Phillip j. y wan, peter j [40]	32
Figura 7. Simulación del proceso de producción de biodiesel	37
Figura 8. Diagrama de flujo generado por SimaPro 7.1 para la etapa de extracción del aceite.	40
Figura 9. Perfil medioambiental para el ACV.	43

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Técnicas De Gestion Ambiental [16, 17, 52, 53]	58
Anexo B. Fundamentos De La Higuera [2, 28,54]	68
Anexo C. Extracción De Aceite De Ricino	73
Anexo D. Equipos Utilizados Para La Simulación	77
Anexo E. Matriz De Distancias	81

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA Y ETANOL\*

**AUTORES:** Álvaro José Pérez Cortés, Kelly Johana Dumar Oyola\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Análisis del ciclo de vida, Biodiesel a partir de aceite de higuera.

**DESCRIPCIÓN:** Durante el ciclo de vida de los biocombustibles, surgen emisiones durante la producción de la biomasa, el transporte y producción de materia prima y productos, la conversión de la materia prima en biocombustible, y el uso del combustible en los vehículos. Estas emisiones pueden tener efectos diversos sobre temas ambientales, tales como el efecto invernadero, acidificación, eutrofización, intoxicación, el agotamiento de la capa de Ozono y smog fotoquímico. En este trabajo, el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) permitió evaluar estos efectos para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera, asociándose para tal fin los flujos másicos y energéticos de entrada y salida de todos los procesos involucrados: adecuación del terreno, cultivo, cosecha, extracción y transesterificación del aceite, distribución y uso como biocombustible, teniendo en cuenta que un porcentaje de los residuos totales es fijado por la naturaleza gracias a los diferentes ciclos biogeoquímicos.

Este estudio se desarrolló con base a las características del Municipio de Puerto López – Meta, el cual cuenta con las condiciones adecuadas y las hectáreas suficientes para la totalidad de procesos involucrados. El proceso de producción continua del biodiesel se diseñó y simuló en ASPEN HYSYS® usando catálisis homogénea ácida y etanol como solvente, mientras que los impactos ambientales fueron evaluados por el método Environmental Product Declaration (EPD) en SimaPro 7.1.

De este estudio se obtiene dos conclusiones fundamentales. A medida que aumenta la proporción del combustible alternativo en la mezcla, se advierte una mejora en los balances energéticos del ciclo de vida de los combustibles y una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. VIATCHESLAV KAFAROV. Codirector: Ing. Diego Martínez

## ABSTRACT

**TITLE:** LIFE CYCLE ANALYSIS FOR BIODIESEL PRODUCTION FROM CASTOR OIL AND ETHANOL \*

**AUTHORS:** Álvaro José Pérez Cortés, Kelly Johana Dumar Oyola\*\*

**KEYWORDS:** life cycle analysis, biodiesel from castor oil.

**DESCRIPTION:** During biofuels lifecycle, emissions arise during biomass feedstock production, transport of raw material and products, conversion of feedstock into biofuel, and use of fuel in cars. These emissions can cause various impacts on environmental themes, such as greenhouse effect, acidification, eutrofication, toxication, ozone layer depletion and photochemical smog.

In this work, the Life Cycle Analysis (LCA) allowed us to evaluate the environmental performance for biodiesel production from castor oil, associating for that purpose the mass and energy flows into and out of all the processes involved: adaptation of the land, cultivation, harvesting, oil extraction and transesterification, distribution and use as biofuel, bearing in mind that a percentage of total waste is set by nature due to various biogeochemical cycles.

This study was performed based on the characteristics of the municipality of Puerto Lopez (Meta), which has the right conditions and enough acres for all processes involved. The process of continuous production of biodiesel was designed and simulated in ASPEN HYSYS ® using homogeneous catalysis acid and ethanol as solvent, while the environmental impact method were evaluated by the Environmental Product Declaration (EPD) in SimaPro 7.1.

In this study we draw two key conclusions. As the proportion of alternative fuel in the mixture increases, we see an improvement in the energy balances of the life cycle of fuels and a reduction in emissions of greenhouse gases.

---

\* Thesis

\*\* Physical-Chemical Faculty. Chemical Engineering Department. Director: Dr. VIATCHESLAV KAFAROV. Co-Director: Engineer. Diego Martínez

## INTRODUCCIÓN

La demanda de combustible en el sector de transporte ha alcanzado volúmenes tan grandes en casi todos los países del mundo que sus emisiones, causantes del efecto invernadero, se han convertido en uno de los principales problemas ambientales de la actualidad [1, 2]. Por esta razón, además del agotamiento de los combustibles fósiles y el incumplimiento de los compromisos de reducciones de CO<sub>2</sub>, nace la necesidad de minimizar el consumo de energía primaria y fortalecer el desarrollo de fuentes energéticas renovables [3,4].

La transesterificación de aceites vegetales con alcoholes de cadena corta se ha constituido como el proceso más utilizado para la producción de biodiesel, que al lado de la producción de etanol, son las formas de energía renovables más desarrolladas a nivel mundial [5]. En este proceso, una mezcla de ésteres de etilo o metilo de ácidos grasos se obtienen por la transesterificación de triglicéridos con etanol o metanol respectivamente, cuya posterior mezcla con petrodiesel constituye uno de los combustibles actualmente en uso en los motores de combustión interna [6]. Entre los varios tipos de catalizadores estudiados para la reacción de transesterificación, los más tradicionales son los homogéneos; entre ellos las bases y los ácidos de Brønsted, siendo los principales ejemplos los hidróxidos y alcóxidos de metales alcalinos y los ácidos sulfúrico, fosfórico y clorhídrico [7].

El biodiesel se caracteriza por ser no tóxico, biodegradable, libre de azufre, compuestos aromáticos y comparado con el petrodiesel, las emisiones de CO, material particulado e hidrocarburos policíclicos de nitrógeno en la combustión del biodiesel son bajas. [7]

La producción de biodiesel puede llevar a un país a minimizar problemas ambientales, pero esto podría generar conflictos sociales relacionados con el abastecimiento adecuado de alimentos. El desafío tecnológico es desarrollar una producción agrícola sustentable a largo plazo de semillas oleaginosas para la producción de biodiesel, sin tener un impacto negativo en los suministros alimentarios.

La higuera, es una planta no comestible y constituye una alternativa válida para la obtención de biodiesel debido a varios factores: a) la higuera es una especie cosmopolita cuyo crecimiento espontáneo y gran poder colonizador permite que espacios que no están siendo sometidos a las actividades agrícolas, sean espacios adecuados para esta especie; b) su capacidad colonizadora evita que plagas y enfermedades interfieran en su dinámica de crecimiento y desarrollo [3].

En Colombia existen iniciativas gubernamentales para promover la siembra e industrialización de la Higuera, ya que se han efectuado estudios promovidos por Corpoica y el Ministerio de Agricultura [8] donde se muestra a esta oleaginosa como una excelente alternativa para la producción de biodiesel en nuestro país.

De acuerdo con el proyecto *Transición de la agricultura* del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en Colombia el aceite de higuera, también llamado aceite de ricino, pertenece al grupo de materias primas consideradas estratégicas para la producción de biodiesel en el país. Además, tiene como característica principal que casi el 90% de su composición corresponde al triglicérido del ácido ricinoléico (triricinoleína), lo que lo hace un aceite exclusivo entre un gran número de aceites [9] ya que le proporciona al biodiesel excelentes propiedades de flujo a baja temperatura [10].

En cuanto al alcohol usado en el proceso de transesterificación, la utilización de etanol puede ser atractiva desde el punto de vista ambiental, dado que puede ser

producido a partir de fuentes renovables [11], y al contrario del metanol, no posee grandes problemas de toxicidad [12]. Sin embargo, la producción de biocombustible no es del todo amigable con el medio ambiente [13], por lo cual resulta urgente el planteamiento y desarrollo de diversas metodologías que busquen evaluar cualitativa y cuantitativamente el posible impacto producido por estos proyectos o actividades de producción.

Una de las herramientas metodológicas que permiten alcanzar este objetivo es el análisis del ciclo de vida (ACV), la cual determina los impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida del producto mediante la recopilación, cuantificación, evaluación e interpretación de las entradas y salidas de materia y energía a un sistema [14].

Los primeros estudios asociados a esta metodología comenzaron en los años 60, siendo uno de los más referenciados el estudio desarrollado por el Midwest Research Institute para la empresa Coca-Cola® a principios de los 70. En 1993, la SETAC publica el primer código internacional sobre ACV (SETAC), "Code of Practice for Life Cycle Assessment", donde homogeneizaba criterios, definiciones y metodología [15]. En 1997 se publica la serie de normas ISO 14040 referente a ACV, actualizadas en el año 2006 [16,17].

El ACV ha sido aplicado en muchos trabajos para evaluar los impactos ambientales potenciales de fuentes alternativas de energía, pero en materia de biocombustibles se destacan los trabajos de Yolanda Lechón y colaboradores: Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte, fase I y Fase II [18].

El Propósito de este trabajo es analizar el impacto ambiental potencial asociado a la producción de biodiesel a partir del aceite de higuera usando catálisis ácida homogénea y etanol. Con este fin, se realizaron inventarios de cada una de las

etapas involucradas en la cadena productiva: actividad agrícola, extracción del aceite, la producción del biodiesel, su distribución y uso final en una mezcla B10. Se utilizó el simulador Aspen Hysys<sup>®</sup> para calcular los flujos de materia y energía que se presentan en el proceso de producción del biodiesel. Los resultados de esta simulación al igual que el resto de procesos involucrados son utilizados como datos de entrada al software SimaPro 7.1 en el cual se evaluaron los impactos ambientales con el método Environmental Product Declaration (EPD).

## 1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y DEL ALCANCE DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El análisis del ciclo de vida de un producto como herramienta de gestión ambiental tiene como finalidad analizar de manera objetiva, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un producto durante su ciclo de vida completo [14] (Para más detalles ver el anexo A).

De acuerdo con las normas ISO 14040 y 14044 (ISO, 2006a; ISO, 2006b), el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología iterativa que consta de cuatro fases fundamentales ilustradas en la Figura 1.



Figura 1. Metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Figura basada en ISO 14040.

En este capítulo se desarrolla la primera fase del ACV, constituida por la definición del objetivo, que comprende la exposición de los motivos por los que se desarrolla el estudio, la aplicación prevista y la descripción del destinatario, así como también la definición de la amplitud, profundidad y detalle del mismo (alcance) [15].

## 1.1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO.

Obtener el perfil ambiental potencial de la cadena de producción de biodiesel de aceite de higuerrilla e identificar las etapas del proceso productivo donde se generan las emisiones contaminantes de mayor relevancia.

## 1.2. DEFINICIÓN DEL ALCANCE:

### 1.2.1. Sistema del producto bajo estudio:

El sistema a estudiar es la producción y uso de biodiesel obtenido a partir de aceite de higuerrilla y etanol en medio ácido, homogéneo, mezclado con diesel al 10% en volumen. (Figura 2).

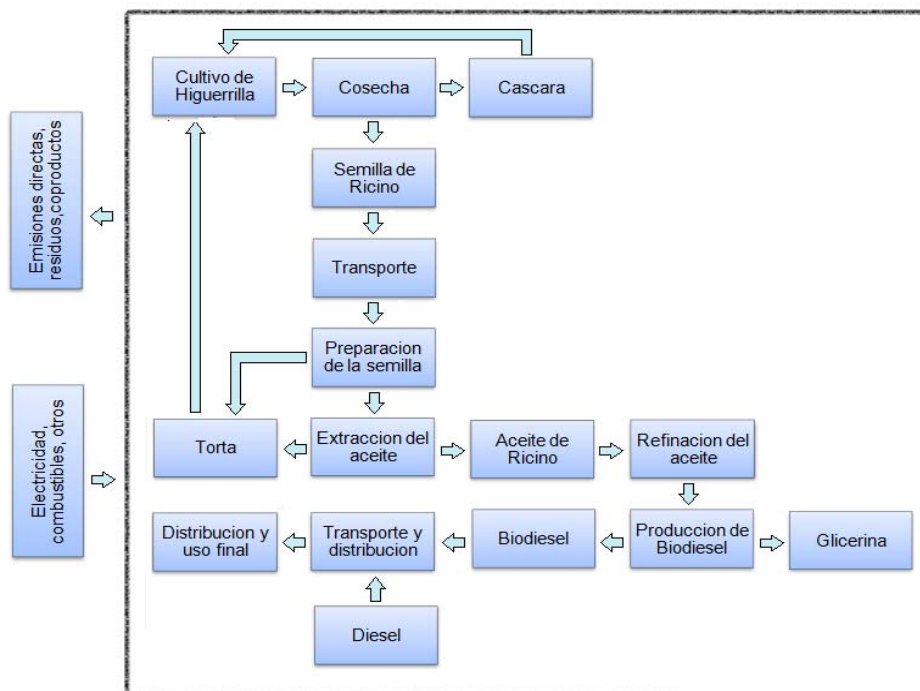


Figura 2. Esquema de los procesos unitarios involucrados en el sistema bajo estudio. Fuente:

Autores

### **1.2.2. Funciones del sistema bajo estudio:**

El sistema bajo estudio cumple la función de servir como combustible para vehículos que trabajen con motores diesel, sin necesidad de ser modificados.

