

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA “DE LA
CUNA A LA CUNA” AL BODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DE ACEITE DE
PALMA AFRICANA EN SABANA DE TORRES**

**DIEGO ARMANDO MARTINEZ MERLANO
WILMER ARTURO JAIMES MEZA**

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

2009

**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**

**DIEGO ARMANDO MARTINEZ MERLANO
WILMER ARTURO JAIMES MEZA**

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

Director

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

Codirectora

**PAOLA ANDREA ACEVEDO P.
Ingeniera Química**

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

2009

A DIOS, por llenarme de sabiduría y ser mi guía incondicional
A mis padres, las personas que más amo, por toda la confianza y el esfuerzo depositados en mí.
A "Candé", la hermanita más linda, por estar siempre conmigo.
Diego.

A Dios por la vida, salud, protección y fuerza necesaria para salir victorioso en cada una de las etapas de mi vida.

A mis padres, Rosalba Meza T. y Arturo Jaimes por todo el amor, apoyo y esfuerzo incondicional hasta este momento. Que mi Dios los llene de salud y vida para tenerlos muchos años más.

A mis hermanos, Karenn Jurley Jaimes M. y Diego Felipe Jaimes M. Quienes me motivan para seguir mejorando día tras día. Los quiero mucho.

A mis amigos con quienes he compartido momentos agradables y fueron artífices también de este logro.

Los mejores éxitos.

Wilmer

AGRADECIMIENTOS

Como los autores de este libro, queremos expresar nuestros agradecimientos:

A DIOS, por ser nuestra compañía y fortaleza en esta etapa de nuestras vidas.

Al Dr. Leonardo Acevedo Duarte, director del proyecto, por la confianza y el apoyo brindado a pesar de sus múltiples ocupaciones.

A la ingeniera Paola Andrea Acevedo, codirectora del proyecto, quien fue nuestra guía en el desarrollo de este trabajo y siempre estuvo dispuesta a colaborarnos incondicionalmente.

A todas las personas que directa o indirectamente hicieron posible la realización de este libro.

A la UIS por convertirse en nuestro segundo hogar.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 Normas ISO 14000 y 14044	3
1.2 Normas ISO para la evaluación del impacto ambiental	3
1.2.1 Análisis de ciclo de vida	4
1.2.1.1 Definición	4
1.2.1.2 Etapas de desarrollo en el ACV	5
1.3 Asignación másica	6
1.4 Categorías de impacto de ambiental	7
1.4.1 Cambio climático	7
1.4.2 Acidificación	7
1.4.3 Eutrofización	7
1.4.4 Formación de oxidantes fotoquímicos	7
1.4.5 Efectos respiratorios	7
1.4.6 Energía no renovable	7
2. METODOLOGÍA	8
2.1 Marco metodológico para el ACV	8
2.1.1 Alcance del estudio	8
2.1.1.1 Sistema de producto bajo estudio	8
2.1.1.2 Función del sistema del producto	8
2.1.1.3 Unidad funcional	9
2.1.1.4 Límites del sistema	9
2.1.1.5 Procedimiento de asignación	9
2.1.1.6 Evaluación del impacto de ciclo de vida y tipos de impacto.	10

2.1.1.7 Requisitos relativos a los datos	10
2.1.1.8 Suposiciones	10
2.1.1.9 Requisito de calidad de los datos	10
2.2 Inventarios	11
2.2.1 Análisis del inventario en la etapa de adecuación agrícola	11
2.2.1.1 Límites, suposiciones y consideraciones	11
2.2.2 Inventario en la extracción del aceite de palma	12
2.2.2.1 Límites, suposiciones y consideraciones	13
2.2.2.2 Asignación másica	14
2.2.3 Inventario en la esterificación del aceite de palma	14
2.2.3.1 Límites, suposiciones y consideraciones	15
2.2.3.2 Asignación másica	16
2.2.4 Análisis de inventario en la distribución y uso del biodiesel	16
2.2.4.1 Límites, suposiciones y consideraciones	17
3. RESULTADOS	18
3.1 Interpretación de resultados por categoría de impacto.	20
CONCLUSIONES	25
RECOMENDACIONES	26
BIBLIOGRAFÍA	27
ANEXOS	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Distancias nacionales	12
Tabla 2. Factores de asignación en la extracción del aceite	14
Tabla 3. Especificaciones de calidad del biodiesel	16
Tabla 4. Factores de asignación en la esterificación	16
Tabla 5. Clasificación de contaminantes por categoría de impacto.	18
Tabla 6. Cuantificación de cargas ambientales.	19

