

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A
PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA (ESCENARIO 1: CULTIVO EN
SABANA DE TORRES, ESTERIFICACIÓN EN MEDIO ÁCIDO Y CON
METANOL)**

**MARÍA DEL PILAR GÓMEZ OLACHICA
LIBIA MIRITH ZURIQUE NARVÁEZ**

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

2009

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A
PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA (ESCENARIO 1: CULTIVO EN
SABANA DE TORRES, ESTERIFICACIÓN EN MEDIO ÁCIDO Y CON
METANOL)**

**MARIA DEL PILAR GOMEZ OLACHICA
LIBIA MIRITH ZURIQUE NARVÁEZ**

**Trabajo Presentado como Requisito para Optar al Título de
Ingeniero Químico**

Director

Ingeniero Químico Ph. D

VIATCHESLAV KAFAROV

Codirectora

PAOLA ANDREA ACEVEDO P

Ingeniera Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2009

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	3
1.1 PROBLEMÁTICA	3
1.2 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN	3
1.2.1 Descripción	3
1.2.2 Metodología	4
1.2.2.1 Objetivo y Alcance del estudio	5
1.2.2.2 Inventario (ICV)	7
1.2.2.3 Análisis del Impacto (AICV)	7
1.2.2.4 Interpretación	7
2. ESCENARIO PROBLEMA	8
2.1 MUNICIPIO SABANA DE TORRES	8
2.1.1 Geografía	8
2.1.2 Accesibilidad	8
2.1.3 Economía	9
2.2 HIGUERILLA	9
3. PLANTEAMIENTO DEL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO	10
3.1 ACTIVIDAD AGRÍCOLA E INTEGRACIÓN DE CICLOS BIOGEOQUÍMICOS	10
3.1.1 Cultivo	10
3.1.2 Cosecha	11
3.1.3 Integración de ciclos biogeoquímicos	12
3.2 EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE RICINO	12
3.3 TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO	13
3.4 DISTRIBUCIÓN Y USO DEL COMBUSTIBLE	14
4. RESULTADOS	16
5. EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	17
5.1 SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DE CATEGORÍAS DE IMPACTO	17
5.2 CLASIFICACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	18

5.3 CARACTERIZACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	19
6. CONCLUSIONES	24
7. RECOMENDACIONES	25
BIBLIOGRAFÍA	26
ANEXOS	29

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fases del ACV de acuerdo a la ISO 14040	5
Figura 2. Diagrama de los procesos implicados en el sistema de estudio	6
Figura 3. Esquema del ciclo de vida de la producción de Biodiesel de Higuera	10
Figura 4. Perfil medioambiental para el ACV	20
Figura 5. Emisiones consideradas para la categoría de cambio Climático	21
Figura 6. Emisiones consideradas para la categoría de acidificación	21
Figura 7. Emisiones consideradas para la categoría de eutrofización	22
Figura 8. Emisiones consideradas para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos	22
Figura 9. Emisiones consideradas para la categoría de efectos Respiratorios	23

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores de asignación másica para la extracción	13
Tabla 2. Factores de asignación másica para transesterificación	14
Tabla 3. Resultados obtenidos para el análisis de inventario	16
Tabla 4. Categorías de impacto	18
Tabla 5. Asociación de las diferentes emisiones a las categorías de Impacto	18

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Sistemas de evaluación ambiental de procesos y productos	29
Anexo B. Fundamentos de la higuera	47
Anexo C. Extracción del aceite de higuera	54
Anexo D. Proceso de producción del aceite de higuera	59
Anexo E. Integración de los ciclos biogeoquímicos	75
Anexo F. Emisiones de la combustión	78
Anexo G. Resultados detallados del análisis de ciclo de vida	80

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE HIGUERILLA (ESCENARIO 1: CULTIVO DE SABANA DE TORRES, ESTERIFICACIÓN EN MEDIO ÁCIDO Y CON METANOL)*

AUTOR: María del Pilar Gómez Olachica, Libia Mirith Zurique Narváez**

PALABRAS CLAVE: Análisis del ciclo de vida, biodiesel a partir de aceite de higuera, catálisis homogénea ácida, impacto ambiental.

DESCRIPCIÓN: Debido al carácter no renovable de los combustibles fósiles, se realiza una búsqueda de nuevas fuentes alternativas, que reduzcan las consecuencias medioambientales producidas por el uso de este tipo de combustibles. Por ello se implementan metodologías de evaluación, para conocer el impacto ambiental que estas nuevas medidas producen.

En este estudio trabajamos con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), metodología que identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. Asociándose para tal fin, los flujos de entrada y salida de todos los procesos y sustancias involucradas en el ciclo de vida de un producto, teniendo en cuenta desde las materias primas hasta su disposición final. Avanzando hacia un enfoque recientemente propuesto denominado “de la cuna a la cuna”, aplicado al proceso.

Se evalúan los impactos ambientales generados en la producción del biodiesel teniendo en cuenta que un porcentaje de los residuos vertidos al medio ambiente son fijados por la naturaleza por los diferentes ciclos biogeoquímicos. Estudiando, etapas de cultivo, transformaciones industriales, uso como biocombustible y disposición de residuos, integrado con los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza, identificándose finalmente 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 evaluadas para la producción de 80.000 ton/año de biodiesel a partir de aceite de higuera usando catálisis ácida homogénea durante el tiempo horizonte del ACV son las siguientes: 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.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingeniería Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Viatcheslav Kafarov PhD. Codirectora: Paola Acevedo.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR THE PRODUCTION OF BIODIESEL FROM CASTOR OIL (SCENARIO 1: HARVEST AT SABANA DE TORRES, ESTERIFICACION WITH METHANOL IN ACID ENVIRONMENT)*

AUTOR: María del Pilar Gómez Olachica, Libia Mirith Zurique Narváez**

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

DESCRIPTION: Because of the non-renewable character of the Fossil fuel, it starts a hardly research on new alternative energy sources, to reduce environmental impacts due to the use of those kind of fuels. Therefore assessment methodologies are implemented to find the environmental impact that these new measures produce.

In this study we worked with the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to identify, quantify and describe the possible environmental impacts, relate to each cycle life's step of a product. Relate to this purpose, the input and output flows of all processes and substances involved in the product's life-cycle, taking into account the raw materials to its final disposal. Moving to a recently proposal called "cradle to cradle", applied to the process.

Evaluating the environmental impacts of biodiesel production taking into account that a percent of the waste threw away to the environment are taken for the nature due to the different biogeochemical cycles. Farming steps, industrial transformations, use as a biofuel and the waste's disposition are studied, relate to the biogeochemical cycles made by nature, identifying the process's steps where the consumption of energy and the emissions to the environment were the most important, through the category indicators calculation.

The impact categories evaluate to the production of 80.000 ton/year of biodiesel from castor oil using homogeneous acid catalysis during the horizon time of ACV are: climate variation, acidification, eutrophication, photochemicals oxidants formation, respiratory effects and non-renewable energy. Showing as a result, the environmental profile from which are set out the solutions aimed at the consumption decrease of energy and emissions generated by the Biodiesel Life-cycle.

*Degree work.

**Physical-Chemical Faculty. Chemical Engineering Department. Director: Viatcheslav Kafarov PhD. Codirectora: Paola Acevedo

INTRODUCCIÓN

Los recursos naturales son ampliamente aprovechados por el hombre pero solo se convierten en riquezas cuando son explotados racionalmente y de esta manera no solo sirven para satisfacer las necesidades de la población actual sino que también, si se tienen los cuidados adecuados, pueden mantenerse y en caso de los recursos renovables incluso aumentar. La situación ambiental en estos momentos hace que el hombre tenga que tomar medidas urgentes debido al gran deterioro del medio ambiente, que se ha dado al acelerar los procesos de contaminación del suelo por el auge del desarrollo de la industria, la explotación desmedida de los recursos naturales y el crecimiento demográfico.

Aunque los problemas ambientales se dan en diferentes ámbitos, la gran mayoría de las veces poseen un factor común: los combustibles fósiles; sus subproductos originados de la combustión han causado gran cantidad de daños medio ambientales alertando de esta manera a la comunidad científica internacional, aún así este tipo de combustibles son de gran importancia debido a la incesante demanda energética mundial. Es por esto, y con la intención de tomar medidas antes de su total agotamiento que se encuentra en desarrollo la búsqueda de nuevas alternativas que sean benévolas con el medio ambiente.

Con el consumo de biodiesel reducimos el nivel de emisiones de dióxido de carbono, dióxido de azufre; se disminuye la concentración de partículas en suspensión emitidas de metales pesados, de monóxido de carbono, de hidrocarburos aromáticos policíclicos y de compuestos orgánicos volátiles. Trayendo a su vez, ventajas socioeconómicas, constituyéndose en una alternativa para tierras agrícolas ociosas, y un potencial para la reforestación; de esta manera se fomentará el trabajo rural y la creación de industrias agrarias. El método del Análisis del Ciclo de Vida trata de identificar la totalidad de las corrientes de entrada y salida posibles que se desarrollan durante un proceso determinado, empezando desde la producción de la materia prima

hasta la disposición final de los desechos generados a lo largo de todo el proceso, convirtiéndose de esta manera en uno de los aspectos claves para la sostenibilidad de los programas y para la competitividad de los productos en los mercados internacionales. Al enfocarlo hacia los Biocombustibles se busca la protección de los ecosistemas, la reducción de emisiones reguladas, tóxicas, la seguridad energética del país, y el bienestar social de las personas de las áreas rurales en donde se implementen los proyectos. El análisis del Ciclo de Vida cuantifica emisiones, pero el impacto real de esas emisiones dependen de cuando, donde y como se liberan en el medio ambiente, es decir del escenario de las emisiones y de los consumos medio ambientales. Pero al considerarse un enfoque como el que se presenta “desde la cuna a la tumba” se asume que la naturaleza procesa las emisiones, y descargas a la vez que continua suministrando los insumos ambientales para el sistema.

Asegurar que la naturaleza puede tomar como insumos las descargas del sistema productivo y contando o no con ellos, pueda seguir siendo fuente sostenible de los suministros naturales para el sistema productivo, es base de una nuevo enfoque denominado “de la cuna a la cuna” el cual se desarrollara en el presente trabajo de grado, en la evaluación del Biodiesel a base de higuierilla, la cual es una semilla de cultivo en zonas tropicales, como nuestro país y que se encuentra mayoritariamente asociado con las malezas, pero que tiene un gran potencial como cultivo ya que si es tecnificado sería relativamente sencillo y económico de producir.

1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

1.1 PROBLEMÁTICA

La preocupación general por el carácter no renovable de los combustibles fósiles y su alta participación en la contaminación atmosférica, se ha convertido en la fuerza que está impulsando en el mundo la investigación sobre fuentes alternas de combustibles, especialmente fuentes agrícolas.

Cuando se hace análisis de ciclo de vida (ACV) de un producto el objetivo es cuantificar el impacto ambiental por unidad de producto desde cuando se extraen de la naturaleza sus insumos hasta cuando regresan y son procesados por la naturaleza sus desechos y emisiones. El procedimiento es: cuantificar corrientes de entrada tales como energía, materias primas, agua, etc. y las emisiones medioambientales asociadas con el sistema; se tienen también en cuenta los productos intermedios y, por último, el propio producto, incluyendo los residuos generados por su uso. Es importante resaltar que la clásica evaluación o ACV no es una *evaluación de riesgo*, por tanto no tiene en cuenta la exposición, que es un factor esencial para evaluar el riesgo. El ACV cuantifica emisiones, pero el impacto real de esas emisiones depende de cuándo, dónde y cómo se liberen en el medio ambiente, es decir del escenario de las emisiones y de los consumos ambientales. Por otra parte, se considera lo que ocurre *desde la cuna a la tumba* y se considera que la naturaleza cierra el ciclo en cuanto se asume (sin asegurarlo) que la naturaleza procesa las emisiones y descargas y continúa suministrando los insumos ambientales del sistema producido.

1.2 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

1.2.1 Descripción

Con este trabajo de grado se busca plantear la higuierilla como alternativa para la producción de biodiesel con metanol haciendo el análisis del ciclo de vida de

la cuna a la cuna lo que nos permite calcular las emisiones potenciales en cada etapa del proceso y ver que tanto tiempo se necesita para la recuperación del terreno que se utiliza para el cultivo con las condiciones ambientales del municipio de Sabana de Torres para que en estudios posteriores al nuestro se compare la higuera con otras fuentes de biodiesel como, la palma africana para ver cual representa mayores beneficios en términos de sostenibilidad ambiental.

Se toma como base un cultivo en Sabana de Torres; se incluye el cultivo e integración de los ciclos biogeoquímicos, procesos de extracción del aceite, de esterificación y transesterificación para la obtención del biodiesel; se incluyen las etapas de uso del biodiesel en automotores; se incluyen emisiones y descargas de todas las etapas; el ciclo del carbono se cierra con la reincorporación de gases (CO₂) a los cultivos vía fotosíntesis y de los residuos sólidos y aguas residuales; se cuantifican corrientes de energía y entre ellas la de energía solar.

En este trabajo se incluye en los balances lo necesario para que el terreno de partida del cultivo recupere su estado inicial (de la cuna a la cuna del cultivo).

1.2.2 Metodología

Basándonos en lineamientos estipulados en las normas ISO 14040 en relación al análisis del Ciclo de Vida y enfocándonos principalmente en la metodología “de la cuna a la cuna”, podemos dividir en cuatro fases diferentes, secuenciales e iterativas, técnica con la cual podemos aumentar el nivel de detalle a medida que avanzamos en el ACV, como se puede observar en la figura 1.

Aún cuando esta metodología ya se encuentra muy bien explicada en tesis anteriores, es de gran importancia para la buena interpretación del proyecto, el retomarla con un breve resumen que se presenta a continuación, teniendo en cuenta su adaptación a nuestro escenario en particular.



Figura 1. Fases del ACV de acuerdo a la norma ISO 14040

1.2.2.1. Objetivo y alcance del estudio

Como se presenta en el numeral anterior el propósito de nuestro estudio es examinar la sostenibilidad ambiental del sistema de producción de biodiesel a partir del aceite de higuera, utilizando para este fin la técnica de Análisis de Ciclo de Vida mediante la metodología de la cuna a la cuna.

Para la realización de este estudio se toma como unidad funcional una capacidad de producción de la planta de biodiesel que es de 80.000 toneladas/año (aproximadamente 220 toneladas/día). Por otra parte, la evaluación a realizar tendrá como objeto de estudio un escenario definido, es por ello que se hace imperante el establecer límites del sistema y de esta manera poder establecer los sistemas funcionales que deben ser incluidos dentro del ACV, en nuestro caso podemos incluir: La actividad agrícola e integración de los ciclos biogeoquímicos, extracción del aceite de ricino, transesterificación del aceite de ricino y distribución y uso del biocombustible, sistemas que se encuentran representados en la figura.

Estos sistemas se encuentran enmarcados en los siguientes límites:

- **Límites geográficos:** El desarrollo del cultivo así como las plantas extractora de aceite y la planta productora de biodiesel se encuentran ubicadas en el municipio de Sabana de Torres (Santander), pero su distribución abarcará todo el territorio nacional.
- **Límites temporales:** Se tomo como horizonte temporal 60 años, con el fin de servir de punto de comparación con otros estudios que sobre el tema se han hecho a partir de este tipo de cultivos.

- **Límites del proceso:** En este estudio se toma un solo escenario para analizar, el cual se encuentra definido por los siguientes parámetros:
 - Terreno a Cultivar: Sabana
 - Lugar: La Gómez (corregimiento al oeste de la cabecera municipal, de la cual dista 7 Km por carretera).
 - Tipo de Semilla: Semilla de higuierilla negra.

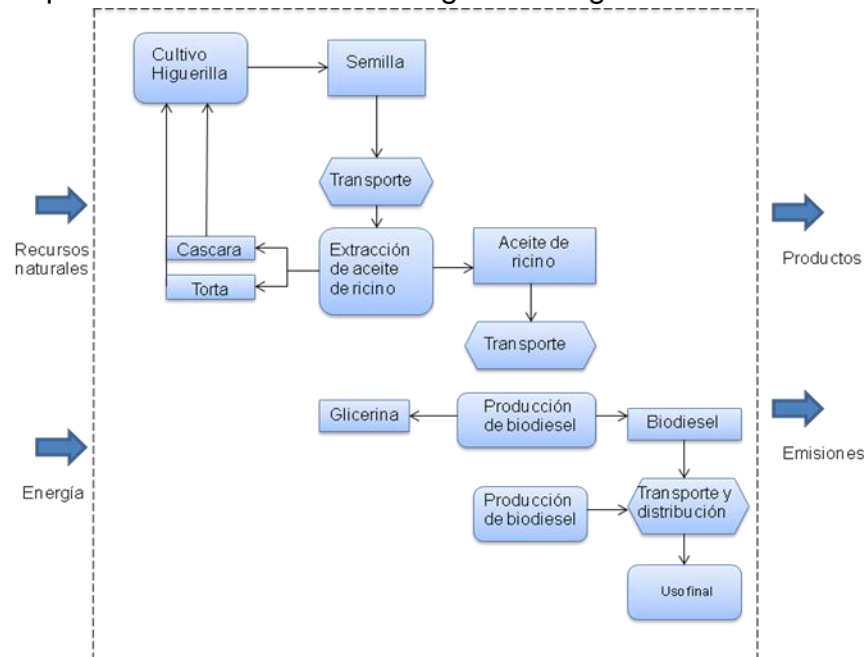


Figura 2. Diagrama de los procesos implicados en el sistema de estudio

Haciendo referencia a los insumos empleados en el proceso diferentes a los provenientes de la cadena de higuierilla, a estos insumos se aplicó una metodología de la cuna a la cuna.

Debido a la dificultad en referencia a la recolección de datos en condiciones locales de algunos impactos ambientales, los mismos no pudieron ser cubiertos en totalidad (consumo y uso del agua). Es importante destacar el uso del 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), para la extracción y transesterificación del aceite, como se recomienda en la norma ISO 14040.

Siguiendo la metodología reportada por Antón (2004), en referencia al estudio y posterior evaluación de los diferentes impactos se tomaron en cuenta las

siguientes categorías: Cambio climático, formación de oxidantes foto-químicos, acidificación, eutrofización, efectos respiratorios y energías no renovables.

Teniendo en cuenta el fin de este estudio, no se desestimaron datos, se procedió a discretizar la información teniendo en cuenta las limitaciones propias del análisis. Se buscaron datos recientes y acordes con la zona geográfica correspondiente, siendo datos extractados de diferentes fuentes esto debido a la relativa dificultad, que se presentó en relación a algunas partes de la investigación.

1.2.2.2. Inventario (ICV)

En esta fase procedemos a reportar los datos de los impactos medioambientales y el consumo de energía de las materias primas y los procesos vinculados en el ciclo de vida del biodiesel obtenido a partir del aceite de higuera.