### **1.2.3. Unidad funcional:**

Tras definir la función, se escogió como unidad funcional 80 000 ton / año que corresponde a la capacidad típica de producción de una planta de biodiesel.

### **1.2.4. Límites del sistema:**

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV y qué cargas ambientales se estudiarán y a qué nivel de detalle.

**Límites para el proceso:** Para la obtención del biodiesel se incluyen: la fase agrícola, el proceso de extracción del aceite, su conversión a biodiesel, los transportes respectivos y, finalmente su uso.

**Límites geográficos:** la validez espacial del estudio se limitó al uso del biodiesel en Colombia, considerando que toda la cadena de producción del biodiesel se localiza en el departamento del Meta, debido a que éste se encuentra entre las 4 zonas mayormente aptas para el desarrollo del cultivo de higuera.

**Límites temporales:** se tomó como horizonte temporal 60 años con base a estudios ya realizados y fines comparativos.

**Etapas excluidas del análisis.** Para este estudio, las cargas ambientales relativas a la producción de la maquinaria e infraestructuras necesarias para la

producción y transporte del biodiesel se han excluido del análisis porque su contribución al balance global es muy pequeña, menor del 1% [19].

Además no se incluyeron los factores económicos, catastróficos, y sociales

#### **1.2.5. Reglas de asignación**

Siguiendo la jerarquía de métodos de asignación detallada en la norma UNE-EN-ISO 14040 se aplicó el método de asignación másica. Este método consiste en tomar como parámetro relevante para realizar la asignación de las cargas ambientales la cantidad producida de cada co-producto en el momento en el que se separan en el sistema.

#### **1.2.6. Tipos de impacto y metodología de evaluación**

Para la evaluación de los diferentes impactos se tuvieron en cuenta las siguientes categorías: Cambio climático, destrucción del ozono, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación, eutrofización y el uso de energía no renovable.

#### **1.2.7. Datos necesarios; requisitos de calidad de los mismos**

En la medida de lo posible se utilizaron datos nacionales, recopilados de instalaciones vinculadas a los eslabones productivos; seleccionando los procesos cuyos flujos de masa y energía generan emisiones relevantes para el medio ambiente.

Se solicitaron datos a entidades como CORPOICA y para los procesos en los cuales no se encontraron datos primarios se recurrió a información ya publicada, teniendo en cuenta que dicha información fuera reciente, preferiblemente de las zonas donde tienen lugar los procesos y a las tecnologías empleadas actualmente en los mismos.

## 2. ANÁLISIS DE INVENTARIO

El Análisis de inventario del ACV (ICV) implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema estudiado [15]. Para este propósito, y con objeto de elaborar un mejor estudio, éste se ha dividido en 4 subgrupos: actividad agrícola, extracción del aceite, transesterificación del aceite, distribución de la mezcla (Biodiesel-Diesel) y uso final.

### 2.1. ACTIVIDAD AGRÍCOLA.

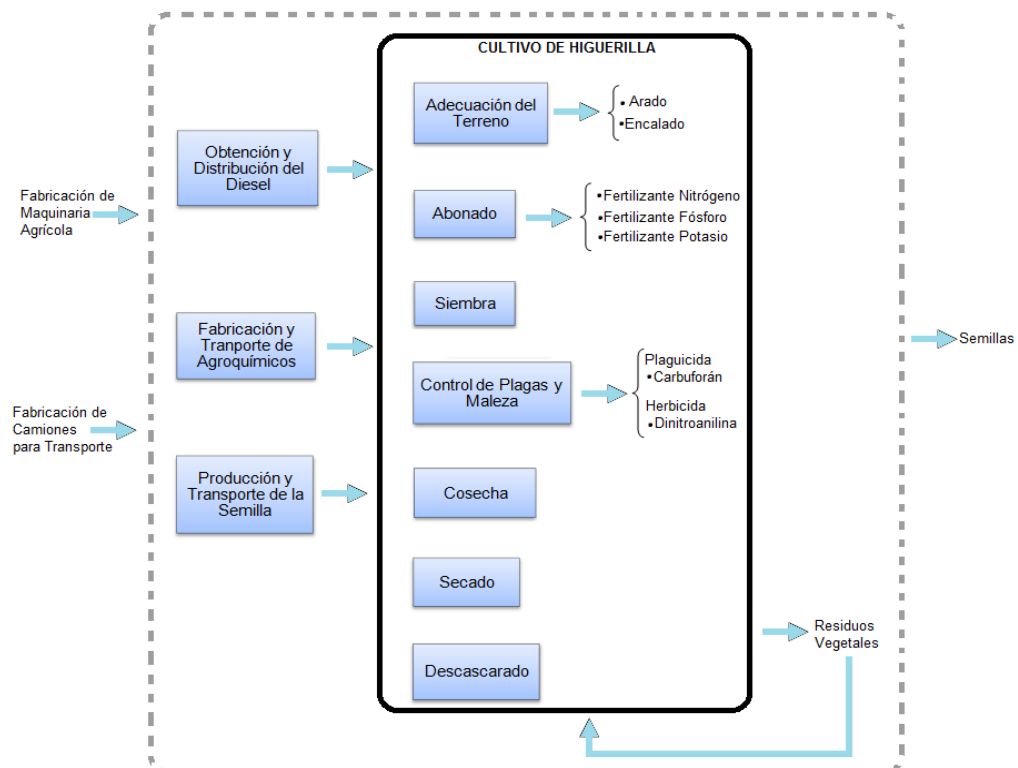


Figura 3. Diagrama de la actividad agrícola. Fuente: autores

La figura 3 muestra el esquema del sistema agrícola estudiado. Dentro de los límites de sistema se incluyeron todas las labores agrícolas que se realizan en el cultivo así como todos los procesos de producción de los diferentes insumos agrícolas: fertilizantes, herbicidas, plaguicidas, semillas, entre otros (Ver tabla B2, Anexo B).

Fuera de los límites del sistema quedan los procesos de fabricación de maquinaria agrícola y camiones de transporte.

**CONSIDERACIONES:**

Los llanos orientales en el Meta comprenden 4 zonas: la parte alta, la parte plana o sabana, la parte urbana y la zona media o piedemonte; La parte plana o sabana se encuentra en los límites con los municipios de Acacías, Puerto López y San Carlos de Guaroa. El cultivo se lleva a cabo en el municipio de Pto López, el cual no presenta vegetación alta y está conformado por arcillas aluviales y superficie con relieve plano y pendientes entre 1 y 3 %. Posee una extensión total de 674000ha de la cual 673050 ha corresponden al área rural [20]. Las condiciones para el desarrollo del cultivo de se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1. Condiciones para el desarrollo de la planta de higuera.**

VARIABLES	CARACTERÍSTICAS
Pendiente	Max 8%
Acidez	Rango 5.5 - 8.0
Humedad	50% - 60%
Temperatura	20°C - 30°C
Luminosidad	1500 - 2500 horas anuales
Altitud	0 -2600 msnm
Precipitación	700 - 2000 mm
Periodo de cosecha	6 meses

Fuente: Empraba 2008

Antes de la siembra de las semillas es necesario acondicionar el suelo, debido a que las raíces de la planta de ricino necesitan alta aireación (oxigenación) [21]; para este fin se lleva a cabo un arado del suelo con sistemas de discos halados por tractores [21].

Debido a que el pH de la zona para el cultivo se encuentra en un rango de 4,5 – 5,0 [22] y la planta de higuera se desarrolla en un rango de pH entre 5,5 y 8 [21] se requiere una corrección de acidez, un mes antes de la siembra, utilizando cal dolomita, porque además de corregir la acidez del suelo es fuente de calcio y magnesio.

Para el encalado se utilizó Cal Dolomita [23] proveniente de la mina “el portillo” en Norte de Santander, es necesario la aplicación de 1000kilogramos/hectárea para cada punto de pH a corregir [23]. Ésta es transportada desde su distribuidor en Bucaramanga hasta el área del cultivo que se encuentra a una distancia de 567 km [24].

La semilla necesaria para el cultivo es suministrada por Higueroil de Colombia [25] y es transportada desde la ciudad de Medellín a 635 km [24] del municipio de Puerto López.

La siembra se efectúa utilizando una sembradora mecánica teniendo en cuenta que la época de cosecha coincida con un clima favorablemente seco [26]. Al momento de la siembra se aplica de manera preventiva Furadán (9.72 kg/ha), como insecticida para evitar el daño por plagas del suelo [27]. En cuanto a los fertilizantes, el estudio de Navas Ríos [28] señala que se debe utilizar 55kg/ha de N (urea); 75kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (triple superfósforo) y 55kg/ha de K<sub>2</sub>O (cloruro de potasio). Como herbicida, se utilizan dosis de 1 a 3 l/ha de trifluralin en las plantaciones [29]. Los fertilizantes, plaguicidas y herbicidas se aplicaron en el terreno utilizando un sistema de aspersión adaptado a un tractor. La distancia

recorrida para el transporte de estos agroquímicos desde la ciudad de Bogotá hasta la zona del cultivo es de 167 km [24].

La cosecha se realiza cuando el 70 % de los frutos del racimo estén secos [3] mediante una cosechadora John Deere 110 Hp turbo diesel [30]. Posteriormente se lleva a cabo el proceso de secado usando una secadora de columnas la cuales poseen venas rectas por donde el grano circula por gravedad; las columnas están formadas por paredes de chapas perforadas, las que atraviesa el aire caliente (o frío) en forma cruzada o perpendicular al espesor de la columna [31]. Éste proceso se realiza de manera artificial ya que es más rápido, económico y seguro puesto que no depende de las condiciones climáticas [32].

El fruto de higuera es casi esférico y trae 3 lóbulos donde vienen las semillas. Se utilizó una descascaradora de rodillos de caucho para procesar el fruto y de esta manera sacar y separar las semillas de su envoltorio (cáscara), esto se consigue partiendo el envoltorio y mediante un ventilador en el equipo, se separa por diferencia de peso las semillas de la cáscara [33]. La tabla 2 muestra los requerimientos eléctricos y energéticos de los procesos mencionados anteriormente.

**Tabla 2. Requerimientos eléctricos y energéticos para el proceso de secado, descascarado y cosecha.**

Etapa	Energía	Cantida por 1 ton de semilla
Secadora	Diesel [Kg]	16.72 <sup>[29]</sup>
	Electricidad [KW]	3.10 <sup>[29]</sup>
Descascaradora	Electricidad [KW]	3,71 <sup>[32]</sup>
Cosechadora	Diesel [Kg]	0.07 <sup>[30]</sup>

*Fuente:* autores a partir de De Dios, Carlos [30] y John Deere Latinoamérica [31] y VALDERRAMA, José O *et al.* [33].

Con base en estudios preliminares se establece que el periodo productivo del cultivo de higuera es de 4 años, y pasado este periodo el terreno estaría en un

proceso de limpieza y recuperación que tarda aproximadamente 4 años más, mientras este tiempo transcurre se establecen cultivos de higuierilla alternos para suplir la producción de semilla mientras el terreno está en reposo.

## **2.2 INTEGRACIÓN DE LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS.**

En el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de higuierilla se consideraron los ciclos del carbono y del nitrógeno.

**2.2.1. Ciclo del carbono.** La mayor parte del carbono que contiene el aceite ricino proviene del CO<sub>2</sub> atmosférico, previamente captado durante el crecimiento de la higuierilla por fotosíntesis, y cuando se quema el biodiesel, el CO<sub>2</sub> regresa a su lugar de origen (la atmósfera). De esta forma no se altera el ciclo del carbono; hay menos emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, hidrocarburos no quemados y material particulado [34]

Una plantación de ricino, cultivada en secano (La agricultura de secano es aquella en la que el hombre no contribuye con agua, sino que utiliza únicamente la que proviene de la lluvia), tiene la capacidad para absorber de la atmósfera aproximadamente 10 toneladas de gas carbónico (CO<sub>2</sub>) por hectárea anualmente [21]

Teniendo en cuenta la fijación de CO<sub>2</sub> en la fase agrícola del cultivo de higuierilla; se ha considerado en este trabajo que las emisiones de CO<sub>2</sub> en la etapa de uso, que provienen de la combustión del biodiesel en la mezcla son cero [18, 35, 36]

**2.2.2 Ciclo del nitrógeno.** El Rhizobium es una bacteria no simbiótica que vive en el suelo y es la encargada de fijar el nitrógeno del aire transformándolo en compuestos solubles, la higuierilla absorbe estos compuestos, tanto en la forma de

nitrate as the form of ammonium to form proteins. During the cultivation, the sources of N, in addition to the fixations of the atmosphere, are in the applications of fertilizers both inorganic and organic [37].

In the present work, it is considered that *Rhizobium* fixes a quantity of 15 kg/ha-year during the cultivation stage of the castor seedling [38]. The emissions due to the use of fertilizers were calculated using the data base of the program simapro 7.1, and the emissions of NO<sub>x</sub> in the use stage due to the combustion of biodiesel are calculated taking the reports in DICTUC, 2007 [39].

### 2.3. EXTRACCIÓN DE ACEITE DE RICINO

In this stage, the material and energy flows related to the process of obtaining refined castor oil from castor seeds, as well as the emissions related to transport and the production of the raw materials used, as shown in figure 5.

