

EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN UN PROCESO
INTEGRADO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE PALMA
AFRICANA USANDO ETANOL LIGNOCELULÓSICO OBTENIDO DE LOS
RESIDUOS DE EXTRACCIÓN DEL ACEITE.

CAROLINA CASAS CÁRDENAS
JULIÁN MAURICIO RAMÍREZ SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2010

EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN UN PROCESO
INTEGRADO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE PALMA
AFRICANA USANDO ETANOL LIGNOCELULÓSICO OBTENIDO DE LOS
RESIDUOS DE EXTRACCIÓN DEL ACEITE.

CAROLINA CASAS CÁRDENAS
JULIÁN MAURICIO RAMÍREZ SÁNCHEZ

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico

Director:

Viatcheslav Kafarov
Ingeniero Químico Ph.D

Codirector:

Diego Martínez Merlano
Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2010

Dedico este logro de mi vida a:

Dios por darme la vida, la salud y una familia maravillosa que siempre me ha apoyado.

A mi hija Karen Nathalia por ser la luz de mi vida y el motivo para luchar y superarme. Te amo princesa.

A mi mami Rosario quien es mi modelo a seguir, la mujer más fuerte, dedicada, esposa ejemplar y madre única.

A mi papi Elber Antonio por apoyarme siempre, sentirse orgulloso de sus hijas y por creer en mí.

A mi hermana Yudy Paola por sus consejos, su comprensión y por estar siempre a mi lado.

A mi hermana Catalina y Cristal por su amor, su cariño por mí y por su sobrinita.

A mi novio Edwin Fabián quien me acompañó durante estos años brindándome su apoyo, su amor y su paciencia, sobre todo en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi familia, amigos y personas que de una u otra forma me ayudaron a cumplir este sueño.

A la memoria de mi nonito polo quien siempre tuvo una mirada, una frase, un gesto lleno de amor para todos nosotros. Te extraño.

Carolina Casas Cárdenas

A Dios y la Virgen, por la salud, bendiciones, a lo largo de mi vida y la obtención de este logro.

A mi mami Graciela "la guía de mi vida" por su amor, humildad, dedicación, enseñanzas a lo largo de mi crecimiento personal.

A mi padre Joaquín por su ejemplo de responsabilidad, perseverancia y ganas de trabajar, a su apoyo para ser lo que soy.

A mis hermanos, Andrés, Joaquín, Rosita, por ser esas personas a las que les debo dar ejemplo.

A mis familiares por la atención, cuidado y colaboración mientras realice mis estudios.

A mis amigos, amigas, y demás personas que han aparecido a lo largo de mi vida, ya que de todos obtuve alguna enseñanza para ser una mejor persona.

Julián Mauricio Ramírez Sánchez

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros agradecimientos:

A la Universidad Industrial de Santander porque nos acogió durante este tiempo.

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

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

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

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. CONCEPTOS TEÓRICOS	19
1.1. ACEITE DE PALMA	19
1.1.1. Extracción de Aceite	19
1.2. PRODUCCIÓN DE BODIESEL.....	19
1.3. PRODUCCIÓN DE ETANOL LIGNOCELULÓSICO	21
1.4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	23
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
2.1. SIMULACIÓN DE PRODUCCION DEL BODIESEL.....	24
2.1.1. Definición de los compuestos químicos de la Simulación	24
2.1.2. Paquete termodinámico y equipos utilizados para la Simulación.....	25
2.1.3. Esterificación.....	25
2.1.4. Transesterificación	25
2.1.5. Purificación del Biodiesel y la Glicerina.....	26
2.2. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ETANOL LIGNOCELULÓSICO.....	28
2.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	29
2.3.1. Objetivo del Estudio	29
2.3.2. Alcance del Estudio.....	29
2.3.3. ANÁLISIS DE INVENTARIOS.....	32

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	36
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reacciones intermedias de Transesterificación.....	200
Figura 2. Reacción de esterificación.....	200
Figura 3. Reacciones de Hidrólisis de la Hemicelulosa y Celulosa.....	211
Figura 4. Reacciones de Fermentación de la Xilosa y Glucosa.....	222
Figura 5. Diagrama del Proceso de Producción de Etanol Lignocelulósico.....	222
Figura 6. Simulación del proceso de Biodiesel.....	27
Figura 7. Límites de los Sistemas Basados en Biodiesel.....	31
Figura 8. Diagrama de flujo de la Fase agrícola.....	322
Figura 9. Diagrama de flujo en la Etapa de Extracción del aceite.....	322
Figura 10. Diagrama de flujo en la etapa de Producción de Etanol.....	344
Figura 11. Diagrama de Flujo en la Etapa de Transesterificación de Aceite.....	344
Figura 12. Diagrama de Flujo en la Etapa de Distribución y Uso.....	35
Figura 13. Clasificación categorías impacto usada por el EcoIndicador99.....	36
Figura 14. Puntuación única de las etapas de la Producción de Biodiesel.....	38
Figura 15. Ponderación de daños causados por las categorías de impacto.....	38
Figura 16. Ponderación de combustibles Diesel, B10, B20, B100.....	39
Figura 17. Ponderación del ACV de combustibles Diesel, B10, B20, B100.....	400
Figura 18. Ponderación del ACV del Biodiesel usando etanol lignocelulósico y etanol de caña de azúcar.....	411
Figura 19. Ponderación de los daños causados por los dos sistemas.....	422

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cinética de la reacción.....	26
Tabla 2. Composición residuos lignocelulósicos.....	29
Tabla 3. Asignación másica en la etapa de extracción.	33
Tabla 4. Asignación másica en la etapa de Transesterificación.....	35
Tabla 5. Caracterización del ACV del Biodiesel.....	37

LISTA DE ANEXO

ANEXO A. LA PALMA AFRICANA	53
ANEXO B. EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE PALMA.....	55
ANEXO C. PROCESO DEL BIODIESEL	58
ANEXO D. PROCESO DE ETANOL LIGNOCELULÓSICO.....	64
ANEXO E. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	68
ANEXO F. SIMAPRO 7.1.....	70
ANEXO G. RESULTADOS DEL ACV	73

RESUMEN

TÍTULO

EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN UN PROCESO INTEGRADO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE PALMA AFRICANA USANDO ETANOL LIGNOCELULÓSICO OBTENIDO DE LOS RESIDUOS DE EXTRACCIÓN DEL ACEITE*

AUTORES: Carolina Casas Cárdenas y Julián Mauricio Ramírez Sánchez**

PALABRAS CLAVES: ACV, SSF, Aceite de Palma, SimaPro 7.1, Aspen HYSYS® 2006.5, Bioetanol, Transesterificación, Etil éster.

Se evaluaron los impactos ambientales del biodiesel, el cual se produce a partir de aceite extraído de los frutos de palma y etanol obtenido del procesamiento de los residuos de la extracción. El proceso de obtención del etanol se dividió en las siguientes etapas: pretratamiento con Ácido diluido, sacarificación y fermentación simultánea (SSF), destilación con tamices moleculares. Para la obtención del biodiesel se realizó un proceso de esterificación y transesterificación del aceite, seguido de las etapas de separación y purificación del biodiesel. Estos procesos fueron simulados en Aspen HYSYS® 2006.5.

Se realizó un inventario y evaluación del ciclo de vida del biodiesel, de la cuna a la tumba. Se tuvo en cuenta la fase agrícola de la palma africana, la extracción del aceite, la producción del Bioetanol y el biodiesel, los insumos requeridos en cada etapa, los transportes de materias primas y productos, y el uso final del biocombustible en una mezcla B10.

Se comparó el B10 con diesel, B20 y B100; también con un proceso de B10 pero esta vez con etanol a partir de caña de azúcar. Para el análisis se utilizó el software SimaPro 7.1® que cumple con los lineamientos de las normas ISO 14040 y 14044. Se concluyó que el uso del biocombustible B10 puede llegar a reducir emisiones de gases de efecto invernadero, pero presenta desventajas en las fases de producción agrícola debido al uso fertilizantes nitrogenados y sulfatados causando daños a la calidad del ecosistema.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Doc. Viatcheslav Kafarov. Codirector:. Ing. Diego Martínez Merlano.

ABSTRACT

TITLE

ENVIROMENT IMPACT ASSESSMENT OF AN INTEGRATED PROCESS FOR THE PRODUCTION OF BIODIESEL FROM AFRICAN PALM USING ETHANOL LIGNOCCELLULOSIC OBTAINED FORM WASTE OIL EXTRACTION*

AUTHORS: Carolina Casas Cárdenas y Julián Mauricio Ramírez Sánchez**

KEYWORDS: ACV, SSF, Oil of palm, SimaPro 7.1, Aspen HYSYS® 2006.5, Bioethanol, Transesterification, Ethyl ester.

The environmental impacts of the biodiesel were analyzed. This is produced from oil extracted of the fruit palm and ethanol obtained from waste extraction processing. The ethanol process was divided into the following stages: dilute acid pretreatment, simultaneous saccharification and fermentation (SSF), distillation with molecular sieves. The production process of the biodiesel was: oil esterification and transesterification, separation and purification of Biodiesel. These processes were simulated with Aspen HYSYS® 2006.5.

An inventory and an evaluation of life cycle analysis of Biodiesel were made from the beginning to the end, which took into account the production of African palm, extraction of oil, production of Ethanol and Biodiesel, inputs required at each stage, transport of materials and products, and final consumption of the Biofuel in a mixture (B10).

The B10 was compared with diesel, B20, B100, and also with a process of B10 with ethanol from sugar cane. SimaPro 7.1® was used for the analysis, which meets the standards ISO 14040 and 14044. It was concluded that the use of B10 can reduce emissions of greenhouse gases, but has disadvantages in the stages of agricultural production due to the use of nitrogen and sulfated fertilizer that cause damages to the ecosystem quality.

* Degree Project

** Physicochemical Engineerings Faculty. Chemical Engineering School. Director: Dr.Sc. Viatcheslav Kafarov
Co-director: Ing. Diego Martínez Merlano.

INTRODUCCIÓN

Frente a la necesidad de disminuir los problemas ambientales generados por el uso de combustibles fósiles y el incremento de los precios del petróleo, se han desarrollado nuevas fuentes de energía que puedan resultar menos contaminantes y que permitan aprovechar al máximo los recursos naturales; como es el caso de la producción de Biocombustibles: biodiesel y bioetanol.

El biodiesel es una alternativa interesante porque usa aceites vegetales provenientes de cultivos oleaginosos como palma africana, soja, higuera, colza, girasol, entre otras. La producción industrial de biodiesel en Colombia es derivada del aceite de palma debido a la actual disponibilidad de esta materia prima.

La extracción de aceite de palma africana, genera una gran cantidad de residuos lignocelulósicos ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina que pueden ser utilizados como materia prima para la producción de etanol, obteniendo combustible de segunda generación que permita la máxima utilización de recursos que antes eran considerados como desechos.

Teniendo en cuenta que todo tipo de proceso tiene emisiones al medio ambiente, con las reglamentaciones actuales y los problemas de calentamiento global, es necesario cuantificar y evaluar dichas emisiones. Existen diversas metodologías que permiten evaluar ambientalmente estos procesos o productos, como el análisis de ciclo de vida (ACV), que permite determinar los impactos generados por un producto, incluyendo las etapas de elaboración, distribución y uso.

Con el objetivo de cuantificar los impactos generados por los biocombustibles, el proyecto se enfocó en evaluar los impactos ambientales de la producción de biodiesel, utilizando como materia prima el aceite de palma africana y etanol de segunda generación. Con este objetivo se hicieron análisis de inventarios para las siguientes etapas: fase agrícola, extracción del aceite, producción del etanol, la

producción del biodiesel, distribución y uso. Se tuvo en cuenta en cada etapa del proceso los gastos de energía, consumos de vapor y agua, compuestos químicos requeridos, transporte de las materias primas y productos.

Para la realización del proyecto, los procesos de producción de biodiesel y etanol lignocelulósico fueron simulados en Aspen HYSYS® 2006.5 utilizando información reportada en la literatura. Finalmente se evaluaron las emisiones ambientales, utilizando SimaPro 7.1® con el Eco-indicador 99, las bases de datos que se utilizaron fueron: ECOINVENT, ETH-ESU 96 y BUWAL 250.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

1.1. ACEITE DE PALMA

La palma de aceite representa una excelente alternativa para la producción de aceite ya que tiene un rendimiento 10 veces mayor que el proporcionado por otros cultivos oleaginosos [2].

Composición del Aceite de Palma

El aceite de palma es saturado hasta en un 50%, su composición en promedio es:

- 40-48% ácidos grasos saturados (principalmente palmítico)
- 37-46% ácidos grasos monoinsaturados (principalmente oleico)
- 10% ácidos grasos poliinsaturados [4].

1.1.1. Extracción de Aceite

El procesamiento de los frutos de la palma de aceite se lleva a cabo en la planta de beneficio o planta extractora. Ahí se desarrolla el proceso de extracción del aceite crudo de palma y de las almendras. Este es un proceso que consiste en esterilizar los frutos, Desfrutamiento del racimo, prensado de los frutos, extraer el aceite de la pulpa, clarificarlo y recuperar las almendras del bagazo resultante, generando residuos como la fibra y raquis [2]. La descripción de las etapas que conforman el proceso de extracción se encuentra en el anexo B.

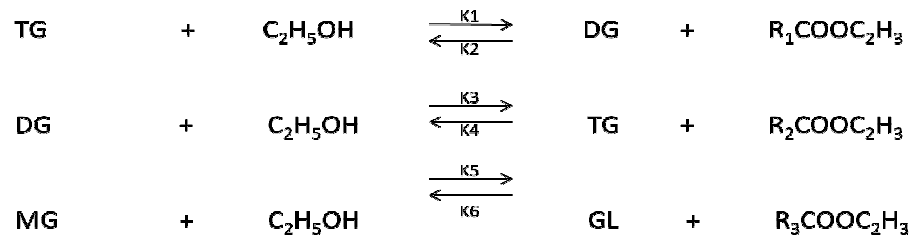
1.2. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

El biodiesel es un combustible que se produce a partir de los aceites vegetales como los obtenidos de la palma de aceite, soya, higuera, girasol; sean crudos o usados y grasas animales, mediante un proceso llamado transesterificación. En este proceso las tres cadenas de ácidos grasos de cada molécula de triglicérido presentes en los aceites reaccionan con alcoholes de bajo peso molecular (metanol, etanol, propanol, butanol) para obtener ésteres y glicerina. Para llevar a

cabo esta reacción se usan catalizadores que pueden ser ácidos homogéneos (H₂SO₄, HCl, H₃PO₄), ácidos heterogéneos (Zeolitas, Resinas Sulfónicas, SO₄/ZrO₂, WO₃/ZrO₂), básicos heterogéneos (MgO, CaO, Na/NaOH/Al₂O₃), básicos homogéneos (KOH, NaOH) o enzimáticos (Lipasas: Cándida, Penicillium, Pseudomonas) [6].