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fases para el ACV	5
Figura 2. Diagrama de flujos en las actividades de adecuación	11
Figura 3. Diagrama de flujos en el proceso de extracción	13
Figura 4. Variables en el proceso de esterificación	14
Figura 5. Perfil ambiental en producción de biodiesel a partir de palma	20
Figura 6. Evaluación del cambio climático	20
Figura 7. Evaluación de la acidificación	21
Figura 8. Evaluación de la eutrofización	22
Figura 9. Evaluación de oxidantes fotoquímicos	22
Figura 10. Evaluación de los efectos respiratorios	23
Figura 11. Evaluación de la energía no renovable	23

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Análisis de ciclo de vida	36
Anexo B. Generalidades de la palma africana	38
Anexo C. Extracción del aceite de palma	45
Anexo D. Producción de biodiesel	52
Anexo E. Resultados	58

RESUMEN

TÍTULO: APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA ANALISIS DE CICLO DE VIDA “DE LA CUNA A LA CUNA” AL BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DE ACEITE DE PALMA AFRICANA EN SABANA DE TORRES*

AUTORES: Diego Armando Martínez Merlano, Wilmer Arturo Jaimes Meza **

PALABRAS CLAVES: Análisis del ciclo de vida, Biodiesel de palma.

DESCRIPCIÓN: Las normas ISO 14040 y 14044 de 2006 contemplan una herramienta que permite superar las discrepancias existentes sobre los impactos generados por el uso de los biocombustibles, conocida como el análisis de ciclo de vida (ACV). Esta metodología fue utilizada en este estudio, pero con los lineamientos del nuevo enfoque “de la cuna a la cuna”, para cuantificar las cargas ambientales en cada uno de los siguientes procesos involucrados: adecuación del terreno y cultivo, extracción del aceite, esterificación, distribución y uso final del combustible, teniendo en cuenta los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza.

Para obtener las cargas ambientales del sistema y con el fin de analizar los datos de una forma rigurosa se cuantificaron seis categorías de impacto: cambio climático, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos, efectos respiratorios y energía no renovable. EL procedimiento para la evaluación de cada una de las categorías de impacto se aplicó como lo sugieren las normas, en el cual se destacan tres etapas fundamentales que son indispensables para la obtención de los resultados.

Este análisis se desarrolló en Sabana de torres (Santander) donde existe un número considerable de hectáreas sembradas con palma africana, y se cuenta con una planta extractora que opera por prensado. El proceso de producción de biodiesel fue simulado con Hyprotech Hysys 3.2, usando catálisis heterogénea ácida y etanol como solvente, ya que en Colombia no hay una planta que opere con esta tecnología.

* Trabajo de Grado

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

ABSTRACT

TITLE: LIFE CYCLE ANALYSIS METHODOLOGY "FROM CRADLE TO CRADLE "APPLIED TO PRODUCE BIODIESEL MADE FROM AFRICAN OIL PALM IN SABANA DE TORRES*.

AUTOR: Diego Armando Martínez Merlano, Wilmer Arturo Jaimes Meza**.

KEY WORDS: life cycle analysis, Biodiesel made from palm.

DESCRIPTION: ISO 14040 and 14044 of 2006 standard includes a tool that allows to overcome discrepancies about generated impacts by the use of biofuels which are known as life cycle analysis (LCA). This methodology was arranged to this study, but with the new approach "from cradle to cradle" guidelines used to quantify environmental burdens in each following process involved: suitability and land, oil extraction, biodiesel production, distribution and final use of fuel taking into account the biogeochemical cycles of nature.

In order to obtain environmental burdens' system and to analyze data in a rigorous way, six impacts categories were quantified: climate change, acidification, eutrophication, formation of photochemical oxidants, respiratory effects and non-renewable energy. The procedure for the evaluation of each impact category was applied as suggested by the rules. In this procedure are three basic stages indispensable to obtain the results.