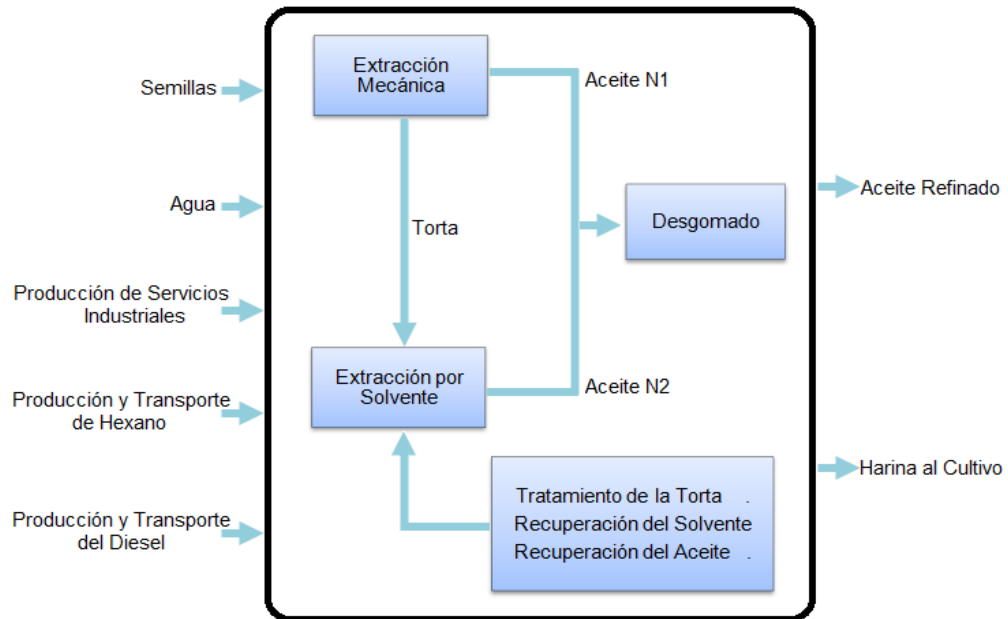


Figura 4. Diagrama de la extracción del aceite de ricino. Fuente : autores

Las composiciones de la semilla de higuera y del aceite de ricino se presentan en las tablas 3 y 4 respectivamente.

**Tabla 3. Composición de la semilla de Higuera**

ÁCIDOS GRASOS	%
Ricinoleico	87
Oleico	7.4
Linoleico	3.1
Palmítico	1
Dihidroxiesteárico	0.6
Esteárico	0.3
Eicosanoico	0.3
Linolénico	0.3

Fuente: M.A. Ramírez 2008

**Tabla 4. Composición del Aceite de Ricino**

COMPOSICIÓN	PORCENTAJE
Aceite	46.19
Almidón	20.00
Albúmina	0.50
Goma	4.31
Resina bruta y principios amargos	1.91
Fibra leñosa	20.00
Agua	7.09
Total	100.00

Fuente: Ardila y León 2008

**2.3.1 Proceso de extracción mecánica.** La semilla se somete a limpieza y clasificación de tamaño por medio de zarandos y luego se precalienta al ponerlas en contacto con aire caliente alcanzando una temperatura de aproximadamente 60°C. El propósito de este calentamiento es (1) romper las paredes celulares para

que el aceite escape; (2) reducir la viscosidad del aceite; (3) controlar el contenido de humedad; (4) coagular proteínas; (5) inactivar enzimas y eliminar microorganismos [40].

Para la extracción mecánica se utiliza una prensa hidráulica tipo expeller como la que se muestra en la figura 5 cuyas especificaciones y requerimientos energéticos están disponibles en la tabla 5. El aceite saliente pasa a través de un filtro sencillo hacia un recipiente de donde se bombea al tanque de almacenamiento y la torta resultante con un porcentaje de aceite de alrededor de 6-9 % es enviada a la extracción por solvente.



**Figura 5. Prensa de la semilla oleaginosa**

Fuente: <http://www.oilseedspress.com/spanish/oilseeds-press/Large-Series-Oilseeds-Press/>

**Tabla 5** Datos técnicos de la prensa YZL - 32

Modelo	YZL32
Capacidad (Ton/d)	120
Potencia (Kw)	106.5
Peso (Kg)	11000
Dimensiones (m)	4.1*2.27*3.85

### 2.3.2 Proceso de extracción química.

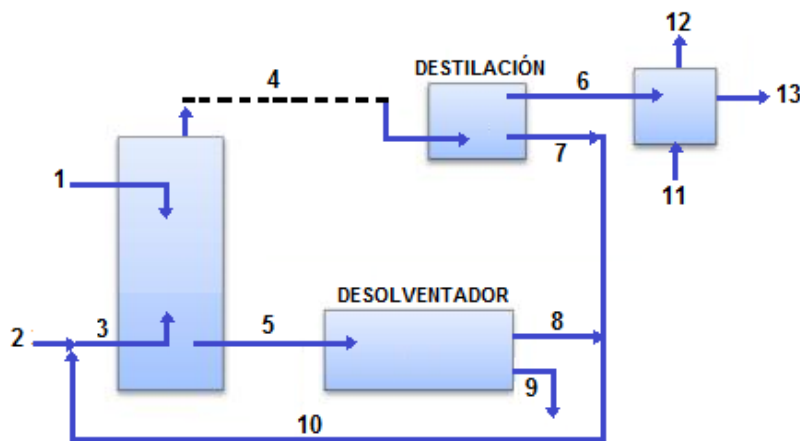
En este proceso, la torta resultante de la extracción por prensado pasa a un sistema continuo en contracorriente de varias etapas, el cual utiliza hexano como solvente para retirar el aceite presente en ella y así formar la miscela (aceite y solvente), de la que se obtiene el aceite por evaporación del disolvente que posteriormente es condensado y reutilizado.

El aceite resultante es sometido a una corriente de vapor para librarlo de trazas de hexano aún presentes en él, y posteriormente este aceite libre de hexano es

enfriado y dispuesto para almacenamiento. La harina pasa a un desolventador y de esta manera la torta se convierte en afrecho con un contenido de aceite menor al 0.5 %. La harina sale con una temperatura de 100 °C y una humedad de 17-18% debido a la utilización del vapor [41]. El solvente extraído en forma de vapor se recicla y utiliza nuevamente para otro ciclo de extracción. La cantidad de solvente remanente en la harina luego de este proceso es de 20-30 ppm [41].

Aproximadamente 10.15 kg de hexano por cada 1000 kg de aceite extraído se pierden durante el almacenamiento, el proceso de desolventización de la harina y, a través de los respiraderos [40,42]. La figura 6 muestra el diagrama de este proceso y en la tabla 6 están los flujos másicos para todas las corrientes.

El aceite extraído contiene gomas que son principalmente fosfátidos (lecitinas y cefalinas) y requiere ser desgomado. Las gomas pueden causar problemas por pérdidas mayores que las necesarias en el proceso de refinación [40]. La operación de desgomado explota la afinidad de la mayoría de los fosfátidos con el agua, convirtiéndolos en gomas hidratadas insolubles en aceite y fácilmente separadas por acción centrífuga.



**Figura 6. Extracción por solvente. Fuente: Autores a partir de wakelyn, Phillip j. y wan, peter j [40]**

**Tabla 6. Flujos de masa para el proceso de extracción.**

Corriente	Flujo másico [Kg/h]	Flujo de Aceite [Kg/h]	Flujo de Hexano [Kg/h]	Flujo de Torta [Kg/h]	Flujo de Harina [Kg/h]	Vapor de Agua [Kg/h]
1	10900	710	0	10190	0	0
2	2640	0	2640	0	0	0
3	6.7	0	6.7	0	0	0
4	2640	660	198	0	0	0
5	10900	51	660	10189	0	0
6	666.199	660	6.199	0	0	0
7	1973.8	0	1973.8	0	0	0
8	659.5	0	659.6	0	0	0
9	10240.5	51	0.5	0	10.189	0
10	2633.3	0	2633.3	0	0	0
11	35	0	0	0	0	35
12	41.1	0	6.1	0	0	35
13	660.099	660	0.099	0	0	0

*Fuente.* Elaborada por los autores.

Consideraciones:

El hexano necesario para la extracción por solvente fue transportado desde la ciudad de Barrancabermeja que se encuentra a una distancia de 687 km [24] de la planta de extracción.

El requerimiento energético para la extracción Química es de 25-30 kw/tonelada de torta procesado. Este dato fue suministrado por la Promotora de Inversiones e Iniciativas Sostenibles (PROININSO).

#### **2.4. TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO**

En esta etapa se lleva a cabo el proceso de transesterificación, donde los triglicéridos del aceite reaccionan con el etanol en presencia del ácido sulfúrico para formar el biodiesel y glicerina. El inventario para esta etapa evalúa todas las

corrientes másicas y energéticas así como las cargas ambientales relacionadas con el proceso de transformación, transporte y fabricación de materias primas.

Consideraciones: Las condiciones de funcionamiento y de suministro fueron seleccionados y especificados con base a estudios realizados por autores como Da costa *et al*, 2010 [5]; Cavalcante *et al.* 2009 [11]; Lima da Silva *et al*, 2009 [43]; West *et al.*, 2008[44]; Zapata *et al.* 2006. entre otros.

El transporte del etanol y del ácido sulfúrico se realizó en camiones cisterna de 48 y 16 toneladas respectivamente disponibles en la base de datos de Simapro 7.1. La tabla 7 presenta las distancias recorridas por carretera para el trasporte de éstos.

**Tabla 7. Distancias Nacionales [24]**

Insumo	Origen	Distancia [KM]
Etanol	Medellín	635
Ácido sulfúrico	Bogotá	167

*Fuente.* Elaborada por los autores

**2.4.1 Proceso de simulación.** Inicialmente se calculó la cantidad de aceite de higuierilla que se requiere para producir 80 000 ton /año de biodiesel, por medio de la estequiometría de la reacción de transesterificación; a partir de este valor se realizó la simulación de una planta de producción de biodiesel utilizando Aspen Hysys 2006, el cual proporciona información fiable sobre la operación del proceso debido a sus amplios paquetes termodinámicos, enormes bibliotecas de componentes y técnicas avanzadas de cálculo.

Los procedimientos para el proceso de simulación se refieren esencialmente a la definición de los componentes químicos, la selección de un modelo termodinámico, la determinación de capacidad de la planta, la elección de unidades adecuadas de operación y la creación de las condiciones de entrada.

El aceite de ricino, fue representado como una mezcla de trirricinoleina ( $C_{57}H_{104}O_6$ ) 91% y los ácidos grasos: linoleico 4%, oleico 3%, palmítico 1% y esteárico 1% [4, 46]. En consecuencia, se tomó el etil ricinoleato ( $C_{19}H_{36}O_2$ ) como el principal producto resultante de la reacción (biodiesel). La trirricinoleina y etil ricinoleato fueron definidos y caracterizados por medio de componentes hipotéticos a través de la herramienta hypo-manager. Para el cálculo de las propiedades críticas ( $T_c$ ,  $P_c$ ,  $V_c$ ) y la temperatura normal de ebullición  $T_b$ , que podemos apreciar en la tabla 8, fue utilizado el método de Constantino-Gani reportados por M. G. Aca-Acaa *et al.* 2009 [47].

**Tabla 8. Reporte de propiedades estimadas por el método de Constantinou-Gani de los principales componentes.**

Parámetro	Trirricinoleina	Etil Ricinoleato
$T_b$ [K]	846.8	623
$T_c$ [K]	946.2	759.8
$P_c$ [bar]	3.4	14.4
$V_c$ [cm <sup>3</sup> /mol]	3271.9	1115.1

*Fuente:* Autores a partir de M. G. Aca-Acaa *et al.* 2009 [46].

La información sobre el resto de componentes, tales como, etanol, glicerina, ácido sulfúrico, agua y demás ácidos grasos; está disponible en la biblioteca de componentes Hysys.

El modelo termodinámico seleccionado fue UNIQUAC (Universal Quasi Chemical) y el modelo de actividad NRTL (Nonrandom Two Liquids) porque son los que proporcionan mejores predicciones en las propiedades de los componentes utilizados [48].

Los equipos que se usaron para la simulación fueron básicamente: mezcladores, reactor CSTR, reactor de conversión, intercambiadores de calor, separador flash,

separador de fases, torre de extracción, válvulas y torre de destilación; disponibles en la librería de Aspen Hysys 2006.