La reacción global es una secuencia de 3 reacciones reversibles intermedias; donde los triglicéridos son convertidos en diglicéridos, monoglicéridos y por ultimo en glicerol (co-producto). El producto principal es una mezcla de ésteres de ácidos grasos (biodiesel) en cada una de las reacciones [7]. Las reacciones se pueden observar en la figura 1.

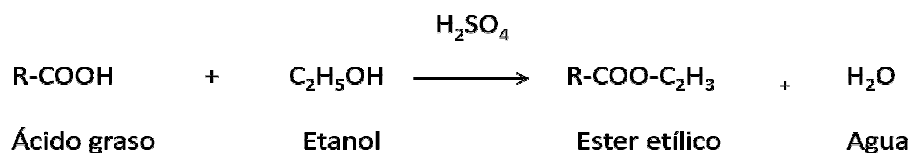
Figura 1. Reacciones intermedias de Transesterificación



Fuente: Elaborada por los autores a partir de Marchetti, Miguel, Errazu. (2007) [7]

Industrialmente el proceso de producción de biodiesel se lleva a cabo en las siguientes etapas: preparación ó adecuación de las materias primas, transesterificación, separación, recuperación del alcohol, purificación del biodiesel y la glicerina. El contenido de ácidos grasos del aceite determina la realización de una etapa de pretratamiento con catálisis acida (esterificación), necesaria cuando la materia prima presenta un alto contenido de ácidos grasos libres (más del 5%) [6]. En la figura 2 se encuentra la reacción de esterificación.

Figura 2. Reacción de esterificación

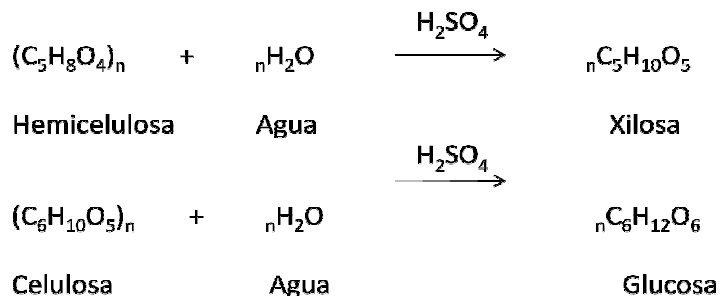


Fuente: Elaborada por los autores a partir de Marchetti, Miguel, Errazu. (2007) [7]

1.3. PRODUCCIÓN DE ETANOL LIGNOCELULÓSICO

Existen diferentes tecnologías para producir etanol. Se pueden producir a partir de materiales que contienen sacarosa (caña de azúcar), materiales ricos en almidón (maíz) y materiales lignocelulósicos, los cuales contienen celulosa, hemicelulosa y lignina. Los materiales lignocelulósicos son los más abundantes sobre nuestro planeta, cerca del 50% de la biomasa terrestre, y pueden convertirse en una de las principales fuentes de la producción de este biocombustible [15]. Los residuos generados en la extracción del aceite de palma africana, pueden ser usados como materia prima para la obtención de etanol, para lo cual es necesario un pretratamiento con ácido sulfúrico diluido (0.015 fracción másica) e hidrólisis, en donde la matriz lignocelulósica se rompe y libera la celulosa, hemicelulosa y lignina; se hidrolizan obteniendo así azúcares que luego se pueden fermentar. [16]. La hemicelulosa y celulosa son parcialmente hidrolizadas formando pentosas (xilosa) y hexosas (glucosa) ver figura 3.

Figura 3. Reacciones de Hidrólisis de la Hemicelulosa y Celulosa



Fuente: Elaborada por los autores a partir de Quintero, Viviana. (2009) [21]

La hidrólisis o sacarificación y la fermentación puede ocurrir en el mismo reactor, para esto es necesario utilizar microorganismos termotolerantes como *Zymomonas Mobilis* o *Saccharomyces Cerevisiae*. Se han realizado varias investigaciones sobre la Sacarificación y fermentación simultaneas (SSF) de glucosa, en este sentido la *Saccharomyces Cerevisiae* es la más usada en la industria, pero sin embargo ésta no es capaz de fermentar las azúcares C₅

(xilosas) derivados de la hemicelulosa, por ello ha sido necesario modificar su estructura genética [17].

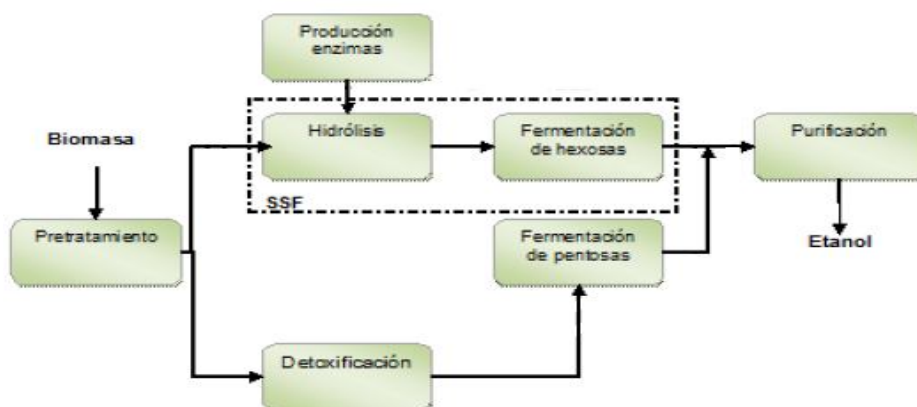
La SSF donde se emplean celulasas junto con la presencia de un microorganismo productor de etanol, tiene ventajas, ya que mejora del rendimiento debido a la remoción de la lignina que inhibe el complejo enzimático de celulosa, para esto la temperatura óptima de la SSF debe ser alrededor de 38 °C, la cual se encuentra en el rango de temperatura optima de la hidrólisis (45-50 °C) y la fermentación (30 °C). La fermentación del etanol se lleva a cabo por métodos aplicados simultáneamente o separados, utilizando azúcares como hexosas (glucosa) y pentosas (xilosa) en los hidrolizados de la celulosa y hemicelulosa (ver figura 4). El flujo proveniente de la fermentación es enviado al proceso de purificación del etanol [21]. En la figura 5 se puede observar el diagrama del proceso.

Figura 4. Reacciones de Fermentación de la Xilosa y Glucosa



Fuente: Elaborada por los autores a partir de Quintero, Viviana. (2009) [21]

Figura 5. Diagrama del Proceso de Producción de Etanol Lignocelulósico



Fuente: Sánchez, Cardona. (2007) [19]

1.4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental, y los posibles impactos asociados a los productos, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender y tratar esos impactos. Una de las metodologías desarrolladas en este sentido es el ACV que trata los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (de la cuna a la tumba) [14]. Las etapas del desarrollo se encuentran en el anexo E.

El ACV tiene cuatro fases:

- a) Definición del objetivo y alcance.
- b) Análisis del inventario.
- c) Evaluación del impacto ambiental.
- d) Interpretación.

El ACV de un producto se considera como la historia del producto desde su origen como materia prima hasta su final como residuo, teniendo en cuenta todas las fases intermedias [18]. Esta metodología permite:

- Evaluar las cargas asociadas a un producto, proceso o actividad relacionados con los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas y energías necesarias para su manufactura, las emisiones y residuos generados en el proceso de producción, así como los efectos ambientales ocasionados por el fin de vida del producto cuando este se consume o no se puede utilizar.
- Comparar ambientalmente dos o más alternativas de diseño.
- Comparar ambientalmente distintos productos que realicen la misma función.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del trabajo inicialmente se recopilaron los datos de referencias bibliográficas necesarios para realizar las simulaciones de las plantas de biodiesel y etanol lignocelulósico mediante Aspen HYSYS. De esta manera se determinaron los balances de materia y energía del proceso que finalmente son usados en el ACV.

2.1. SIMULACIÓN DE PRODUCCION DEL BIODIESEL

En esta etapa fue necesario definir los compuestos químicos y a su vez las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de aquellos que no se encuentran en la librería del software para continuar con el montaje de la planta con sus diferentes etapas: esterificación de ácidos grasos libres, reacción de transesterificación, recuperación del etanol, separación y purificación del biodiesel y la Glicerina.

2.1.1. Definición de los compuestos químicos de la Simulación

Los compuestos usados fueron triglicéridos, ácidos grasos, etanol, ácido sulfúrico, hidróxido de sodio, agua, etil esteres y glicerina. La mayoría de estos compuestos se encontraron en la librería de componentes de Aspen HYSYS. Aquellos que no lo están, debieron ser caracterizados y representados por medio de componentes hipotéticos a través de la herramienta Hypo Manager. El aceite de Palma se representó como una mezcla de triglicéridos: Tripalmitina 50% y Trioleina 45%; y ácidos grasos: ácido Palmítico 3% y ácido Oleico 2%. Los etil esteres se representaron como una mezcla de esteres de ácidos grasos (etil-Palmitato y etil-Oleato).

Para el cálculo de las propiedades críticas (T_c , P_c y V_c) y la temperatura normal de ebullición T_b , fueron utilizados los métodos de Valderrama-Álvarez (2006) y el de Constantinou-Gani (1994) (Ver tablas C2 y C3 del anexo C), así como la estructura UNIFAC para llevar a cabo la caracterización en el software.

2.1.2. Paquete termodinámico y equipos utilizados para la Simulación

El modelo termodinámico seleccionado fue UNIQUAC (Universal Quasi Chemical) y el modelo de actividad NRTL (nonrandom two liquids) porque presenta los mejores comportamientos [26]. Los coeficientes de interacción binaria no disponible en la librería del simulador fueron estimados con el método UNIFAC (Universal Funcional Group Activity Coefficient).

Los equipos que se usan básicamente son reactor de conversión (esterificación), reactor CSTR (transesterificación), tanques de mezclado, intercambiadores de calor, torres de destilación, bombas, válvulas, torre de extracción líquido-líquido, disponibles en la librería de HYSYSTEM.(ver tabla C4 anexo C).

2.1.3. Esterificación

Para llevar a cabo la simulación del proceso se usó como base de cálculo 8000 kg/h de aceite para producir 8200 kg/h de biodiesel correspondientes a una producción de 70848 ton/año. La reacción de esterificación se llevó a cabo en un reactor de conversión usando etanol en una relación molar etanol/aceite de 0,5:1 para lo cual fue necesario una cantidad de 160 kg/h de los cuales 32 kg/h eran etanol fresco y 128 kg/h etanol de reciclo. Como catalizador se usó ácido sulfúrico en una cantidad de 80 kg/h (1% en peso de la masa del aceite) [8]. La corriente de salida del reactor se alimentó a una torre de destilación para separar el etanol y el agua que se formó en la reacción de esterificación del aceite. La corriente de etanol hidratado se llevó a una torre de destilación para retirar el agua del proceso; el etanol fue recirculado al reactor de esterificación. El flujo másico de la corriente de aceite refinado fue de 8015 kg/h y fue llevada a la siguiente etapa del proceso.

2.1.4. Transesterificación

La corriente proveniente de la reacción de esterificación fue alimentada a un reactor CSTR donde se llevó a cabo la reacción de transesterificación, usando etanol lignocelulósico en una relación molar etanol/aceite 6:1, Freedman et al.

(1984) [9], se alimentaron 2685 kg/h de etanol de los cuales 1325 kg/h fueron etanol fresco y 1360 kg/h de reciclo; y 80 kg/h de NaOH como catalizador (1% peso del aceite).

Para la cinética de la reacción se tomó la reportada por Nouredini y Zhu (1997) para la transesterificación del aceite de soya con etanol catalizada por NaOH a una temperatura de 50°C ver tabla 1.

Tabla 1. Cinética de la reacción

Constante (l/mol·min)	Valor (50°C)	Energía de activación (cal/mol)	A
k1	0,049	13145	38027534,04
k2	0,102	9932	531576,003
k3	1,218	19860	3,28755E+13
k4	1,28	14639	10174129778
k5	0,239	6421	5258,842943
k6	0,007	9588	21350,9716

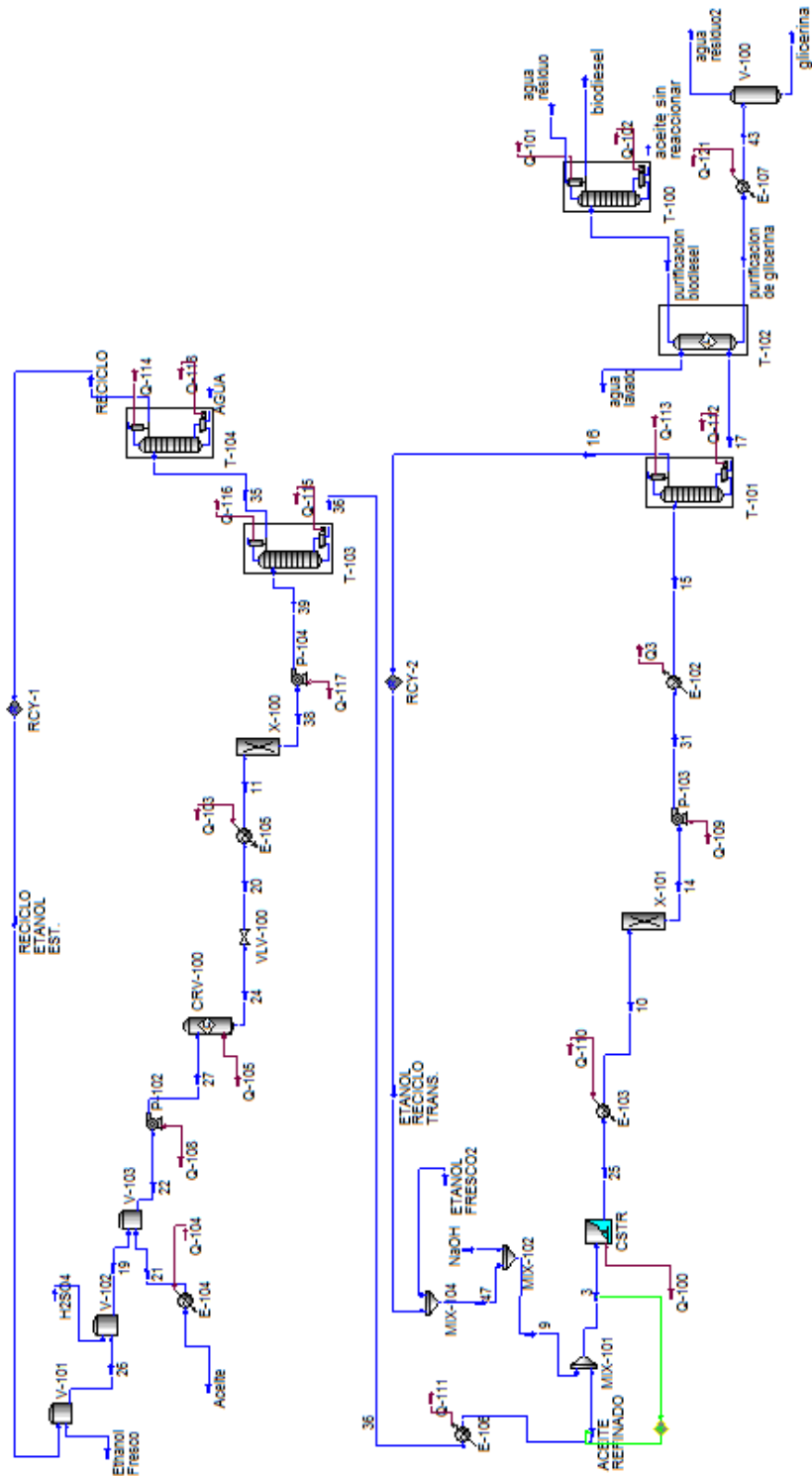
Fuente: Elaborada por los autores a partir de Montoya (2008) [10]

La corriente de producto fue llevada a una torre de destilación para recuperar el etanol en exceso que fue recirculado al reactor de transesterificación, la otra corriente se alimentó a una torre extracción líquido-líquido para lograr la separación total de la mezcla de etil-esteres de la glicerina usando agua como solvente.