1.2.2.3. Análisis del Impacto (AICV)

Para poder interpretar los datos del Inventario es necesario hacer una selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelación mediante factores de caracterización, las cuales se encuentran representados en cada sistema funcional a continuación.

1.2.2.4. Interpretación

Es en esta fase del ACV, en la cual se combina los resultados del análisis de inventario con la evaluación de impacto, convirtiéndose sus resultados en las conclusiones y recomendaciones de nuestro proyecto.

2. ESCENARIO PROBLEMA

2.1 SABANA DE TORRES

2.1.1 Geografía

Sabana de Torres es un municipio que se encuentra localizado geográficamente, al noroeste del Departamento de Santander, en la parte media de la línea férrea que comunica a la Ciudad de Bucaramanga con el Municipio de Puerto Wilches, formando parte la mayoría de su territorio de la zona del Valle del Río Magdalena. Limitando con los municipios de Rionegro por el norte, de Lebrija y Girón por el oriente, de Barrancabermeja por el sur y Puerto Wilches por el occidente.

Posee una extensión territorial de 1.428 Km² (IGAC), se tiende a considerar como una zona donde se encontraran tierras planas, pero posee un bioclima propio, con una zona de lomerío intrincada por las características del sustrato. Pasamos después a una zona de Sabana la cual se divide en dos hasta alcanzar el distrito de Magara por el Norte y Sabaneta en las riberas del río Sogamoso por el Sur. En su parte Central se encuentran terrazas, algunas ya disecadas por el uso de sus suelos y por su propia dinámica natural. En la zona más Noroccidental del municipio existe una zona de bajos o inundables que termina en Ecosistemas de Humedales, encontrándose en ella altitudes que oscilan entre 50 y 300 msnm, con rangos de temperatura que fluctúan entre 27°C y 31°C, acompañadas de precipitaciones elevadas, como lo demuestra la precipitación media anual de 2.200 mm, se presenta en la región un alto grado de humedad que se evidencia en el desarrollo de vegetación de selva ecuatorial en la actualidad altamente intervenida.

2.1.2 Accesibilidad

Su principal vía de acceso, corresponde con la Transversal a Barrancabermeja, empalmando con la Troncal del Magdalena Medio, tramo La Fortuna – San Alberto. Posteriormente se encuentra una derivación pavimentada de 5,2 Km

en el sitio llamado La Gómez, terminando en una vía doble pavimentada, este acceso ubica a la cabecera municipal a dos horas promedio de la Ciudad de Bucaramanga.

Existen otros accesos con menos kilometraje, pero al ser vías con especificaciones muy regulares solo se llega a aumentar el tiempo de recorrido, de ellas 180 Km como vías secundarias y 223 Km vías terciarias, se encuentran en regular y mala condición

2.1.3 Economía

En este ámbito el municipio se puede considerar estratégico en su localización por varias razones como lo son la fertilidad de sus tierras, por sus recursos en el subsuelo (hidrocarburos) y principalmente por ser el punto nodal de encuentro de importantes proyectos de infraestructura vial que articulan al país como la Troncal del Magdalena Medio.

2.2 HIGUERILLA

- **Características**

La higuera (Ricinus communis Linnaeus) es un arbusto que pertenece a la familia Euphorbiaceae es un arbusto que generalmente se encuentra en estado silvestre y alcanza 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. En algunas regiones es considerado como maleza por su fácil propagación, crece en lugares rocosos y terrenos abandonados, es resistente a las sequías y es de fácil adaptabilidad, suelos francos (franco – arenosos, franco limosos, franco-arcillosos), con alta humedad, grandes precipitaciones y temperaturas templadas; nos conducen a obtener una mayor cantidad de aceite por semilla.

3. PLANTEAMIENTO DEL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO

En la siguiente figura (Fig. 3) se muestra un esquema general que representa las etapas del ciclo de vida para el biodiesel a base de higuera, incluyéndose adicionalmente el terreno de partida ya que en el enfoque “de la cuna a la cuna” el terreno es de gran importancia debido a que debemos asegurarnos de que recupere su estado inicial, convirtiéndose en un paso obligatorio para el análisis.

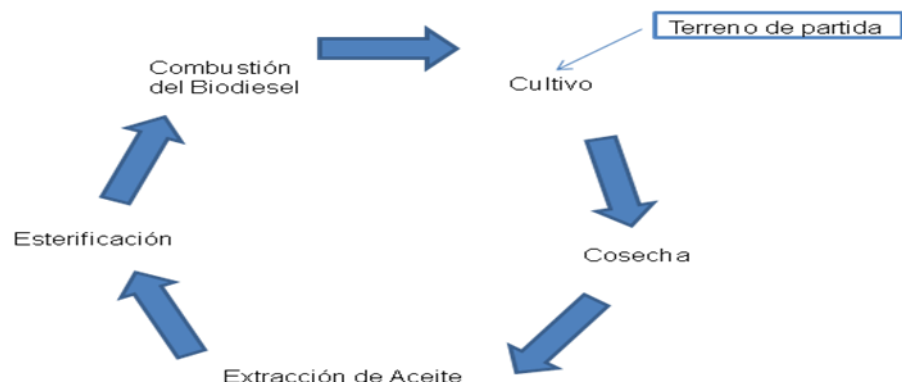


Figura 3. Esquema del Ciclo de Vida de la producción de Biodiesel de Higuera.

3.1. ACTIVIDAD AGRÍCOLA E INTEGRACIÓN DE CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

En esta etapa se encuentran resumidas todas las labores relacionadas con la parte agrícola, debido a su correlación natural durante el tiempo, esto conlleva a que puedan ser tratados como parte de un subsistema, presentándose la identificación y contabilización de los flujos ambientales y energéticos relacionados tanto con la semilla de higuera, con las actividades realizadas (cultivo y cosecha), así como los procesos de producción, y transporte de insumos agrícolas

3.1.1. Cultivo

Aunque es una etapa más del ACV, esta se convierte en el punto de inicio y de llegada, ya que nuestro fin es brindarle al terreno la posibilidad de regresar a

su estado inicial después de efectuarse el ciclo de producción del producto, cerrando de esta manera los ciclos desde la cuna de partida hasta recuperar esa cuna.

Con tal fin se tienen en cuenta algunas consideraciones principales, en referencia a nuestro escenario en particular:

- ✓ Se tomo como punto de partida un terreno considerado como terrazas bajas, con una fertilidad alta, un porcentaje medio de materia orgánica, pH de 5.5, baja cantidad de fosforo, ácidos y de textura franco arenosa, en el cual no se presento rotación con otro cultivo.
- ✓ Se comenzó a plantar al inicio de la época de lluvias, sembrándose de forma mecanizada garantizándose de esta manera una semilla por hoyo, a una profundidad de 4 cm, dándose su germinación en un ciclo de 10 días en promedio. Se hace un raleo manual a los 30 días después de la germinación y se hace la recolección de semillas de forma manual.
- ✓ En relación a los fertilizantes se tomaron los siguientes valores (25-25-25 Kg*ha⁻¹ de NPK) siendo el nitrógeno fraccionado en 15 Kg en el momento de la siembra y 10 Kg aplicados a los 45 días posteriores a la germinación. Su transporte se hizo en camiones desde la ciudad de Cartagena hasta el terreno, recorriendo una distancia de 629 Km.
- ✓ La cal necesaria para el terreno se obtiene cerca de nuestra ubicación, es decir se consigue también en el departamento de Santander, a 110 Km de nuestra ubicación.
- ✓ Para el cultivo de higuierilla, no se tienen productos específicos en relación al uso de agroquímicos (herbicidas, pesticidas, insecticidas...etc.), por ende no se encuentran gran cantidad de datos (Audsley 2003) y los pocos encontrados indican que su aporte es mínimo (De Costa et.al., 2005).

3.1.2. Cosecha

Se cosecha a los 150 días, tomamos en cuenta que todos los frutos se encuentren secos, esta se hace cortando los racimos con cuchillos afilados, en horas de la mañana. Por ser una semilla dehiscente se desgrana naturalmente

con el secado al sol y después con ayuda de la ventilación y a mano se termina de limpiar la semilla

3.1.3 Integración de ciclos biogeoquímicos

Existe un porcentaje de residuos vertidos al medio ambiente los cuales son fijados en la naturaleza debido a los diferentes ciclos biogeoquímicos. De estos ciclos los que revisten mayor importancia para nuestro proceso en su etapa de cultivo son el ciclo del carbono y del nitrógeno. (Ver anexo E).

3.2 EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE RICINO

En esta etapa se presenta los flujos de materia y energía relacionados con el proceso de obtención del aceite refinado a partir de las semillas de higuierilla, así como las emisiones debidas a la producción y transporte de las materias primas correspondientes.

Para poder llevar a cabo una extracción inicialmente compuesta por un prensado y seguida de una extracción por solvente, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones en el proceso:

- ✓ No se toma en cuenta el sistema de descascarado debido al carácter dehiscente de nuestra semilla.
- ✓ Las semillas que vienen del cultivo son transportadas hacia la planta procesadora en camiones de 15,5 ton de capacidad, en una distancia promedio de 45 Km.
- ✓ El hexano usado en la extracción fue transportado desde la ciudad de Barrancabermeja a una distancia de 63 Km.
- ✓ Los requerimientos energéticos del precalentador y la prensa (tipo expeller) fueron escalados basándonos en Barragán y Cepeda, 1979 y Global Extent, respectivamente.
- ✓ En relación a la extracción por solvente se toma como referencia el proceso reportado por Sheejan J. et. Al., 1998; incluyendo la extracción del aceite, el

procesamiento de la torta, la recuperación del aceite y la recuperación del solvente.

- **Aplicación de las reglas de asignación**

Además del aceite de ricino refinado, en la etapa de extracción también se da como resultado algunos co-productos que también poseen un porcentaje de participación en las emisiones y en el consumo energético evaluado mediante la asignación másica. Estos factores de asignación para la extracción se presentan en la tabla 1, a continuación.

Sustancia	%
Aceite ricino refinado	58.55
Torta	41.45
Total	100

Tabla 1. Factores de asignación másica para la extracción

3.3 TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE RICINO

Nuestro proceso se fundamenta en la transesterificación del aceite de ricino con metanol en presencia de ácido sulfúrico como catalizador, la cual da como resultado metilricinoleato (biodiesel) y glicerina (ver anexo C). Para esta etapa nos concentramos en las corrientes másicas y energéticas así como las cargas ambientales relacionadas con el proceso de transformación, transporte y fabricación de materias primas.

Para la estimación del impacto del proceso de obtención de biodiesel debemos tener en cuenta varias consideraciones, presentadas a continuación.

- ✓ Los requerimientos de materias primas se calcularon a partir de la simulación Hysys® 3.2 para una planta de producción de Biodiesel de 80.000 ton/año.
- ✓ En relación a las materias primas el metanol utilizado requiere su importación, es por este hecho que se considera únicamente las emisiones

causadas por su transporte dentro los límites del país. El metanol es transportado desde la ciudad de Barranquilla a 670 Km, en cisternas con una capacidad de 15.000 L.

- ✓ los datos de entrada necesarios para la simulación realizada en Hysys® 3.2. para la etapa de obtención del biodiesel fueron el resultado del análisis de una serie de estudios entre los cuales se puede destacar: West et al.,2008; Zięba et al., 2007; y França et al., 2009.
- ✓ Para obtener Biodiesel a partir de aceite de higuera, se emplea esterificación y transesterificación simultaneas, en medio ácido, con ácido sulfúrico como catalizador utilizándose para la reacción alcohol metílico.

- **Aplicación de las reglas de asignación**

En la reacción llevada a cabo en la obtención del biodiesel, tenemos como resultado productos secundarios como la glicerina y los ácidos grasos, estos contribuyen a las cargas ambientales y a los requerimientos energéticos del proceso. Es por esta contribución que se hace imperante el uso de la asignación másica como sistema de asignación, los factores de asignación hallados se muestran en la tabla 2

Sustancia	%
Biodiesel	91.23
Glicerina	8.53
Ácidos Grasos	0.24
Total	100

Tabla 2. Factores de asignación másica para la transesterificación

3.4 DISTRIBUCIÓN Y USO FINAL DEL COMBUSTIBLE

Pasamos a la última etapa del ciclo de vida, la combustión. Como referencia tomamos una mezcla 10% v y 90% v diesel de hidrocarburos, logrando de esta

manera una disminución en las emisiones de CO₂ a la atmósfera, al ser utilizado en vehículos de carga pesada.

Como limitantes para esta etapa encontramos:

- ✓ El biodiesel producido es transportado hasta Bogotá a 399 Km de distancia del cultivo, este es el lugar de almacenamiento, es llevado en cisternas de 15.000 L donde se mezcla con el diesel de origen fósil para poder 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 biodiesel se aplicaron los modelos propuestos por EPA, 2002 (ver anexo F).

4. RESULTADOS

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos en el análisis llevado a cabo para cada etapa del ciclo de vida, en busca de contabilizar los diferentes impactos en el tiempo horizonte del ACV.

Etapa		Adecuación del terreno e integración de los ciclos	Extracción del aceite de ricino	Transesterificación del aceite	Distribución y uso del biocombustible	Total
EMISIONES EN EL AIRE [kg]	Hydrocarburos	1,945E+06	5,859E+06	1,350E+05	2,844E+08	2,924E+08
	CO	4,974E+06	2,132E+07	2,375E+06	9,970E+08	1,026E+09
	NO2	2,518E+07	5,237E+07	2,756E+07	1,926E+09	2,031E+09
	PM10	1,881E+06	5,018E+06	6,920E+04	2,360E+08	2,430E+08
	SO2	2,142E+06	3,410E+07	6,258E+07	8,590E+08	9,578E+08
	CH4	5,118E+05	1,426E+07	2,327E+07	1,752E+08	2,133E+08
	N2O	3,232E+06	1,144E+05	1,608E+05	1,134E+07	1,485E+07
	CO2	-2,071E+11	8,673E+09	9,403E+09	2,243E+11	3,525E+10
	Hydrocarburos (sin especificar)	1,147E+05	2,594E+05	2,194E+05	2,288E+08	2,294E+08
	Benceno	1,369E+02	2,279E+01	9,471E+00	1,675E+05	1,676E+05
	Formaldehidos	2,680E+03	3,003E+02	1,271E+02	9,177E+05	9,208E+05
	Particulas (sin especificar)	1,762E+05	2,670E+07	3,765E+07	1,404E+08	2,049E+08
	HCl	5,430E+03	1,023E+06	1,444E+06	3,394E+06	5,866E+06
	HF	8,657E+02	1,278E+05	1,805E+05	5,268E+05	8,359E+05
	NH3	2,204E+06	4,118E+02	9,834E+00	1,174E+05	2,321E+06
EMISIONES EN EL AGUA [kg]	DBO5	8,216E+04	9,938E+04	3,834E+04	1,572E+08	1,574E+08
	DCO	1,446E+03	4,355E+03	3,243E+05	1,330E+09	1,330E+09
	Metales (sin especificar)	1,487E+04	1,647E+04	3,202E+03	6,185E+06	6,220E+06
	Amonia (como N)	1,153E+04	1,621E+03	9,402E+03	2,298E+07	2,300E+07
	Nitratos (NO3)	9,498E+00	8,217E+05	2,506E+03	4,952E+03	8,291E+05
	Agroquimicos (sin especificar)	0,000E+00	0	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
ENERGÍA (MJ)	Energía Primaria	5,211E+10	9,298E+13	1,681E+11	1,030E+13	1,035E+14
	Energía Fósil	2,821E+10	9,008E+13	1,640E+11	1,030E+13	1,006E+14

Tabla 3. Resultados obtenidos para el análisis de inventario.

Los datos obtenidos de los balances de masa y energía se llevaron a la hoja de cálculo en Excel[®] donde se cuantificaron las variables de estudio, para cada una de las etapas del ciclo de vida de nuestro producto, estos resultados se resumen en la anterior tabla

5. EVALUACIÓN 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. A continuación en este capítulo, se seleccionan, clasifican y caracterizan los resultados del análisis de inventario, provenientes del capítulo anterior para una mejor interpretación del análisis del ciclo de vida.

5.1 SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DE CATEGORÍAS DE IMPACTO

En primer lugar se debe determinar que categorías de impacto van a ser consideradas, para posteriormente evaluar la importancia de los potenciales impactos ambientales utilizando los resultados del análisis de inventario. Para ello se selecciona de acuerdo a la disponibilidad de los datos y a la relevancia reportada por diversos autores (Antón, 2004; CIEMAT, 2006).

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

Indicador de la categoría de impacto

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

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, seleccionadas de acuerdo referencia a la disponibilidad de sus datos y a la relevancia mostrada ante diferentes autores (Güereca, 2006; Antón, 2004; Bentrup et al., 2000).

Categoría de impacto	Unidades de referencia	Indicador de la categoría	Factor de caracterización
Cambio climático	Kg-eq. CO ₂	CCI	GWP(Kg-eq. CO ₂ /Kg)
Acidificación	Kg-eq. H ⁺	AI	AP (g-eq. H ⁺ /g)
Eutrofización	Kg-eq. PO ₄	EI	EP (g-eq. PO ₄ /g)
Formación foto-oxidantes	Kg-eq. Etileno	POI	POCP (g-eq. Etileno/g)
Efectos respiratorios	Kg-eq. PM _{2,5}	REI	REP (Kg-eq. PM _{2,5} /Kg)
Energía no renovable	MJ	NREI	NREP (MJ/Kg)

Tabla 4. Categorías de impacto. Fuente: Antón, 2004.

Si se desea conocer mayor información sobre las categorías de impacto, véase el Anexo A.

5.2 CLASIFICACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En esta etapa asociamos cada intervención ambiental con las categorías de impacto en las que tienen efecto. En la siguiente tabla se presenta esta asociación junto con los factores de caracterización.

Tabla 5. Asociación de las diferentes emisiones a las categorías de impacto (Antón, 2004).

SUSTANCIA	GWP	AP	EP	POCP	REP	NREP
CO ₂	1	n.c	n.c	n.c	n.c	n.c
CH ₄	7	n.c	n.c	0	n.c	n.c
N ₂ 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 ₃	n.c	0.059	0.35	n.c	n.c	n.c
NO ₂	n.c	0.022	0.13	n.c	0.1273	n.c
SO ₂	n.c	0.03125	n.c	n.c	0.078	n.c
NO ₃ ⁻	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 ₄	n.c	n.c	0.42	n.c	0.124	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 s.e.	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 s.e.	n.c	n.c	n.c	n.c	0.1571	n.c
PM ₁₀	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

s.e. sin especificar

n. c. no contribuye

5.3 CARACTERIZACION E INTERPRETACION DE RESULTADOS

Basándonos en la tabla relacionada con las Categorías de impacto (Antón, 2004) y en la ecuación del modelo para contabilizar las categorías de impacto, se calcula el porcentaje de participación que tiene cada una de las etapas consideradas para la producción del biodiesel en la diferentes categorías de impacto. En la siguiente figura se observa el perfil medioambiental del ACV que es descrito a continuación.