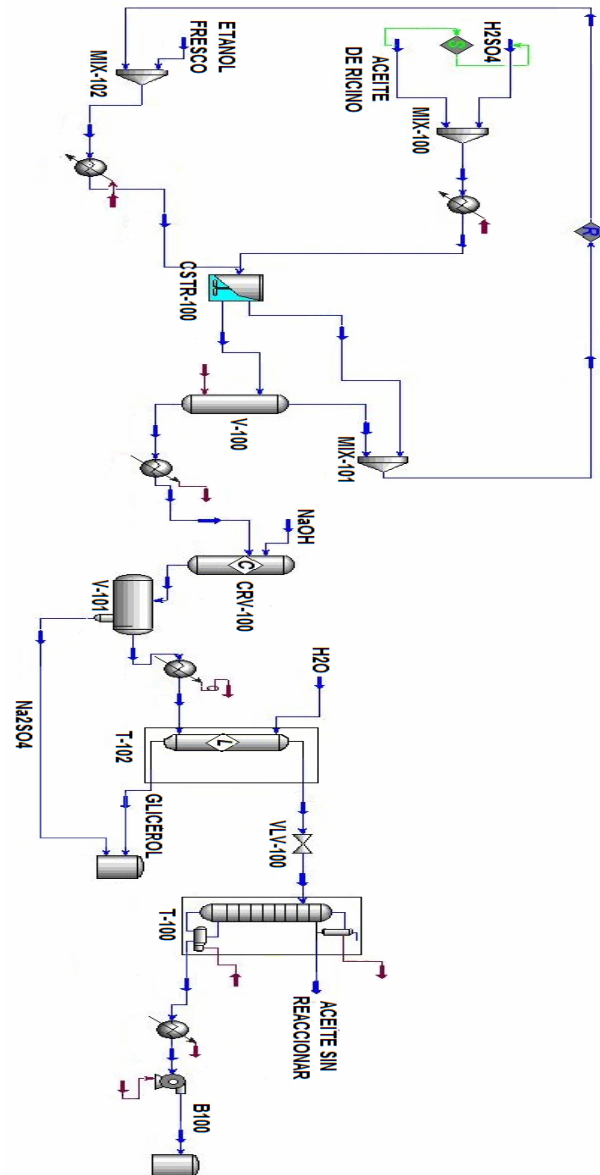
El proceso se inició al final de la unidad de desgomado de aceite de higuera. El aceite de ricino (10140kg/h) fue mezclado con el catalizador ácido ( $H_2SO_4$ ) en una relación molar de 7.5:1 en el mezclador MIX-100. La mezcla de  $H_2SO_4$  con aceite de ricino (al 1.68% p/p) se calentó hasta  $80^{\circ}C$  antes de ser enviada al reactor de transesterificación. La alimentación de etanol consistió en etanol fresco y etanol reciclado de la unidad de recuperación de etanol V-100 y reactor CSTR-100, por lo que el etanol total suministrado fue de aproximadamente 7065 kg/h, con una proporción molar de 11.6:1 de etanol/aceite. El etanol se calentó hasta una temperatura de  $78^{\circ}C$  [49].

La reacción de transesterificación se llevó a cabo en el reactor CSTR-100 de  $19.7 m^3$ , a una temperatura de  $80^{\circ}C$  y 1 atm de presión; como constante cinética se tomó: 1.0348 l/mol-min, reportada en el trabajo de *Agra Et al. 1996* [49]. El reactor fue alimentado continuamente por la mezcla de  $H_2SO_4$  - aceite de ricino y etanol hirviendo. Durante una hora de reacción se presentó un rendimiento del 97.25% de conversión de aceite en biodiesel. El producto de la reacción fue el etilester (Biodiesel) y la glicerina.

La corriente en la salida del reactor CSTR-100 que además del producto de la reacción contenía el etanol en exceso, el catalizador y aceite sin reaccionar, fue enviada a la unidad de destilación flash V-100, la cual fue diseñada para recuperar el etanol que no reaccionó y reciclarlo a la alimentación de etanol a fin de que sea reducida la carga de etanol fresco. La pureza del etanol destilado debe ser superior a 94%, ya que si ésta es menor se verá afectada la reacción de transesterificación [50]. La columna de destilación flash se operó a una temperatura de  $210^{\circ}C$  y 1 atm de presión.

El mezclador Mix-101 se cargó con el etanol recuperado del reactor y el de la parte superior de la columna flash para ser enviados al MIX-102 con el etanol fresco.

**Figura 7. Simulación del proceso de producción de biodiesel**



*Fuente:* Autores a partir de Aspen Hysys 2006.5

El producto de fondo del evaporador flash fue enfriado hasta 70<sup>0</sup>C y enviado al reactor de conversión CRV-100, el cual, al mismo tiempo también era alimentado por una corriente de hidróxido de sodio a una temperatura de 40<sup>0</sup>C; en este

reactor todo el catalizador ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) reaccionó con  $\text{NaOH}$  para producir sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) y agua.

El producto del reactor CRV-100, que contiene el etilester, la glicerina, aceite sin reaccionar, sulfato de sodio y agua; fueron enviados al decantador continuo V-101, en el cual se separó una fase pesada de otra fase ligera.

La fase ligera (biodiesel) se calentó hasta  $60^\circ\text{C}$  y se lavó con agua en la torre de extracción líquido-líquido T-102 para eliminar la glicerina remanente. El producto de fondo de esta torre (glicerina y agua) se mezcló con la fase pesada (glicerina y sulfato de sodio) proveniente del decantador continuo, y fue enviada a almacenaje. La glicerina bruta que se produce en una cantidad del orden del 10% del biodiesel elaborado, debe ser refinada para obtener un producto con valor agregado, comercializable en los campos químico, farmacéutico y cosmético [51].

La corriente de tope de la torre de extracción L-L (biodiesel) pasó a través de la válvula de expansión VLV-100 donde se disminuyó la presión hasta 800 Pa y posteriormente ingresó a la torre de destilación T-100, donde el Biodiesel (B100) se separó del aceite sin reaccionar. La cantidad de aceite no convertido, el etanol, el catalizador y el agua en la corriente de B100 fue menor al 1%.

Finalmente el biodiesel fue enfriado hasta temperatura ambiente y fue bombeado a la unidad de almacenaje.

En la figura 8 se puede observar la simulación de la planta productora de biodiesel. (En el anexo D se muestra las condiciones de operación para cada uno de los equipos utilizados en la simulación).

## 2.5. DISTRIBUCIÓN Y USO FINAL DEL COMBUSTIBLE

El biodiesel fue transportado hasta los sitios de almacenamiento en la ciudad de Bogotá haciendo un recorrido de 167 km [23], donde se mezcló con el diesel de petróleo para obtener un combustible con un 10% v/v de biodiesel de higuera; se asumió que el petrodiesel para la mezcla B10 ya se encontraba en dicha ciudad.

Las emisiones producidas en la combustión de la mezcla estudiada se calcularon a partir de las reportadas por CIEMAT, 2006[1] y DICTUC, 2007 [39]; podemos verlas en la tabla 9.

**Tabla 9. Emisiones para el B10 de higuera**

Contaminante	[Kg/Ton de B10]
CO	16.9672873 <sup>[39]</sup>
CO <sub>2</sub>	3141.02579 <sup>[39]</sup>
CH <sub>4</sub>	0.1607096 <sup>[1]</sup>
NO <sub>x</sub>	27.3511844 <sup>[39]</sup>
N <sub>2</sub> O	0.22411516 <sup>[1]</sup>

Fuente: Autores a partir de CIEMAT, 2006[1] y DICTUC, 2007 [39]

## 2.6. HERRAMIENTA INFORMÁTICA UTILIZADA

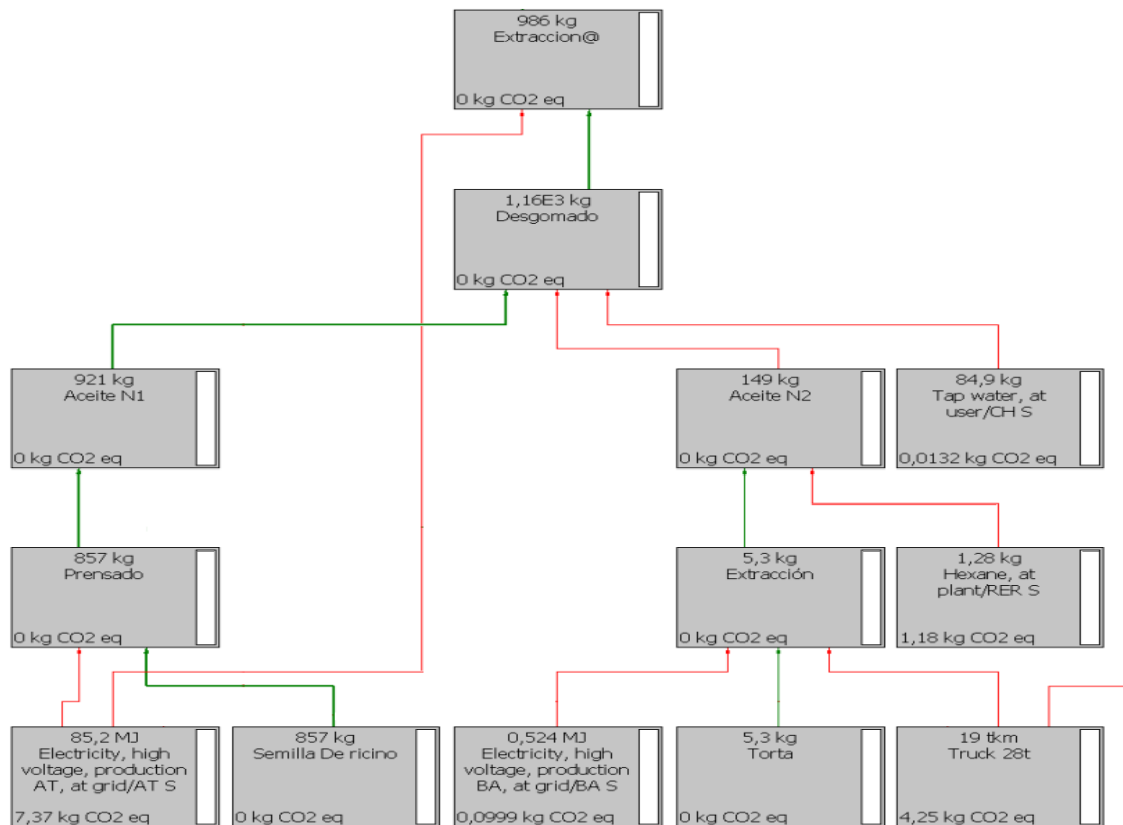
El presente estudio de ACV se ha realizado utilizando una herramienta informática comercial SimaPro 7.1, desarrollada para el análisis del ciclo de vida, que analiza y compara los aspectos medioambientales de un producto de manera sistemática y consistente siguiendo las recomendaciones de la normas ISO serie 14040 [1].

Uno de los principales elementos del programa es la base de datos. Esta base de datos puede contener varias librerías o proyectos que a su vez agrupan diferentes

procesos. Todas las entradas y salidas de un proceso están definidas en el registro de la base de datos de ese proceso. Los procesos se separan en siete categorías: materiales, energía, transporte, transformaciones, uso, escenario de residuo y tratamiento de residuo.

Una vez se detectaron qué datos son los necesarios para el análisis se procedió a hacer el inventario de ciclo de vida. Primero se buscaron aquellos datos que no están contenidos en las librerías de la herramienta y se introdujeron en los registros de los procesos. Después SimaPro 7.1 generó automáticamente un árbol de procesos o diagrama de flujos uniendo todos los procesos; como lo muestra la figura 7 para la etapa de extracción del aceite.

**Figura 8. Diagrama de flujo generado por SimaPro 7.1 para la etapa de extracción del aceite.**



Fuente: Autores a partir de SimaPro 7.1

### 3. EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En esta fase se evalúan los impactos ambientales potenciales de cada una de las etapas asociadas a la cadena de producción del B10, usando los resultados del análisis de inventario mediante el software SimaPro 7.1, el cual incluye varios métodos de evaluación de impacto reconocidos. Este trabajo fue realizado utilizando el método EPD 2007, el cual se basa en el procedimiento de caracterización para calcular la contribución relativa de una sustancia a una categoría de impacto determinada.

Con el método EPD cada intervención ambiental se asocia con las categorías de impacto en las que ella tiene un efecto, y luego cuantifica los impactos ambientales utilizando factores de equivalencia.

En la tabla 10 se especifica el indicador, el factor de caracterización y la asociación de las diferentes emisiones para cada una de las categorías de impacto.

De esta manera se contabilizó cada una de las categorías de impacto relacionadas con cada una de las etapas para la producción de 80 000 Ton/año de biodiesel y su respectiva distribución y uso en una mezcla B10. Los resultados podemos verlos en la tabla 11.

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 muestra el perfil medioambiental del ACV que es descrito a continuación.