This study was developed in Sabana de Torres (Santander), where there has been a considerable number of hectares planted with African palm, and it has a pressure-operated stracting plant. The biodiesel production process was simulated with Hyprotech Hysys 3.2, using heterogeneous catalysis acid and ethanol as solvent, because in Colombia there is not a plant that operates with this technology.

* Degree Work

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

INTRODUCCIÓN

La seguridad energética, el progreso económico y la prevención del calentamiento global son objetivos contrapuestos de la actual economía mundial, la cual se basa fuertemente en el consumo masivo de combustibles fósiles. Por este motivo, se requieren fuentes de energía alternativas para sostener el desarrollo a corto y largo plazo, apareciendo los biocombustibles como una posible solución, aspecto que ha generado posiciones contradictorias en los últimos años.

Con el fin de medir los impactos ambientales reales en un proceso de producción y superar las contradicciones mencionadas han surgido normas como las ISO 14040 y 14044, que contempla la herramienta conocida como Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Con el uso de esta herramienta se cuantifican las entradas y salidas de cada una de las etapas de elaboración, distribución y uso de un producto, desde la producción de sus materias primas hasta su disposición como desecho. La metodología planteada en la norma se considera incompleta ya que dependiendo del autor del ACV, el ciclo de producción puede tener un inicio y un final diferentes llevando a resultados opuestos. Con el nuevo paradigma “de la cuna a la cuna” se supera la dificultad mencionada, gracias a que se cierra el ciclo de producción y se incluyen en las diferentes etapas los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza.

En los últimos años se han elaborado varios ACV de biocombustibles, entre los que se destacan: ACV comparativo de biodiesel y diesel llevado a cabo por CIEMAT (2006), ACV de productos energéticos desarrollado por Rainer Zah, et al, (2007), Evaluación de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera empleando la metodología “de la cuna a la cuna”, (2008), entre otros.

En el presente estudio se aplicaron los procedimientos sugeridos por las ISO 14040 y 14044 a la producción de biodiesel de aceite de palma, bajo la implementación del nuevo paradigma “de la cuna a la cuna” con el fin de cuantificar los impactos ambientales en cada una de las etapas involucradas en su ciclo de vida. Con este objetivo en mente se colectaron datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las corrientes de entrada y salida relevantes del sistema en estudio (capítulo 2). En el capítulo 3 se presentan los resultados de esta investigación, donde las emisiones fueron clasificadas en seis categorías de impacto, y dentro de las cuales se les asignó un factor de equivalencia para ponderar y evaluar su efecto contaminante.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Normas ISO 14000 de 2006.

Las normas ISO 14000 se encargan de desarrollar los parámetros generales que permiten orientar las acciones de los sectores productivos a cumplir con un proceso de desarrollo sostenible, en el cual se incorpora una conciencia de responsabilidad ambiental, sin sacrificar un rendimiento económico que se traduce en una mejor calidad de vida para la sociedad. De esta manera, las normas permiten que se desarrollen mecanismos para la protección del medio ambiente, se generen bases competitivas equitativas, se logre un cumplimiento de las instituciones con las regulaciones correspondientes, se establezcan efectivos sistemas de manejo, se reduzcan costos a largo plazo para las empresas, se reduzcan los daños sociales, se mejoren las relaciones comunitarias, y por último, se mejore la confianza y satisfacción del consumidor [1].

1.2 Normas ISO para la evaluación del impacto ambiental.

Estas normas buscan establecer parámetros que permitan reducir el impacto ambiental de un producto a lo largo de la cadena de producción del mismo aplicando la metodología “de la cuna a la tumba”. Abarca aspectos como lo son, el diseño conceptual de las fases del producto, el uso de materias primas, los impactos operacionales, el reciclaje o desecho de los productos. El trabajo está orientado a desarrollarse en cuatro áreas principales: políticas, principios generales, inventarios de ciclo de vida y desecho de productos [1].