2.1.5. Purificación del Biodiesel y la Glicerina

Para obtener biodiesel que cumpliera con las normas UNE EN 14214-03 y A.S.T.M.D6751-02, se removió el agua en exceso y el aceite sin reaccionar en una torre de destilación, obteniendo un flujo de biodiesel de 8200 kg/h; la glicerina también se purificó en una torre de destilación obteniendo un flujo de 867,4 kg/h. en la figura 6 se puede observar la simulación de producción del biodiesel.

Figura 6. Simulación del proceso de Biodiesel



Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

2.2. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ETANOL LIGNOCELULÓSICO

Se seleccionó un proceso reportado en la literatura, por ser uno de los más eficientes para la obtención del etanol lignocelulósico, el cual consiste: pretratamiento con ácido diluido (AD), sacarificación y fermentación simultáneas (SSF) de la glucosa, fermentación simple de la xilosa, separación por medio de torres de destilación y deshidratación con tamices moleculares (figura D2 anexo D) [16-21].

Se determinó flujo de 15714 Kg/h en base a la producción de biodiesel (46.7% fibra, 53.3% tusas o raquis) de biomasa lignocelulósica, proveniente de los residuos de extracción del aceite, de acuerdo a la disponibilidad según la producción del biodiesel. La composición de celulosa, hemicelulosa y lignina se determinaron según Cardona, Sánchez y Gutiérrez [16] (ver tabla 2). El modelo termodinámico empleado fue NRTL para el cálculo de los coeficientes de actividad y para el comportamiento de la fase vapor se utilizaron las ecuaciones del Virial, porque representan en forma adecuada el comportamiento del sistema [29]. Se emplearon reactores de conversión, columnas de lavado para el CO₂, columna de destilación para la separación del etanol, se simuló la separación de tamices moleculares por medio de un splitter, se utilizaron intercambiadores de calor de carcasa y tubos. Para más detalles ver tabla 1 anexo D. El pretratamiento fue con ácido sulfúrico diluido en 1.5% w/w y temperatura de 160 °C. Se causa una degradación del 90% de la hemicelulosa y una completa solubilización de la lignina. La solución acuosa resultante que contiene lignina, xilosa, y el H₂SO₄ fue neutralizada con cal (Ca(OH)₂), lográndose así la precipitación de la lignina.

Para la SSF se tiene un rendimiento del 85% y un 75% para la fermentación de los azúcares C₅ [21]. En las etapas de separación y purificación se obtiene un etanol 99.45% en fracción másica, el cual cumple las características del etanol anhidro requerido para la producción del biodiesel [23].

Tabla 2. Composición residuos lignocelulósicos

Componente	Raquis (% w/w)	Fibra (% w/w)
Celulosa	15.47	24
Hemicelulosa	11.73	14.4
lignina	7.14	12.6
Cenizas	0.67	9
Humedad	65	40

Fuente: Elaborada por los autores a partir de Gutiérrez, Sánchez, Cardona. (2009) [16]

2.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

Para realizar el ACV de la producción de biodiesel se siguió los procedimientos establecidos en las normas ISO 14040 y 14044 de 2006, donde se definieron los objetivos, el alcance del estudio y el análisis de inventario.

2.3.1. Objetivo del Estudio

Evaluar, cuantificar y comparar los impactos ambientales del biodiesel teniendo en cuenta todo su ciclo de producción desde la fase agrícola hasta su uso como combustible en diferentes mezclas con diesel fósil.

Objetivos específicos:

- Simular los procesos de producción de biodiesel y bioetanol en Aspen Hysys 2006.5.
- Comparar el ACV de la producción de biodiesel usando etanol lignocelulósico y etanol de caña de azúcar.
- Comparar el ACV de la producción de biodiesel de diferentes sistemas: B10, B20, B100 y diesel.

2.3.2. Alcance del Estudio

- **Unidad Funcional**

La unidad funcional es una medida del comportamiento de las salidas funcionales de un sistema, sirve de referencia para las entradas y salidas. La unidad funcional de este trabajo fue de 70848 Ton/año de biodiesel.

- **Sistemas bajo Estudio**

Los sistemas de biodiesel comprende las etapas de: fase agrícola, extracción del aceite, esterificación y transesterificación de ácidos grasos, producción del etanol lignocelulósico, distribución y uso del combustible.

Los sistemas estudiados en el ACV fueron los siguientes:

Sistema B10: Producción y uso de biodiesel obtenido de la Palma Aceitera, mezclado con diesel al 10% v/v.

Sistema B20: Producción y uso de biodiesel obtenido de la Palma Aceitera, mezclado con diesel al 20% v/v.

Sistema B100: Producción y uso de biodiesel obtenido de la Palma Aceitera al 100% v/v.

Sistema diesel: Producción y uso del diesel obtenido a partir del refino del petróleo³.

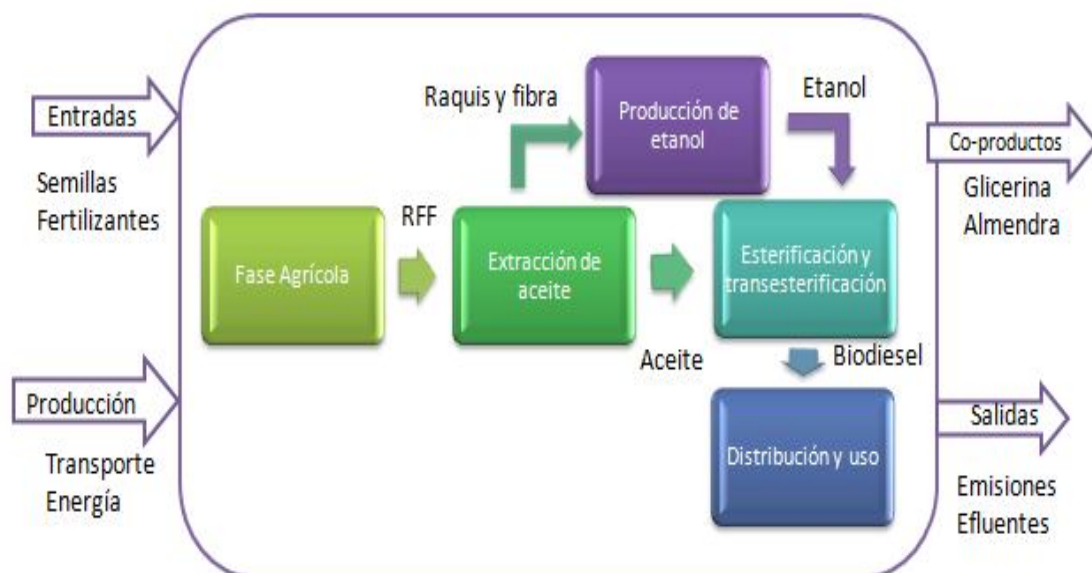
- **Límites del Sistema**

Límites del proceso

El sistema se analizó considerando los impactos desde el cultivo de la palma hasta la combustión del B10, en la fase agrícola se incluyen los impactos por el uso de fertilizantes y su proceso de fabricación. Respecto a las otras etapas, se consideró el consumo de energía, el uso de compuestos químicos y sus emisiones. Para la etapa de distribución y uso se consideró las emisiones generadas por el transporte del biocombustible y la combustión de la mezcla en un vehículo (ver figura 7).

³ Sistema para combustible diesel tomado de la base de datos de SimaPro 7.1

Figura 7. Límites de los Sistemas Basados en Biodiesel



Fuente: Elaborada por los autores

Límites geográficos

La ubicación geográfica fue Sabana de Torres (Santander) donde existe gran cantidad de hectáreas sembradas con palma de aceite y cuenta con una planta extractora de aceite.

- **Suposiciones**

Se supuso la existencia en el municipio de sabana de torres de las plantas de biodiesel y etanol.

- **Requisitos relativos a los Datos**

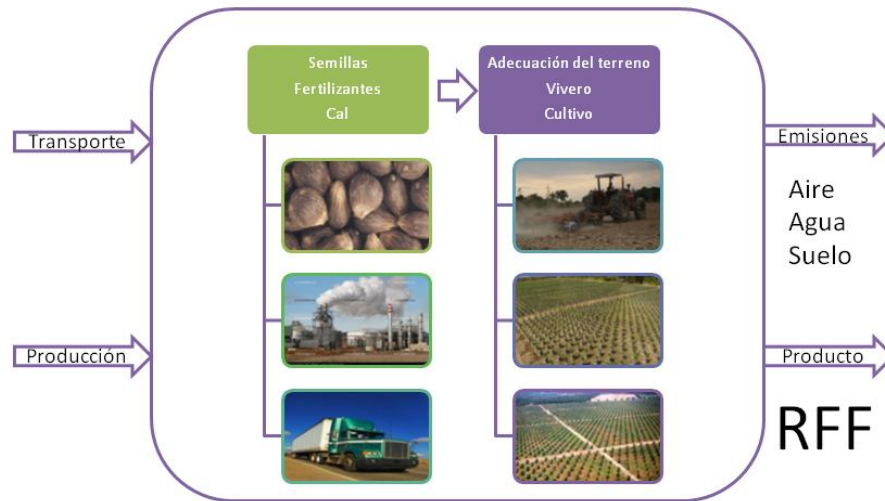
Aproximadamente el 70% de la información utilizada para la realización del estudio se encuentra reportada en las bases de datos de Simapro 7.1: BUWAL 250, ECOINVENT, ETH-ESU 96, entre otras. La información complementaria fue extraída de artículos y trabajos relacionados con la producción de biocombustibles.

2.3.3. ANÁLISIS DE INVENTARIOS

- **Inventario para la etapa de Fase Agrícola**

Este inventario incluye la producción, transporte y uso de materias primas y fertilizantes, energía y las emisiones generadas al aire, agua y suelo (la información soportada se encuentra en el anexo A).

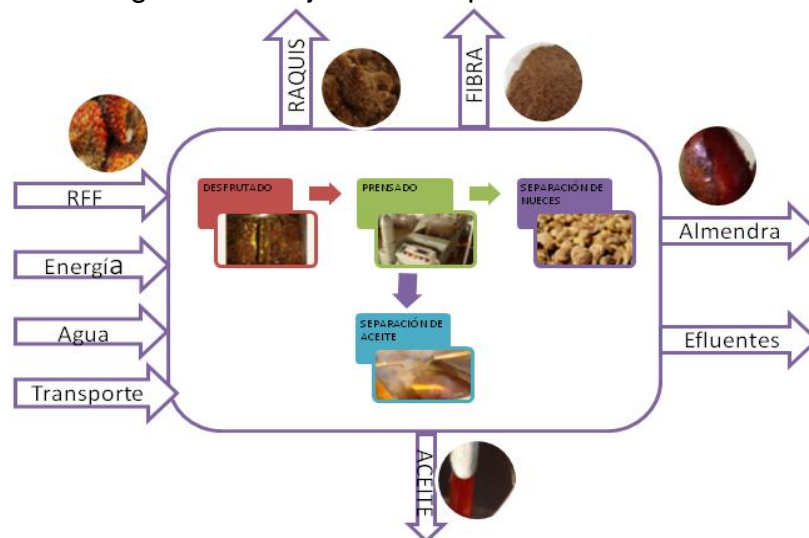
Figura 8. Diagrama de flujo de la Fase agrícola



Fuente: Elaborada por los autores

- **Inventario para la etapa de Extracción de Aceite**

Figura 9. Diagrama de flujo en la Etapa de Extracción del aceite



Fuente: Elaborada por los autores

En la figura 9 se muestra un esquema de los límites considerados para llevar a cabo la extracción del aceite. Los racimos de fruta fresca fueron transportados 45 km desde el cultivo hasta la planta extractora.

En la etapa de extracción de aceite de palma se obtuvo como productos secundarios la almendra, el raquis y la fibra. De acuerdo con la norma ISO 14040 fue necesario hacer asignación másica (tabla 3) de los co-productos para cuantificar las cargas ambientales de éstos.

Tabla 3. Asignación másica en la etapa de extracción.

PRODUCTO	%P/P
Aceite de Palma	31
Raquis y Fibra	60.8
Almendras	8.2
Total	100

Fuente: Elaborada por los autores

- **Inventario Producción de Etanol**

Para el sistema de producción de etanol lignocelulósico se incluyeron dentro de los límites las emisiones causadas por la fabricación y transporte materias primas hasta la planta productora, gastos de energía y vapor consumido.

Este proceso fue necesario simularlo en Aspen HYSYS® 2006.5 usando como materia prima el raquis y la fibra que normalmente se desechan en el proceso de extracción del aceite de palma.

En la figura 10 está el esquema de las etapas de producción y los límites de este.

Figura 10. Diagrama de flujo en la etapa de Producción de Etanol.



Fuente: Elaborada por los autores

• Inventario Esterificación y Transesterificación

Dentro de los límites se incluyeron los procesos necesarios para llevar a cabo la transesterificación del aceite de palma, las emisiones generadas por la producción de energía, la producción y transporte de materias primas. En la figura 11 se muestra el esquema de los límites del sistema incluyendo las etapas que se estudiaron.