**Tabla 10. Asociación de las diferentes emisiones a las categorías de impacto.**

Categoría de impacto	Factor de caracterización	Contaminante
Cambio climático	WGP [Ton CO <sub>2</sub> eq]	Dióxido de carbono Metano Monóxido de carbono Monóxido de di nitrógeno
Agotamiento del ozono	ODO [Ton CFC-11 eq]	Cloroflorocarbonados
Formación de oxidantes fotoquímicos	POCP [Ton C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq]	Benceno Formaldehidos Hidrocarburos Monóxido de carbono
Acidificación	AP [Ton SO <sub>2</sub> eq]	Amoníaco Dióxido de azufre Dióxido de nitrógeno Óxidos de azufre Óxidos de nitrógeno
Eutrofización	EP [Ton PO <sub>4</sub> eq]	Amoníaco Amonio Demanda química de oxígeno Dióxido de nitrógeno Fosfatos Nitratos Nitrógenos Óxidos de nitrógeno
Energía no renovable	NREP [GJ eq]	Carbón Petróleo Gas natura

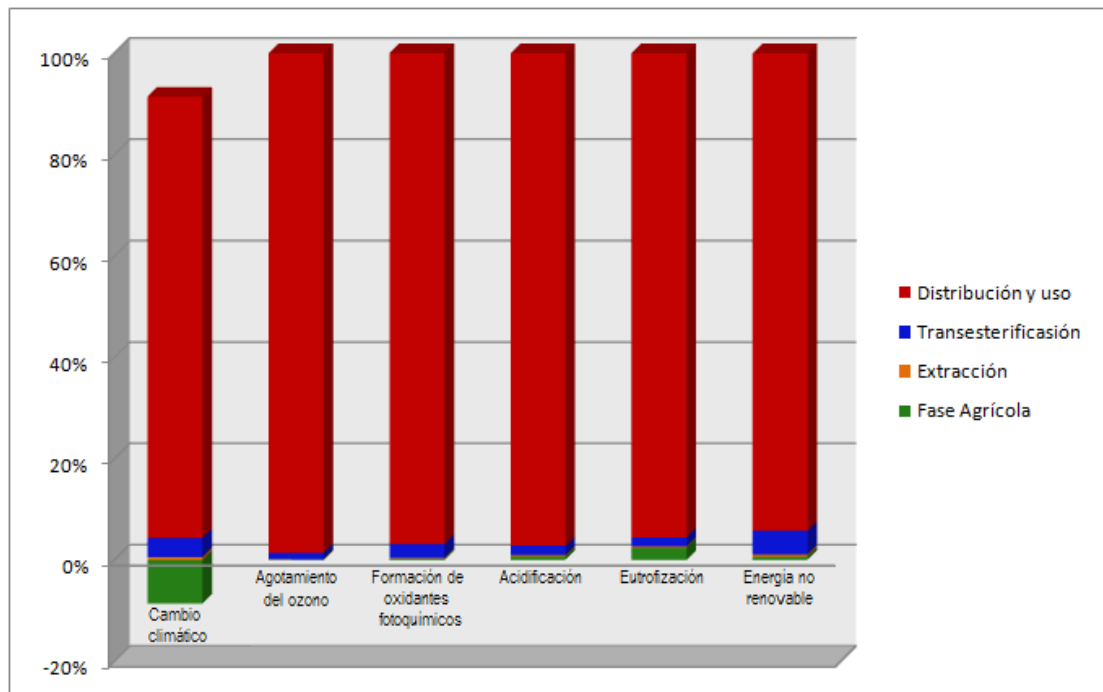
Fuente: Autores a partir de SimaPro 7.1

**Tabla 11. Caracterización del ACV de la mezcla B10**

Categoría de Impacto	Unidad	Fase Agrícola	Extracción	Transesterificación	Distribución y Uso
Cambio climático	Ton CO2 eq	-243882,63	15640,3307	107205,729	2479476,41
Agotamiento del ozono	Ton CFC-11 eq	0,00356838	0,00242588	0,06736208	5,29488985
Formación de oxidantes fotoquímicos	Ton C2H4	15,3582236	16,3676236	211,954935	7609,64438
Acidificación	Ton SO2 eq	205,903488	73,4619977	556,957771	29350,3171
Eutrofización	Ton PO4 <sup>---</sup> eq	164,767935	14,9205136	119,558665	6475,54967
Energía no renovable	GJ eq	430761,729	249771,322	3042364,44	60873690,8

Fuente: Elaborado por los autores a partir de SimaPro 7.1

**Figura 9. Perfil medioambiental para el ACV.**



Fuente: Elaborado por los autores.

En la categoría cambio climático el mayor porcentaje de participación lo tiene la etapa de distribución y uso, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CO}$ ), producidas durante la combustión del B10, estos gases permiten la entrada de la radiación visible, pero impide su salida en forma de radiación infrarroja y posteriormente se vuelve a irradiar hacia la superficie de la tierra; causando el sobrecalentamiento en la atmosfera. ; Sin embargo la fase agrícola disminuye las Ton-eq de  $\text{CO}_2$  emitidas, gracias a la fotosíntesis de las plantas de higuera, dando como resultado un efecto favorable en el indicador.

En la categoría agotamiento del ozono, prácticamente el único participante es la etapa de distribución y uso, por la presencia de Clorofluorocarbonos (CFC) después de la combustión de la mezcla B10 y durante la producción del diesel fósil. CFC son compuestos orgánicos que contienen átomos de carbono, cloro y flúor; estas sustancias de origen antropogénico, son inertes, muy estables, no inflamables ni venenosas. La estabilidad de su estructura les permite atacar la capa de ozono, y sin cambio alguno, se desplazan lentamente hasta la estratosfera donde la intensa radiación UV-C rompe sus enlaces químicos; así se libera el cloro, que captura la molécula de ozono ( $\text{O}_3$ ) y lo convierte en oxígeno común ( $\text{O}_2$ ). El cloro actúa de catalizador y provoca esta destrucción sin sufrir ningún cambio permanente él mismo, pudiendo repetir el proceso; así, cada molécula de CFC destruye miles de moléculas de ozono.

Las etapas de transesterificación, y distribución y uso, generan altas emisiones de hidrocarburos, de los cuales el metano reacciona con radicales hidroxilo, oxígeno y óxidos de nitrógeno, produciendo agentes oxidantes como formaldehído, monóxido de carbono e hidroperoximetilo. El resto de hidrocarburos reacciona con radicales hidroxilo, ozono y oxígeno atómico, dando como productos finales nitratos de peroxiacilo (hidrocarburos alifáticos) y de peroxibenzoílo (hidrocarburos aromáticos); en el proceso se produce además dióxido de nitrógeno y, de forma

indirecta, un incremento del ozono troposférico. A este grupo de compuestos se les denomina, oxidantes fotoquímicos; y estos producen necrosis en plantas, menor crecimiento y producción; en el hombre y otros animales, cefaleas, irritación del aparato respiratorio y otros daños; finalmente, pueden afectar a materiales orgánicos, alterando los enlaces insaturados y modificando las propiedades de dichos materiales.

En el indicador de acidificación nuevamente las mayores contribuciones son causadas por la etapa distribución y uso, a causa de las emisiones de  $\text{NO}_2$  provenientes del diesel fósil presente en la mezcla; el porcentaje de participación del proceso de transesterificación se debe al  $\text{SO}_2$  emitido, originado fundamentalmente en la fabricación del ácido sulfúrico. Uno de los efectos que causan estos contaminantes ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) es que reaccionan con radicales hidroxilos y vapor de agua de la atmósfera para convertirse en ácido nítrico y sulfúrico respectivamente, los cuales disueltos en las gotas de agua existentes en la atmósfera pueden volver a la superficie terrestre mediante precipitaciones, originando la lluvia ácida.

El uso de fertilizantes en la fase agrícola hace que esta etapa tenga un porcentaje de participación importante en la eutrofización, debido a las altas concentraciones, tanto de nitrógeno como de fósforo. La acumulación de estos nutrientes en las aguas superficiales, son causantes de la proliferación de algas con el posterior agotamiento del oxígeno disuelto y la muerte de muchos organismos aeróbicos.

Finalmente la categoría de impacto para la energía fósil 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. Además el consumo de energía no renovable que se da en las fase

agrícola, extracción y transesterificación se debe a la elaboración de las materias primas involucradas y también al procesamiento en sí de cada etapa.

#### **4. CONCLUSIONES**

- La metodología ACV ha resultado útil para identificar y cuantificar los impactos ambientales asociados a la producción y utilización del biodiesel de higuera en una mezcla B10.
- El perfil medioambiental elaborado refleja que la etapa de distribución y uso de la mezcla B10 es aquella que ejerce mayor influencia en todas las categorías de impacto estudiadas.
- Se puede afirmar que al adicionar biodiesel de higuera al diesel de petróleo se presenta una reducción en las categorías del impacto: cambio climático y eutrofización; lo que convierte al biodiesel y a la mezcla de éste con diesel de origen fósil en una alternativa ambientalmente atractiva.

## 5. RECOMENDACIONES

- Para concluir sobre la viabilidad de la aplicación biodiesel de higuera es indispensable complementar los resultados del estudio de impacto ambiental con estudios socio-económicos.
- Se recomienda realizar estudios de manejo agronómico en los distintos tipos de terreno que minimicen el consumo de fertilizantes y plaguicidas sin comprometer el rendimiento de los cultivos, en especial optimizar el uso de fertilizantes nitrogenados para minimizar las emisiones de óxido nitroso y  $\text{NH}_3$ .
- Estudiar el efecto en el uso de energía y emisiones de gases de efecto invernadero de la utilización de la biomasa residual como fuente de energía en el proceso de extracción del aceite.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS. Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel y del Diésel : Energía y Cambio Climático. España : Ministerio de Medio Ambiente-CIEMAT, 2006. 141 p.
- [2] RÖDER, Alexander. Integration of Life-Cycle Assessment and Energy Planning Models for the Evaluation of Car powertrains and fuels. zürich, 2001, 198p. A dissertation submitted to the swiss federal institute of technology for the degree of doctor of natural sciences.
- [3] DURÁN ALTISENT, José M. *et al.* *EL CULTIVO DE RICINO (Ricinus communis L.) EN ANDALUCÍA: UNA ALTERNATIVA PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL* En : RECALDE POSSO, Edmundo R. y DURÁN ALTISENT, José M. Cultivos energéticos alternativos. Ecuador : Grupo Seritex, 2009. 178p.
- [4] AVELLANEDA VARGAS, Fredy A. Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. Tarragona, 2010, 244p. Universitat Rovira I Virgili. Departament d'Enginyeria Química.
- [5] DA COSTA BARBOSA, Daniela; SERRA, Tatiana M.; PLENTZ MENEGHETTI, Simoni M. y MENEGHETTI, Mario R. Biodiesel production by ethanolysis of mixed castor and soybean oils. En : Fuel (2010) p. 1-4

- [6] COVIELLO, Manlio F. *et al.* Biocombustibles líquidos para transporte en América latina y el Caribe. Naciones Unidas: CEPAL, 2008. 183p.
- [7] ROJAS GONZÁLEZ, Andrés Felipe; GIRÓN GALLEGO Erika y TORRES CASTAÑEDA, Harlen Gerardo. Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión - catálisis química. En : *Revista Ingeniería e Investigación* VOL. 29 No. 3, DICIEMBRE DE 2009, p. 17-22
- [8] DURÁN ALTISENT, José M. *et al.* *EL CULTIVO DE RICINO (Ricinus communis L.) EN ANDALUCÍA: UNA ALTERNATIVA PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL* En : RECALDE POSSO, Edmundo R. y DURÁN ALTISENT, José M. Cultivos energéticos alternativos. Ecuador : Grupo Seritex, 2009. p. 39.
- [9] ARDILA JAIME, Jorge Andrés; LEÓN NAIZAQUE, Adriana Nathaly. Caracterización del biodiesel a partir de aceite de higuera y evaluación de las variables del proceso sobre el porcentaje de glicerina. Bucaramanga, 2008, 68p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías físicoquímicas.}
- [10] COHA VESGA, Pablo Miguel y ROJAS PUENTE, Laura Carolina. Obtención y caracterización de biodiesel por medio de la transesterificación en medio básico del aceite de higuera con diferentes alcoholes. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2009. 46 p
- [11] CAVALCANTE, Kiany S.B. *et al.* Optimization of transesterification of castor oil with ethanol using a central composite rotatable design (CCRD). En : *Fuel* (2009); p. 1-5

- [12] ČERNÝ ERNOCH, Michal; HAJEK, Martin and SKOPAL, František. Ethanolysis of rapeseed oil – Distribution of ethyl esters, glycerides and glycerol between ester and glycerol phases. Department of Physical Chemistry, Faculty of Chemical Technology, University of Pardubice, Studentska 573, 532 10 Pardubice, Czech Republic. *Bioresource Technology* 101 (2010). p. 2071–2075
- [13] ZAH, Rainer *et al.* Evaluación del Ciclo de Vida de los Productos Energéticos: Evaluación Ambiental de Biocombustibles – Informe Final. Switzerland : EMPA 2007. 203 p.
- [14] QUISPE TRINIDAD, Isabel *et al.* Análisis de Ciclo de Vida de los Biocombustibles en Perú. Red Peruana de Ciclo de Vida - Sección Ingeniería Industrial : Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú, 2009. 59p.
- [15] CURRAN, Mary Ann. Life Cycle Assessment: Principles and Practice, National Risk Management Research Laboratory. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati Ohio, 2006, 88p.
- [16] AENOR: Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia. UNE-EN ISO 14040. Madrid: AENOR, 2006
- [17] AENOR: Gestión ambiental Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. UNE-EN ISO 14044. Madrid: AENOR, 2006.
- [18] SHEEHAN J, CAMOBRECO V, DUFFIELD J, GRABOSKI M AND SHAPOURI H, Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus, Report NREL/SR-580-24089 UC Category 1503, National Renewable Energy Laboratory NREL, 1998, Golden CO USA, 314p.