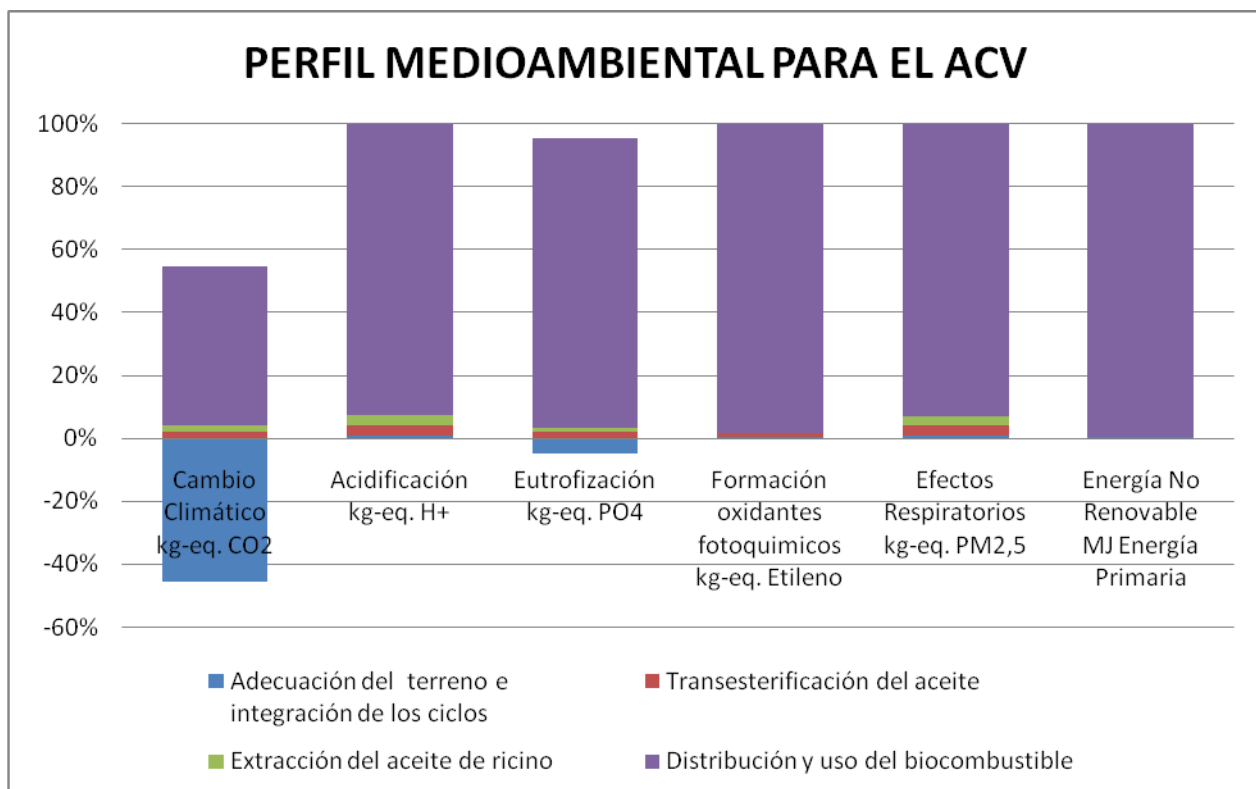


Figura 4. Perfil medioambiental para el ACV.

Podemos observar en referencia al cambio climático una participación significativa de la etapa de adecuación del terreno e integración de los ciclos biogeoquímicos, presentando un impacto positivo debido a la disminución de Kg-eq de CO₂ emitidos a la atmósfera. Este efecto es contrario al presentado en las otras etapas obteniéndose un impacto negativo principalmente en la etapa de distribución y uso.

En busca de una mayor comprensión del impacto ambiental generado se debe analizar con mayor detalle el efecto producido por cada categoría. Es por ello que en las siguientes gráficas se presentan las diferentes participaciones que se consideraron para la categoría de cambio climático.

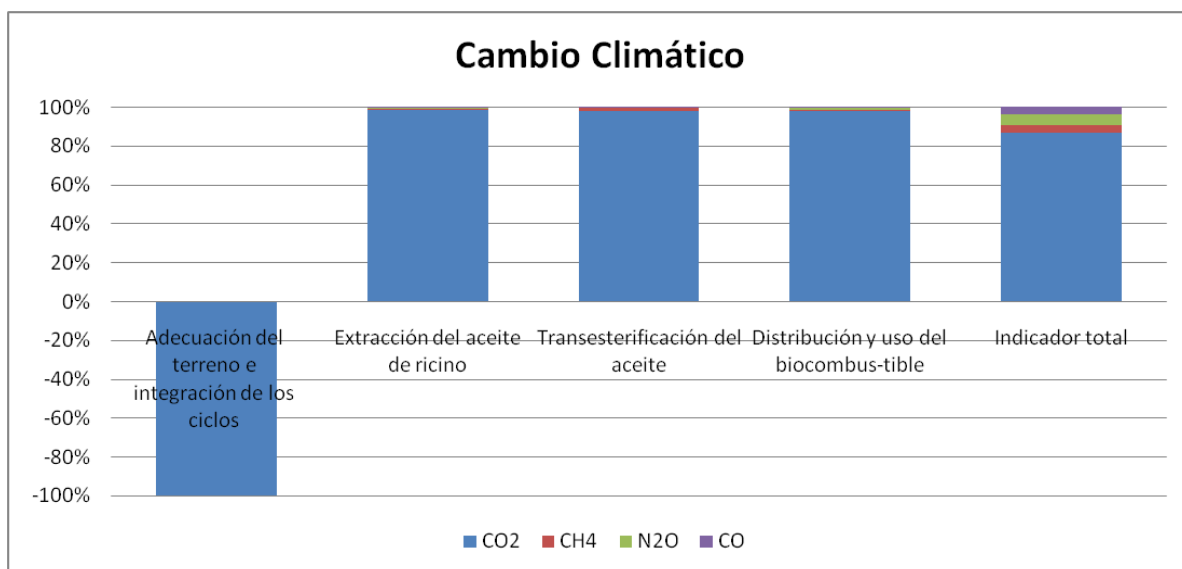


Figura 5. Emisiones consideradas para la categoría de cambio climático.

Esta categoría tiene en cuenta la participación de las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O y CO, apreciándose una disminución de los Kg-eq de CO₂ emitidos a la atmosfera en la etapa de adecuación del terreno e integración de los ciclos biogeoquímicos; aunque se presenta esta disminución no es suficiente para contrarrestar las emisiones producidas por las otras etapas, presentándose un impacto negativo que se refleja al analizarse el indicador total para el tiempo de estudio del ACV.

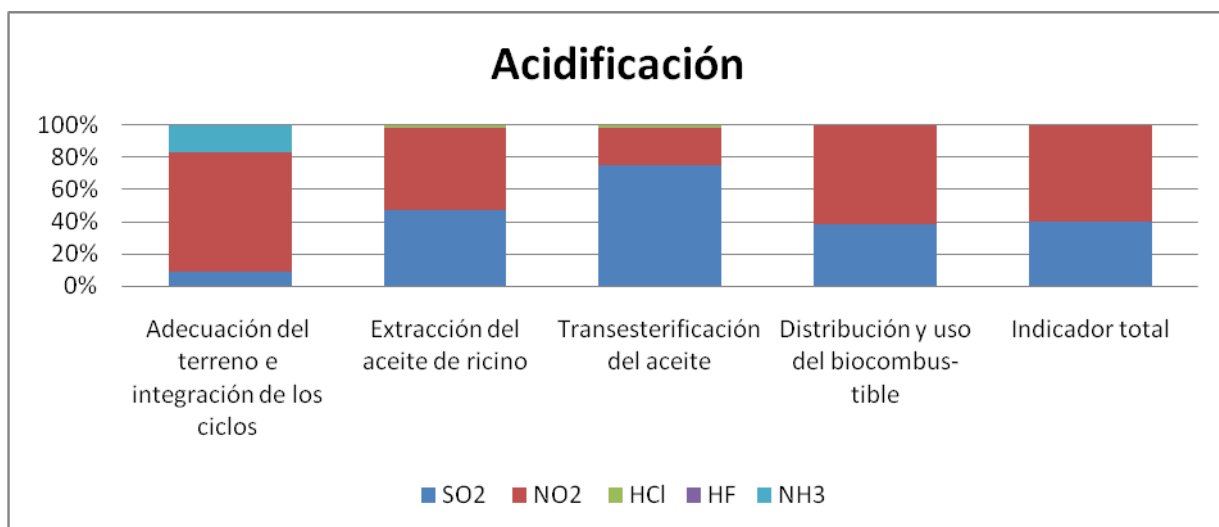


Figura 6. Emisiones consideradas para la categoría de acidificación

En la categoría de acidificación se puede apreciar que las emisiones mas importantes son las SO_2 y NO_2 respectivamente, contrarrestando con las emisiones de HCL , HF y NH_3 que son casi nulas. Basándonos en los resultados obtenidos podemos concluir que en las diferentes etapas se presenta un impacto ambiental negativo.

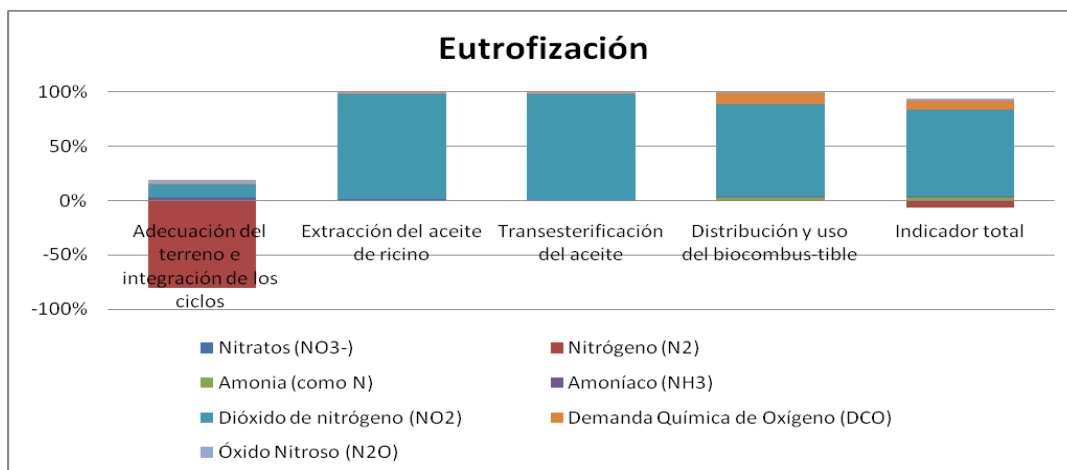


Figura 7. Emisiones consideradas para la categoría de eutrofización

La categoría de eutrofización presenta una disminución en el N_2 debido a la fijación en el suelo por la integración de los ciclos biogeoquímicos, el cual fija el 6,23% al suelo del total de la categoría considerada. Por otra parte se puede apreciar la contribución del NO_2 en las demás etapas.

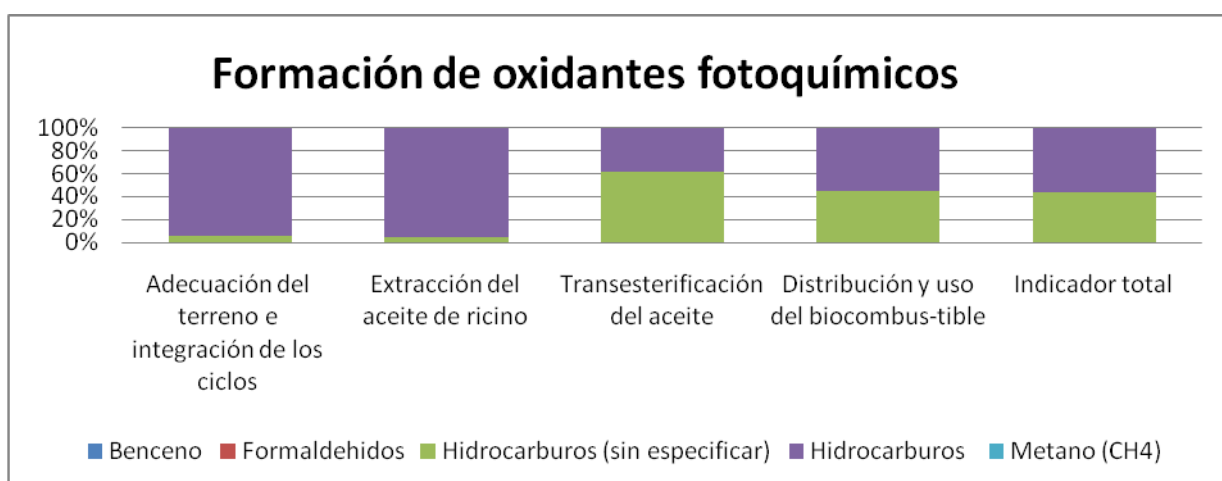


Figura 8. Emisiones consideradas para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos.

La categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, se caracteriza por el predominio de las emisiones representadas por los hidrocarburos en las diferentes etapas del proceso.

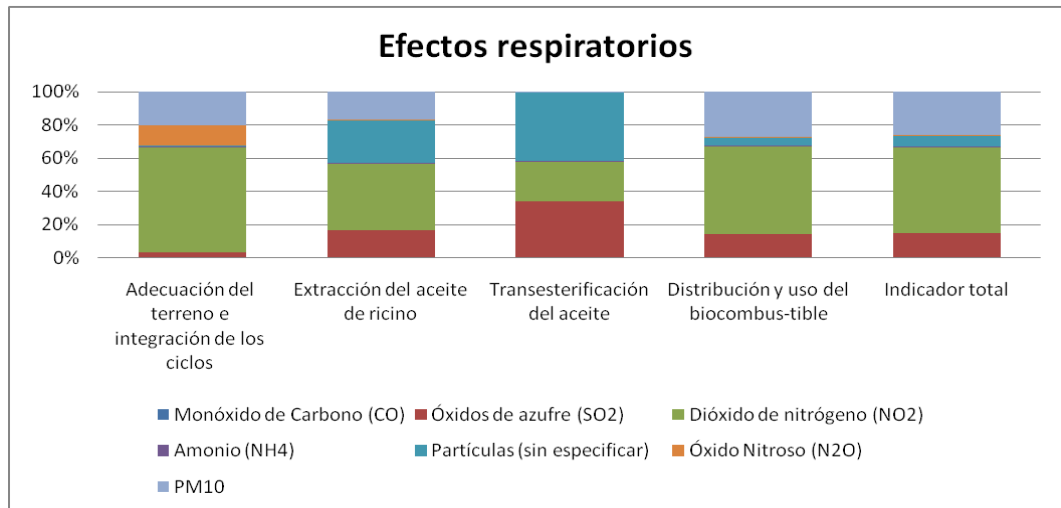


Figura 9. Emisiones consideradas para la categoría de efectos respiratorios.

Podemos apreciar en la categoría de efectos respiratorios, una contribución proporcional de las emisiones de CO, SO₂, NO₂, NH₄, N₂O₂, Y partículas sin especificar en las diferentes etapas.

6. CONCLUSIONES

El impacto ambiental representado por las categorías de cambio climático y eutrofización disminuye significativamente por la fijación neta del carbono y nitrógeno en la etapa de adecuación del terreno e integración de los ciclos biogeoquímicos.

La etapa de distribución y uso del biocombustible representa el mayor aporte de las emisiones generadas a cada una de las categorías de impacto ambiental estudiadas, esto se ve reflejado en el perfil medioambiental.

La etapa de distribución y uso del biocombustible es la que representa el mayor porcentaje de participación de las emisiones con respecto a las otras etapas.

Al hacer el ACV de la cuna a la cuna con la integración de los ciclos biogeoquímicos del carbono y nitrógeno se logró percibir la disminución de las emisiones en dos categorías de impacto como son la eutrofización y el cambio climático en la etapa de adecuación del terreno e integración de los ciclos biogeoquímicos.

El alto consumo de energía no renovable que se da en las etapas de adecuación del terreno e integración de los ciclos biogeoquímicos, transesterificación y distribución se debe a la elaboración de las materias primas involucradas, y en la extracción a la producción de electricidad.

El mayor gasto de energía se presenta en la etapa de distribución y uso del biocombustible.

7. RECOMENDACIONES

Es necesario hacer un análisis económico, con el cual se pueda ver la viabilidad de poner en marcha un proyecto de este tipo en la región propuesta, convirtiéndose en un generador de empleo; en pro de utilizar el recurso humano de la región.

Investigar la utilización de la torta que queda como residuo de la extracción del aceite considerando su capacidad calorífica, para la disminución de las emisiones en el proceso, al ser utilizada como combustible para los requerimientos energéticos de la planta, ya que en estos momentos la torta se considera un desecho en relación al proceso.

Efectuar un ACV del Diesel con la intención de compararlo con el ACV de la mezcla B10, con el fin de cuantificar la reducción de las emisiones.

Es necesaria la comparación del proceso llevado a cabo en el cual se utiliza un tipo de semilla de higuera en particular, con otros procesos con diferentes tipos de semilla de higuera, con el fin de encontrar el tipo de semilla más productivo y que a su vez conlleve una considerable reducción en las emisiones a la atmósfera.

BIBLIOGRAFÍA

ALVAREZ, Roberto. Balance de carbono en los suelos. En: publicación miscelánea. N° 105 (2006).

AMAYA RAMIREZ, Bibian; BECERRA BAYONA, Silvia. Evaluación del análisis de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de higuierilla empleando la metodología de la cuna a la cuna. 2008. Trabajo de grado (ingeniero químico). Universidad industrial de Santander. Escuela de ingeniería química.

AUDSLEY, Eric et al. Harmonization of environmental life cycle assessment for agriculture: final report. European commission DG VI agriculture, 2003. 98 p.

BENAVIDES, Alirio. BENJUMEA, Pedro. PASHOVA, Veselina, el biodiesel de aceite de higuierilla como combustible alternativo para motores diesel. Grupo Combustibles Alternativos, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2007,153, 141-150.

BRICEÑO BUENO, Yolanda; PRADA GOMEZ, Azucena. Diseño y construcción de una planta piloto para la obtención de aceite de higuierilla. Bucaramanga, 1980, 140 p. Trabajo de grado (ingeniero químico). Universidad industrial de Santander. Escuela de ingeniería química.

CAMACHO VILLALOBOS, Alina et al. Adaptación de tecnología de fertilización en un cultivar de higuierilla (*ricinus communis* L.) Introducido de Brasil, para la región Ucayali en la selva del Perú 2007-2008. En: 3er. CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, ENERGIA E RICINOQUIMICA (2008).