Figura 11. Diagrama de Flujo en la Etapa de Transesterificación de Aceite.



Fuente: Elaborada por los autores

En la producción de Biodiesel se obtiene un subproducto, la glicerina, como ya se mencionó fue necesario realizar asignación másica ver tabla 4.

Tabla 4. Asignación másica en la etapa de Transesterificación.

PRODUCTO	%P/P
Biodiesel	90.4
Glicerina	9.6
Total	100

Fuente: Elaborada por los autores

- **Inventario de Distribución y Uso del Biodiesel**

En este inventario se supuso que el biodiesel fue transportado hasta la ciudad de Bucaramanga recorriendo una distancia por carretera de 110 km, se asumió que el diesel para la mezcla B10 ya se encontraba en dicha ciudad.

Dentro de los límites del sistema se incluyeron las emisiones generadas por el transporte y la combustión de la mezcla B10, estas últimas fueron tomadas de la literatura [12] ver tabla C10 anexo C.

Figura 12. Diagrama de Flujo en la Etapa de Distribución y Uso.



Fuente: Elaborada por los autores

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para la evaluación de impactos ambientales se utilizó la metodología del Eco Indicador 99⁴ (las especificaciones de este evaluador están en el anexo F). Esta metodología tiene en cuenta las etapas de clasificación, caracterización y valoración.

CLASIFICACIÓN:

El Eco Indicador 99 es una metodología de evaluación de impacto de puntuación única que utiliza tres categorías principales de impacto o endpoints para obtener la puntuación global. El Eco Indicador 99 trabaja relacionando diferentes categorías de impacto con los daños ocasionados en tres grandes secciones: ecosistema, salud humana y recursos [24].

Figura 13. Clasificación categorías de impacto usada por el EcoIndicador99



Fuente: Elaborada por los autores a partir de Zapata, Martínez, Henao, Arenas (2006) [28]

⁴ Metodología utilizada por SimaPro 7.1

CARACTERIZACIÓN

En esta etapa se cuantificaron los impactos ambientales por cada categoría utilizando factores de equivalencia obtenidos en SimaPro 7.1 para el proceso de producción del Biodiesel. Ver tabla 5.

Tabla 5. Caracterización del ACV del Biodiesel

Categoría de impacto	Unidad	Total
Carcinogens	DALY	21,5
Respiratory organics	DALY	87,5
Respiratory inorganics	DALY	1,44E3
Climate change	DALY	-109
Radiation	DALY	1,26
Ozone layer	DALY	3,31
Ecotoxicity	PDF*m2yr	1,39E7
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	8,25E7
Land use	PDF*m2yr	8,64E6
Minerals	MJ surplus	3,23E6
Fossil fuels	MJ surplus	2,5E9

Fuente: Elaborado por los autores utilizando SimaPro 7.1

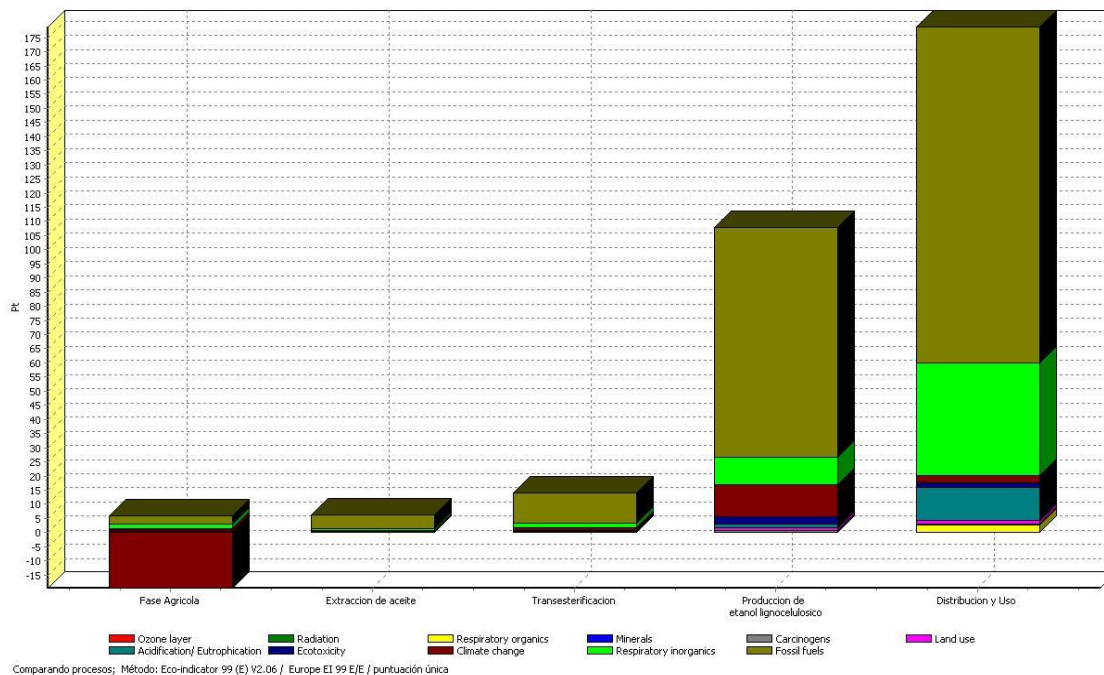
VALORACIÓN

De esta manera se obtuvo el ACV de los diferentes sistemas estudiados.

- El siguiente es el ACV para la producción del Biodiesel usando etanol lignocelulósico donde se incluyen los impactos generados por todas las etapas del proceso.

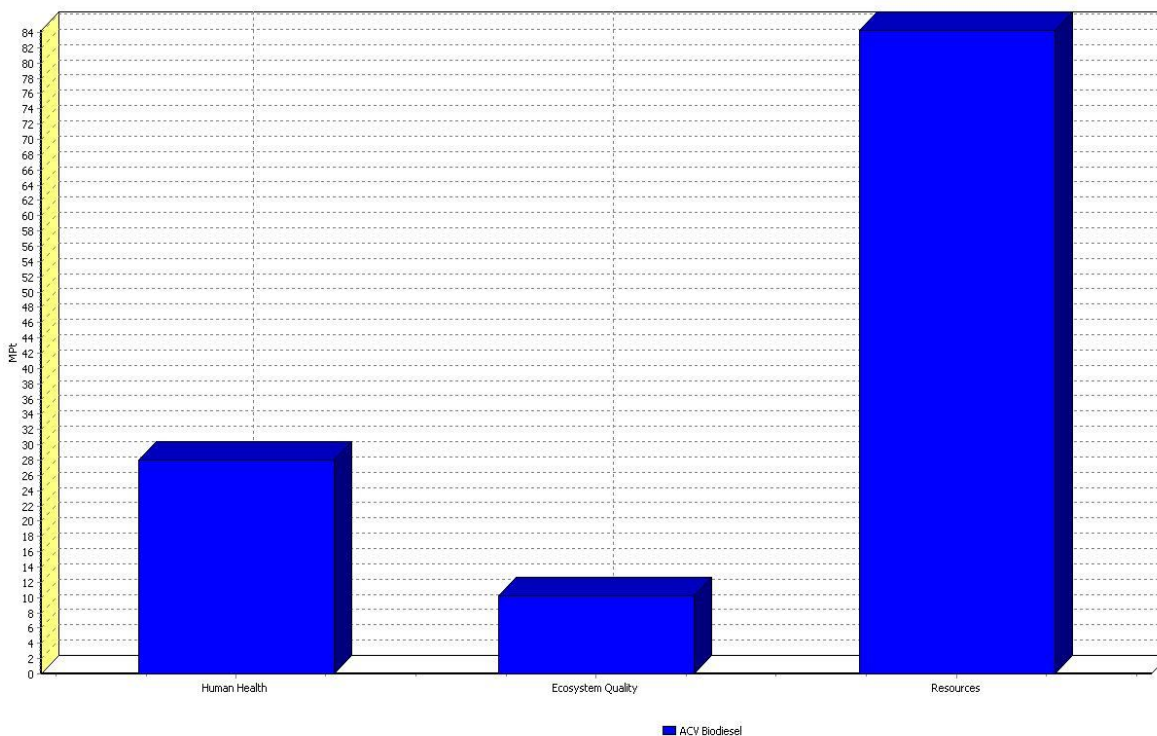
En la figura 13 se puede observar que la mayor carga ambiental se debe a la fase de distribución y uso, generándose un gran impacto en las categorías de respiración de compuestos inorgánicos debido al proceso de combustión. Así mismo, el uso de combustibles fósiles genera grandes cantidades de compuestos NOx y SOx que afectan los niveles de acidificación/eutrofización, causando desequilibrios en los ecosistemas receptores.

Figura 14. Puntuación única de las etapas de la Producción de Biodiesel.



Fuente: Elaborado por los autores utilizando SimaPro 7.1

Figura 15. Ponderación de los daños causados por las categorías de impacto.



Analizando 1 p (ACV, Biodiesel, Etanol Lignocelulósico.); Método: Eco-indicador 99 (E) V2.06 / Europe EI 99 E/E / ponderación

Fuente: Elaborado por los autores utilizando SimaPro 7.1

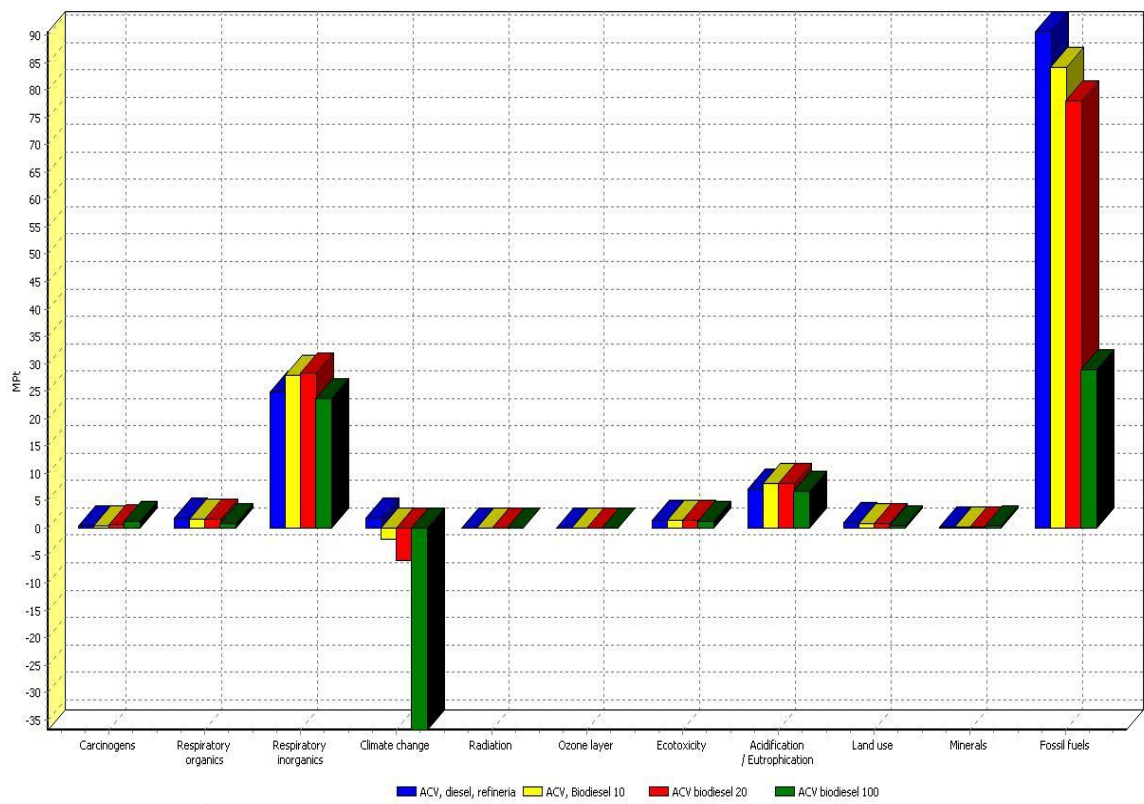
Existe una gran carga ambiental en la categoría de combustibles fósiles debido al transporte de los fertilizantes, materias primas usadas en las distintas etapas del proceso y el uso de diesel fósil que entra a formar parte de la mezcla B10.

La contribución al cambio climático es mínima ya que se considera un ciclo cerrado de carbono para los biocombustibles, pues estos emiten la cantidad de carbono que se absorbe durante su vegetación.

Al cuantificar las categorías de impacto es evidente que el mayor daño se ve representado en el uso de recursos figura 14.

- Comparación de combustibles Diesel, B10, B20, B100.