- [19] 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.
- [20] Puerto Lopez, pagina oficial, <http://puertolopez-meta.gov.co/index.shtml>, (en español), Consultado el 12 de enero del 2010.
- [21] SOARES, Severino Liv. Ricino : Colección 500 preguntas- 500 respuestas. Empraba 2010
- [22] RIPPSTEIN, Georges; ESCOBAR, Germán y MOTTA, Francisco. Agrologia y Biodiversidad de las sabanas en los llanos orientales de Colombia. CIAT 2010. 308p. Disponible en: [http://www.ciat.cgiar.org/downloads/pdf/Agrologia\\_y\\_biodiversidad.pdf](http://www.ciat.cgiar.org/downloads/pdf/Agrologia_y_biodiversidad.pdf)
- [23] Fertilizantes Ltda. Pagina online. Consultada el 10 de marzo de 2010. Disponible en <http://www.fertilizantes.com/index.htm>.
- [24] Instituto Nacional de vías - INVÍAS, Mapas de la red vial territorial Colombia, 2001. Disponible en [http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portallG/home\\_1/recursos/01\\_genera l/mapas/contenidos/08042008/index\\_mapas.jsp](http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portallG/home_1/recursos/01_genera_l/mapas/contenidos/08042008/index_mapas.jsp)
- [25] HIGUEROIL DE COLOMBIA: disponible en <http://www.higueroil.net/>

- [26] MENDOZA SEGUNDO, Reyes Heriberto, GUIA DEL CULTIVO DE HIGUERILLA. INIAP, boletín divulgativo No. 177 Estación Experimental “Portoviejo”; 1985.
- [27] SAMAYOA, Mario Orlando. Manual técnico del Higuerrillo. Centro nacional de Tecnología Agropecuaria y forestal – CENTA. Programa Agroindustria; 2007. 17p.
- [28] NAVAS RÍOS, Gloria E. Fertilización. En : Higuerrilla : “Alternativa Productiva, Energética y Agroindustrial para Colombia”. Avances de investigación, Agosto de 2008. Centro de investigación la selva – CORPOICA. Rionegro, Antioquia p. 13- 15.
- [29] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERIA. Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. San José, Costa Rica. 1991, 5p.
- [30] John Deere Latinoamerica. Disponible en: [http://www.deere.com/jdla/es\\_LA/index.html](http://www.deere.com/jdla/es_LA/index.html)
- [31] DE DIOS, Carlos Alberto. Secado de Granos y Secadoras. Serie tecnológica Postcosecha 11. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. 1996. 267p.
- [32] *MACÊDO, L.R.; WAGNER, W.J. Revisão bibliográfica sobre a cultura da mamona. Belém: SUDAM/DSP, 1984. 35 p.*
- [33] VALDERRAMA, José O; MERY, Alejandro y ARAVENA, Felipe. Industrialización de la higuerrilla o planta de ricino parte II: Extracción de Aceite. EN : Informacion Tecnologica Vol. 5, N° 3. (1994), p. 91 - 95

- [34] ALVAREZ GALLEGOS, Alberto. El cultivo de energía renovable En: narraciones de la ciencia. Mexico; 2010. p. 67 – 71
- [35] WHITAKER, Michael and HEATH, Garvin. Life Cycle Assessment Comparing the Use of Jatropha Biodiesel in the Indian Road and Rail Sectors. *Technical Report* NREL/TP-6A2-47462. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2010, 143 p.
- [36] ZAH, Rainer *et al.* Evaluación del Ciclo de Vida de los Productos Energéticos: Evaluación Ambiental de Biocombustibles – Informe Final. Switzerland : EMPA 2007. 203 p.
- [37] Los ciclos biogeoquímicos. Disponible en: <http://www.biologia.edu.ar/ecologia/CICLOS%20BIOGEOQUIM.htm>
- [38] AMAYA RAMÍREZ, Bibian Helena; BECERRA BAYONA, Silvia Milena. Evaluación del Análisis del Ciclo de Vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera empleando la metodología “de la cuna a la cuna”. Bucaramanga, 2008, 86p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías fisicoquímicas.
- [39] UNIVERSIDAD DE CHILE. Actualización de factores de emisión para buses y transporte de carga de la región metropolitana. Santiago de Chile : Fundacion para la transferencia tecnológica, 2007. 59p.
- [40] WAKELYN, Phillip j. and WAN, Peter j. Solvent extraction to obtain edible oil products. Taylor & Francis Group, 2006. 43 p.

- [41] ERRASQUIN, Lisandro *et al.* Proceso de Eficiencia de Cosecha y Postcosecha de Granos Agroindustria en Origen. Unidad Ejecutora Proyecto PRECOP II. Caso 1: Extracción de aceite de soja por solvente. Visita a Aceitera A.F.A. "Los Cardos". Disponible en <http://www.cosechaypostcosecha.org/>
- [42] Life Cycle Impact of Soybean Production and Soy Industrial Products. Prepared for The United Soybean Board By Omni Tech International. February, 2010, 52 p. Disponible en: [http://www.soybiobased.org/wp-content/uploads/2010/02/Soy-Life-Cycle-Profile\\_Report.pdf](http://www.soybiobased.org/wp-content/uploads/2010/02/Soy-Life-Cycle-Profile_Report.pdf)
- [43] LIMA DA SILVA, Nívea; BATISTELLA, Cesar Benedito; FILHO, Rubens Maciel y WOLF MACIEL, Maria Regina. Biodiesel Production from Castor Oil: Optimization of Alkaline Ethanolysis. En : Energy Fuels (2009) 23, p. 5636-5642
- [44] WEST, Alex H.; POSARAC, Dusko y ELLIS Naoko. Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant. En : Bioresource Technology, Vol.99 (2008), p. 6587-6601
- [45] ZAPATA, carlos *et al.* Produccion de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: 1. Diseño y simulacion de dos procesos continuos. En : Dyna. Vol 74 (2007); p. 71-82
- [46] CONCEIÇÃO, Marta M. et al. Rheological Behavior of Castor Oil Biodiesel. EN : Energy & Fuels. Vol. 19 (2005); p. 2185 - 2188
- [47] M. G. Aca-Acaa *et al.* Estimación de propiedades termodinámicas de los compuestos involucrados en la producción de biodiesel. *Superficies y Vacío* 22(3). México; 2009. p 15-19.

- [48] GARCÍA, Carlos M."Simulación de una planta de producción y purificación de biodiesel a partir de aceite de palma y etanol usando el simulador comercial HYSYS PLANT 3.2". Universidad industrial de Santander. 2007.
- [49] AGRA, I.B. WARNIJATI, S. and WIRATNI. Two steps ethanolysis of castor oil using sulfuric acid as catalist to produce motor oil. Departement of Chemical Engineering Faculty of Engineering, Gadjah Mada University Yogyakarta, Indonesia, 1996. 4p.
- [50] KAEWCHAROENSOMBAT, Uraiwan; PROMMETTA, Kant and SRINOPHAKUN, Thongchai. Life cycle assessment of biodiesel production from jatropha. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. Bangkok, Thailand; 2011. 9p.
- [51] CALERO CÁCERES, William; CHICAIZA, Erika; CHICAIZA, Wilson y VIZUETE David. Síntesis y Refinación de biodiesel y glicerina obtenidos a partir de grasa vegetal. Escuela de Bioquímica y Farmacia Química de Alimentos. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR. FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS. Quito DM, Marzo 2007. 28p.
- [52] ROMERO RODRIGUÉZ, Blanca Iris. El Análisis del Ciclo de Vida y la gestión Ambiental. EN : Tendencias Tecnológicas (Boletín IIE, julio- septiembre de 2003)
- [53] MARTÍN, Carlos A. Folleto La Gestión Ambiental: Herramientas para el Desarrollo Sustentable. EN : Ecociencia & Naturaleza. (2008).

[54] MENDOZA SEGUNDO, Reyes Heriberto, GUIA DEL CULTIVO DE HIGUERILLA. INIAP, boletín divulgativo No. 177 Estación Experimental "Portoviejo"; 1985.

## ANEXOS

### ANEXO A. TÉCNICAS DE GESTIÓN AMBIENTAL [16, 17, 52, 53]

La gestión ambiental se nutre de una gran cantidad de herramientas metodológicas, que se integran, asocian y coordinan para administrar una dada situación y garantizar un desarrollo sustentable. Las más extendidas se pueden clasificar atendiendo a su objeto de aplicación, pudiendo distinguirse entre las que están orientadas a los productos y las que son de aplicación exclusiva a las actividades/proyectos de las organizaciones (Tabla A1).

**Tabla A1.** Clasificación de las herramientas de gestión ambiental más extendidas

ORIENTADAS A LOS PRODUCTOS	<ul style="list-style-type: none"><li>• Análisis del ciclo de vida</li><li>• Ecodiseño</li><li>• Etiqueta ecológica</li><li>• Marketing ecológico</li></ul>
ORIENTADAS A LAS ACTIVIDADES Y PROYECTOS	<ul style="list-style-type: none"><li>• Evaluación del impacto ambiental</li><li>• Auditorías medioambientales</li><li>• Evaluación de riesgos</li><li>• Sistemas de gestión ambiental</li></ul>

*Fuente: Puga Sánchez 2004*

### ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El análisis del ciclo de vida, ACV (*LCA en nomenclatura inglesa*), estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o de una actividad.

El ciclo de vida de un producto considera toda la “historia” del producto, desde su origen como materia prima hasta su final como residuo. Se tienen en cuenta todas las fases intermedias como transporte y preparación de materias primas, manufactura, transporte a mercados, distribución, uso, etc.

En un ACV completo se atribuyen a los productos todos los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas y energías necesarias para su manufactura, las emisiones y residuos generados en el proceso de producción así como los efectos ambientales procedentes del fin de vida del producto cuando este se consume o no se puede utilizar.

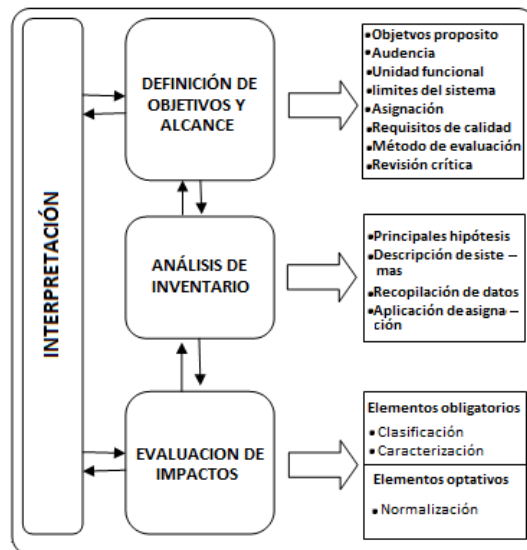
Las categorías generales de impactos medioambientales que precisan consideración incluyen el uso de recursos, la salud humana y las consecuencias ecológicas (ISO International Standard, 1997).

### **METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA**

De acuerdo con la metodología propuesta por la normativa ISO 14040 un proyecto de ACV puede dividirse en cuatro fases: objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación.

Estas cuatro fases no son simplemente secuenciales como lo muestra la Figura A1, el ACV es una técnica iterativa que permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesivas iteraciones.

**Figura A1. Facetas del ACV**



*Fuente: De la rúa Lope2009*

## **Objetivo y alcance del estudio**

Esta primera etapa condiciona de manera importante el resto de elementos del ACV, desde las necesidades de tiempo y recursos hasta los resultados finales (Curran, 2006).

- **Objetivos y propósitos del estudio**

En esta fase, se debe definir con exactitud el objetivo del estudio, el propósito con el que se realiza así como la audiencia a la que se comunicarán los resultados una vez finalizado.

- **Sistemas estudiados, límites del sistema y unidad funcional**

El desarrollo de un ACV requiere un amplio conocimiento del sistema que se va a analizar. En la etapa de definición del objetivo y alcance se describirán estos sistemas, así como la función que desempeñan.

También, se definen los límites del sistema, de modo que todos los procesos dentro de ellos serán analizados mientras que el resto de procesos serán excluidos.

Igualmente, se deben definir otros límites como son el horizonte temporal y geográfico y el nivel tecnológico. Este último aspecto determinará cuales son las tecnologías de las que se tomarán los datos.

Una vez que se conoce el sistema a analizar, sus límites y su función, se definirá la unidad funcional. La norma ISO define la unidad funcional como “el desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia” (AENOR, 2006). Es decir, sirve de referencia para todas las entradas y salidas del sistema que se estudia (CIEMAT, 2005) y cobrará especial importancia cuando se trate de estudios comparativos de productos que cumplen la misma función. La unidad funcional debe ser coherente con el objetivo propuesto.

- **Requisitos de calidad y método de evaluación**

La recopilación de datos es una de las tareas del estudio que más tiempo y recursos requiere. En esta primera etapa se definirán los requisitos de calidad para los datos que se utilizarán, pudiendo reflejar características temporales, geográficas y tecnológicas entre otras.

Del mismo modo, se describirá el software que se utilizará para la realización del ACV.

Además, en esta etapa se decidirá el método de evaluación de impactos y las categorías de impacto que se utilizarán posteriormente en la etapa de Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida.

- **Audiencia y grupo revisor**

Algunos ACV son estudios internos de empresas que buscan una mejora u optimización de su producción. Otros están realizados para ser divulgados al público, bien sea por interés comercial o para informar, pudiendo comparar sus beneficios ambientales con respecto a otro bien que tenga la misma función. La audiencia a la que se dirige el ACV debe quedar claramente definida en esta primera etapa.