CARDONA, C. A. et al. Biodiesel de higuierilla: Una alternativa de desarrollo rural. En: 1er. CONGRESO INTERNACIONAL DEL CULTIVO, PROCESAMIENTO Y APLICACIONES DE LA HIGUERILLA. (2007: Medellín).

CONCEIÇÃO, Marta M. et al. Dynamic Kinetic Calculation of Castor oil Biodiesel. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2007, 87, 3, 865-869.

_____CORPOICA. Higuierilla: “alternativa productiva, energética y agroindustrial para Colombia”. Centro de investigaciones la selva-Rio Negro, Antioquia. Agosto 2008.

FRANCA, Bruno B, et al. Liquid-liquid equilibria for castor oil biodiesel+glicerol+alcohol. J. chem. Eng. Data. 2008.

GIRALDO LEON, Sonia. Extracción de aceite de higuierilla por medio de solventes. 1978. Trabajo de grado (ingeniero químico). Universidad industrial de Santander. Escuela de ingeniería química.

GONZALEZ, Amado E. et al. Caracterización termoanalítica de semillas de ricinus communis variedades mamona blanca, mamona negra y silvestre: Análisis de las propiedades reológicas del biodiesel. Bisuta: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, 2006, 4, 001, 15-20.

GUTIERREZ DE LOS RIOS, German Alberto et al. Evaluación de cuatro genotipos de higuierillo (Ricinus communis L.) en zona cálida del departamento de Caldas. En: 1er. CONGRESO INTERNACIONAL DEL CULTIVO, PROCESAMIENTO Y APLICACIONES DE LA HIGUERILLA.(2007: Medellín)

ISO-14040. (1997). Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework. International Organization for Standardization ISO. International standard. 14040. Geneva

ISO-14041. (1998). Environmental management-Life cycle assessment-Goal and scope definition and inventory analysis. International Organisation for Standardisation ISO. International standard. 14041. Geneva

ISO-14042. (2000). Environmental management-Life cycle assessment-Life cycle impact assessment. International Organisation for Standardisation ISO. International standard. 14042. Geneva

ISO-14043. (2000). Environmental management – Life cycle assessment-Life cycle interpretation. International Organisation for Standardisation ISO. International standard. 14043. Geneva

MORON, Alejandro. El rol de los rastrojos en la fertilidad del suelo. Sección suelos INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay, 2002.

MUNICIPIO DE SABANA DE TORRES. Esquema de Ordenamiento Territorial de Sabana de Torres – Santander. 2004.

OGUNNIYI, D.S. Castor Oil: A vital industrial raw material. Bioresource Technology, 2006, 97, 1086-1091

RAMIREZ, Miguel Ángel. Cultivos para la producción sostenible de biocombustibles: Una alternativa para la generación de empleos e ingresos. Bron, Willem, Higuerrillo, no.2. Tegucigalpa: Comunica, 2008.

RODUIGUEZ, Jesús E. diseño de una planta de extracción de aceite de higuerrilla. 1980. Trabajo de grado (ingeniero mecánico). Universidad industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica.

WEST, Alex H. POSARAC, Dusko. ELLIS, Naoko. Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS Plant. Bioresource Technology. 2008, 99. 6587-6601

ZIĘBA, A. Flashlight presentation: Transesterification of castor oil as a method of biodiesel production. En: 2nd. EUROPEAN SUMMER SCHOOL ON RENEWABLE MOTOR FUELS WARSAW. (2007: Poland

ANEXOS.

ANEXO A. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental, y los posibles impactos asociados con los productos, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas en este sentido es el análisis del ciclo de vida (ACV).

“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) El enfoque ambiental del ACV trata los aspectos e impactos de un sistema del producto. Los aspectos e impactos sociales, generalmente están fuera del alcance del ACV. Se pueden combinar otras herramientas con el ACV para análisis más profundos.

Tabla A1. Herramientas usadas en los sistemas de gestión ambiental.

RA-Risk Assessment	Análisis del Riesgo Ambiental
EIA-Enviromental impact assessment	Estudio del impacto ambiental
Eau-Enviromental Auditing	Auditoría ambiental
EPE-Enviromental Performance Evaluation	Evaluación del comportamiento ambiental
SFA-Substance Flow Analysis	Análisis de flujo de sustancia
EMA-Energy and Material Analysis	Análisis de material y energía

ISCM-Integrate 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

El ACV es una técnica iterativa. Las fases individuales de un ACV utilizan resultados de las otras fases. El enfoque iterativo en y entre las fases contribuye a la integridad y coherencia del estudio y de los resultados presentados.

Las decisiones en un ACV se basan preferentemente en las ciencias naturales. Si esto no es posible, se pueden utilizar otros enfoques científicos (por ejemplo, de las ciencias económicas y sociales) o se puede hacer referencia a convenciones internacionales. Si no existe una base científica ni una justificación basada en otros enfoques científicos o en convenciones internacionales, las decisiones se pueden basar en juicios de valor.

Otras características esenciales del ACV.

- Evalúa en forma sistemática los aspectos e impactos ambientales de los sistemas de un producto.
- Naturaleza relativa debido a que el ACV depende de la unidad funcional dentro de la metodología.
- El nivel de detalle y la duración depende de la definición y alcance del ACV.
- La metodología está abierta a la inclusión de nuevos hallazgos científicos y mejoras en el estado del arte de la técnica.
- Es un método flexible de acuerdo con la aplicación prevista y los requisitos de la organización.
- Trata los impactos ambientales potenciales; el ACV no predice impactos ambientales absolutos o precisos debido a:

La expresión relativa de los impactos ambientales potenciales con relación a una unidad de referencia.

La integración de los datos ambientales en el espacio y el tiempo.

La incertidumbre inherente al modelar los impactos ambientales.

Algunos impactos ambientales posibles sean claramente impactos futuros.

El ACV puede ayudar a:

- La identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida.
- La aportación de información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (por ejemplo, para la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades, el diseño y rediseño de productos o procesos).
- La selección de indicadores de desempeño ambiental pertinentes, incluyendo técnicas de medición.
- El marketing (por ejemplo, implementando un esquema de etiquetado ambiental, elaborando una reivindicación ambiental, o de una declaración ambiental de producto).

FASES DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. (Normas ISO-14040)

○ Definición del objetivo y del alcance.

El objetivo debe establecer una aplicación prevista, las razones para realizar el estudio y al público que se prevé comunicar los resultados de estudio.

El alcance deberá estar suficientemente bien definido para asegurar que la amplitud, profundidad y el nivel de detalle del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo establecido.

El alcance incluye los siguientes puntos:

- Sistema del producto a estudiar.
 - Funciones del sistema del producto
 - La unidad funcional.
 - Procedimientos de asignación.
 - Categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación; y interpretación del impacto.
 - Requisitos relativos a los datos
 - Las suposiciones planteadas en el caso de estudio.
 - Las limitaciones.
 - La calidad de los datos.
- Unidad funcional: Se deben especificar las funciones del sistema de estudio y cuantificar las salidas funcionales del sistema del producto, con el fin de proporcionar una referencia para todas las entradas y salidas del proceso.
- Sistema del producto: conjunto de procesos que permiten la presencia del producto en el mercado.
- Límites del sistema. Los límites definen los sistemas del producto como modelos que describen los elementos claves de los sistemas físicos, definen los procesos unitarios a ser incluidos en el ACV.
- Reglas de asignación: la mayoría de los procesos industriales dan varios productos, 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. Evitar la asignación por medio de:
 - a. La división del proceso en subprocesos y la recogida de los datos de entrada y salida relacionada con estos procesos.
 - 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 que se producen en un sistema alternativo que proporciona el mismo servicio que el que proporciona el co-producto.

2. Cuando no se puede 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 de las cargas del sistema a 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 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:
 - i. La asignación 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.
 - ii. 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.** Es la etapa que implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes de un sistema del producto.

Este análisis es un proceso iterativo. A medida que se recopilan datos y se aprende más sobre el sistema, se pueden identificar nuevos requisitos y limitaciones, que requieran cambios en los procedimientos de recopilación de datos, de manera que aún se puedan cumplir los objetivos de estudio.

- Recopilación de datos. Este tipo de datos puede clasificarse en :
 - Las entradas de energía, de materias primas, entradas auxiliares, otras entradas físicas.
 - Productos, co-productos y residuos
 - Las emisiones al aire, vertidos al agua y al suelo.
 - Otros aspectos ambientales.
- Calculo de datos. Esta etapa incluye:
 - Validación de los datos recopilados.
 - Relación de los datos con los procesos unitarios.
 - Relación de los datos con el flujo de referencia de la unidad funcional.

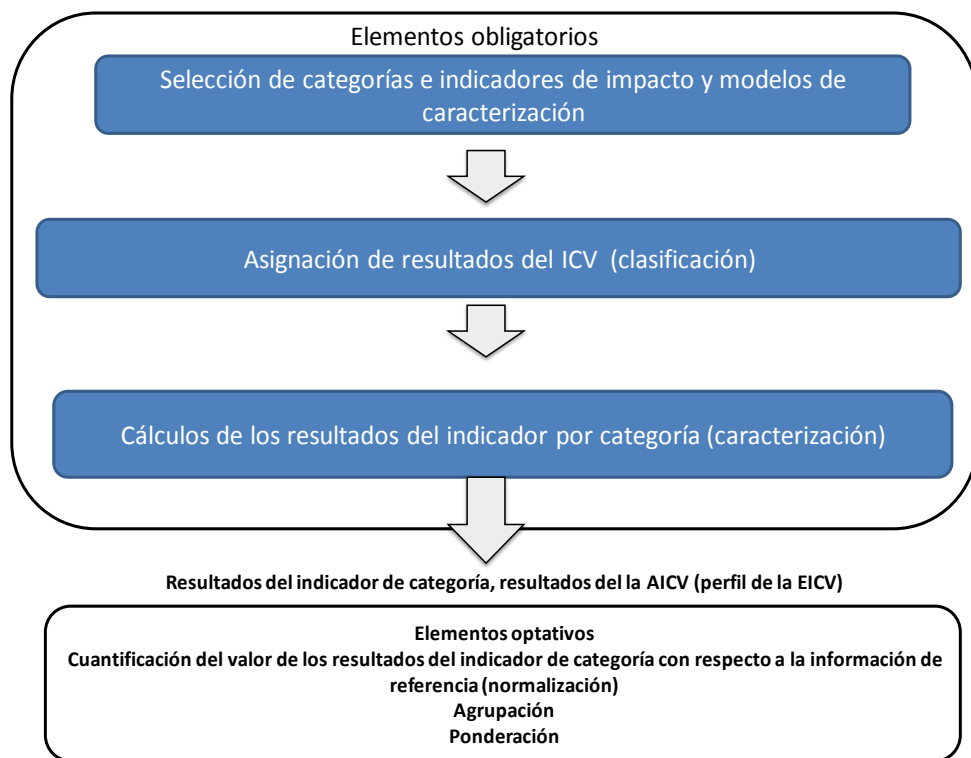
En los cálculos de flujos de energía se debe tener en cuenta las diferentes fuentes de combustible y electricidad utilizadas, la eficiencia de la conversión y la distribución y uso del flujo de energía.

- **EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV).** Esta fase tiene como propósito evaluar los impactos ambientales potenciales más significativos utilizando los resultados del ICV. En este proceso se asocian los datos de inventario con las categorías de impactos

ambientales específicos y con los indicadores de esas categorías para entender estos impactos.

Cuestiones tales como la elección, el modelado y la evaluación de categorías de impacto pueden introducir subjetividad en la fase del EICV. Por lo tanto, la transparencia es crítica en la evaluación del impacto a fin de asegurar que las suposiciones están claramente descritas e informadas. Vurro

Elementos de la fase EICV



Fuente. ISO 14042, 2000

En la selección y definición de las categorías de impacto, indicadores de la categoría y modelos de estimación, se busca definir los efectos sobre el medio ambiente que causan los aspectos medioambientales del sistema de estudio. En la asignación de los resultados del ICV se asignan con respecto a cada una de las categorías de impacto seleccionadas y en el cálculo de los indicadores de categorías (caracterización) consiste en modelar mediante los factores de

caracterización de los datos del inventario para cada una de las categorías de impacto.

Los elementos considerados obligatorios son:

- ❖ Selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos.
- ❖ **Clasificación.** Es esta fase se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.
- ❖ **Caracterización.** Consiste en la modelización, mediante los factores de caracterización de los datos del inventario mediante cada una de las dichas categorías de impacto.

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

- ❖ **Normalización.** Se entiende por normalización la relación de la magnitud cuantificada para una categoría de impacto respecto a un valor de referencia ya sea a escala geográfica y/o temporal.
- ❖ **Agrupación.** Clasificación y posible catalogación de los indicadores.
- ❖ **Ponderación.** Consiste en establecer unos factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impacto para después sumarlas y obtener un resultado ponderado en forma de único índice ambiental global del sistema.
- ❖ **Análisis de calidad de los datos.** Ayudará a entender la fiabilidad de los resultados del análisis del ACV. Se considera obligatorio en análisis comparativos.

Limitaciones de la EICV. La EICV no es una evaluación completa de todos los asuntos ambientales del sistema bajo estudio porque trata solamente los asuntos especificados en el objetivo y el alcance.

La EICV no siempre demostrará diferencias significativas entre las categorías de impacto y los resultados de sus indicadores correspondientes para diferentes alternativas de los sistemas del producto. Esto se debe a:

- Desarrollo limitado de: modelos de caracterización, análisis de sensibilidad y de incertidumbre para la fase de la EICV.
- Establecimiento de los límites del sistema en la fase del ICV, que no incluye todos los procesos unitarios o entradas y salidas de cada proceso unitario.
- Calidad inadecuada de los datos del ICV como incertidumbres o diferencias en los procedimientos de asignación y de agregación.

La ausencia de dimensiones espaciales y temporales en los resultados del ICV introducen incertidumbre en los resultados de la EICV. La incertidumbre varía según las características espaciales y temporales de cada categoría de impacto.

Tabla A2. Clasificación Categorías de impacto.

Categorías de impacto	Unidades	Escala Geográfica
Agotamiento recursos abióticos (entrada)	Kg SB	Global
Energía (entrada)	MJ/Kg	Global
Uso del suelo (entrada)		Local
Cambio climático	Kg-eq. CO ₂	Global
Agotamiento Ozono (salida)	Kg-eq. CFC11	Global
Acidificación (salida)	Kg-eq. SO ₂	Continental/regional/local
	Kg-eq. H ⁺	Global
Eutrofización (salida)	Kg-eq. PO ⁻³	Continental/regional/local

Formación foto-oxidantes	Kg-eq. etileno	Continental/regional/local
Toxicidad humana (salida)	Kg-eq. 124 DCB Kg-eq. Pb aire	Continental/regional/local Global
Toxicidad terrestre (salida)	Kg-eq. 124 DBC Kg-eq. Zinc aire	Continental/regional/local Global
Acuática marina (salida)	Kg-eq. 124 DCB	Continental/regional/local
Acuática agua dulce (salida)	Kg-eq. 124 DBC Kg-eq.Zinc agua	Continental/regional/local Global
Sedimento agua dulce (salida)	Kg-eq. 124 DCB	Continental/regional/local
Sedimento marino (salida)	Kg-eq. 124 DCB	Continental/regional/local

Fuente: Antón, 20004

Agotamientos de recursos abióticos: define la disminución de la disponibilidad de los recursos naturales incluyendo recursos abióticos y energía.

$$AR = \sum_i F_i \times m_i$$

Donde AR es el indicador de agotamiento de recursos abióticos, m_i es la cantidad del recurso utilizado, en Kg, m_3 o MJ, y F_i es el factor de caracterización de este recurso. Tradicionalmente su agotamiento se calculaba como la relación entre lo usado y la cantidad total de reserva de este recurso, siendo F_i la inversa de la reserva (Kg^{-1}).

Uso del suelo: A pesar de que ésta es una de las categorías que más importancia tiene para establecer la sostenibilidad de una actividad, no existe todavía un consenso sobre de que indicadores usar. Debido a su propia complejidad. Por esta razón los indicadores más desarrollados hasta el momento guardan relación con la biodiversidad.

Cambio climático: Es el impacto que produce el fenómeno en el cual la energía radioactiva absorbida por la tierra de los rayos solares que es redistribuida por la atmosfera y los océanos y que luego es absorbida por los gases existentes (gases invernaderos), produciendo así el calentamiento global; debido a que estos gases van poco a poco acumulando energía. Estos gases son principalmente el vapor de agua y el CO₂, y otros gases como CH₄, N₂O, y CFCs. Esta categoría de impacto afectará a las áreas de salud humana, ambiente natural y ambiente modificado por el hombre. El indicador que sirve para evaluar este cambio se expresa como CCI, (Climate Change Indicator). Su medida se hará relativa respecto al efecto producido por un Kg de CO₂ y se calculará mediante la ecuación:

$$CCI = \sum_i GWP_i \times m_i$$

Donde m_i es la masa de la sustancia i expresada en Kg y GWP es el potencial de calentamiento global, un factor desarrollado para comparar las emisiones de diferentes gases invernaderos. Se define como la relación entre la contribución a la absorción de calor resultante de la emisión de 1 Kg de un gas con efecto invernadero y la emisión equivalente de CO₂ a lo largo de un tiempo.

Agotamiento del ozono: es la categoría que cuantifica los potenciales de agotamiento de ozono para las diferentes sustancias que ayudan significativamente al aumento de este fenómeno medioambiental. El agotamiento del ozono trae consecuencias perjudiciales a la salud humana, producción agrícola, entre otros. El indicador del agotamiento de ozono, ODI, se calcula como la suma de los potenciales de agotamiento de ozono, ODPs,

para las diferentes sustancias multiplicados por la masa en Kg de cada una de ellas.

Formación de oxidantes fotoquímicos: es la generación de compuestos químicamente reactivos formados en la troposfera bajo 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. Los oxidantes fotoquímicos pueden resultar perjudiciales para la salud humana, los ecosistemas y la agricultura. Para el cálculo del indicador de formación de foto-oxidantes, POI, se utiliza como factor de caracterización, POCP, photo chemical ozone creation potentials, se mide respecto al efecto producido por 1 Kg de etileno. Los NO_x actúan como catalizadores en esta reacción química, no son por tanto consumidos, pero en función de la concentración de NO_x se verá afectada la producción de foto-oxidantes.

$$POI = \sum_i POCP_i \times m_i$$

POCP se define como el cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de un VOC y el cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de etileno.

Acidificación: consiste en la disposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuro en la atmósfera, en el suelo y en el agua, donde puede variar la acidez del medio, cosa que afectará a la flora y fauna que habita en él, produce deforestación y también puede afectar a los materiales de la construcción. El indicador de esta categoría de acidificación, AI, g-eq. H⁺ se expresa como:

$$AI = \sum_i AP_i \times m_i$$

Donde m_i es la masa en Kg de la sustancia i y AP es el potencial de acidificación. AP de una sustancia i se puede calcular como el potencial de iones H^+ equivalentes que puede emitir dicha sustancia i . Las diferentes emisiones podrían ser sumadas basándose en su potencial de formar iones H^+ .