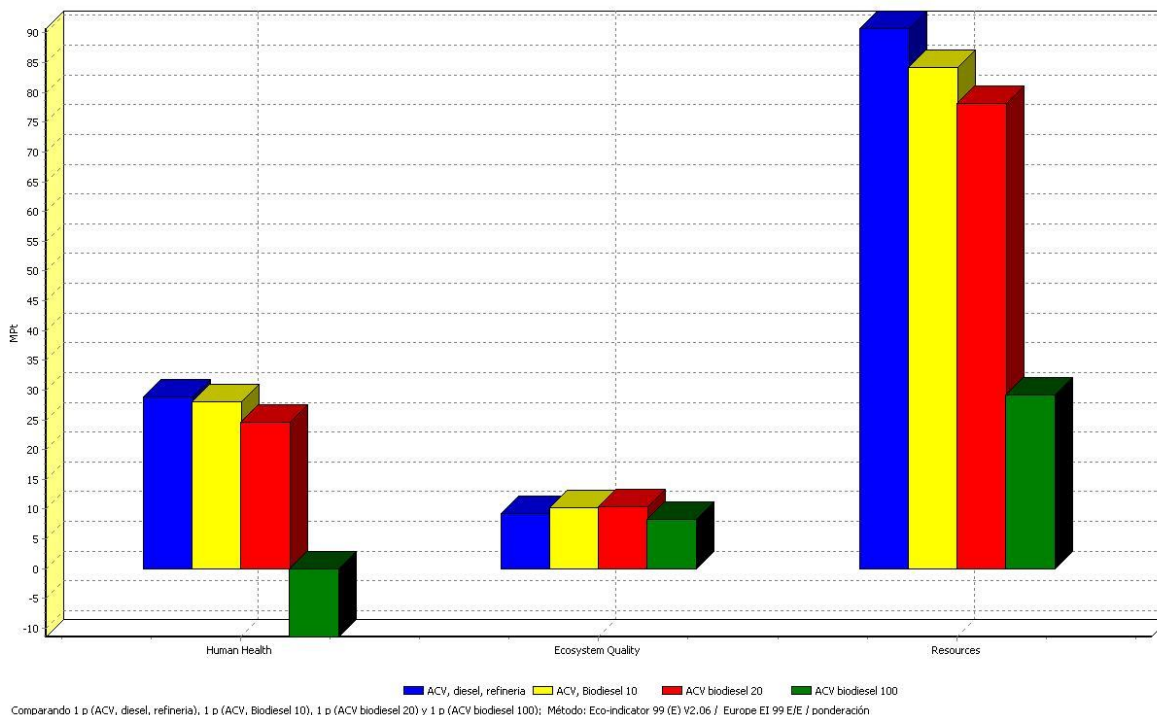
Figura 16. Ponderación por los combustibles Diesel, B10, B20, B100



Comparando 1 p (ACV, diesel, refinería), 1 p (ACV, Biodiesel 10), 1 p (ACV biodiesel 20) y 1 p (ACV biodiesel 100); Método: Eco-indicator 99 (E) V2.06 / Europe EI 99 E/E / ponderación

Fuente: Elaborado por los autores utilizando SimaPro 7.1

Figura 17. Ponderación del ACV de los combustibles Diesel, B10, B20, B100

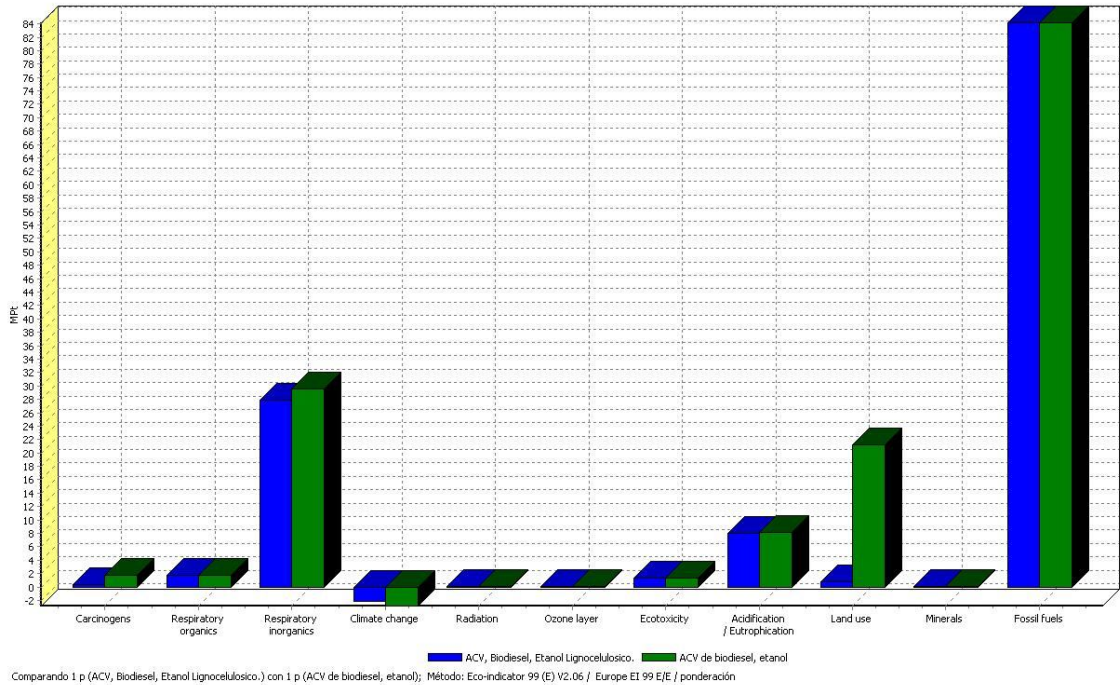


Fuente: Elaborado por los autores utilizando SimaPro 7.1

Al comparar los cuatro sistemas se puede observar (figura 15) que al adicionar biodiesel a la mezcla de combustibles se presenta una disminución significativa en las categorías de impacto que afectan la salud humana y el consumo de recursos no renovables principalmente por la disminución de emisiones CO₂ y el consumo de combustibles fósiles. La calidad del ecosistema se afecta de manera particular dependiendo de la cantidad de biodiesel presente en la mezcla, ya que para las mezclas B10 y B20 los niveles de eutrofización/acidificación son más altos que cuando se usa diesel fósil debido al uso de fertilizantes nitrogenados. La utilización de biodiesel al 100% reduce levemente las cargas ambientales sobre el ecosistema.

- En las figuras 17 y 18 se comparó el ACV el sistema del biodiesel a partir de palma africana usando etanol lignocelulósico y el sistema del biodiesel a partir de palma africana usando etanol de caña de azúcar⁵.

Figura 18. Ponderación del ACV del Biodiesel usando etanol lignocelulósico y etanol de caña de azúcar.



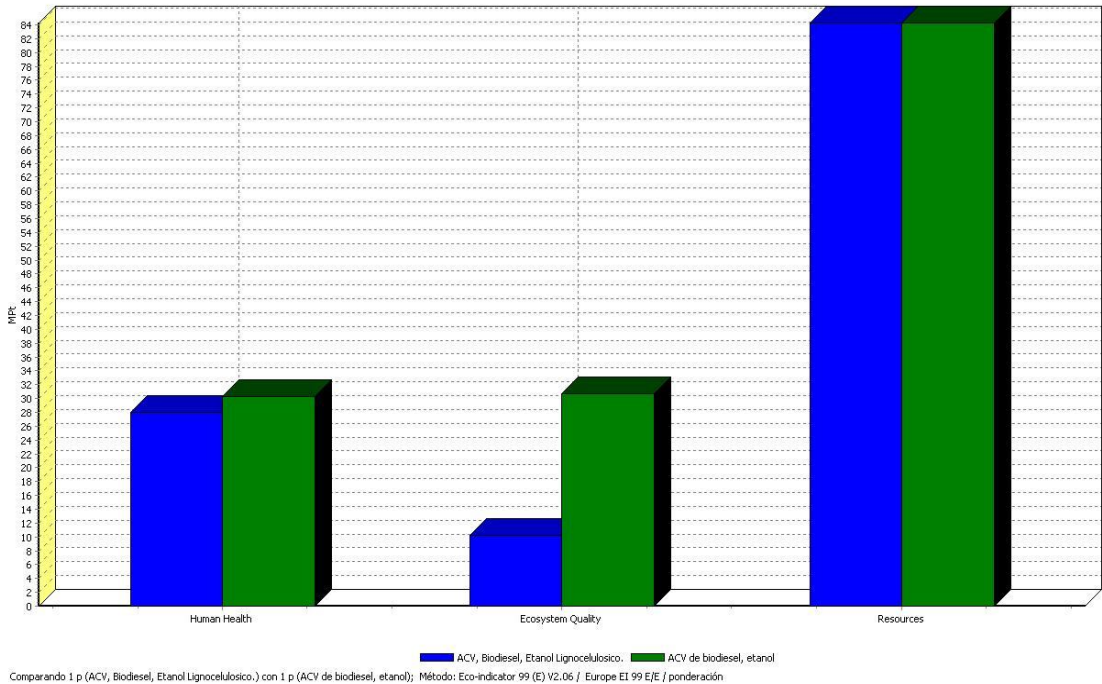
Fuente: Elaborado por los autores utilizando SimaPro 7.1

Al realizar la ponderación del ACV de los dos sistemas, SimaPro calculó que usando etanol obtenido de la biomasa en los residuos de la extracción de aceite, presenta un total de puntos de 1.23E8 menor de los arrojados al utilizar etanol de caña de azúcar 1.45E8 puntos (ver tabla G4 anexo G); esto se debe a que no se necesita el uso de tierras arables adicional para la plantación de la materia prima, a la disminución de los impactos en la categoría de respiración de compuestos

⁵ Proceso tomado de la base de datos de SimaPro 7.1

inorgánicos y en la categoría de sustancias cancerígenas. Cuantificándose así menos daños por la utilización de etanol lignocelulósico (figura 18).

Figura 19. Ponderación de los daños causados por los dos sistemas.



Fuente: Elaborado por los autores utilizando SimaPro 7.1

CONCLUSIONES

Al realizar el ACV con la metodología del Eco-indicador 99 se puede afirmar:

Las mayores emisiones son generadas por el uso de combustible diesel en todas las etapas del proceso de producción de biodiesel afectando principalmente las categorías de combustibles fósiles, respiración de compuestos inorgánicos y acidificación/eutrofización, que a su vez causan daños al consumo de recursos, salud humana y calidad del ecosistema respectivamente.

A medida que se aumenta el contenido de biodiesel en la mezcla, se reducen los impactos ambientales en un total de 6E6 puntos para el B10, 1.6E7 para el B20 y 1.03E8 para el B100; representando una alternativa para reemplazar la utilización del combustible fósil ya que este genera mayores impactos ambientales.

Utilizar el raquis y la fibra como fuente de materia prima para la obtención de bioetanol presenta ventajas ambientales por reducir la utilización de tierras arables en 2,02E7 puntos.

RECOMENDACIONES

Realizar el análisis del ciclo de vida usando como combustible una mezcla B10 para el transporte de materias primas.

Incluir la infraestructura de las plantas de extracción de aceite, biodiesel y etanol en el inventario del ACV, ya que podrían tener una contribución significativa a los impactos ambientales del proceso.

Realizar estudios en el laboratorio con el raquis y la fibra para la obtención del etanol optimizando las variables del proceso usadas en la simulación con el fin de llevarlo a nivel industrial ya que este proceso está en fase de inicio y ha sido poco estudiado y difícilmente se encuentra datos en la literatura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PALMA DE ACEITE (*Elaeis guineensis* Jacq.)

<http://www.fao.org/inpho/content/documents/vlibrary/ae620s/Pfrescos/PALMADEACEITE.HTM>

[2] LA PALMA DE ACEITE

<http://www.fedepalma.org/palma.htm>

[3] AGROINDUSTRIA DE LA PALMA DE ACEITE

<http://www.fedepalma.org/pyr.htm>

[4] ACEITE DE PALMA

http://es.wikipedia.org/wiki/Aceite_de_palma

[5] RAMÍREZ, Mauricio. Análisis ambiental de la producción de palma de aceite para biodiesel en Colombia. Universidad de Antioquia. 2009.

[6] GARCÍA, Juan. Biocarburantes Líquidos: Biodiesel y Bioetanol. Universidad Rey Juan Carlos del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME), Universidad de Alcalá. Madrid, España, 2006.

[7] MARCHETTI, J.M., MIGUEL, V.U., ERRAZU, A.F. Possible methods for biodiesel productions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (2007) 1300–1311

- [8] WEST, Alex H., POSARAC, Dusko., ELLIS, Naoko, Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant. *Bioresource Technology* 99 (2008) 6587–6601
- [9] FREEDMAN, V., PRYDE, E., MOUNTS, T. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *J. Am. Oil Soc. Chem.*
- [10] MONTOYA, María. Tesis de Grado. “Evaluación Integral de la Eficiencia Económica y Ambiental de Procesos para la obtención de Biodiesel”. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 2008.
- [11] MARTÍNEZ, Diego, JAIMES, Wilmer. Tesis de Grado “Aplicación de la Metodología Análisis de Ciclo de Vida De la Cuna a la Cuna al Biodiesel producido a partir de Aceite de palma Africana en Sabana de Torres”. Universidad Industrial de Santander. 2009.
- [12] EL PROGRAMA DE BIOCOMBUSTIBLES EN COLOMBIA. Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia. 2007.
- [13] FEDEPALMA-CENIPALMA. Presentación Multimedia.
- [14] ISO 14040:2006, Environmental management, life cycle assessment, principles and framework. International Standard Organization.
- [15] SÁNCHEZ, Oscar J., CARDONA, Carlos A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology* 99. (2008).
- [16] GUTIÉRREZ, Luis F., SÁNCHEZ, Oscar J., CARDONA, Carlos A. Process integration possibilities for biodiesel production from palm oil using ethanol obtained from lignocellulosic residues of oil palm industry. *Bioresource Technology* 100 (2009).

- [17] G, V. H., Future prospects for ethanol production from lignocellulosic biomass, in Department of Science Technology and Society. 2000: Utrecht the Netherlands.
- [18] SETAC, (1992). Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice, Washington DC.
- [19] SÁNCHEZ, Oscar J., CARDONA, Carlos A. Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. Bioresource Technology 98. 2007.
- [20] ISO 14044:2006, Environmental management, life cycle assessment, requirements and guidelines. International Standard Organization.
- [21] QUINTERO, Viviana. Tesis de Maestría. “Evaluación del potencial de producción de etanol combustible a partir de biomasa secundaria disponible en la agroindustria azucarera Colombiana”, Universidad Industrial de Santander, 2009.
- [22] “Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte”. Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiesel y del Diesel. Ministerio de Medio Ambiente, CIEMAT, España.
- [23] SÁNCHEZ, Oscar J., CARDONA, Carlos A. Producción biotecnológica de alcohol carburante II: integración de procesos. Interciencia 2005.
- [24] QUISPE, Isabel. “Análisis de ciclo de vida de los biocombustibles en Perú”.. Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú. 2009.
- [25] PLATA, Vladimir, BLANCO, Lady J. “Estudio de la transesterificación del aceite de palma con etanol en un sistema de reactores de flujo continuo de biodiesel”, Universidad industrial de Santander. 2008.

[26] GARCÍA, Carlos M. “Simulación de una planta de producción y purificación de biodiesel a partir de aceite de palma y etanol usando el simulador comercial HYSYS PLANT 3.2”. Universidad industrial de Santander. 2007.

[27] PRé Consultants: Life Cycle Consultancy and Software Solutions

www.pre.nl

[28] ZAPATA, Carlos, MARTÍNEZ, Iván, ARENAS, Erika, HENAO, Carlos. Producción de Biodiesel a Partir de Aceite Crudo de Palma: 1. Diseño y Simulación de dos Procesos Continuos. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia, 2006.

BIBLIOGRAFÍA

ACEITE DE PALMA

http://es.wikipedia.org/wiki/Aceite_de_palma

AGROINDUSTRIA DE LA PALMA DE ACEITE

<http://www.fedepalma.org/pyr.htm>

AGUDELO, John R., BENJUMEA, Pedro; GÓMEZ, Edwin y PÉREZ, Juan F. Biodiesel una Revisión del Desempeño Mecánico y Ambiental. Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte. 13: 1-14, 2003.

“Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte”. Fase I. Análisis de Ciclo de Vida comparativo del etanol de cereales y de la gasolina. Ministerio de Medio Ambiente, CIEMAT, España.

“Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte”. Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiesel y del Diesel. Ministerio de Medio Ambiente, CIEMAT, España.

ÁVILA, Adrián, BULA, Antonio, SANJUÁN, Homero. Cinética de la transesterificación de la oleína de palma africana con etanol. Interciencia. 2008.