### **Análisis de inventario de ciclo de vida**

En esta etapa se recopilan todos los datos cualitativos y cuantitativos necesarios para alcanzar los objetivos establecidos. Se identifican los procesos unitarios que forman el sistema bajo estudio. Estos procesos están conectados entre sí mediante flujos tanto económicos como físicos. Cada proceso unitario suministra un bien o servicio a otro proceso a la vez que recibe bienes y servicios de otros procesos, de modo que el conjunto de procesos unitarios describe el ciclo de vida completo del objeto de estudio.

Una vez identificados los procesos unitarios se deben definir los límites de cada sistema, así como las características de los datos que se van a requerir.

El análisis del inventario puede ser descrito como un diagrama de flujo, en el que todos los datos referidos a procesos específicos están agrupados y éstos están interconectados entre sí, creando un árbol con un número finito de procesos (Suh et al., 2004).

### **Evaluación del impacto de ciclo de Vida**

Según la norma ISO 14040:2006, esta etapa tiene por objeto evaluar la importancia de los impactos ambientales potenciales a partir de los resultados del análisis de inventario.

La norma ISO 14040:2006 distingue dos elementos en esta etapa: (i) elementos obligatorios, que comprende la clasificación y caracterización de impactos, y (ii) elementos optativos, la normalización de los impactos.

En primer lugar, se deben definir las categorías de impacto referidas a efectos ambientales a los que se asignarán los resultados del inventario. Las categorías de impacto deben responder a una serie de requisitos, como ser consistentes con el objetivo y alcance del estudio, ser comprensibles para la audiencia a la que van dirigidas y estar internacionalmente aceptadas. Los resultados obtenidos en el análisis de inventario se asocian a las diferentes categorías de impacto definidas y se aplican factores de caracterización para cada componente de la categoría. Estos factores convierten el resultado del análisis del inventario a una unidad común para cada categoría de impacto, agrupando todos los resultados de esa categoría en un único valor. Los factores de caracterización pueden variar en función del método de evaluación que se utilice en esta etapa (de la Rúa Lope, 2009).

En la tablas A3 se muestran las categorías de impacto usadas comúnmente en el ciclo de vida (adaptación de Curran, 2006)

**Tabla A3.** Categorías de impacto usadas comúnmente en el ciclo de vida

CALCULO DE IMPACTO	ESCALA	EJEMPLO DE DATOS ACV (CLASIFICACIÓN)	POSIBLE FACTOR DE CARACTERIZACIÓN COMÚN	DESCRIPCIÓN DEL FACTOR DE CARACTERIZACIÓN
Calentamiento global	Global	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) Metano (CH <sub>4</sub> ) Clorofluorocarbonado (CFCs) Hidroclorofluorocarbonados (HCFCs) Bromuro de metilo (CH <sub>3</sub> Br)	Calentamiento global potencial	Convierte los datos de IVC a dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) equivalentes
Agotamiento del ozono estratosférico	Global	Clorofluorocarbonados (CFCs) Hidroclorofluorocarbonados (HCFCs) Halons Bromuro de metilo	Agotamiento potencial del ozono	Convierte los datos del ICV triclorofluorometano (CF(-11)) equivalentes
Acidificación	Regional Local	Óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> ) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) Acido clorhídrico (HCl) Acido fluorhídrico (HF) Amoniaco (NH <sub>4</sub> )	Acidificación potencial	Convierte los datos del ICV a ion hidrogeno (H <sup>+</sup> ) equivalentes
Eutrofización	Local	Fosfato (PO <sub>4</sub> ) Oxido de nitrógeno (NO)	Eutrofización potencial	Convierte los datos del ICV a fosfatos

CALCULO DE IMPACTO	ESCALA	EJEMPLO DE DATOS ACV (CLASIFICACIÓN)	POSIBLE FACTOR DE CARACTERIZACIÓN COMÚN	DESCRIPCIÓN DEL FACTOR DE CARACTERIZACIÓN
		Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) Nitratos Amoniac (NH <sub>4</sub> )		(PO <sub>4</sub> ) equivalentes
Smog foto químico	Local	Hidrocarburos no metílicos	Creación potencial de foto químicos	Convierte los datos del ICV a etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ) equivalente
Toxicidad terrestre	Local	Químicos tóxicos con una concentración letal reportada a roedores	LC <sub>50</sub>	Convierte los datos LC <sub>50</sub> a equivalentes
Toxicidad acuática	Local	Químicos tóxicos con una concentración letal reportada a peces	LC <sub>50</sub>	Convierte los datos LC <sub>50</sub> a equivalentes
Salud humana	Global Regional Local	Emisiones totales al aire, agua y suelos	LC <sub>50</sub>	Convierte los datos LC <sub>50</sub> a equivalentes
Agotamiento de recursos	Global Regional Local	Cantidad de minerales utilizados Cantidad de combustibles fósiles utilizados	Agotamiento potencial de los recursos	Convierte los datos del ICV a una proporción de la cantidad de recursos utilizados frente a una cantidad de recursos en reserva
Uso del suelo	Global	Cantidad depositada en un	Disponibilidad	Convierte la masa

CALCULO DE IMPACTO	ESCALA	EJEMPLO DE DATOS ACV (CLASIFICACIÓN)	POSIBLE FACTOR DE CARACTERIZACIÓN COMÚN	DESCRIPCIÓN DEL FACTOR DE CARACTERIZACIÓN
	Regional Local	vertedero u otras modificaciones del suelo	de tierra	de los residuos sólidos en volumen usando una densidad estimada
Uso del agua	Regional Local	Agua usada o consumida	Escasez de agua potencial	Convierte los datos del ICV a una relación de la cantidad de agua utilizada comparada con la cantidad de recursos en reserva

**Tabla A4.** Categorías de impacto y Variables Asociadas

<b>IMPACTOS GLOBALES</b>	
CALENTAMIENTO GLOBAL	→ Derretimiento de los polos, pérdida de humedad en el suelo, estaciones más largas, pérdida/cambio de los bosques y cambio en los patrones del viento y del mar
AGOTAMIENTO DEL OZONO	→ Aumento de la radiación ultravioleta
AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS	→ Disminución de recursos para futuras generaciones
<b>IMPACTOS REGIONALES</b>	
SMOG FOTOQUIMICO	→ "Smog" disminución de la visibilidad, irritación de los ojos, irritación de os pulmones y las vías respiratorias, y daños a

	la vegetación
ACIDIFICACIÓN	→ Corrosión de las construcciones, acidificación del agua, del cuerpo, efectos en la vegetación y efectos en el suelo
<b>IMPACTOS LOCALES</b>	
SALUD HUMANA	→ Incremento en la morbilidad y la mortalidad
TOXICIDAD TERRESTRE	→ Disminución de la producción y la biodiversidad, y la disminución en la fauna silvestre para la caza o la visualización
TOXICIDAD ACUÁTICA	→ Disminución de plantas acuáticas y producción de insectos y biodiversidad, disminución de la pesca local comercial o recreativa
EUTROFIZACIÓN	→ Nutrientes (fosforo y nitrógeno) entran en los cuerpos de agua, como lagos, estuarios y las corrientes de movimiento lento, causando un crecimiento excesivo de las plantas y agotamiento del oxígeno
USO DE LA TIERRA	→ Pérdida del hábitat para la fauna terrestre y el espacio para vertederos
USO DEL AGUA	→ Pérdida del agua disponible de fuentes subterráneas y superficiales

Si el objetivo del estudio es además identificar la importancia relativa de cada categoría de impacto con respecto al resto de categorías, se lleva a cabo la ponderación de los resultados ya normalizados. De esta forma, se puede finalmente obtener un único valor como resultado, suma de todos los resultados ponderados de cada categoría.

Existe un gran número de métodos de impacto aplicables a los ACV. La elección del método más apropiado para el estudio debe estar condicionada al objetivo y alcance del mismo así como a la audiencia a la que va dirigido.

### **Interpretación del ciclo de vida**

En esta fase se analizan los resultados de las etapas anteriores así como todos los supuestos e hipótesis que se han realizado a lo largo del estudio.

El último paso de la etapa de interpretación es la formulación de conclusiones y de recomendaciones. Éstas se harán teniendo en cuenta la audiencia a la que va dirigido el estudio y basadas en los resultados obtenidos en las etapas previas.

## **ANEXO B. FUNDAMENTOS DE LA HIGUERILLA [2, 28,54]**

La higuera cuyo nombre científico es *Ricinus communis* Linnaeus pertenece a la Familia Euphorbiaceae la cual es reconocida como una de las más extensas y controvertidas de las Angiospermas, con más de 300 géneros y 5000 especies, ubicándose la mayoría de ellas en América y África tropical (Bittner, M., Alarcón, J., Aqueveque, P. et al., 2001).

### **Características Botánicas de la Higuera (*Ricinus communis* L.)**

La higuera es una planta herbácea de porte arbustivo, ligeramente leñosa, con tallos y ramas huecas por dentro, de color verde claro a azul-grisáceo, en ocasiones rojiza. (Pabón Garcés. 2009)

**Hojas:** son alternas, pecioladas, palmeadas con 7 a 11 lóbulos, dentadas, con nerviación palmatinervia en forma de palma. Miden hasta 50 cm de longitud

**Flores:** están dispuestas en grandes inflorescencias, erguidas, que rematan los tallos; en la parte inferior de las mismas están las flores masculinas, las flores femeninas de 4 a 8 mm de largo, se encuentran en la parte superior de la panícula (Leal Alvarado. 2009).

**Frutos:** es una cápsula trilocular que contiene una semilla por lóbulo (tricoco), de 1.5 a 2.5 cm de largo, exteriormente está recubierto por espinas o púas no punzantes, cortas y gruesas.

**Semilla:** es oval, de tamaño variable entre 5 y 20 mm según variedades, tiene una cubierta dura y quebradiza exterior y otra inferior muy fina de color blanquecino. La semilla contiene toxinas que son ricina (albúmica) y la ricenina (alcaloide) las

cuales quedan en el bagazo o torta que sobra en la extracción del aceite. (Pabón Garcés. 2009; Leal Alvarado.2009).

La ficha técnica de la semilla utilizada se encuentra en la Tabla B1

Tabla B1: Ficha técnica de la higuerrilla Negra seleccionada. Fuente: Higueroil, 2011

 PBX: (57) 4 2352470 Carrera 72 N° 32 b 54 Medellín Antioquia <a href="http://www.higueroil.net">www.higueroil.net</a> <a href="mailto:contacto@higueroil.net">contacto@higueroil.net</a>	<h2>Ficha Técnica</h2>	VC/05-99
		Página 1 de 1

### SEMILLA SELECCIONADA DE HIGUERILLA NEGRA

HIGUERILLA NEGRA:

Variedad: VC/05-99

Características: Hasta 52% de aceite se cultiva en clima cálido entre 0 y 1200 msnm

Tiempo de cosecha: 4-5 meses

Cantidad de semilla para ser sembrada por Hectáreas: 2 a 4 kg.

Datos:

<b>NOMBRE:</b>	<b>NEGRA</b>
<b>CODIGO:</b>	VC-05/99
<b>ORIGEN LOTE:</b>	ANTIOQUIA
<b>CONTENIDO DE ACEITE:</b>	50%
<b>SEMILLAS POR KG:</b>	1200 – 1300
<b>PESO POR SEMILLA (GR. PROMEDIO):</b>	0.8
<b>COLOR:</b>	NEGRA
<b>ALTURAS CULTIVABLES:</b>	0 – 1200 MSNM
<b>CICLO VEGETATIVO MEDIO (DIAS):</b>	150
<b>PRODUCTIVIDAD MEDIA (KG./HA/AÑO)</b>	3000
<b>PRODUCTIVIDAD POTENCIAL (KG./HA/AÑO)</b>	5000
<b>FRUTOS:</b>	DEHISCENTES
<b>RECOLECCIÓN:</b>	POR ESTRATOS
<b>PODAS: (NO SON OBLIGATORIAS)</b>	2-3
<b>HÁBITO DE CRECIMIENTOS:</b>	ARBUSTIVO
<b>ALTURA MEDIA DE LA PLANTA (m):</b>	2
<b>TOLERANCIA A LA HUMEDAD:</b>	MEDIA
<b>FORMATO DE LAS SEMILLAS:</b>	OVALADO
<b>TIEMPO DE GERMINACIÓN (DIAS PROM.)</b>	10

**Época de siembra:** En zonas de baja precipitación es necesario sembrar después de las primeras lluvias, mientras que en zonas con lluvias fuertes y prolongadas, la siembra debe efectuarse calculando que la cosecha coincida con tiempo seco. (Mendoza, 1985).

**Cosecha:** Generalmente debe cosecharse cuando los frutos del tercio inferior de los racimos están secos, lo que da lugar a realizar uno a cinco pases de cosecha en todo el ciclo del cultivo (Mendoza 1985).

La recolección de los frutos está determinada en gran parte por la tecnificación del cultivo y la variedad (indehisente o dehisente), sin embargo para que la semilla pueda entrar al proceso productivo debe ser sometida a una etapa de secado y descascarado (Amaya y Becerra, 2008); El secado puede ser natural o mediante secadoras y el descascarado es mediante la máquina descascaradora.

### **Datos agronómicos de la planta de higerilla en el Municipio de Pto López en el departamento del Meta**

Las hectáreas necesarias para el cultivo de higerilla son 22206,6 Ha, para la adecuación de este terreno se utiliza Cal, Fertilizantes, Herbicidas y Plaguicidas, cuyas especificaciones se muestran en la tabla 2.