Eutrofización: en esta categoría se incluyen los impactos debidos a un alto nivel de los macro nutrientes (nitrógeno y fosforo). Su aumento puede representar un incremento significativo en la producción de biomasa en los ecosistemas acuáticos. Un aumento de las algas en los ecosistemas acuáticos producirá una disminución del oxígeno debido a que la descomposición de dicha biomasa consumirá oxígeno medido como DBO. Este consumo puede conducir a alcanzar unas condiciones anaerobias que provocaran la descomposición causada por bacterias anaeróbicas que liberan CH_4 , H_2S y NH_3 (desaparece cualquier tipo de vida aeróbica).

Toxicidad: contempla 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.

○ **Interpretación del Ciclo de vida.** Es la fase donde se agrupan o se asocian los resultados del análisis de inventario y los de la evaluación del impacto. la fase de la interpretación debe proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y el alcance definidos, que lleguen a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones.

La interpretación debería reflejar el hecho de que los resultados de la EICV están basados en un enfoque relativo, indican efectos ambientales potenciales, no predicen los impactos reales en los puntos finales de categoría, ni se sobrepasan los umbrales, los márgenes de seguridad ni los riesgos.

La fase de interpretación puede involucrar un proceso iterativo de revisión y de actualización del alcance de un ACV así como la naturaleza y de la calidad de los datos recopilados de modo que sean coherentes. Los hallazgos de la interpretación del ciclo de vida deberán reflejar los resultados del elemento de evaluación.

Análisis del Ciclo de Vida “De la Cuna a la Tumba”

El método reconoce que todos los sistemas de producción, procesos o servicios poseen un ciclo de vida, el cual está compuesto por varios subsistemas conectados entre sí en forma de flujo progresivo, y se inicia con la adquisición de las materias primas, pasando por otros subprocesos intermedios hasta llegar al final de su vida útil. Tiene en cuenta que 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 permiten medir los diversos tipos de parámetros como lo son, los relacionados con el consumo de materias primas, consumo de agua y energía, emisiones de efluentes líquidos, emisiones de gases a la atmósfera, residuos sólidos, generación de coproductos, los riesgos potenciales, cambios geográficos, impactos visuales del entorno, entre otros.

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. Sin embargo, la aplicación del ACV se incrementó sólo partir de los años 80 del siglo pasado, cuando 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). La última actualización fue realizada en el 2006, cuyo resultado son las ISO 14040 (2006) e ISO 14044(2006). Así pues el ACV ha evolucionado y hoy 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”.

El SETAC-Society for Environmental Toxicology and Chemistry, 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 (2006), “el ACV es recopilación y evaluación de entradas y salidas para un sistema del producto a través de su ciclo de vida.

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.

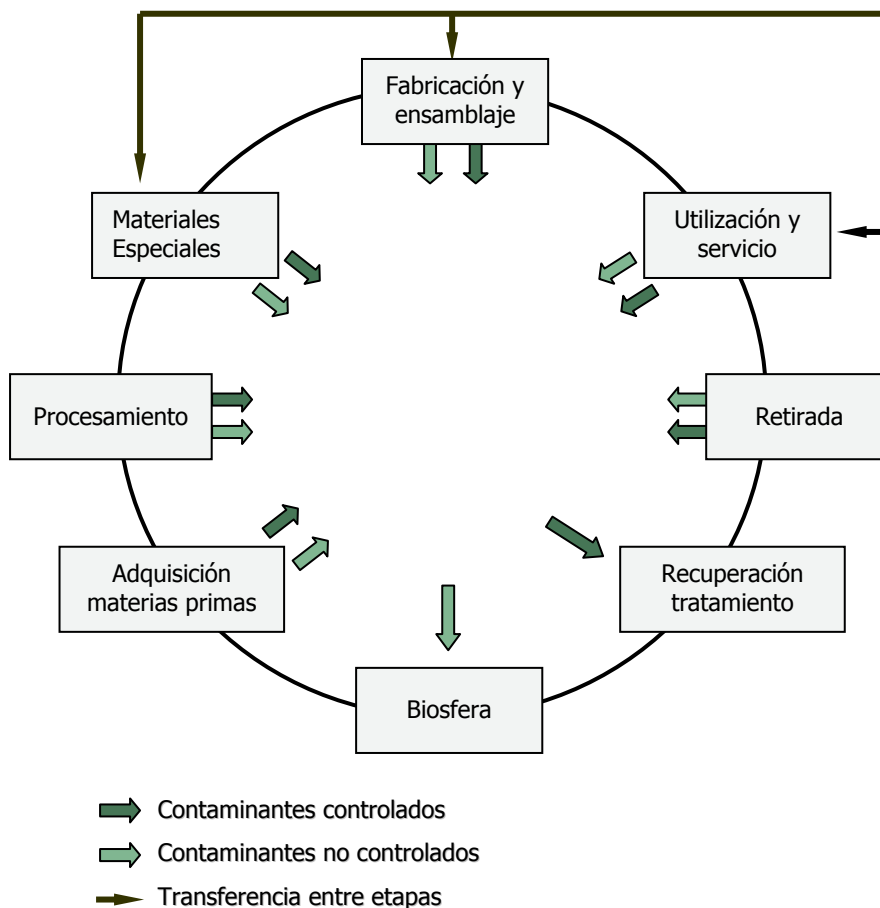


Figura A1. Esquema del ciclo de vida de un producto o servicio

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 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.

De acuerdo a 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.

Los cuatro elementos que estructura el ACV no solo son secuenciales, sino también son iterativos entre sí. Así, el ACV es una herramienta iterativa que permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesivas iteraciones, representando una flexibilidad para el proceso de evaluación proporcionado por esta herramienta.

Análisis del Ciclo de Vida “De la cuna a la cuna”

Dadas las limitaciones del ACV “de la cuna a la tumba” en los últimos años se ha propuesto el enfoque “de la cuna a la cuna”. Se han hecho propuestas metodológicas y algunos análisis para unos pocos productos.

En una ponencia presentada en el X Seminario Internacional de Medio Ambiente se hace una comparación preliminar con metodología de análisis de ciclo de vida de la cuna a la cuna del producto biodiesel a partir de dos aceites vegetales: el de palma y el de higuierilla o ricino. Como base del análisis se toman 1000 hectáreas de un bosque que se derriba para el correspondiente cultivo; se incluye el cultivo, la cosecha, postcosecha, beneficio y preparación de los frutos; las plantas o procesos de extracción del aceite, de recuperación del solvente de extracción, de esterificación y de purificación del biodiesel y de la glicerina; se incluyen las etapas de uso del biodiesel en automotores y de la glicerina para algún propósito; se incluye la disposición final de residuos sólidos, emisiones y descargas líquidas de todas las etapas; el ciclo del carbono se cierra con la reincorporación de gases (CO₂) a los cultivos vía la fotosíntesis y de los residuos sólidos y aguas residuales como biofertilizantes; se incluye el ciclo de la energía y dentro de el de energía solar y sus componentes; se incluye la recuperación del bosque de partida en los terrenos de los cultivos. Mediante balances de masa y energía con métodos generales y aproximados se llega a una comparación ambiental entre las dos alternativas de producir biodiesel a partir de aceites vegetales.

Se trata de un ejercicio que apenas inicia y sobre el cual hay oportunidad de hacer aportes en muchos aspectos: metodológico, aplicaciones a diferentes situaciones y productos, convertirlo en instrumento de toma de decisiones, integración de métodos de análisis de impacto ambiental, integrar análisis económico con análisis ambiental, desarrollar bases y bancos de datos para soportar los ACVs, entre otros frentes.

ANEXO B. LA HIGUERILLA.

La Higuierilla cuyo nombre científico es *Ricinus communis* Linnaeus, pertenece a la familia Euphorbiaceae, posiblemente originaria de India o de África; es un arbusto que generalmente se encuentra en estado silvestre y alcanza 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. La higuierilla es una oleaginosa cuyo aceite se utiliza en la industria de motores de alta revolución, en pinturas, lacas, barnices, plásticos, fertilizantes, para uso antiparasitario en humanos, etc.; en total se utiliza en más de ciento ochenta productos. Tiene gran capacidad de adaptación y hoy día es cultivada prácticamente en todas las regiones tropicales y subtropicales, aunque es típica de regiones semiáridas. Su origen es muy discutido y algunos la consideran originaria de Asia y otros como nativa de América, pero se cree que Afrecha es su cuna.

Descripción botánica:

Raíz. Es pivotante y puede alcanzar hasta 3 m de profundidad constituyéndose el anclaje principal de la planta. Presenta raíces secundarias numerosas y oblicuas, situadas a poca profundidad.

Tallo. La planta está dotada de un tallo principal recto seccionado por entrenudos, hueco en su parte interior lo cual facilita la eliminación de la soca. Su color depende de la variedad puede ser verde, rosado o caoba. El tallo principal termina en el primer racimo (inflorescencia), siendo este el más grande de la planta. A partir del cuarto nudo empiezan a aparecer las ramas secundarias que producen a su vez ramas adicionales observándose en ambas producción de racimos.

Hojas. Alternas, pecioladas, palmeadas con 7 a 11 lóbulos, dentadas, con nerviación palmatinervia. Peciolos redondos de 8 a 50 cm de largo y de 10 a 20

cm de longitud; con dos glándulas nectaríferas en la unión con la lamina, dos glándulas en la unión con el peciolo; la lamina de la hoja tiene 10 a 75 cm de diámetro y de un color que va de verde a rojo.

Flores. Están agrupadas en una panícula terminal de 10 a 40 cm de largo, la cual es monoica, las flores femeninas están localizadas en la parte superior y las masculinas en la parte inferior de la inflorescencia. Las flores masculinas están en cimas de 3 a 16 flores de pedicelo de 0.5 a 1.5 cm de largo, de 3 a 5 sépalos verdes de 5 a 7 cm de largo, pétalos ausentes, estambres numerosos de 5 a 10 mm de largo con muchos filamentos ramificados, cada filamento termina en una antera pequeña esférica y de color amarillo claro. Las flores femeninas en cimas de 1 a 7 flores, pedicelo de 4 a 5 mm de largo de 3 a 5 sépalos de color verde de 3 a 5 mm de largo los cuales se caen rápidamente; ovario superior con tres celdas, un óvulo por cada celda, la pared del ovario cubierta con espinas verdes y suaves, cada una termina en un punto transparente, el cual se cae cuando el fruto se desarrolla, estilo muy corto que se divide en tres estigmas bien definidos de color rojo, suaves papilados y persistentes.

Frutos. Es una cápsula globosa con pedicelo alongado con tres lóculos de 1.5 a 2.5 cm de diámetro, generalmente espinoso. Los frutos inmaduros son generalmente verdes y algunas veces rojos, se vuelven cafés en la maduración, los estigmas permanecen en el fruto en forma leñosa. La cápsula puede abrirse y soltar las semillas que son tres, estas pueden ser negras o jaspeadas.

Semillas. De forma oval aplastada, redondeadas en un extremo y con una excrecencia en el otro llamada carúncula, de superficie brillante y lisa, de color variable que suele ser gris con manchas rojizas y parduzcas de tamaño variable que va de 0.5 a 1.5 cm de largo; la semilla tiene una cubierta dura y quebradiza exterior y otra inferior muy fina de color blanquecino, ambas protegen la semilla, la cual consta de un embrión pequeño con sus dos

cotiledones delgado y el albumen que es blando, compacto y aceitoso, el albumen es el que contiene el aceite. 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.

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

Tabla B1. Composición de la semilla.

Clima. Para un cultivo comercial el desarrollo normal de la planta se consigue en climas cálidos y secos con precipitación de 700 a 1200 mm anuales y con baja humedad relativa.

Las lluvias deben ser moderadas y bien distribuidas, abundantes en la etapa de desarrollo; la maduración y la cosecha deben coincidir con la época seca para que los racimos sequen uniformemente y no se desprendan los frutos antes de la recolección. Cuando las lluvias pasan los requerimientos mencionados la planta tiende a desarrollarse mucho vegetativamente con disminución en la producción.

En estado de floración y fructificación si se presentan abundantes lluvias puede haber pudriciones que pueden bajar los rendimientos de producción. La temperatura debe ser entre 20-26°C y requiere gran luminosidad.

Suelos. La higuera no es exigente en suelos, se desarrolla bien en distintos lugares pero requiere de un buen drenaje y materia orgánica. Presenta un buen sistema de raíces que le permite explorar áreas relativamente profundas. Requiere pH entre 5-6.5.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
Altura	Nivel del mar hasta los 2700 msnm
Clima	Calientes y secos
Temperatura	24- 30 °C
Precipitaciones	600 a 800 mm
Humedad relativa	Baja
Suelo	Franco – arenosos, franco – arcillosos y franco – limosos
	pH >5,5
Brillo solar	7 horas diarias
Periodo de cosecha	180 días

Tabla B2. Condiciones del cultivo.

Preparación del suelo: se necesita un arado muy superficial para establecer los surcos y soltar un poco el suelo (10 cm). Se acostumbra hacer los surcos orientados perpendicularmente a la dirección del viento. Esta planta prospera bien en suelos con altas cantidades de nutrientes y con pH sobre 5.5 (optimo 6-

7), aunque no soporta la alcalinidad. En el país se fertiliza de la siguiente forma, a la siembra se adicionan entre 50 y 70 kg/ha de fósforo y entre 30 y 50 kg/ha de potasio y nitrógeno; a los veinticinco días se aplican 50 kg/ha de nitrógeno y a los cincuenta días otros 50 kg/ha de nitrógeno.

Preparación de la semilla: la semilla se debe dejar remojar mínimo 12 horas para hidratarla y ganar unos días en la germinación, se debe inocular con hongos antagonistas evitando ataques posteriores.

SIEMBRA Y COSECHA

Siembra: La mejor época para la siembra es al inicio de las lluvias. Esta se hace de forma directa y su distancia de siembra depende de la variedad y del tipo de cultivo a establecer. Se siembra por sitio de 3-4 semillas a 3-5 cm de profundidad para conseguir un alto porcentaje de germinación, se recomienda usar semilla certificada.

La germinación puede variar en un ciclo de 8-10 días. Durante los dos últimos meses del cultivo es importante que este no reciba agua.

Manejo de la plantación: Cuando la planta germina (entre el día 5 a 10) presenta las hojas falsas, después comienza a desarrollar las hojas verdaderas y cuando este a la altura de la rodilla se debe realizar la primer poda de crecimiento, estas podas de deben repetir hasta que la planta comience a florecer para desarrollar a edades tempranas mas brazos productivos y mejorar el fenotipo del arbusto (no dejarlo muy alto). Después que comienza la floración, la planta producirá grano para extracción constantemente, La recolección debe realizarse cuando el racimo presente 60% de madurez y ojalá en época seca, evitando llevar humedad a la extracción.

Fertilización: Altos niveles de nitrógeno perjudican la cantidad de flores y frutos pues se incrementa el desarrollo de hojas innecesarias. Para obtener un

adecuado equilibrio se debe hacer análisis de suelos y darle importancia a las aplicaciones de calcio y fósforo.

Combate de malezas: Se puede realizar con herbicidas químicos, en pre o pos emergencia o bien por medios mecánicos. El cultivo debe permanecer limpio, sobre todo en la fase de crecimiento. Se recomienda el uso de trifluralin (Treflán en dosis de 1 a 3 l/ha) incorporado antes de la siembra y se complementa su acción con un pase de cultivadora una vez establecido el cultivo.

Cosecha: Puede iniciarse a los 100-150 días después de la siembra. Los racimos son cortados con cuchillos afilados o tijeras podadoras. La mejor hora para hacer la recolección son las de la mañana. El corte de los racimos puede hacerse cuando estos han secado completamente pero se corre el riesgo de que se hayan desgranado o se desgranen al tirar los racimos al suelo.

Las variedades dehiscentes se desgranar naturalmente con el secado al sol, luego es necesario limpiar bien la semilla sea por ventilación o a mano. Las variedades indehiscentes deben descascarse a máquina.

Desgrane: En el manipuleo de la secada, si la variedad es altamente dehiscente un gran porcentaje de las cápsulas se desgranar en el proceso, el resto, una vez separados los vástagos secos, es necesario desgranarlos manualmente.

Enfermedades: En el cultivo de la higuera se pueden presentar algunas enfermedades que pueden constituirse en un factor limitante de la producción, debido a que bajo condiciones favorables puede ocasionar pérdidas.

Moho Ceniciento (*Botrytis ricini*). Se presenta en ambientes húmedos durante la última parte del ciclo vegetativo de la planta. Ataca los racimos, vaneándolos y haciendo caer los frutos. Los frutos se cubren con un moho grisáceo que se desprende fácilmente.

Mancha de Fusarium (*Fusarium oxysporum*). Su ataque se localiza en forma de parches dentro del cultivo, la infección se produce por el sistema radical y el hongo se desarrolla en el xilema. El ataque se puede producir en plántulas o plantas adultas cuando la infestación es mayor. La planta sufre un marchitamiento hasta producir la muerte.

Marchitamiento de las Plántulas (*Phytophthora colocasicae*). Ataca hojas, tallos tiernos, se caracteriza por la aparición de manchas verde opaco al principio, amarilla y pardas al final. Produce marchitamiento descendente. Se presenta en lotes mal drenados o cuando se presenta excesos de lluvia.

Roya (*Melapsona Ricini*). Las hojas presentan pústulas en el envés, manchas amarillas redondeadas. Puede ser grave cuando la enfermedad aparece temprano.

Plagas:

- En el estado de plántula encontramos las siguientes plagas tronzadoras de hojas:
 - Gallina ciega, *Phyllophaga sp*
 - Gusano alambre, *Agriotes sp*
 - Gusano soldado, *Spodoptera sp*
- Desde el estado de plántula a la floración se presentan ataques a yemas y flores, ocasionados por:
 - Gusano negro, *Proderica sp*
 - Gusano soldado, *Spodoptera sp*
 - Mosca blanca, *Bemisia tabaci*
 - Chinche verde, *Nezara viridula*
 - Lorito verde, *Empoasca sp*
- Estado final desde la formación de los primeros racimos al corte, atacando los racimos en formación y los ya formados tenemos:
 - Bellotero, *Heliothis sp*

ANEXO C. EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE HIGUERILLA

ACEITE DE RICINO.

El aceite de ricino o aceite de castor proviene de las semillas que se encuentran dentro de las capsulas de los frutos; como característica principal se encuentra que más de un 90% de su composición corresponde al triglicérido del ácido ricinoléico, a continuación se presenta la ficha técnica de la variedad de semilla escogida para el proceso.