ÁVILA, Omar A., SUÁREZ, Jairo A. “Análisis de ciclo de vida e integración del proceso de producción de bioetanol de segunda generación a partir de bagazo de caña”. Universidad industrial de Santander. 2010.

Biocarburantes líquidos: biodiesel y Bioetanol. CITME, CEIM, Comunidad de Madrid. Universidad Rey Juan Carlos. España. 2006.

CASTRO, Paula, COELLO, Javier. “Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú”. Perú. 2007.

EL PROGRAMA DE BIOCOMBUSTIBLES EN COLOMBIA. Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia. 2007.

FEDEPALMA-CENIPALMA. Presentación Multimedia.

FREEDMAN, V., PRYDE, E., MOUNTS, T. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. J. Am. Oil Soc. Chem.

G, V. H., Future prospects for ethanol production from lignocellulosic biomass, in Department of Science Technology and Society. 2000: Utrecht the Netherlands.

GALLARDO, Martín. Diseño de un reactor de transesterificación para la producción de biodiesel. Universidad Carlos III de Madrid. España. 2008.

GARCÍA, Carlos M. "Simulación de una planta de producción y purificación de biodiesel a partir de aceite de palma y etanol usando el simulador comercial HYSYS PLANT 3.2". Universidad industrial de Santander. 2007.

GARCÍA, Juan, José Ángel. Biocarburantes Líquidos: Biodiesel y Bioetanol. Universidad Rey Juan Carlos del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME), Universidad de Alcalá. Madrid, España, 2006.

GONZÁLEZ, Andrés F., JIMÉNEZ, Cristina I. Biocombustibles de segunda generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes. Colombia. 2007.

GUTIÉRREZ, Luis F., SÁNCHEZ, Oscar J., CARDONA, Carlos A. Process integration possibilities for biodiesel production from palm oil using ethanol obtained from lignocellulosic residues of oil palm industry. Bioresource Technology 100 (2009).

ISO 14040:2006, Environmental management, life cycle assessment, principles and framework. International Standard Organization.

ISO 14044:2006, Environmental management, life cycle assessment, requirements and guidelines. International Standard Organization.

KAFAROV, Viatcheslav, OJEDA Karina, SÁNCHEZ, Eduardo. “ Diseño de producción conjunta biodiesel – bioetanol. Universidad industrial de Santander. 2006.

LA PALMA DE ACEITE
<http://www.fedepalma.org/palma.htm>

MARCHETTI, J.M., MIGUEL, V.U., ERRAZU, A.F. Possible methods for biodiesel productions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11 (2007) 1300–1311.

MARTÍNEZ, Diego, JAIMES, Wilmer. Tesis de Grado “Aplicación de la Metodología Análisis de Ciclo de Vida De la Cuna a la Cuna al Biodiesel producido a partir de Aceite de palma Africana en Sabana de Torres”. Universidad Industrial de Santander. 2009.

MONTOYA, María. Tesis de Grado. “Evaluación Integral de la Eficiencia Económica y Ambiental de Procesos para la obtención de Biodiesel”. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 2008.

PALMA DE ACEITE (*Elaeis guineensis* Jacq.)
<http://www.fao.org/inpho/content/documents/vlibrary/ae620s/Pfrescos/PALMADEACEITE.HTM>

PLATA, Vladimir, BLANCO, Lady J. “Estudio de la transesterificación del aceite de palma con etanol en un sistema de reactores de flujo continuo de biodiesel”, Universidad industrial de Santander. 2008.

Potencial de Biocombustibles en Colombia. BIRD Antioquia. Colombia. 2008.

PRé Consultants: Life Cycle Consultancy and Software Solutions.
www.pre.nl

QUINTERO, Viviana. Tesis de Maestría. “Evaluación del potencial de producción de etanol combustible a partir de biomasa secundaria disponible en la agroindustria azucarera Colombiana”, Universidad Industrial de Santander, 2009.

QUISPE, Isabel. “Análisis de ciclo de vida de los biocombustibles en Perú”.. Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú. 2009.

RAMÍREZ, Mauricio. Análisis ambiental de la producción de palma de aceite para biodiesel en Colombia. Universidad de Antioquia. 2009.

SÁNCHEZ, Oscar J., CARDONA, Carlos A. Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. Bioresource Technology 98. 2007.

SÁNCHEZ, Oscar J., CARDONA, Carlos A. Producción biotecnológica de alcohol carburante II: integración de procesos. Interciencia 2005.

SÁNCHEZ, Oscar J., CARDONA, Carlos A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. Bioresource Technology 99. (2008).

Seminario-taller Biocombustibles Biodiesel – Bioetanol. Virtual Pro. Bogotá, Colombia. 2007.

SETAC, (1992). Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice, Washington DC.

WEST Alex, POSARAC, Dusko, ELLIS, Naoko. Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant. Bioresource Technology 99 (2008).

ZAPATA, Carlos, MARTÍNEZ, Iván, ARENAS, Erika, HENAO, Carlos. Producción de Biodiesel a Partir de Aceite Crudo de Palma: 1. Diseño y Simulación de dos Procesos Continuos. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia, 2006.

ANEXOS

ANEXO A. LA PALMA AFRICANA

La expansión del cultivo en Colombia ha mantenido un crecimiento sostenido. A mediados de la década de 1960 existían 18.000 hectáreas en producción y hoy existen más de de 150.000 hectáreas en 54 municipios del país distribuidos en cuatro zonas productivas:

Norte - Magdalena, norte del Cesar, Atlántico, Guajira

Central - Santander, Norte de Santander, sur del Cesar, Bolívar

Oriental - Meta, Cundinamarca, Casanare, Caquetá

Occidental – Nariño y Valle del Cauca

Colombia es el primer productor de palma de aceite en América Latina y el cuarto en el mundo. Tiene como fortaleza un gremio que cuenta con sólidas instituciones, ya que desde 1962 fue creada la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite.

DATOS AGRONÓMICOS DE LA PALMA AFRICANA EN SABANA DE TORRES SANTANDER

Se utilizan fertilizantes para el vivero, cal y fertilizantes para el terreno, las especificaciones están en las tablas 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla A1. Fertilizantes para el vivero

Tipo Fertilizante			Kg/árbol	Kg/adec	ton/adec
fertilizante A	N-P-K-Mg	15-15-6-4	0,01204	25065,05934	25,06505934
fertilizante B	N-P-K-Mg	12-12-17-2	0,285	593317,4346	593,3174346
Total			0,29704	618382,4939	618,3824939

Fuente: Elaborada por los autores a partir de Martínez, Jaimes (2009) [11]

Tabla A2. Cal necesaria para el Terreno

OTROS	Kg/Ha. año	Ton/Ha.año
Cal	500	6329.6

Fuente: Elaborada por los autores a partir de Martínez, Jaimes (2009) [11]

Tabla A3. Fertilizantes para el Terreno

Fertilizante	Kg/árbol*año	Kg/año	Ton/año
urea	2	3620548,8	3620,5488
triple super fosfato	0,75	1357705,8	1357,7058
sulfato de potasio	0,7	1267192,08	1267,19208
cloruro de potasio	0,7	1267192,08	1267,19208
bórax	0,06	108616,464	108,616464
sulfato de magnesio	0,25	452568,6	452,5686
total	4,46	8073823,82	8073,82382

Fuente: Elaborada por los autores a partir de Martínez, Jaimes (2009) [11]

Las características del cultivo de la palma se encuentran en la tabla 4.

Tabla A4. Características del cultivo.

Característica	Unidad	Valor
Rendimiento palma	Ton/ha* año	26
RFF necesarios	Ton/año	329140.8
Área necesaria	Ha	12659,26154
Arboles necesarios	-	1810274,4
Peso prom. Racimos	kg	14
Producción de Racimos	kg/árb*año	182
Distribución	Árbol/Ha	143
Peso prom. Fruto	g	11.8
Pulpa	g	9.31
Cuesco	g	1.21
Almendra	g	1.28
Semilla	g	2.49
Peso semillas nec.+15%	g	5183720,744
Peso semillas nec.+15%	Ton	5,183720744

Fuente: Elaborada por los autores a partir de Martínez, Jaimes (2009) [11]

En la tabla 5 están las distancias recorridas por carretera a nivel nacional.

Tabla A5. Distancias Nacionales

INSUMO	ORIGEN	DISTANCIA (km)
Semilla	Buenaventura	776
Fertilizantes	Cúcuta	243
Cal	Bucaramanga	110
Combustible	La Gómez (Sder)	15

Fuente: Elaborada por los autores a partir de Martínez, Jaimes (2009) [11]

ANEXO B. EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE PALMA

A continuación se muestran las etapas que conforman la extracción del aceite de palma. [2]

Recepción del fruto: los racimos que llegan a las instalaciones de la planta de beneficio son pesados y según los criterios de la empresa se establece el tipo de control para evaluar la calidad del fruto. Los racimos generalmente se descargan en una plataforma de recibo y, mediante un sistema de tolvas se alimentan las vagonetas. Una vez cargadas, estas se trasladan por medio de rieles a la zona de esterilización

Esterilización: la esterilización se realiza en autoclaves de diferente capacidad por medio de vapor de agua saturada a presiones relativamente bajas, durante más o menos 90 minutos, aumentando y disminuyendo la presión. Este proceso acelera el ablandamiento de la unión de los frutos, lo cual facilita la separación, la extracción del aceite y el desprendimiento de la almendra.

Desfrutamiento: este proceso se realiza en el tambor desfrutador para separar, mediante un proceso mecánico, el fruto de la tusa o raquis. El fruto es transportado mediante sinfines de elevadores a los digestores. Las tusas o raquis son conducidos por medio de bandas transportadoras y se recolectan para disponerlas en los cultivos.

Digestión prensado: los frutos son macerados hasta formar una masa homogénea blanda para extraer el aceite mediante prensa que separan la torta (compuesto de fibra, cuesco y nueces) y el aceite crudo. El compuesto aceitoso pasa por bombeo al proceso de decantación y clarificación. La torta o parte sólida pasa a desfibración para separar las nueces que van a un proceso de secado en un silo y se lleva a palmistería.

Clarificación: se realiza mediante una separación estática o dinámica de fases por diferencia de densidades. El aceite clarificado pasa a los tanques

sedimentadores donde las partículas pesadas se van decantando por reposo, Así se separa de la mezcla lodosa restante que pasa a las centrífugas deslodadoras.

Secado: el aceite pasa a secado para disminuir la humedad bien sea por calentamiento en un tanque o por sistema de secamiento atmosférico o al vacío.

Almacenamiento: una vez realizados los controles de calidad en el laboratorio, el aceite es llevado a los tanques de almacenamiento para ser despachado a las industrias procesadoras.

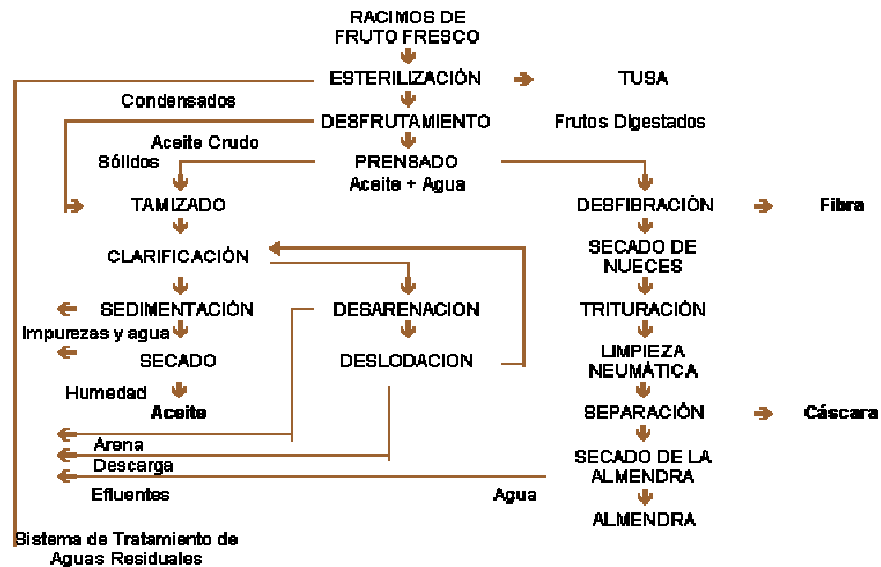
Deslodado: las aguas aceitosas se tamizan y pasan por centrífugas deslodadoras para recuperar el aceite y separar las aguas efluentes. Esta agua ya no tiene ningún contenido de aceite recuperable, por lo tanto pasan a las piscinas de desaceitado para continuar con el sistema de tratamiento de aguas residuales.

Desfibración y Trituración: la mezcla compuesta por fibra y nueces es conducida mediante sinfines para la separación. La separación es un proceso neumático, donde se utiliza una columna vertical a través de la cual pasa un flujo de aire ascendente a una velocidad determinada que toda la fibra sube y las nueces caen al fondo de la columna de separación. Las nueces pasan al tambor pulidor para separarlas de impurezas y de este van al silo de almacenamiento, donde se secan para facilitar el rompimiento de la cáscara y poder recuperar la almendra contenida en ella.

Palmistería: las nueces secas provenientes de los silos de almacenamiento van a un tambor provisto de mallas, en donde se realiza su clasificación por tamaños antes de enviarlas a las rompedoras. Mediante un proceso de separación neumática y de fuerzas centrífugas se separa la almendra de la cáscara. La almendra pasa a silo de secado y empaque. De esta manera se obtiene el aceite de palmiste.

En la siguiente figura se presenta el diagrama del flujo del proceso de extracción de aceite de palma, donde se destacan los principales productos y subproductos.

Figura B1. Proceso de Extracción de Aceite de Palma



Fuente: Fedepalma [2]

Para este proceso se tomaron datos de la literatura [11-13], con base en la cual se realizaron los cálculos para la obtención de 69120 ton/año de aceite.

Tabla B1. Datos de la Extracción.

Descripción	Unidades	Valor
RFF	Ton/año	329140.8
Raquis	Ton/año	72410,976
Fibra	Ton/año	63359,6004
Aceite	Ton/año	69120
Almendra	Ton/año	18429.12
otros	Ton/año	259546.22
Torta	Ton/año	27319.7
Vapor	Ton/año	93810
Consumo Agua	Ton/año	102856.5
Consumo E. Eléctrica	KWh/año	7314000

Fuente: Elaborada por los autores a partir de Martínez, Jaimes (2009) [11]

ANEXO C. PROCESO DEL BIODIESEL

Como se mencionó anteriormente el proceso de producción de biodiesel fue dividido en varias etapas: esterificación, Transesterificación, separación y purificación. Para lo cual primero fue necesario caracterizar los compuestos químicos e introducir propiedades fisicoquímicas y termodinámicas al simulador.

CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS EN EL SIMULADOR

Fue necesario suministrar las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas para los triglicéridos: tripalmitina (PPP), trioleína (OOO); para los diglicéridos: dipalmitina (PP), dioleína (OO); para los monoglicéridos: monopalmitina (MP), monoleína (MO); para los etil ésteres: etilpalmitato (EP), etiloleato (EO) y para los ácidos grasos libres: ácido palmítico (AP), ácido oleico (AO) [10].

Se suministraron datos como temperatura normal de ebullición, propiedades críticas y estructura UNIFAC.

Tabla C1. División por grupos para el método de Valderrama-Álvarez

Sustancia	-CH3	-CH2-	>CH-	=CH	>COO-	-OH
PPP	3	44	1		3	
OOO	3	44	1	6	3	
POS	3	46	1	2	3	
POO	3	44	1	4	3	
POP	3	44	1	2	3	
POLi	3	42	1	6	3	
PP	2	29	1		2	1
OO	2	30	1	4	2	1
OS	2	32	1	2	2	1
OP	2	30	1	2	2	1
OLi	2	25	1	6	2	1
MP	1	16	1		1	2
MS	1	18	1		1	2
MO	1	16	1	2	1	2
EP	2	15			1	
ES	2	17			1	
EO	2	15		2	1	
ELi	2	10		4	1	

Fuente: Montoya (2008) [10]

Se decidió trabajar con los valores obtenidos por el método de Constantinou-Gani (1994) ya que este método permite el cálculo la temperatura normal de ebullición, además este método ha sido utilizado por Ndiaye et al. (2006) para estimar las propiedades críticas del aceite de soya, higuierilla.

Tabla C2. Propiedades Críticas

Sustancia	Pc ¹ (bar)	Pc ² (bar)	Tc ¹ (K)	Tc ² (K)	Vc ¹ (m ³ /kmol)	Vc ² (m ³ /kmol)	w ¹
OOO	3.28	5.00	944.78	1205.76	3.24	3.50	0.6004
POP	3.53	5.27	930.79	1172.49	3.05	3.28	0.6949
POS	3.40	5.10	938.06	1188.21	3.16	3.41	0.6538
POO	3.40	5.13	937.92	1189.26	3.14	3.39	0.6461
POL	3.40	5.16	937.78	1190.33	3.13	3.38	0.6384
PLP	3.52	5.30	930.64	1173.60	3.27	3.03	0.6868
PPP	3.67	5.41	923.37	1155.44	2.95	3.17	0.7473
RRR	3.42	5.08	965.57	1295.40	3.26	3.70	0.7671
OO	4.95	7.03	890.10	1067.10	2.25	2.38	0.887
PP	5.61	7.82	870.91	1019.70	2.05	2.10	1.0209
OP	5.26	7.31	880.76	1048.20	2.15	2.27	0.9513
OL	4.95	7.09	889.91	1068.61	2.23	2.37	0.8759
OS	4.95	6.98	890.28	1065.70	2.26	2.39	0.898
MO	10.37	12.48	811.40	911.00	1.25	1.29	1.2451
MP	11.65	13.49	796.76	888.50	1.15	1.18	1.3325
MS	10.39	12.31	811.68	908.40	1.26	1.30	1.2645
ES	10.51	11.96	750.55	805.30	1.17	1.20	1.0364
EL	10.48	12.31	749.76	809.47	1.15	1.17	0.9898
EO	9.56	12.13	762.23	807.40	1.29	1.19	1.4496
EP	11.80	13.09	729.28	779.80	1.06	1.08	1.0881

¹ Método de Constantinou-Gani (1994)

² Método de Valderrama-Álvarez (2006)

Fuente: Montoya (2008) [10]

Tabla C3. Temperaturas normales de ebullición

POS	818.293				
POO	817.7619				
POL	817.2295				
PLP	810.7482				
PPP	804.6225	675.03	19.19	Goodrum y Geller, 2002	
RRR	848.1752				
OO	761.9853				
PP	744.542				
OP	753.4497				
OL	761.2853				
OS	762.6827				
MO	672.4609				
MP	659.0767				
MS	673.5407				
ES	611.5304				
EL	608.5917				
EO	643.6576				
EP	591.6826				
Metil palmitato	580.9856	611.2	4.91	Yuan <i>et al.</i> , 2005	
		688.15	15.57	Goodrum 2002	
Metil estearato	601.8473	625.2	3.70	Yuan <i>et al.</i> , 2005	
		715.15	15.84	Goodrum 2002	
Metil oleato	635.4102	622.2	2.16	Yuan <i>et al.</i> , 2005	
Metil linoleato	566.0855	639.2	11.41	Yuan <i>et al.</i> , 2005	

Fuente: Montoya (2008) [10]

EQUIPOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN

La siguiente tabla muestra todos los quipos usados en la simulación del proceso de producción de biodiesel

Tabla C4. Equipos usados en la simulación de la producción del Biodiesel

Equipo	Descripción	Equipo	Descripción
V-100	Separador Flash	P-102	Bombas
V-101	Mezclador	P-103	Bombas
V-102	Mezclador	P-104	Bombas
V-103	Mezclador	T-100	Columna destilación del biodiesel
E-102	Intercambiador-enfriador	T-101	Columna destilación del etanol
E-103	Intercambiador-calentador	T-102	Columna de extracción Liq-Liq
E-104	Intercambiador-calentador	T-103	Columna destilación de etanol hidratado
E-105	Intercambiador-calentador	T-104	Columna destilación de etanol anhidro
E-106	Intercambiador-enfriador	VLV-100	Válvula
E-107	Intercambiador-calentador	CSTR	Reactor de transesterificación
X-100	Splitter	MIX-1021	Mezclador
X-101	Splitter	MIX-102	Mezclador
CRV-100	Reactor de esterificación	MIX-104	Mezclador

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

Los flujos principales de cada etapa se muestran a continuación.

Tabla C5. Esterificación.

ESTERIFICACION				
Corriente	Kg/h	Ton/año	P(KPa)	T (°C)
Etanol fresco 1	32,02	276,6528	101,3	25
Etanol reciclo 1	128	1105,92	101,3	78,7
Aceite	8000	69120	101,3	25
H ₂ SO ₄	80	691,2	101,3	25
Aceite refinado	8015	69249,6	120	294
Agua	17,09	147,6576	110	94,11

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Tabla C6. Transesterificación.

TRANSESTERIFICACION				
Corriente	Kg/h	Ton/año	P(KPa)	T (°C)
Etanol fresco 2	1325	11448	101,3	25
Aceite refinado	8015	69249,6	101,3	48,96
Etanol reciclo 2	1360	11750,4	101,3	78,11
NaOH	80	691,2	101,3	25
Mezcla a lavado	9339	80688,96	120	226,6

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Tabla C7. Separación y Purificación.

SEPARACION Y PURIFICACION				
Corriente	Kg/h	Ton/año	P(KPa)	T (°C)
Mezcla a lavado	9339	80688,96	120	226,6
Agua lavado	1709	14765,76	101,3	81
Biodiesel crudo	8985	77630,4	101,3	125,7
Glicerina cruda	2063	17824,32	101,3	105
Biodiesel refinado	8200	70848	101,3	150
Glicerina refinada	867,4	7494,336	101,3	150
Agua residuo	605,9	5234,976	101,3	150,8
Aceite sin reaccionar	179,4	1550,016	11,3	454,5
Agua residuo 2	1196	10333,44	101,3	150

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Los gastos energéticos, de vapor y agua para la planta de producción de Biodiesel se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla C8. Consumos para la Planta de Biodiesel.

Flujo	Unidad	Cantidad
Consumo Energético	kW.h/año	6973,344
Vapor Consumido	Ton/año	77596,6176
Consumo de Agua	Ton/año	112516,128

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Propiedades del Biodiesel

Debe cumplir normas de calidad como EN 14214 o A.S.T.M.D 6751-02 adaptadas a normas técnicas colombianas como las NTC o la ISO.

Figura C1. Propiedades del Biodiesel

		EN 14214-03	A.S.T.M D 6751-02
Contenido de esteres	% masa	Mín. 96,5	----
Densidad a 15 °C	g/cm ³	0,86 – 0,90	----
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	3,50 – 5,00	1,90 – 6,00
Punto de Inflamación	°C	Mín. 120	Mín. 130
Azufre total	% masa	Máx. 0,001	Máx. 0,05
Residuo carbonoso Conradson al 100%	% masa	Máx. 0,05	Máx. 0,05
Número de cetano	----	Mín. 51	Mín. 47
Contenido en cenizas	% masa	Máx. 0,03	Máx. 0,02
Contenido en agua	mg/Kg.	Máx. 500	----
Índice de acidez	mg KOH/g	Máx. 0,50	Máx. 0,80
Contenido en monoglicéridos	% masa	Máx. 0,80	----
Contenido en diglicéridos	% masa	Máx. 0,20	----
Contenido en triglicéridos	% masa	Máx. 0,20	----
Glicerol libre	% masa	Máx. 0,02	Máx. 0,02
Glicerol total	% masa	Máx. 0,25	Máx. 0,24
Índice de yodo	----	Máx. 120	----
Fósforo	ppm.	Máx. 10	Máx. 10

Fuente: Plata, Blanco (2008) [25]

Datos arrojados por la simulación que cumplen con los requisitos de estas normas.

Tabla C9. Resultados de las propiedades del Biodiesel.

Contenido de esteres	%masa	98.89
Densidad	g/cm ³	0.869
Contenido de agua	mg/Kg	455
Contenido monogliceridos	%masa	0.75
Contenido digliceridos	%masa	0.1
Contenido de trigliceridos	%masa	0.005
Glicerol	%masa	0

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Emisiones gaseosas de algunos combustibles.

Tabla C10. Emisiones gaseosas del Biodiesel de Palma

COMPUESTO	DIESEL (gr/Kg. de combustible)	B-5 (gr/Kg. de combustible)	B-10 (gr/Kg. de combustible)	B-20 (gr/Kg. de combustible)	B-100 (gr/Kg. de combustible)
Monóxido de carbono (CO)	34,02	31	31	29	18
Dióxido de carbono (CO ₂)	3.123	3.110	3.093	3.060	2.813
Hidrocarburos (HC) – (Metano, Butano, Benceno, Benzopireno, Benzofluoranteno)	100	96	92	89	40
Óxidos de Nitrógeno (Nox)	15,22	15	17,94	18,29	14

Fuente: Ministerio de Minas y Energía (2007) [12]

ANEXO D. PROCESO DE ETANOL LIGNOCELULÓSICO

Descripción del proceso. [21]

Pretratamiento con ácido sulfúrico (H_2SO_4), concentración 1.5% peso y Temperatura de $160\text{ }^{\circ}C$, se causa una degradación del 90% de la hemicelulosa y una completa solubilización de la lignina la solución acuosa compuesta principalmente por xilosa, lignina y H_2SO_4 fue neutralizada con cal ($Ca(OH)_2$).

Para las etapas de sacarificación y fermentación de la celulosa (azúcares C6), la torta de la primera filtración es llevada a un tanque de mezclado donde se le adiciona agua, luego es llevada a los reactores de SSF ($32^{\circ}C$, 101.3 Kpa, t_{res} 72 horas), se utiliza *Saccharomyces Cerevisiae*, para la fermentación de los azúcares C5 las condiciones de fermentación son ($32^{\circ}C$, 101.3 Kpa, t_{res} 36 horas), el producto gaseoso compuesto por una mezcla de dióxido de Carbono y Etanol, se envía a una torre empacada de absorción con agua en contracorriente. La corriente del tope contiene un 98% m/m de CO_2 . La corriente de los fondos se mezcla con la corrientes líquidas de los fermentadores y son enviadas a las etapas de destilación y purificación.

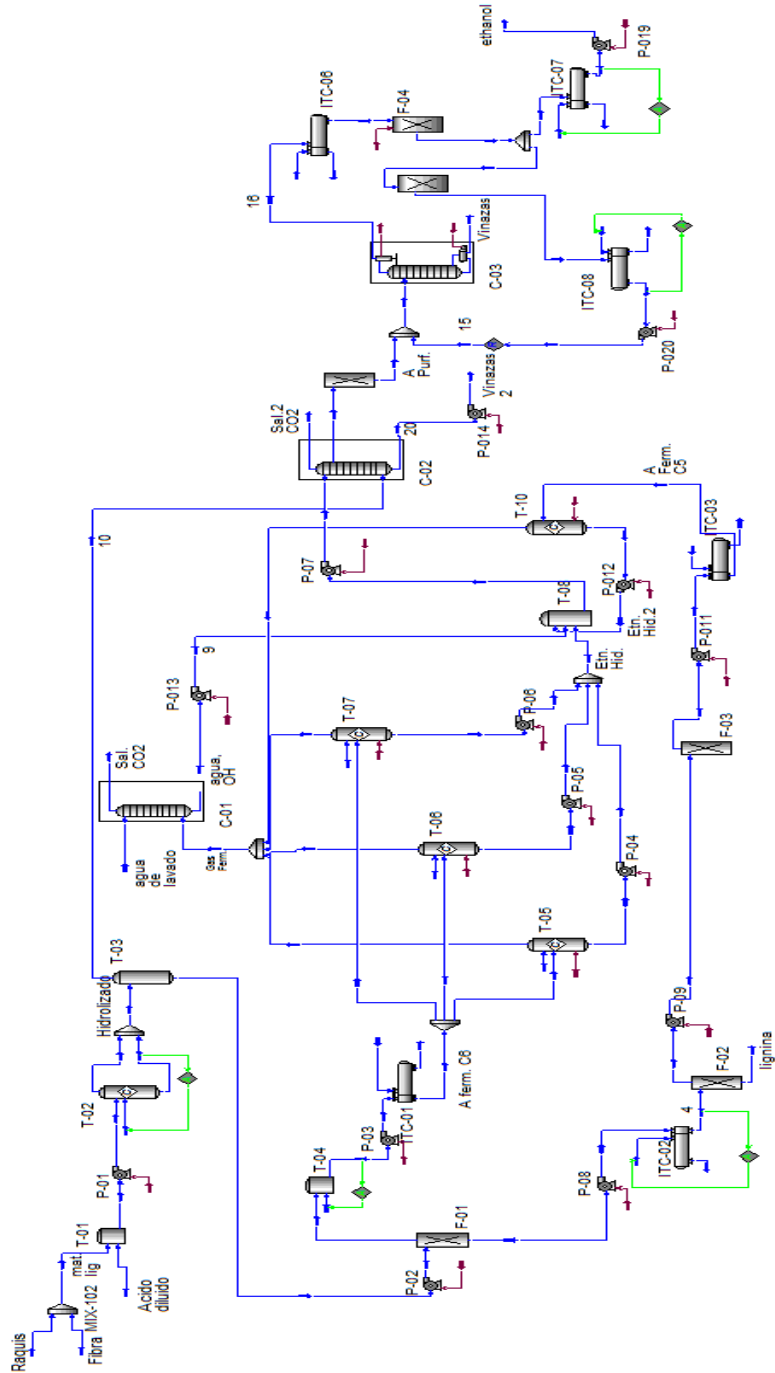
Tabla D1. Equipos utilizados en la simulación de la producción de Etanol

Equipo	Descripción	Equipo	Descripción
MIX-102	Mezclador	T-02	Reactor hidrólisis
T-01	Tanque mezclado	T-05	Reactor SSF
T-04	Tanque mezclado	T-06	Reactor SSF
T-08	Tanque mezclado	T-07	Reactor SSF
P-01	Bomba	T-10	Reactor Ferm. C5
P-02	Bomba	T-03	Destilador Flash
P-03	Bomba	C-01	Colum. Lavado CO_2
P-04	Bomba	C-02	Colum. Lavado CO_2
P-05	Bomba	C-03	Colum. Destilación
P-06	Bomba	F-01	Separador
P-07	Bomba	F-02	Separador
P-08	Bomba	F-03	Separador
P-09	Bomba	F-04	Tamiz Molecular
P-11	Bomba	ITC-01	Int. de calor
P-12	Bomba	ITC-02	Int. de calor
P-13	Bomba	ITC-03	Int. de calor
P-14	Bomba	ITC-06	Int. de calor
P-19	Bomba	ITC-07	Int. de calor
P-20	Bomba	ITC-08	Int. de calor

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

SIMULACIÓN DEL PROCESO.