1.2.1 Análisis de ciclo de vida.

1.2.1.1 Definición

Según lo define la SETAC (Sociedad de Química y Toxicología ambiental) el (ACV) *“Es un procedimiento objetivo de evaluación de cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o a una actividad, que se efectúa identificando los materiales y la energía utilizada y los descartes liberados en el ambiente natural. La evaluación se realiza en el ciclo de liberados en el ambiente natural. La evaluación se realiza en el ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y el despacho final”* [2].

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 [3].

Se trata de una herramienta que permite:

- Evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto (proceso o actividad) relacionadas 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.

1.2.1.2 Etapas de desarrollo en el ACV

Según la norma ISO 14040 y 14044 un ACV está constituido por cuatro fases bien diferenciadas que se explican a continuación.

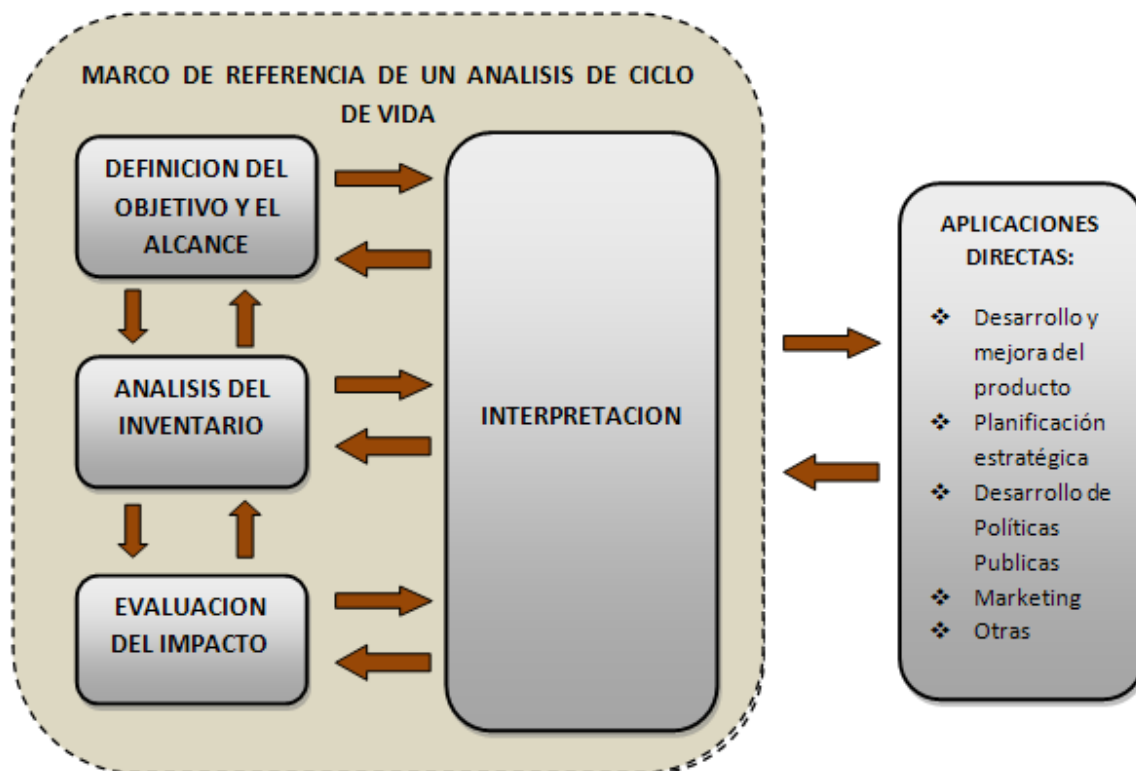


Figura 1. Fases para el ACV.

Definición de los objetivos y alcance del ACV

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 del ciclo de vida

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 del estudio, de forma que se obtiene un juicio o valoración sobre la calidad global del producto.

Interpretación del ciclo de vida

Se establecen las conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones.

1.3 Asignación másica

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

1.4 Categorías de impacto ambiental [4-6]

1.4.1 Cambio climático. Producido por el incremento de gases de efecto invernadero en la atmosfera, provocando el sobrecalentamiento del planeta.

1.4.2 Acidificación. Consiste en la deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuro en la atmosfera, en el suelo y en el agua; variando la acidez del medio y afectando el ecosistema.