HIGUEROIL 

Elaborado por:  de Colombia

NOMBRE:	NEGRA
CODIGO:	VC-05/99
ORIGEN LOTE:	ECUADOR (MANABI)
CONTENIDO DE ACEITE	50%
SEMILLA POR KG.	1200-1300
PESO POR SEMILLA (gr. Promedio)	0.8
COLOR	NEGRA
ALTURAS CULTIVABLES	0-800 MSNM
CICLO VEGETATIVO MEDIO (días)	150
PRODUCTIVIDAD MEDIA (Kg. / ha/ año)	6000
PRODUCTIVIDAD POTENCIAL (Kg. / ha / año)	8000
FRUTOS	DEHISCENTES
RECOLECCIÓN	PARCELADA
PODAS	2-3
HABITO DE CRECIMIENTO	ARBUSTIVO

ALTURA MEDIA DE LA PLANTA (m)	2
TOLERANCIA A LA HUMEDAD	ALTA
FORMATO DE LAS SEMILLAS	OVALADA
TIEMPO DE GERMINACION (Días Prom.)	10

Tabla C1. Ficha técnica de la higuerrilla. Fuente: *HIGUEROIL, 2006*

La fórmula molecular del ácido tricicoléico es $C_{57}H_{104}O_4$, su estructura molecular se presenta a continuación.

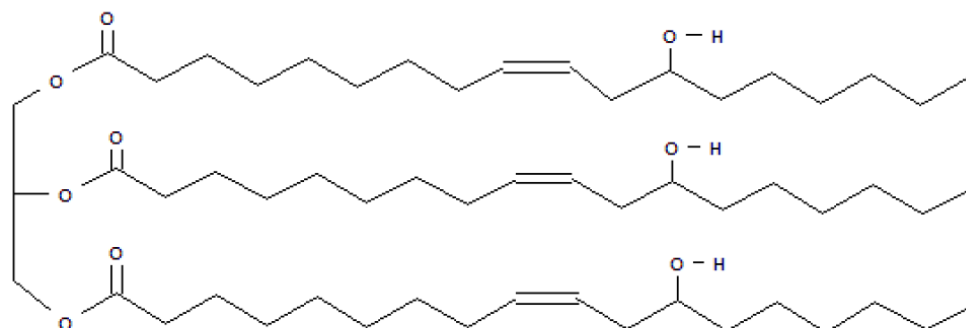


Figura C1. Estructura molecular ácido tricicoléico.

Aun cuando su principal componente es el ácido ricinoleico, formado de el triglicérido simple denominado tricicoléina, cuya concentración es alta, adicionalmente, en el aceite de higuerrilla se pueden encontrar pequeñas cantidades de tripalmitina, triestearina y otros triglicéridos mixtos. Dada su composición química, el aceite de ricino adquiere una serie de propiedades, su alta viscosidad, miscibilidad en el alcohol, benceno, cloroformo, bisulfuro de carbono y, en pequeñas proporciones en éter de petróleo y aceites minerales, y con un bajo punto de solidificación, es debido a este ultima propiedad que es resistente a muy bajas temperaturas sin congelarse, dando la posibilidad de ser usado en motores de altas revoluciones en los cuales se requiere resistencia a las variaciones de presión y temperatura.





Compuesto	Porcentaje (%)	Fórmula molecular	Estructura
Ácido palmítico	0.9	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	
Ácido esteárico	1.1	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	
Ácido oleico	3.0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	
Ácido linoleico	4.6	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CH}\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	
Triricinoleína	90.4	$(\text{CH}_3)_3[\text{CH}_2]_{41}(\text{CH})_4(\text{OH})_3(\text{CH}=\text{CH})_3(\text{COO})_3$	

Tabla C2. Composición del aceite de higuera

Es necesario para poder ser usado como materia prima para la producción de biocombustible, que pase nuestra semilla por una variedad de etapas de pretratamiento para poder obtener un aceite con los requerimientos necesarios. A continuación se presenta en la figura un resumen de los pasos o etapas que son necesarios para llegar a tal fin.

Calentamiento: El objetivo de este proceso es hacer más frágil la semilla al dilatar sus membranas celulares. En esta etapa las semillas (1161656,1229 ton/año) se colocan en contacto con aire caliente con el fin de incrementar su temperatura hasta 60°C, se siguió el proceso reportado por *RODRIGUEZ, Jesús E. (1980)*, del cual también se escalo el consumo energético.

Extracción por prensado: Consiste básicamente en someter a presión la semilla por medio de un equipo adecuado (prensa expeller), que permita al líquido escapar y que retenga al sólido en las superficies compresoras. Los

productos obtenidos por este método son el aceite y un material seco conocido como torta. El aceite obtenido es enviado a tanques de almacenamiento y la torta resultante es enviada a la extracción por solvente con un aceite remanente del 18%.

Extracción por solvente: Este tipo de extracción sólido- líquido, se basa en la disolución del aceite (líquido) que forma parte de la semilla (sólido), usando un disolvente adecuado (hexano para nuestro caso en estudio), el cual es insoluble para el resto de sólidos. Se requiere fundamentalmente contacto del disolvente con el sólido a tratar para disolver el componente soluble o soluto y separación de la disolución y el inerte con la disolución adherida al mismo. El tipo de contacto empleado fue en contracorriente de varias etapas (10 etapas); para el cálculo de las etapas fue necesario conocer la curva de retención hexano-aceite GIRALDO, Sonia (1978). La torta que deja la extracción tiene un contenido de aceite de 0.9% de aceite de higuera.

Procesamiento de la torta. La torta de salida de la etapa de extracción por solvente se coloca en contacto con vapor con el objetivo de inactivar algunas enzimas que lleva y retirarle el hexano que arrastra de la extracción con solvente y aceite en pequeñas cantidades, este vapor es condensado mediante un sistema de condensadores totales en los que se recupera el hexano y el agua. Luego la torta es enfriada con aire y enviada a la sección de almacenamiento para un posterior uso como abono orgánico para el cultivo de higuera.

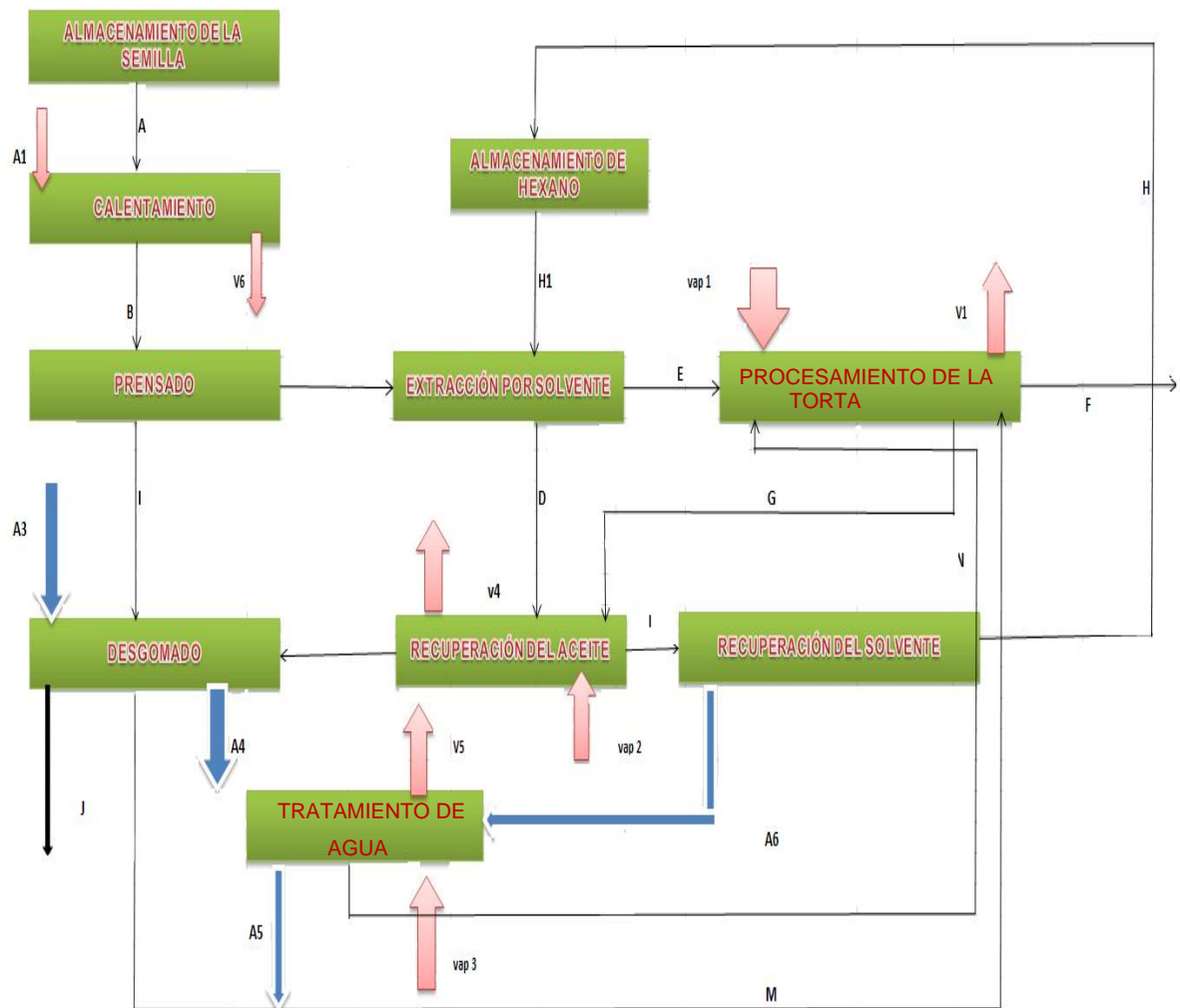
Recuperación del aceite. La cantidad de aceite presente en la micela resultante de la extracción es concentrada por medio de evaporadores de efecto múltiple, dando un aceite de higuera crudo con pequeñas trazas de hexano y agua.

Recuperación del solvente. El hexano proveniente de las etapas de procesamiento de la torta y de la 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 las gommas colectadas en la fase acuosa son separadas del agua y retornadas al procesamiento de la torta.

Figura C2. Esquema general del proceso de extracción del aceite de higuera



ANEXO D. TRANSESTERIFICACION DEL ACEITE DE HIGUERILLA

REACCIONES EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Una vez obtenida la materia prima, el proceso de fabricación de este producto resulta bastante sencillo desde el punto de vista técnico. El aceite se somete a un proceso denominado “transesterificación”, en el que se hidrolizan los enlaces éster de los triglicéridos, obteniendo nuevos ésteres con los ácidos grasos liberados en la hidrólisis y un alcohol sencillo que se utiliza como reactivo. El proceso se realiza en presencia de un catalizador a una temperatura moderada de unos 60 °C. En realidad, se trata de algo muy parecido a la elaboración del jabón casero con el que tanto aceite se reciclaba antaño. De hecho, durante la elaboración del biodiesel se obtiene el principal compuesto de estos jabones: la glicerina, que es un subproducto de gran valor añadido y con múltiples salidas comerciales en los sectores químico, agrario y alimentario.

Las principales variables que influyen en el rendimiento, conversión y cinética de la reacción de transesterificación son la calidad de la materia prima, el tipo y cantidad de catalizador, el tipo de alcohol, la relación molar alcohol/aceite y las condiciones de reacción como temperatura, presión y agitación.

REACCIONES DE TRASESTERIFICACIÓN DE TRIGLICÉRIDOS

Aunque la esterificación es un proceso posible, sin embargo el método utilizado comercialmente para la obtención de biodiesel es la transesterificación (también llamada alcoholólisis). Se basa en la reacción de moléculas de triglicéridos (el número de átomos de las cadenas está comprendido entre 15 y 23, siendo el más habitual de 18 con alcoholes de bajo peso molecular (entre éstos, el más utilizado es el metanol debido a su bajo costo, seguido por el etanol) para producir ésteres y glicerina (que puede ser utilizada en cosmética, alimentación, farmacia, etc.).

La reacción de transesterificación, que se presenta en la figura D1, se desarrolla en una proporción molar de alcohol a triglicérido de 3 a 1, reaccionando en la metanólisis 1 mol de triglicérido con 3 moles de alcohol (aunque se añade una cantidad adicional de alcohol para desplazar la reacción hacia la formación del éster metílico). El triglicérido es el principal componente del aceite vegetal o la grasa animal. Además, la formación de la base de la glicerina, inmisible con los ésteres metílicos, juega un papel importante en el desplazamiento de la reacción hacia la derecha, alcanzándose conversiones cercanas al 100%.

La figura D1 muestra la reacción que transforma las moléculas de triglicéridos, grandes y ramificadas, en moléculas de ésteres alquílicos, lineales, no ramificadas, de menor tamaño y muy similares a las del diesel.

Es el método más usado para la obtención del biodiesel, esta reacción se ve influenciada por diferentes variables, entre ellas la temperatura de reacción, el nivel de agitación, el tiempo de reacción, la concentración del catalizador, la pureza de la materia prima. La reacción de transesterificación ocurre en tres etapas consecutivas y balanceadas como se presenta a continuación:

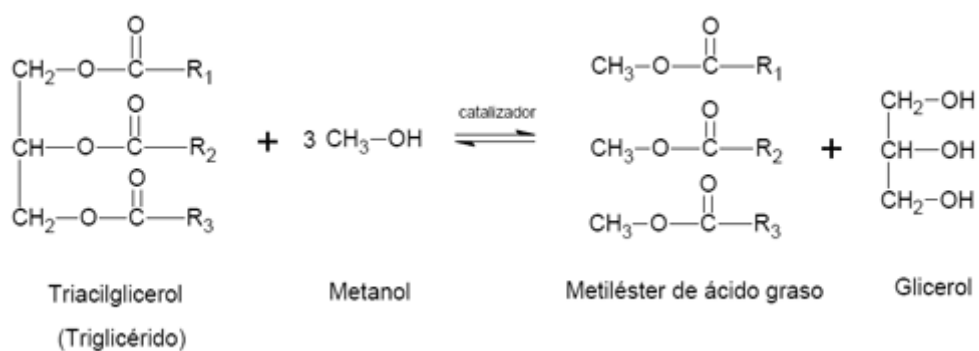


Figura D1. Reacción de transesterificación de un triglicérido para producir biodiesel.

En la figura, R1, R2 y R3 son cadenas generalmente largas de ácidos grasos. Los ácidos grasos que se presentan con mayor frecuencia en las grasas y aceites, son:

Ácido palmítico $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_{14} - \text{COOH}$ (16 carbones, saturado)

Ácido esteárico $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_{16} - \text{COOH}$ (18 carbones, saturado)

Ácido oleico $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_7 - \text{CH} = \text{CH} - (\text{CH}_2)_7 - \text{COOH}$ (18 carbones 1 doble ligadura, insaturado)

Ácido Linoléico $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_4 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - (\text{CH}_2)_7 - \text{COOH}$ (18 carbones más doble ligadura)

Ácido linolenico 18 carbones, 3 dobles ligaduras

En la figura D2 se presentan las diferentes reacciones que tienen lugar en la transesterificación, la cual consiste químicamente en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción un mol de éster metílico es liberado.

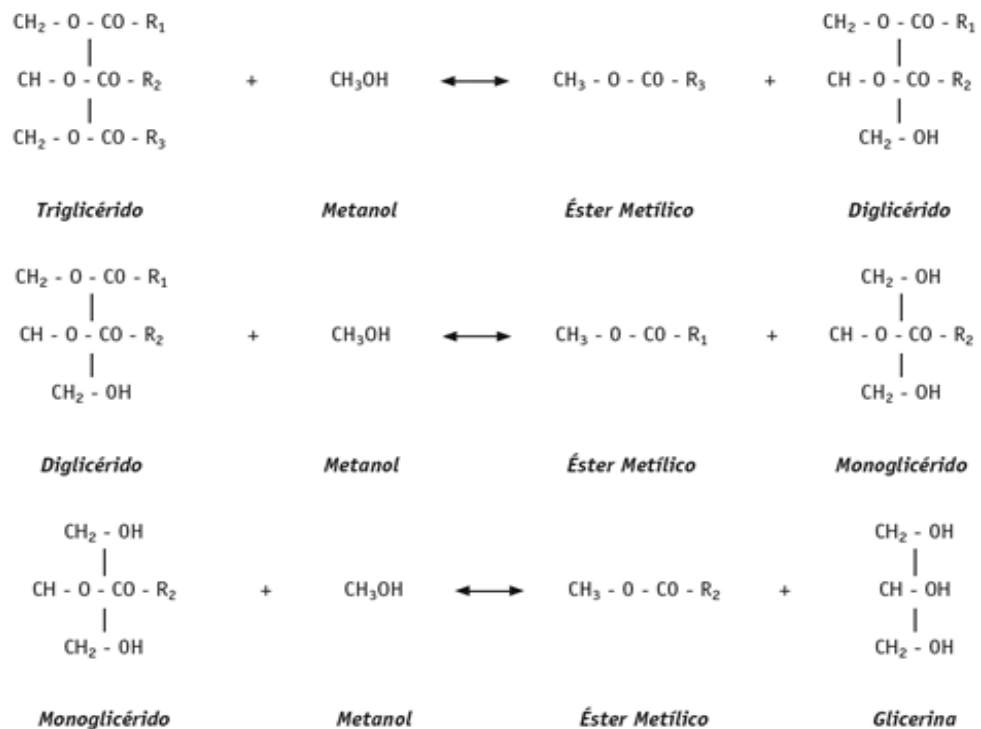


Figura D2. Etapas de la reacción de transesterificación.

En la reacción de transesterificación se utiliza un catalizador para mejorar la velocidad de reacción y el rendimiento final. Los catalizadores pueden ser ácidos homogéneos (H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4 , RSO_3), ácidos heterogéneos (Zeolitas, Resinas Sulfónicas, SO_4/ZrO_2 , WO_3/ZrO_2), básicos heterogéneos (MgO , CaO , $\text{Na}/\text{NaOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$), 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. En el caso de la reacción de transesterificación, cuando se utiliza un catalizador ácido se requieren condiciones de temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos, por ello es frecuente la utilización de derivados de ácidos más activos.

Sin embargo, la utilización de álcalis, que como se ha comentado es la opción más utilizada a escala industrial, implica que los glicéridos y el alcohol deben ser anhidros ($<0,06\%$ v/v) para evitar que se produzca la saponificación. Además, los triglicéridos deben tener una baja proporción de ácidos grasos libres para evitar que se neutralicen con el catalizador y se formen también jabones.

De esta manera las reacciones secundarias que se pueden dar son las siguientes:

- Reacción de saponificación
- Reacción de neutralización de Ácidos grasos libres

El triglicérido reacciona con el catalizador básico, consumiendo éste, en presencia de agua dando lugar a la formación de jabones (reacción de saponificación), tal y como se puede ver en la figura D3.