**Tabla B2.** Agroquímicos para el terreno.

Agroquímicos	Kg/Ha-año	Ton/año
Cal	500	11 103.03
Urea	13.75	305.333325
Triple super fosfato	18.75	416.363625
Cloruro de potasio	13.75	305.333325
Trifluralin	2.73	60.6225438
	L/Ha-año	
Furadán	0.5	11.10303

Fuente: <http://www.fertisuelos.com/index.htm>,

## ACEITE DE RICINO

El aceite de ricino o aceite de castor tiene como característica principal que casi el 90% de su composición corresponde a triglicéridos del ácido ricinoléico, este ácido ricinoléico, se encuentra formando el triglicérido simple denominado triricinoleína ( $C_{3}H_{5}(C_{18}H_{33}O_{3})_{3}$ ) de peso molecular 932 g/gmol (Fig.1)

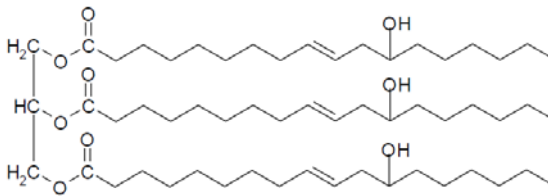


Figura 1: Estructura fundamental del aceite de ricino (Triricinoleína). Fuente. *Montoya 2009*

En la tabla B4 encontramos una serie de propiedades con las que cuenta el aceite de ricino gracias a su composición química (presencia de triglicéridos), entre las se encuentra su elevada densidad u viscosidad.

Entre otras características del aceite de ricino encontramos su solubilidad en alcohol, benceno, cloroformo y bisulfuro de carbono; su resistencia a las 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 B4.** Propiedades del aceite de ricino

Propiedad	Magnitud	Valor Típico
Densidad (15°C)	$0.95 \pm 0.08$ gr/ml	0.96
Viscosidad (40°C)	$297 \pm 1.5$ mm <sup>2</sup> /s	297
Índice de Iodo	$81.8 \pm 1.1$ gr Iodo/100gr	81-91
Índice de Saponificación	$178 \pm 2.3$ mg KOH/gr	180
Índice de acidez	$0.8 \pm 0.015$ mg KOH/gm	1-3
Peso Molecular	$933.32 \pm 5.48$ gr/mol	933
Contenido de material insaponificable	$0.6 \pm 0.007$ % (p/p)	--

*Fuente: Montoya 2009*

## **ANEXO C. EXTRACCIÓN DE ACEITE DE RICINO**

Los métodos más importantes de extracción a nivel industrial son:

- Extracción del aceite por prensado
- Extracción del aceite por prensado y posterior extracción por solventes
- Extracción del aceite por solventes

En países productores de aceite generalmente se usan solo dos de estos sistemas. En el primero se emplea la extracción mecánica o prensado y en el segundo se hace primero la operación por extracción mecánica y luego se extrae por disolventes.

Extracción por prensado y posterior extracción por disolventes:

Prensado

1. Limpieza y precalentamiento.

La semilla se somete a limpieza y clasificación de tamaño por medio de zarandos y luego se precalienta al ponerlas en contacto con aire caliente y alcanzan una temperatura de aproximadamente 60°C. Por aumento de la temperatura disminuye la viscosidad del aceite, dilata las gotas de aceite permeabilizando las paredes celulares, lo cual facilita la salida del aceite y mejora las condiciones y propiedades mecánicas del producto que entra a la prensa.

2. Extracción del aceite por prensado

La semilla entra a una prensa hidráulica tipo expeller (Figura C1), cuyas especificaciones se muestran en la tabla C1. El aceite saliente pasa a través de un filtro sencillo hacia un recipiente de donde se bombea al tanque de almacenamiento y la torta resultante con un porcentaje de aceite de alrededor de 6-9 % es enviada a la extracción por solvente.

### Datos técnicos principales de las prensas grandes de la semilla oleaginosa

MODEL	CAPACITY (T/D)	POWER (KW)	NET WEIGHT (KG)	PACKING(MM)
LYZX18	6-10	37.7	3500	3176*1850*2600
YZL24	20	45	5000	2900*1850*3240
YZL28	40-60	50+11+4	9160	3740*1920*3843
YZL32	90-120	90+11+5.5	11000	4100*2270*3850

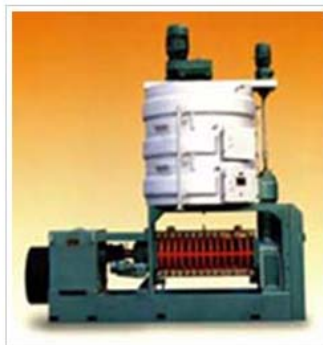
*Fuente: oilseedspress*



YZL-18 Prensa de la semilla oleaginosa



YZL-24 Prensa de la semilla oleaginosa



YZL-28 Prensa de la semilla oleaginosa



YZL-32 Prensa de la semilla oleaginosa

### 3. Extracción por solvente

Es la extracción del aceite residual por solvente se realiza utilizando hexano el cual disuelve el aceite separándolo, en un sistema en contracorriente de varias etapas formando la miscela (aceite y solvente) de la que posteriormente, una vez

separado del residuo extraído, se obtiene el aceite por evaporación del disolvente; el disolvente evaporado se condensa y vuelve a aprovecharse. La torta pasa a ser el afrecho procedente de la extracción por solvente la cual contiene menos del 0.5 % de aceite.

#### 4. Procesamiento del afrecho

El afrecho se pone con 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 enfriado con aire y enviada a la sección de almacenamiento para su posterior utilización como abono orgánico para el cultivo de higuera.

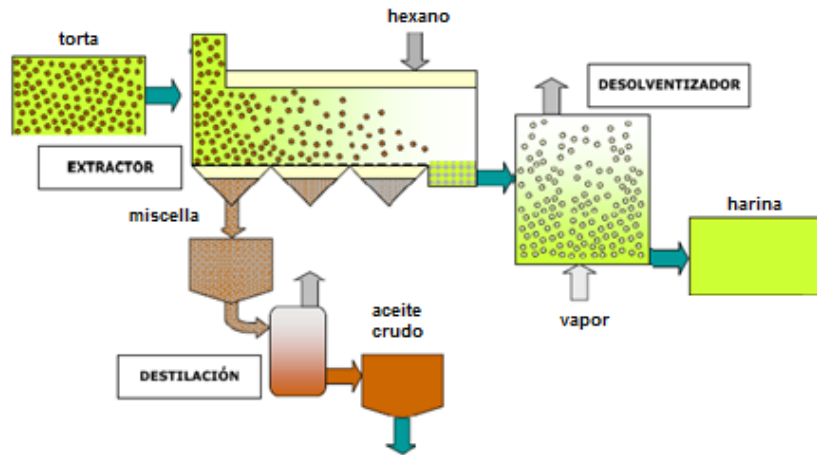
#### 5. Recuperación del aceite crudo

El aceite contenido en la miscela es recuperado mediante la utilización de evaporadores múltiples dando un aceite de ricino crudo con pequeñas trazas de hexano y agua.

#### 6. 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. Así el solvente recuperado (fase liviana) es bombeado al tanque de almacenamiento de hexano puro, mientras que la fase pesada (agua) es bombeada a la sección de tratamiento de agua de la planta.

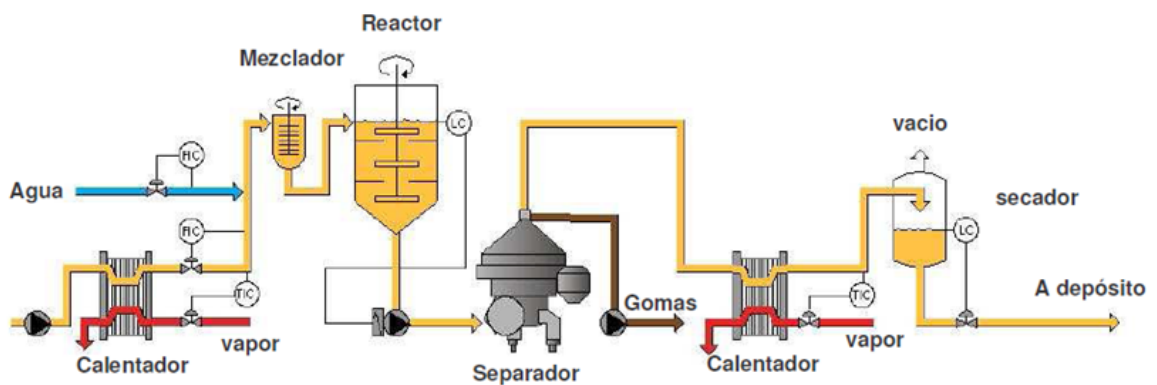
**Figura C2.** Extracción por solvente



1. 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 gomias hidratadas en una centrífuga. Las gomias colectadas en la fase acuosa son separadas del agua y retornadas el procesamiento de la harina Figura C3.

**Figura C3.** Desgomado del aceite



## ANEXO D. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN

A continuación se muestra las condiciones de operación para cada uno de los equipos utilizados en la simulación del proceso de producción de biodiesel.

Tabla D1. Mezclador MIX-102 usado en la simulación de la producción de Biodiesel.

MIX-102		
Product Molar Flow	149.9	kgmole/h
Product Mass Flow	7065	kg/h
Product Volume Flow	8.757	m3/h
Product Temperature	94.20	C
Product Pressure	101.3	kPa
Equalize Pressures	No	

Fuente: Elaborado por los autores a partir de Aspen Hysys 2006.5

Tabla D2. Mezclador Mix-100 usado en la simulación de la producción de Biodiesel.

MIX-100		
Product Molar Flow	14.92	kgmole/h
Product Mass Flow	1.031e+004	kg/h
Product Volume Flow	10.72	m3/h
Product Temperature	25.00	C
Product Pressure	101.3	kPa
Equalize Pressures	No	

Fuente: Elaborado por los autores a partir de Aspen Hysys 2006.5

Tabla D3. Reactor CSTR-100 usado en la simulación de la producción de Biodiesel.

CSTR-100		
Separator Type		
Vessel Temperature	92.76	C
Vessel Pressure	101.3	kPa
Vapour Molar Flow	0.0000	kgmole/h
Liquid Molar Flow	164.9	kgmole/h
Heat Flow	0.0000	kJ/h

Fuente: Elaborado por los autores a partir de Aspen Hysys 2006.5

**Tabla D4.** Separador flash V-100 usado en la simulación de la producción de Biodiesel.

V-100		
Vapour Molar Flow	117.4	kgmole/h
Liquid Molar Flow	47.46	kgmole/h
Vessel Temperature	210.0	C
Vessel Pressure	101.3	kPa
Liquid Percent Level	50.00	%

Fuente: Elaborado por los autores a partir de Aspen Hysys 2006.5

**Tabla D5.** Mezclador MIX-101 usado en la simulación de la producción de Biodiesel.

MIX-101		
Product Molar Flow	117.4	kgmole/h
Product Mass Flow	5567	kg/h
Product Volume Flow	6.873	m <sup>3</sup> /h
Product Temperature	210.0	C
Product Pressure	101.3	kPa
Equalize Pressures	No	

Fuente: Elaborado por los autores a partir de Aspen Hysys 2006.5

**Tabla D6.** Reactor CRV-100 usado en la simulación de la producción de Biodiesel.

CRV-100		
Separator Type		
Vessel Temperature	39.04	C
Vessel Pressure	101.3	kPa
Vapour Molar Flow	0.0000	kgmole/h
Liquid Molar Flow	50.99	kgmole/h
Heat Flow	0.0000	kJ/h

Fuente: Elaborado por los autores a partir de Aspen Hysys 2006.5

**Tabla D7.** Separador de fases V-101 usado en la simulación de la producción de Biodiesel.

V-101		
Vapour Molar Flow	0.0000	kgmole/h
Liquid Molar Flow	49.22	kgmole/h
Vessel Temperature	39.04	C
Vessel Pressure	101.3	kPa
Liquid Percent Level	50.00	%

Fuente: Elaborado por los autores a partir de Aspen Hysys 2006.5

**Tabla D8.** Torre de extracción L-L T-102 usado en la simulación de la producción de Biodiesel.

T-102		
Overhead Stream Pressure	101.3	kPa
Overhead Stream Vapour Fraction	0.0000	
Bottoms Stream Pressure	101.3	kPa
Bottoms Stream Vapour Fraction	0.0000	

Fuente: Elaborado por los autores a partir de Aspen Hysys 2006.5

**Tabla D9.** Válvula VLV -100 usado en la simulación de la producción de Biodiesel.

VLV-100		
Molar Flow	34.43	kgmole/h
Pressure Drop	100.5	kPa
Feed Pressure	101.3	kPa
Percentage open	50.00	%

Fuente: Elaborado por los autores a partir de Aspen Hysys 2006.5

Tabla D9. Torre de destilación T-100 usado en la simulación de la producción de Biodiesel.

T-100		
Convergence	Converged	
Number of Trays	10.00	
Temperature (Temperature_1)	243.6	C
Pressure (Pressure_1)	0.8000	kPa
Molar Flow (Molar Flow_1)	34.43	kgmole/h

Fuente: Elaborado por los autores a partir de Aspen Hysys 2006.5