1.4.3 Eutrofización. En esta categoría se incluyen todos los impactos que conllevan a la acumulación de un alto nivel de macronutrientes en el medio, especialmente fósforo y nitrógeno.

1.4.4 Formación de oxidantes fotoquímicos. El principal oxidante fotoquímico es el ozono, el cual puede resultar perjudicial para la salud humana y los ecosistemas.

1.4.5 Efectos respiratorios. Causados por la emisión de material particulado y gases como el SO_x y el NO_x básicamente.

1.4.6 Energía no renovable. Especifica la energía excedente para extraer un combustible fósil, como resultado de la menor calidad de los recursos.

2. METODOLOGÍA

2.1 MARCO METODOLÓGICO PARA EL ACV

El ACV fue llevado a cabo utilizando los procedimientos establecidos en las normas ISO 14040 y 14044 de 2006 pero aplicando la nueva metodología “de la cuna a la cuna”.

En este capítulo se muestran los aspectos que definen el alcance del estudio, como la unidad funcional, los límites del sistema, procedimientos de asignación y la evaluación de las categorías de impacto, también se incluyen la fase de inventario, la cual es trascendental para cuantificar las entradas y salidas del sistema.

2.1.1 Alcance Del Estudio

2.1.1.1 Sistema de producto bajo estudio

Este ACV comprende los procesos de adecuación de terreno, extracción del aceite, esterificación de ácidos grasos, distribución y consumo del combustible, así como la absorción de gases (CO₂ y N) por el cultivo de palma a través de la fotosíntesis.

2.1.1.2 Función del sistema de producto

El biodiesel producido se mezclará con diesel de origen fósil para formar la mezcla B10. El combustible será utilizado sin la necesidad de modificar los motores de los vehículos.

2.1.1.3 Unidad funcional

Este trabajo hace parte de una tesis doctoral de la universidad industrial de Santander, en la cual se estableció como unidad funcional la capacidad de producción de biodiesel en 80000Ton/año.

2.1.1.4 Límites del sistema

Límites geográficos

La ubicación geográfica del sistema en estudio fue Sabana de Torres (Santander), donde existen un número considerable de hectáreas sembradas con palma de aceite y se cuenta con una planta extractora que opera por prensado. En el transporte de insumos y otros materiales se tuvieron en cuenta únicamente las distancias nacionales, estableciendo a Colombia como marco geográfico.

Límites temporales

El ciclo de vida se estableció en 60 años, ya que este trabajo será comparado con otros ACV de diferentes cultivos oleaginosos y en otras regiones del país.

Límites para el proceso

En los cálculos del ACV no se tuvo en cuenta las emisiones por la producción industrial de bienes de capital (maquinaria, infraestructura, etc.) porque su vida útil es muy prolongada, y pueden intervenir en la elaboración de variados productos.

2.1.1.5 Procedimiento de asignación

El método de asignación másica se aplicó en las etapas de extracción del aceite y la esterificación, pues en estos procesos se obtienen co-productos cuyas cargas ambientales deben ser cuantificadas al abandonar el sistema. Por consiguiente, en estas etapas solo se cuantificaron las emisiones del producto principal: aceite y biodiesel respectivamente. El método se aplicó como lo sugiere la norma ISO14044.

2.1.1.6 Metodología de la evaluación del impacto de ciclo de vida y categorías de impacto.

Mediante el ACV se evaluaron las siguientes categorías ambientales: cambio climático, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos, efectos respiratorios y energía no renovable; aplicando la metodología propuesta por Antón [4].

2.1.1.7 Requisitos relativos a los datos

Para la etapa de adecuación del terreno y extracción del aceite, los datos se obtuvieron de centros de investigación, gremios y asociaciones vinculados con el cultivo de palma. Además, se realizó una visita técnica a una de las fincas palmeras del municipio para averiguar y observar cómo es el manejo del cultivo en la zona. En la etapa de esterificación, la mayoría de los datos fueron extraídos de artículos publicados en revistas con reconocimiento nacional e internacional.