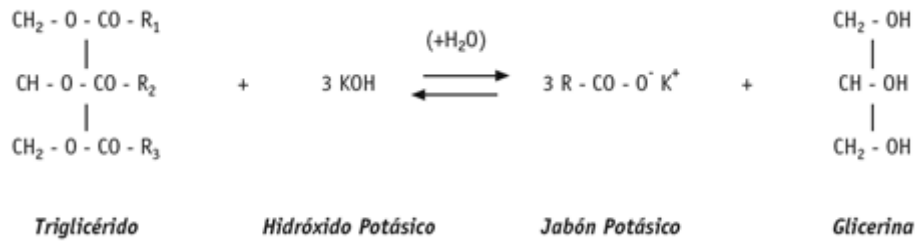


Figura D3. Reacción de saponificación.

Por este motivo, se debe eliminar el agua, mediante evaporación, en los aceites con altos contenidos en humedad antes de llevar a cabo la transesterificación.

Por otra parte, hay dos maneras de eliminar los ácidos grasos libres presentes en el aceite. Así, se puede proceder a su neutralización, ya que los ácidos grasos presentes en el aceite vegetal pueden reaccionar con el catalizador básico (fundamentalmente NaOH) en presencia de agua, ocurriendo asimismo una reacción indeseable, produciendo como en el caso anterior jabón. Otra manera de eliminar los ácidos grasos libres es mediante una reacción de esterificación con un catalizador ácido con lo que se formaría el éster metílico.

REACCIONES DE ESTERIFICACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS

El proceso que se utiliza para la producción de biodiesel es la transesterificación, sin embargo la esterificación se viene aplicando combinándolo con la transesterificación de cara a aprovechar el subproducto de ácidos grasos y producir asimismo biodiesel.

Dada la importancia de los ésteres se han desarrollado numerosos procesos para obtenerlos. El más común es el calentamiento de una mezcla del alcohol y del ácido correspondiente con ácido sulfúrico, utilizando el reactivo más económico en exceso para aumentar el rendimiento y desplazar el equilibrio hacia la derecha (esterificación de Fischer). El ácido sulfúrico sirve en este

caso tanto de catalizador como de sustancia higroscópica que absorbe el agua formada en la reacción. A veces es sustituido por ácido fosfórico concentrado. En la práctica este procedimiento tiene varios inconvenientes. El alcohol puede sufrir reacciones de eliminación formando olefinas, esterificación con el propio ácido sulfúrico o de formación del éter, y el ácido orgánico puede sufrir descarboxilación.



FiguraD4. Reacción de Esterificación

Los catalizadores que se utilizan en este tipo de reacción, al contrario que en el proceso de transesterificación que habitualmente son hidróxidos, son ácidos o enzimáticos. En el caso de la esterificación, al contrario que en la reacción de transesterificación, al utilizar catalizadores ácidos no es necesario recurrir a trabajar con temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos

CATALIZADORES

Es necesario contar con catalizadores para que ocurra la reacción y sea posible desde un punto de vista cinético. Estos catalizadores, en el caso de la transesterificación, pueden ser ácidos homogéneos, ácidos heterogéneos, básicos homogéneos o enzimáticos, siendo los catalizadores básicos los que se utilizan a nivel industrial en la transesterificación ya que actúan mucho más rápido y además permiten operar en condiciones moderadas. El único problema de estos catalizadores es que deben ser anhidros para evitar que se produzcan reacciones secundarias, como la de saponificación, que reducirían el rendimiento del proceso. Por otra parte, los triglicéridos deben tener una baja proporción de ácidos grasos libres para evitar que se neutralice con el catalizador y se formen también jabones.

Se ha observado que la reacción es más rápida cuando se cataliza con un alquilo. En el primer paso de la reacción, un ion óxido alquilo ataca al grupo carbonilo de la molécula del triglicérido. La reacción de este producto intermedio con un alcohol produce un ion del grupo alcóxido en el segundo paso. En la última etapa la redistribución del compuesto tetraedro intermedio da lugar a un éster y a diglicerina.

Asimismo, se pueden utilizar catalizadores ácidos de Bronsted, preferiblemente sulfúricos y sulfónicos. Estos catalizadores producen rendimientos muy altos en ésteres alquílicos pero las reacciones son lentas, necesitando temperaturas superiores a los 100 °C y más de 3 horas para completar la conversión. La acidificación del grupo carbonil del éster conduce a la carbonatación, y posteriormente, el ataque nucleófilo del alcohol produce el compuesto tetraédrico intermedio. Esto elimina el glicerol para formar un nuevo éster y regenerar el catalizador.

En la figura D5 se resumen las ventajas y desventajas de utilización de los distintos catalizadores para el proceso de transesterificación:

Catálisis Básica (homogénea)

VENTAJAS

- Esterifica ácidos grasos
- No se forman jabones
- Purificación más simple

INCONVENIENTES

- Velocidad de reacción baja
- Exceso de alcohol elevado
- Condiciones enérgicas: P, T
- Neutralización del catalizador

Catálisis Ácida (homogénea)

VENTAJAS

- Esterifica ácidos grasos
- No se forman jabones
- Purificación más simple

INCONVENIENTES

- Velocidad de reacción baja
- Exceso de alcohol elevado
- Condiciones enérgicas: P, T
- Neutralización del catalizador

Catálisis Enzimática

VENTAJAS

- Esterifica ácidos grasos
- No se forman jabones
- Purificación más simple

INCONVENIENTES

- Velocidad de reacción baja
- Exceso de alcohol elevado
- Condiciones enérgicas: P, T
- Neutralización del catalizador

Catálisis Heterogénea

VENTAJAS

- Reutilización del catalizador
- Facilidad de procesos continuos
- No se forman jabones
- Purificación más sencilla

INCONVENIENTES

- Transferencia de materia

VARIABLES QUE AFECTAN A LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN

Acidez y humedad

Los contenidos de ácidos grasos y de humedad son los parámetros determinantes de la viabilidad del proceso de transesterificación del aceite vegetal. Para que se realice la reacción completa se necesita un valor de ácidos grasos libres, del inglés Free Fatty Acid (FFA), menor al 3%. Cuanto más alta es la acidez del aceite, menor es la conversión. Además, tanto el exceso como la deficiencia de catalizador pueden afectar a la reacción, pues el agua reacciona con los catalizadores formando jabones.

Si las grasas animales o los aceites vegetales, con valores altos de FFA, se quieren utilizar para producir biodiesel, es necesario refinarlos con una neutralización, utilizando una solución de NaOH para eliminar los ácidos grasos

libres. Igualmente, el proceso de catálisis ácida también se puede usar para la esterificación de estos ácidos grasos.

Los triglicéridos deben tener un valor ácido bajo y los materiales deben contener baja humedad. La adición de catalizadores de hidróxido de sodio compensa la alta acidez, pero el jabón resultante provoca un aumento de viscosidad o de formación de geles que interfieren en la reacción y en la separación del glicerol. Cuando no se dan estas condiciones los rendimientos de la reacción se reducen sustancialmente. El hidróxido y metóxido de sodio o de potasio deben mantener un grado de humedad bajo. Su contacto con el aire disminuye la efectividad del catalizador por su interacción con el dióxido de carbono y la humedad.

Actualmente, la mayor parte del biodiesel producido, procede de aceites vegetales al que se le añade metanol y un catalizador alcalino. Sin embargo hay muchos aceites de bajo costo y grasas animales que pueden ser utilizados. Su problema radica en que suelen contener gran cantidad de ácidos grasos que no se pueden convertir en biodiesel usando catalizadores alcalinos. En estos casos es necesario hacer la esterificación en dos etapas: inicialmente debe realizarse un pretratamiento para convertir los FFA en esteres metílicos con un catalizador ácido, y en un segundo paso se realiza la transesterificación con un catalizador alcalino, para completar la reacción.

Tipo de catalizador y concentración

Si el aceite usado tiene un alto grado de ácidos grasos y elevada humedad los catalizadores ácidos son los más adecuados. Estos ácidos pueden ser sulfúrico, fosfórico o ácido sulfónico orgánico.

En los procesos de metanólisis alcalina los principales catalizadores usados han sido el hidróxido potásico y el hidróxido sódico

Se han probado catalizadores de metales alcalino-térreos. El proceso se lleva a cabo si aparecen iones de metóxido en la reacción intermedia. Los hidróxidos alcalino-térreos, alcóxidos y óxidos catalizan la reacción más lentamente [14]. Aunque el proceso de transesterificación, con catalizadores alcalinos, para transformar los triglicéridos en sus correspondientes esteres metílicos tiene una conversión muy alta en un periodo más corto de tiempo, tiene algunos inconvenientes: el catalizador debe ser separado del producto final, la recuperación del glicerol puede resultar difícil, el agua alcalina resultante del proceso debe ser tratada y los ácidos grasos y el agua afectan a la reacción. Los catalizadores enzimáticos pueden obtener resultados relevantes en sistemas tanto acuosos como no acuosos, lo que resuelve alguno de los problemas anteriores [15]. En particular el glicerol se puede separar fácilmente y, también, los ácidos grasos contenidos en el aceite reutilizado se pueden convertir completamente en esteres alquílicos. En cambio el uso de estos catalizadores enzimáticos tiene un coste superior que el de los alcalinos.

Relación molar de alcohol / aceite y tipo de alcohol

La relación estequiométrica requiere tres moles de alcohol y un mol de triglicérido para producir tres moles de esteres y un mol de glicerol. La transesterificación es una reacción de equilibrio que necesita un exceso de alcohol para conducir la reacción al lado derecho. Para una conversión máxima se debe utilizar una relación molar de 6:1. En cambio un valor alto de relación molar de alcohol afecta a la separación de glicerina debido al incremento de solubilidad. Cuando la glicerina se mantiene en la solución hace que la reacción revierta hacia la izquierda, disminuyendo el rendimiento de los ésteres.

La formación de éster etílico comparativamente es más difícil que la de éster metílico, especialmente la formación de una emulsión estable durante la etanolisis es un problema. El etanol y el metanol no se disuelven con los triglicéridos a temperatura ambiente y la mezcla debe ser agitada

mecánicamente para que haya transferencia de masa. Durante la reacción generalmente se forma una emulsión, en la metanólisis esta emulsión desciende rápidamente formándose una capa rica en glicerol quedándose en la parte superior otra zona rica en éster metílico. En cambio en la etanólisis esta emulsión no es estable y complica mucho la separación y purificación de los esteres etílicos. La emulsión está causada en parte por la formación de monoglicéricos y diglicéricos intermedios, que contienen tanto grupos hidróxidos polares como cadenas de hidrocarburos no polares.

Efecto del tiempo de reacción y temperatura

La conversión aumenta con el tiempo de reacción.

La transesterificación se puede producir a diferentes temperaturas, dependiendo del tipo de aceite

REACCIONES COMPETITIVAS

Son indeseables, una de las reacciones que compite con la reacción de transesterificación, se produce cuando la materia prima tiene un alto contenido de ácidos grasos, los cuales reaccionan más rápidamente que lo que los triglicéridos pueden hacerlo con el hidróxido de sodio, formando jabones.



Figura D6. Reacción de formación de jabones.

También, se forman jabones cuando la materia prima tiene agua

La excesiva formación de jabón inhibe la reacción de transesterificación, incluyendo la separación del glicerol y el lavado del biodiesel donde se produce una emulsión.

PROCESOS EN LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE BIODIESEL

Con respecto al estado actual de la tecnología para la producción de biodiesel, se puede decir que se trata de una tecnología probada, relativamente madura, en período de diseminación, capaz de aprovechar diversas materias primas y que ha alcanzado nivel comercial en varios países. La mayor parte del biodiesel producido en la actualidad se elabora mediante metanólisis en medio básico.

PROCESO GENERAL DE TRANSESTERIFICACIÓN

Existen múltiples opciones de operación viables para la fabricación de biodiesel. Muchas de estas tecnologías pueden ser combinadas de diferentes maneras variando las condiciones del proceso y la alimentación del mismo. La elección de la tecnología será función de la capacidad deseada de producción, alimentación, calidad y recuperación del alcohol y del catalizador.

En general, plantas de menor capacidad y diferente calidad en la alimentación suelen utilizar procesos Batch o discontinuos. Los procesos continuos, sin embargo, son más idóneos para plantas de mayor capacidad que justifique el mayor número de personal y requieren una alimentación más uniforme.

Los procesos continuos pueden emplear bien sea reactores de tanque agitado CSTR (continuous stirred tank reactor) como tubulares PFR (plug flow reactor). Un esquema de proceso típico es el uso de varios CSTR en serie. Después de que parte de la glicerina producida se sedimenta en el primer reactor, la reacción en el segundo es bastante rápida. Gran cantidad de procesos emplean mezcladores estáticos o bombas para aumentar la intensidad de mezclado de la corriente que ingresa al reactor. El uso de reactores PFR ofrece menores tiempos de residencia, del orden de 6-10 min., aunque debe garantizarse que el diseño de los reactores brinde el grado de agitación necesario para obtener conversiones adecuadas.

Proceso Combinado Esterificación-Transesterificación

En nuestro caso teniendo en cuenta la variedad de procesos que se pueden usar para llevar a cabo la producción de Biodiesel a base de higuera, en nuestro caso este proceso.

Este tipo de proceso refina los ácidos grasos aparte del sistema de alimentación o mediante un tratamiento diferenciado en la unidad de esterificación. Se añaden los catalizadores cáusticos y el producto de reacción se separa mediante centrifugación (proceso llamado Caustic Stripping).

Los aceites refinados son secados y enviados a la unidad de transesterificación para un proceso posterior. De esta manera, los ácidos grasos pueden ser transformados en ésteres metílicos mediante un proceso ácido de esterificación.

Los procesos de catálisis ácida pueden ser usados para la esterificación directa de los ácidos libres (FFA). Una alternativa a esto sería utilizar un catalizador básico para formar deliberadamente jabón en el FFA. El jabón es recuperado, el aceite seco y posteriormente utilizado en un sistema convencional mediante catalizadores básicos.

En la reacción de transesterificación-esterificación, por su parte, se puede aprovechar los ácidos grasos subproductos de la reacción de la figura 6 para alimentar posteriormente un reactor de esterificación.

DESCRIPCION DEL PROCESO DE OBTENCION DEL BIODIESEL

Para la producción de biodiesel se tomo como materia prima principal el aceite de higuera previamente refinado que es almacenado para luego ser llevado al reactor de conversión donde se realiza esterificación de los ácidos grasos y

transesterificación de triglicéridos; posteriormente los productos obtenidos (biodiesel y glicerina) son llevados a procesos de recuperación y purificación.

A continuación se detalla cada una de las etapas del proceso mostrado en la figura D6, este proceso fue simulado en ASPEN HYSYS[®], utilizando el modelo UNIQUAC como paquete termodinámico base para la simulación (GARCIA, Carlos Mario. Bucaramanga 2007). Se emplearon datos de los coeficientes binarios de interacción calculados mediante el modelo UNIQUAC para el biodiesel de aceite de higuera, el glicerol, y el metanol a 298 K y 1 atm de presión (FRANCA, Bruno B, et al. 2008).

Almacenamiento del aceite refinado. El aceite proveniente de la extracción es almacenado en tanques provistos de un sistema de calentamiento y agitación con el objetivo de garantizar su homogeneidad.

Obtención del metilester. En el reactor se lleva a cabo una catálisis ácida de los ácidos grasos libres y del triglicérido ricinoleico produciéndose biodiesel, agua y glicerina. El reactor trabaja con una temperatura de 120 °C y una presión de 6.8 atm logrando una conversión del 95 % con una relación molar alcohol-aceite de 12:1 con un 3% de ácido sulfúrico.

Recuperación del metanol. Para esto se utilizó una torre de destilación, donde se recupera el 99 % del metanol que entra al proceso, dejando como fondo el biodiesel impuro.

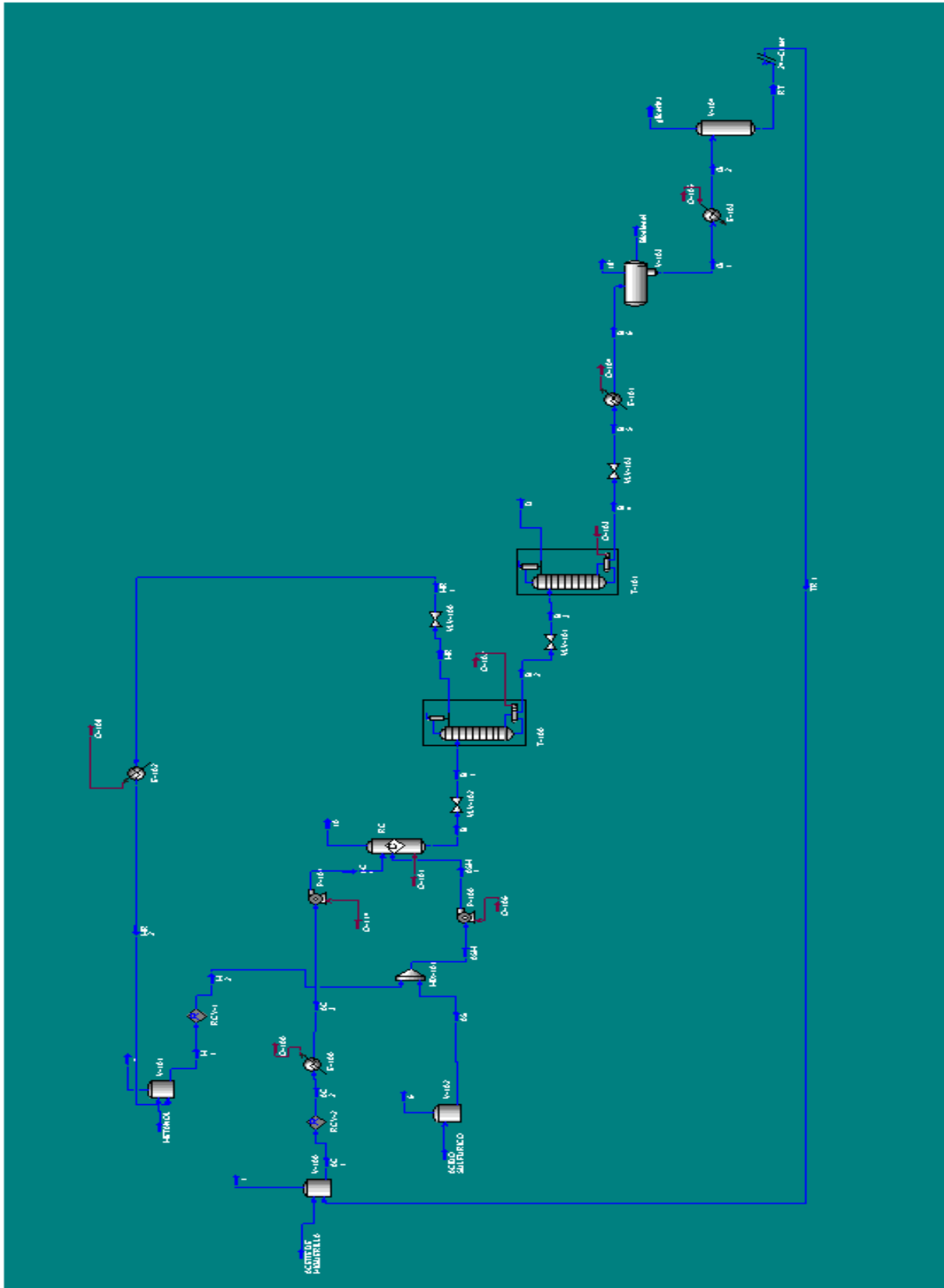
Purificación del Biodiesel. Como primera medida se utiliza una torre de destilación para separar el biodiesel y la glicerina del agua, del ácido sulfúrico y del metanol residual. Posteriormente pasa a un decantador donde se separa el biodiesel de la glicerina después pasa a un destilador donde se purifica la glicerina separándola de la tricínoleína, con el objetivo de cumplir con las normas de calidad presentadas a continuación.