Figura D2. Simulación del proceso del etanol



Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Se tomaron las principales etapas del proceso de producción del bioetanol, estas son pretratamiento con ácido diluido, fermentación y sacarificación simultánea y la purificación, se indican también los subproductos y residuos más importantes; se ilustran los principales flujos y sus respectivas condiciones en las siguientes tablas.

Tabla D2. Etapa de Pretratamiento con ácido diluido

Corriente	Presión (KPa)	Temperatura (°C)	Flujo (Kg/h)	Flujo (Ton/año)
Raquis	101.3	30	8381	72411.84
Fibra	101.3	30	7333	63357.12
AC. DILUIDO	101.3	30	4714	40728.96
Hidrolizado	617	160	36140	312249.6

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Tabla D3. Etapa de SSF

Corriente	Presión (KPa)	Temperatura (°C)	Flujo (Kg/h)	Flujo (Ton/año)
A ferm. C6	101.3	32	20660	178502.4
Gas Ferm.	91	32	2183	18861.12
Etn. Hid.	101	32	19240	166233.6

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Tabla D4. Etapa de fermentación Xilosa (C₅)

Corriente	Presión (KPa)	Temperatura (°C)	Flujo (Kg/h)	Flujo (Ton/año)
A ferm. C5	101.3	30	13580	117331.2
Etn. Hid.2	101	32	12820	110764.8

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Tabla D5. Etapa de Purificación.

Corriente	Presión (KPa)	Temperatura (°C)	Flujo (Kg/h)	Flujo (Ton/año)
A Purf.	101.3	95.02	10890	94089.6
Vinazas	101.3	99.94	8667	74882.88
ethanol	101.3	50	2219	19172.16

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Tabla D6. Otras corrientes

Corriente	Presión (KPa)	Temperatura (°C)	Flujo (Kg/h)	Flujo (Ton/año)
Sal CO2	90	27.45	2118	18299.52
Sal 2 CO2	101.3	38.66	34.54	298.4256
Lignina	101.3	50	1370	11836.8
Vinazas, 2	111	100	36810	318038.4

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

Los gastos energéticos, de vapor y agua para la planta de producción de Etanol se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla D7. Consumos de la planta de Etanol

Tipo de consumo	Consumo/h	Consumo/año
Energía	8.06 Kw	63871.07 Kw-h
Vapor	17128.84 Kg	147993.1776 Ton
Agua	27124.8 Kg	234358.272 Ton

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Aspen Hysys 2006.5

ANEXO E. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

MARCO DE REFERENCIA METODOLÓGICO PARA EL ACV [20]

Etapas de desarrollo de un ACV Los estudios de ACV deben incluir la definición del objetivo y del alcance, el análisis del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación de los resultados.

✓ **Definición de los objetivos y alcance del estudio.**

Se definen los objetivos globales, la finalidad del estudio, el producto a estudiar, el destinatario previsto y el alcance del estudio. De acuerdo a los objetivos particulares el ACV puede variar en cuanto a profundidad, tiempo y espacio.

✓ **Análisis del inventario.**

Comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes a lo largo de la vida útil del producto. Se calculan los requerimientos energéticos y materiales del sistema, la eficiencia energética de sus componentes y las emisiones producidas a lo largo de todo el proceso.

✓ **Evaluación del impacto de ciclo de vida. (EICV)**

Evalúa la importancia de los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados anteriores del análisis de inventario. Dentro de esta fase se pueden identificar tres etapas: clasificación, caracterización, valoración.

- **Clasificación:** consiste en asignar los datos del inventario a cada una de las categorías de impacto que se vayan a considerar.
- **Caracterización:** se cuantifican los impactos ambientales para cada categoría utilizando factores de equivalencia establecidos.

- **Valoración:** intenta agregar los resultados medioambientales para cada producto objeto de estudio, de forma que se obtiene un juicio o valoración sobre la calidad global del producto.

Además de los anteriores elementos en la EICV, podría haber elementos e información opcional, que pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y el alcance del ACV.

- Normalización: cálculo de la magnitud de los resultados de indicadores de categoría en relación con la información de referencia.
- Agrupación: organización y posible clasificación de las categorías de impacto.
- Ponderación: conversión y posible suma de los resultados del indicador a través de las categorías de impacto utilizando factores numéricos basados en juicios de valor. Puede incluir la suma de resultados de indicadores ponderados.
- Análisis de la calidad de los datos: mejor comprensión de la fiabilidad en la recopilación de los resultados del indicador, y del perfil de la EICV.

✓ **Interpretación del ciclo de vida.**

Identificación de los eventos significativos basados en los resultados de la EICV. Se establecen las conclusiones, limitaciones y recomendaciones para la toma de decisiones.

ASIGNACIÓN MÁSCA

Procedimiento mediante el cual se distribuyen los flujos de entrada y salida de un proceso entre el producto principal y cada una de los productos secundarios, permitiendo cuantificar los impactos de los co-productos cuando abandonan el sistema.

ANEXO F. SIMAPRO 7.1

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL UTILIZADA PARA EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA. [22]

El estudio del ACV del biodiesel se llevo a cabo con la herramienta computacional SimaPro 7.1®.

SimaPro es una herramienta desarrollada por Pré Consultants para el análisis del ciclo de vida que analiza y compara los aspectos medioambientales de un producto de una manera sistemática y consistente siguiendo las recomendaciones de las normas ISO 14040:2006 Principios y Marco de Referencia, y la ISO 14044:2006 Requerimientos y Directrices.

En una herramienta utilizada por empresas, consultoras, universidades y centros de investigación en multitud de estudios, los cuales avalan su capacidad y potencial en estos tipos de análisis.

BASE DE DATOS:

La base de datos puede contener varias librerías o proyectos que a su vez agrupan diferentes procesos. Los procesos se separan en siete categorías: materiales, energía, transporte, procesado, uso, escenarios de residuos y tratamientos de residuos. También contiene datos de carácter general como son los nombres de sustancias, las unidades de medida, referencia bibliográfica, etc.

Para los procesos más comunes como transporte, combustibles, productos químicos básicos y servicios industriales se utilizaron las siguientes bases de datos.

- **ETH-ESU 96:** Contiene base de datos sobre materiales (construcción, sustancias químicas. Metales, combustibles, etc.), energía transporte, tratamiento de residuos y otros.

- **BUWAL 250:** Contiene datos sobre materiales (sustancias químicas, metales, combustibles, etc.), energía, transporte, tratamientos de residuos.
- **ECOINVENT:** Contiene datos sobre energía, transporte, residuos, construcción, químicos, detergentes, papel y agricultura.

INDICADORES DE LA CALIDAD DE DATOS:

Este sistema evalúa la idoneidad de los datos asignándoles una puntuación ponderada teniendo en cuenta el perfil que se haya definido en el objetivo y alcance; periodo de tiempo, región del estudio, tipo de tecnología, límites del sistema, etc.

INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA:

Una vez se han detectado qué datos son los necesarios para el análisis se procede a hacer el inventario del ciclo de vida. Primero se recopilan aquellos datos que no están contenidos en las librerías de la herramienta y se introducen en los registros de los procesos. SimaPro genera automáticamente un árbol de procesos o diagrama de flujos uniendo todos los procesos.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO:

SimaPro incluye varios métodos de evaluación de impactos reconocidos. Todos utilizan el procedimiento de caracterización por el cual se calcula la contribución relativa de una sustancia a una categoría de impacto determinada. Además algunos métodos también utilizan otros procedimientos, como la evaluación de daño (Eco-Indicador 99).

La evaluación de impacto ambiental reside en la opción de analizar el efecto último del impacto ambiental, “endpoint” o bien, considerar los efectos intermedios, “midpoints”, las categorías de impacto intermedio se hallan más cercanas a la intervención ambiental, las de impacto finales son variables que afectan directamente a la sociedad.

ECO-INDICADOR 99:

Los valores estándar del eco-indicador pueden ser considerados adimensionales como el nombre utilizado comúnmente: puntos del eco-indicador (Pt). El valor absoluto de estos puntos es insignificante, el propósito principal es comparar las diferencias relativas entre productos o componentes.

- **Daño a la Salud Humana:** incluye el número y duración de enfermedades, los años de vida perdidos debido a la muerte prematura proveniente de causas ambientales. Las categorías de impacto incluidas son: Cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, efectos cancerígenos, efectos respiratorios y radiación ionizante, expresado en DALY (Disability Adjusted Life Years), significa que diferentes discapacidades causadas por enfermedades son ponderadas.
- **Daño a la Calidad del Ecosistema:** incluye los efectos sobre la diversidad de especies, especialmente para plantas y pequeños organismos; contiene las categorías: ecotoxicidad, acidificación/eutrofización, y uso de tierras, expresado en PDF*m2y, cantidad de especies de plantas y organismos que desaparecen en un área determinada.
- **Daño al Consumo de Recursos Minerales y Fósiles:** expresado en MJ surplus; energía adicional requerida para extraer dichos recursos cuando su concentración sea menor [27].

ANEXO G. RESULTADOS DEL ACV

Datos arrojados por SimaPro 7.1

Tabla G1. Ponderación de los resultados del ACV del Biodiesel

Categoría de impacto	Unidad	Total
Total	Pt	1,23E8
Carcinogens	Pt	4,17E5
Respiratory organics	Pt	1,7E6
Respiratory inorganics	Pt	2,79E7
Climate change	Pt	-2,11E6
Radiation	Pt	2,45E4
Ozone layer	Pt	6,42E4
Ecotoxicity	Pt	1,36E6
Acidification/ Eutrophication	Pt	8,04E6
Land use	Pt	8,42E5
Minerals	Pt	1,09E5
Fossil fuels	Pt	8,42E7
Daño de categoría	Unidad	Total
Total	Pt	1,23E8
Human Health	Pt	2,8E7
Ecosystem Quality	Pt	1,02E7
Resources	Pt	8,43E7

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Simapro 7.1

Tabla G2. Ponderación de los resultados de la comparación del Diesel, B10, B20, B100

Categoría de impacto	Unidad	ACV, diesel, refinería	ACV, Biodiesel 10	ACV biodiesel 20	ACV biodiesel 100
Total	Pt	1,29E8	1,23E8	1,13E8	2,6E7
Carcinogens	Pt	3,4E5	4,17E5	4,93E5	1,11E6
Respiratory organics	Pt	1,85E6	1,7E6	1,64E6	7,09E5
Respiratory inorganics	Pt	2,47E7	2,79E7	2,83E7	2,36E7
Climate change	Pt	1,8E6	-2,11E6	-5,95E6	-3,69E7
Radiation	Pt	2,62E4	2,45E4	2,29E4	1,01E4
Ozone layer	Pt	7,14E4	6,42E4	5,73E4	2,13E3
Ecotoxicity	Pt	1,38E6	1,36E6	1,34E6	1,2E6
Acidification/ Eutrophication	Pt	7E6	8,04E6	8,2E6	6,74E6
Land use	Pt	8,95E5	8,42E5	7,92E5	3,97E5
Minerals	Pt	8,89E4	1,09E5	1,28E5	2,86E5
Fossil fuels	Pt	9,06E7	8,42E7	7,8E7	2,89E7
Daño de categoría	Unidad	ACV, diesel, refinería	ACV, Biodiesel 10	ACV biodiesel 20	ACV biodiesel 100
Total	Pt	1,29E8	1,23E8	1,13E8	2,6E7
Human Health	Pt	2,88E7	2,8E7	2,46E7	-1,15E7
Ecosystem Quality	Pt	9,28E6	1,02E7	1,03E7	8,33E6
Resources	Pt	9,07E7	8,43E7	7,81E7	2,92E7

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Simapro 7.1

Tabla G3. Ponderación de los resultados de la comparación del Biodiesel usando etanol lignocelulósico y etanol de caña de azúcar

Categoría de impacto	Unidad	ACV, Biodiesel, Etanol Lignocelulosico.	ACV de biodiesel, etanol
Total	Pt	1,23E8	1,45E8
Carcinogens	Pt	4,17E5	1,8E6
Respiratory organics	Pt	1,7E6	1,7E6
Respiratory inorganics	Pt	2,79E7	2,95E7
Climate change	Pt	-2,11E6	-2,83E6
Radiation	Pt	2,45E4	2,55E4
Ozone layer	Pt	6,42E4	6,42E4
Ecotoxicity	Pt	1,36E6	1,38E6
Acidification/ Eutrophication	Pt	8,04E6	8,15E6
Land use	Pt	8,42E5	2,12E7
Minerals	Pt	1,09E5	1,42E5
Fossil fuels	Pt	8,42E7	8,41E7
Daño de categoría	Unidad	ACV, Biodiesel, Etanol Lignocelulosico.	ACV de biodiesel, etanol
Total	Pt	1,23E8	1,45E8
Human Health	Pt	2,8E7	3,02E7
Ecosystem Quality	Pt	1,02E7	3,07E7
Resources	Pt	8,43E7	8,43E7

Fuente: Elaborada por los autores utilizando Simapro 7.1