2.1.1.8 Suposiciones

Se supuso la existencia en sabana de torres de una planta productora de biodiesel funcionando con la tecnología requerida en este estudio (catálisis heterogénea ácida), cuyo insumo principal, el aceite, es suministrado por las extractoras de la región.

2.1.1.9 Requisitos de calidad de datos

Ámbito temporal de los datos. Los datos fueron recolectados en los últimos meses del 2008 y primer semestre del 2009. Toda la información recopilada tiene menos de dos años de antigüedad.

Ámbito geográfico de los datos. La información se obtuvo de los cultivos y de la planta extractora de Sabana de Torres (Santander).

Ámbito tecnológico. Los datos se manejaron de acuerdo a la tecnología empleada actualmente en las plantaciones, extractora y la supuesta planta de biodiesel.

2.2 ANÁLISIS DE INVENTARIOS

2.2.1 INVENTARIO PARA LA ETAPA DE ADECUACIÓN AGRÍCOLA

En el inventario se tuvieron en cuenta cada una de las actividades básicas para el acondicionamiento del terreno, cuidado del previvero-vivero, manejo en campo, emisiones en la producción y transporte de insumos, así como la absorción de gases de efecto invernadero por el cultivo de palma africana.

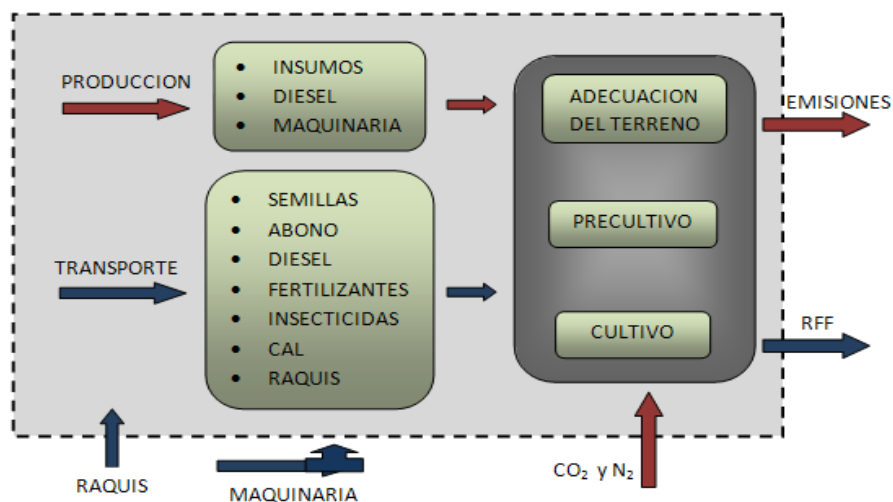


Figura 2. Diagrama de flujos en las actividades de adecuación.

2.2.1.1 Límites, suposiciones y consideraciones

Las plantaciones que fueron objeto de estudio en este trabajo se radican en Sabana de Torres (Santander), zona que reúne las condiciones agronómicas para el desarrollo de la palma de aceite. Se consideró que la etapa de crecimiento de la palma africana es de 5 años aproximadamente, que abarcan las fases de previvero-vivero y plantación, con un periodo productivo de 25 años, siendo necesarias dos etapas de siembra para cumplir con el límite de tiempo establecido previamente.

La experiencia de las haciendas palmeras de la región y las condiciones de su suelo, hacen necesario el uso de la semilla **Deli x Lamé**, especie importada desde Malasia a través del puerto de Buenaventura, con la cual se han obtenido los mayores rendimientos por hectárea [7]. El anexo B contiene las generalidades del cultivo de la palma africana.

El terreno necesario para suplir la producción de 80000 Ton/año de biodiesel se estimó en 14621 hectáreas aproximadamente, con una densidad de 143 palmas/hectárea.

La información sobre el tipo, la frecuencia y el medio de aplicación de los fertilizantes en el cultivo fue proporcionada por el personal técnico de la zona [7]

El uso de plaguicidas y fungicidas fue despreciado porque existe un tratamiento particular para cada una de las diferentes enfermedades que afecta la palma, lo cual dificulta el inventario. Además, estos productos se aplican en bajas cantidades y poca frecuencia [7].

La tabla 1. Presenta las distancias recorridas por carretera para el transporte de cada uno de los insumos de la etapa de adecuación del cultivo.