Propiedad	Unidad	Especificaciones	Método
Propiedades como combustible			
Densidad a 15°C	g/cm ³	0.86-0.90	En ISO 3675 En ISO 12185
Viscosidad cinemática 40°C	mm ² /s	3.5-5.0	En ISO 3104
Punto de inflamación	°C	>101	ISO/CD 3679
Punto de obstrucción del filtro(POFF)	°C verano °C invierno	Max. 0 Max. < -15	DIN EN 116
Azúfre	mg/Kg	Max. 10	
Residuo carbonoso conradson (10% residuo destilación)	% p/p	Max. 0.30	En ISO 10370
Índice de cetano	-	Min 51	En ISO5165
Contenido de cenizas	% p/p	Max. 0.02	ISO 3987
Contenido de agua	mg/Kg	Max. 500	ISO 12937
Partículas sólidas	g/m ³	Max. 20	DIN 51416
Corrosión al cobre (3h/50°C)	-	Max. 1	ISO 2160
Estabilidad a la oxidación (110°C)	horas	6	Pr En 14112
Propiedades como éster			
Índice de acidez	mg KOH/g	Max. 0.5	Pr EN 14104
Contenido de metanol	% p/p	Max. 0.2	Pr EN 14110
Contenido en monoglicéridos	% p/p	Max.0.8	Pr EN 14105
Contenido en di glicéridos	% p/p	Max.0.2	Pr EN 14105
Contenido en triglicéridos	% p/p	Max.0.2	Pr EN 14105
Glicerina ligada	% p/p	Max. 0.2	Cálculo
Glicerina libre	% p/p	Max. 0.02	Pr EN 14105 Pr EN 14106
Glicerina total	% p/p	Max. 0.25	Pr EN 14105
Índice de yodo	-	Max. 120	Pr EN 14111

Tabla D2. Especificaciones según norma ASTM D-6751.Fuente (CASTILLO. Liliana. Primer congreso sobre combustibles y energías renovables. 2007)

Para nuestro caso en estudio se tuvo mas en cuenta las propiedades del biodiesel como éster debido a que estas fueron mas fáciles de medir por los medios de cálculos utilizados.

Figura D7. Proceso de producción de biodiesel mediante esterificación/transesterificación. Proceso de catálisis ácida.



ANEXO E. INTEGRACIÓN DE LOS CICLO BIOGEOQUÍMICOS

Ciclo del Carbono

A medida que las plantas crecen van fijando CO₂ atmosférico debido al proceso de fotosíntesis esto con el fin de formar compuestos de carbono orgánicos utilizados para su crecimiento, esta cantidad de CO₂ fijado, tiene variados destinos; como lo son el retornar nuevamente a la atmosfera (respiración de la planta), fijarse en la biomasa que se cosecha (semillas) o formar parte del fijado en la biomasa que queda en el terreno (rastrosos y raíces) (ver figura E1).

Una parte del carbono absorbido por las plantas es transferido al suelo en forma de rizodepositos (formas inmovilizadas de C) los cuales se convierten en la contribución de la planta en la disminución del CO₂, formas que al no transformarse nuevamente en CO₂, se consideran como una fijación neta del CO₂ atmosférico por el cultivo (CIEMAT, 2006). Las cantidades de CO₂ emitidas provenientes 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). La fijación neta de C en el suelo representada como un porcentaje del CO₂ incorporado por la planta se asume con el valor de 56.8% (Amaya R. Vivian H. et. al., UIS 2008). La fijación de CO₂ para el rastrojo se consideró de 56.8% (Kuzyakov,y. Domanski, 2000).

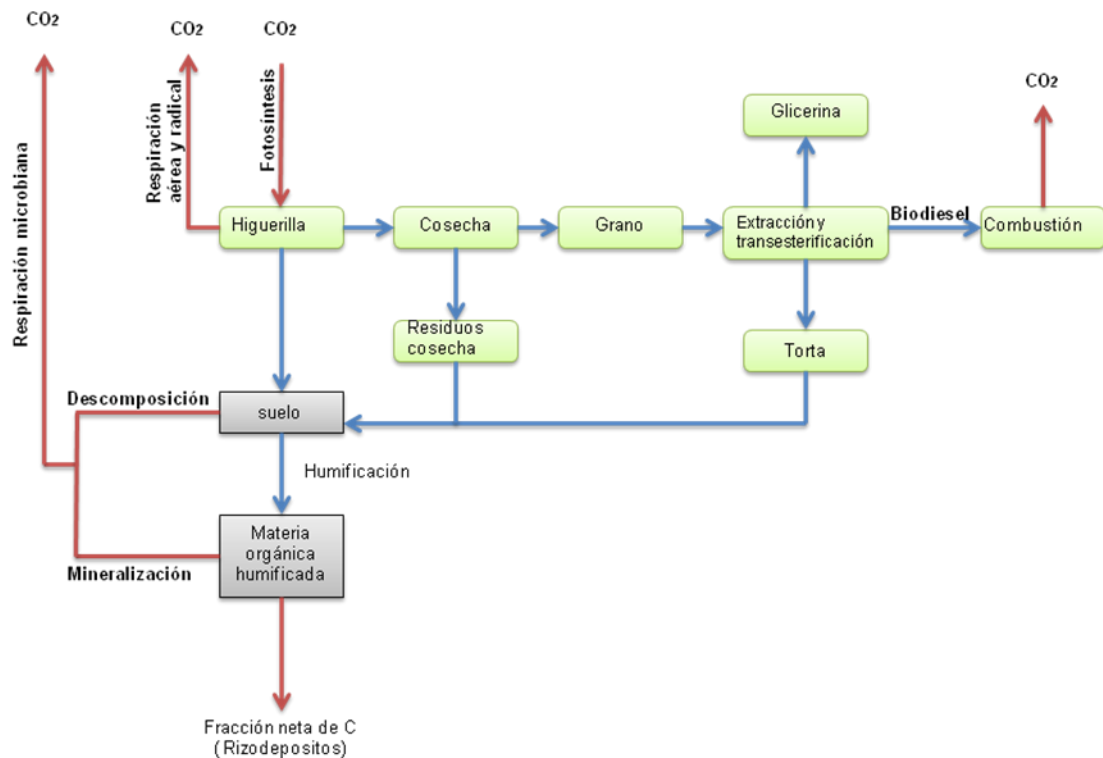


Figura E1. Ciclo del Carbono para la cadena de producción de biodiesel.

Ciclo del Nitrógeno

El nitrógeno podemos encontrarlo en varios compartimientos, en la planta, en los residuos vegetales, en el nitrógeno mineral, y en la materia orgánica humificada. Los flujos de entrada de nitrógeno entre estos compartimientos y también con el medio fuera de ellos se ven representados por la fijación biológica de nitrógeno, la fertilización y el ingreso por lluvia. Los flujos de salida de mayor magnitud son la exportación, volatilización, desnitrificación y lixiviación (Álvarez, 2006). Se consideró que existe una fijación neta de nitrógeno en el suelo debida a la presencia de bacterias no simbióticas que no superan los 15 Kg/ha año (Abela, 2004). Las emisiones debidas al uso de los fertilizantes (N_2O) se calcularon de acuerdo a lo propuesto en la metodología IPCC; esta metodología expresa las perdidas de nitrógeno en forma de oxido nitroso como un porcentaje del nitrógeno aplicado, Audsley et al (2003) propone esta metodología en función del tipo de fertilizante y la época de

aplicación. También se tomo como referencia *ECETOC, (1994)* para estimar las emisiones de NH_3 y NO_x (ver figura E2).

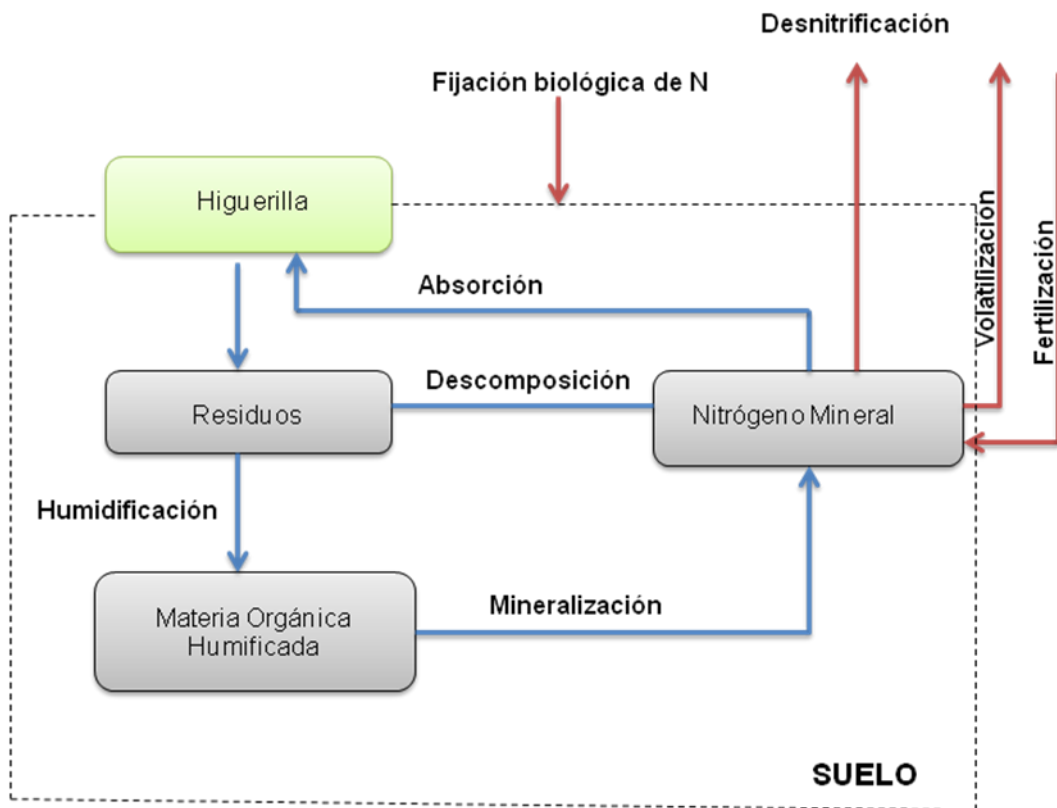


Figura E2. Ciclo del Nitrógeno para la cadena de producción de biodiésel.

ANEXO F. 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, Se llaman sustancias tóxicas a las que ejercen influencia nociva sobre el organismo humano y el medio ambiente. Durante el trabajo de los MCI de émbolo se desprenden las siguientes sustancias tóxicas principales: óxidos de nitrógeno, hollín, monóxido de carbono, hidrocarburos, aldehídos, sustancias cancerígenas (bencipireno), compuestos de azufre y plomo. Además de los gases de escape de los MCI, otras fuentes de toxicidad son también los gases del cárter y la evaporación del combustible a la atmósfera. Incluso en un motor bien regulado la cantidad de componentes tóxicos que se expulsan durante su funcionamiento puede alcanzar los siguientes valores

CONTAMINANTE	EMISIÓN (g/MJ quemado)
Hidrocarburos	0.085
CO	0.32
NO _x	0.89
PM ₁₀	0.041
SO ₂	0.12
CH ₄	0.042
N ₂ O	0.0019
CO ₂	75.5

Tabla F1. Emisiones de combustión del diesel para un camión de carga pesada

Fuente: universidad de Chile, 2007.

De este modo, la toxicidad de los motores Diesel depende en lo principal del contenido de los óxidos de nitrógeno y el hollín. La toxicidad de los motores de encendido por chispa y carburador depende en gran medida de la concentración del monóxido de carbono y de los óxidos de nitrógeno.

EMISIONES DE LA COMBUSTIÓN DEL BIODIESEL

En un estudio desarrollado por la EPA sobre emisiones producidas a causa de la combustión del biodiesel en diferentes medios de transporte; se evaluaron para el transporte pesado las correlaciones básicas de emisiones de los óxidos de nitrógeno, del material particulado, del monóxido de carbono y de los hidrocarburos. Las correlaciones obtenidas por la EPA involucran la concentración del biodiesel con el porcentaje de cambio en las emisiones, y se reportan de la siguiente forma:

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

La tabla F2 reporta los valores del coeficiente “a” para cada uno de los contaminantes.

CONTAMINANTE	COEFICIENTE “a”
NO _x	0.0009794
PM	-0.006384
HC	-0.011195
CO	-0.006561

TABLA F2. Coeficientes para las correlaciones de emisión del biodiesel (EPA 2002).

ANEXO G. RESULTADOS DETALLADOS DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

ANÁLISIS DE INVENTARIO

Tabla G1. Resultados obtenidos con referencia a las emisiones al agua.

ETAPA	Emisiones en el Agua			
	DBO5 [kg]	DCO [kg]	Metales (sin especificar) [kg]	Nitratos (NO3) [kg]
ADECUACIÓN Y CICLOS	Combustión	0,000E+00	0,000E+00	0
	Producción materias primas	8,216E+04	1,446E+03	1,487E+04
	Cultivo	0	0	0
EXTRACCIÓN	Combustión	0	0	0
	Producción vapor	1,907E-02	1,612E-01	9,363E-04
	Producción electricidad	4,109E+04	3,475E+05	2,596E+03
	Producción materias primas	1,280E+05	1,050E+06	4799,258362
TRANSESTERIFICACIÓN	Producción vapor	3,521E-01	2,976E+00	1,729E-02
	Producción electricidad	34585,53694	292516,5843	2184,826842
	Producción materias primas	3,886E+03	3,289E+04	1,027E+03
	Combustión	0	0	0
DISTRIBUCIÓN Y USO	Producción materias primas	1,572E+08	1,330E+09	6,185E+06
	Combustión	0	0	0
	Uso	0	0	0

Tabla G2. Resultados obtenidos con referencia a las emisiones al aire.

ETAPA		Emisiones en el aire												
		Hydrocarburos [kg]	CO [kg]	NO2 [kg]	PM10 [kg]	SO2 [kg]	CH4 [kg]	N2O [kg]	CO2 [kg]	Hydrocarburos (sin especificar) [kg]	Benceno [kg]	HCl [kg]	HF [kg]	NH3 [kg]
ADECUACIÓN CICLOS	Combustión	3,47E+05	1,28E+06	3,14E+06	2,11E+05	3,36E+05	1,17E+05	5,31E+03	2,64E+08	0	0	0	0	0
	Producción materias primas	1,51E+06	3,38E+06	2,08E+07	1,63E+06	1,69E+06	3,54E+05	4,95E+04	6,15E+09	1,14E+05	1,36E+02	5,43E+03	8,65E+02	2,40E+05
	Cultivo	8,06E+04	3,03E+05	1,17E+06	3,89E+04	1,13E+05	3,98E+04	3,17E+06	-2,13E+11	0	0	0	0	1,96E+06
EXTRACCIÓN	Combustión	9,67E+06	3,41E+07	5,80E+07	8,56E+06	0	0	0	4,67E+09	0	0	0	0	0
	Producción vapor	5,38E+02	1,57E+04	6,39E+04	1,13E+03	3,62E+05	7,76E+04	2,15E+02	4,70E+07	3,21E+01	0	1,52E+02	1,90E+03	8,79E+06
	Producción electricidad	7,98E+04	2,18E+06	3,05E+07	0	5,61E+07	2,37E+07	1,81E+05	9,84E+09	2,59E+05	0	1,71E+06	2,14E+05	1,16E+01
	Producción materias primas	2,46E+05	6,78E+04	2,50E+05	393	7,94E+05	1,36E+05	1,03E+04	8,00E+07	1,78E+05	39	2518	315	6,91E+02
TRANSESTERIFICACIÓN	Producción vapor	9,93E+03	2,90E+05	1,18E+06	2,08E+04	6,64E+06	1,43E+06	3,97E+03	8,69E+08	5,93E+00	0	2,80E+01	3,51E+02	1,62E+04
	Producción electricidad	6,72E+04	1,83E+06	2,57E+07	0,00E+00	4,72E+07	1,99E+07	1,53E+05	8,28E+09	2,18E+05	0,00E+00	1,44E+06	1,80E+05	9,86E+00
	Producción materias primas	8,95E+03	8,20E+04	4,60E+05	4,90E+03	8,84E+06	1,93E+06	4,27E+03	2,52E+08	1,45E+03	9,50E+00	4,76E+03	5,95E+02	5,95E+02
DISTRIBUCIÓN Y USO	Combustión	4,94E+04	1,73E+05	2,90E+05	4,36E+04	0	0	0	2,38E+07	0	0	0	0	0
	Producción materias primas	3,33E+07	7,01E+07	2,24E+08	2,90E+06	8,59E+08	1,75E+08	1,13E+07	8,66E+10	2,28E+08	1,67E+05	3,39E+06	5,26E+05	1,17E+05
	Combustión	2,62E+05	9,30E+05	1,70E+06	2,20E+05	41384	14484	655	1,38E+08	0	0	0	0	0
Uso	2,50E+08	9,25E+08	1,70E+09	2,32E+08	0	0	0	1,35E+11	0	0	0	0	0	

Tabla G3. Resultados obtenidos con referencia a las emisiones de energía.

ETAPA		Energía	
		Energía Primaria	Energía Fósil
ADECUACIÓN Y CICLOS	Combustión	0,000E+00	0,000E+00
	Producción materias primas	5,211E+10	2,820E+10
	Cultivo	0,000E+00	0,000E+00
EXTRACCIÓN	Combustión	0,000E+00	0,000E+00
	Producción vapor	8,313E+08	8,313E+08
	Producción electricidad	5,211E+10	1,513E+14
	Producción materias primas	8,021E+09	0,000E+00
TRANSESTERIFICACIÓN	Producción vapor	1,535E+10	1,535E+10
	Producción electricidad	1,311E+11	1,271E+11
	Producción materias primas	2,217E+10	2,216E+10
	Combustión	0,000E+00	0,000E+00
DISTRIBUCIÓN Y USO	Producción materias primas	1,03023E+13	1,02971E+13
	Combustión	0	0
	Uso	0	0