Tabla 1. Distancias nacionales [Invias]

INSUMO	ORIGEN	DISTANCIA (Km.)
Semilla	Malasia (Buenaventura)	776
Fertilizantes	Venezuela (Cúcuta)	243
Cal	Bucaramanga	110
Combustible	La Gómez (Santander)	15

2.2.2 INVENTARIO PARA LA EXTRACCIÓN DEL ACEITE

En esta etapa se cuantificaron las emisiones por consumo de vapor, energía eléctrica, los impactos generados a causa de los procesos de producción del diesel y su posterior combustión en el transporte. La figura 3. Representa el proceso para la extracción del aceite y sus respectivas variables de estudio.

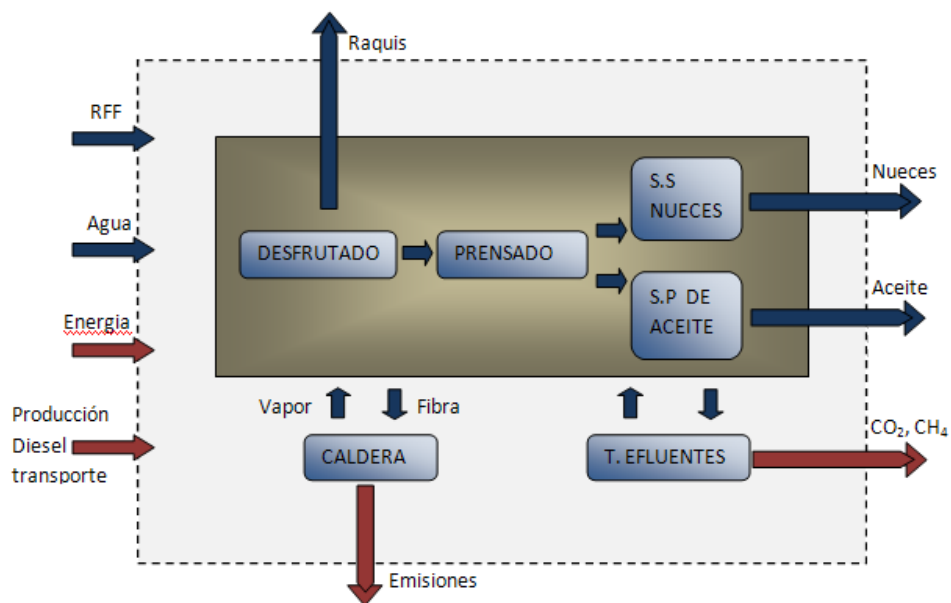


Figura 3. Diagrama de flujos en el proceso de extracción.

2.2.2.1 Límites, suposiciones y consideraciones

Se consideró únicamente la extracción por prensado, ya que la planta que funciona en el municipio opera fundamentalmente bajo este mecanismo. Los balances de masa y energía fueron calculados en base a datos suministrados por dicha extractora; en este último caso, haciendo uso del consumo mensual de la planta. El combustible para la operación de la caldera se asumió como gas natural, dejando el raquis y la fibra del prensado como fertilizante natural [8]. El anexo C presenta la información detallada del proceso de extracción.

Se supuso la existencia de tres extractoras similares a la que actualmente se encuentra en el municipio, con el objetivo de alcanzar la producción requerida de 8805 Kg/h de aceite a partir de 41929 Kg/h de racimos.

Los racimos de frutos frescos fueron transportados 45Km. desde el cultivo a la extractora.

2.2.2.2 Asignación másica

Debido a que en la etapa de extracción de aceite de palma se obtuvo como producto secundario la almendra, se hizo necesaria la regla de asignación másica como parámetro para determinar las cargas ambientales de este co-producto. La tabla 2. muestra el valor de asignación para los productos de la extracción.

Tabla 2. Factores de asignación en la extracción.

PRODUCTO	% P/P
Aceite de palma	78.95
Almendras	21.05
Total	100

2.2.3 INVENTARIO PARA LA ESTERIFICACIÓN

En el proceso de producción de biodiesel se manejaron las mismas variables que en el inventario anterior, pero se adicionaron las emisiones en la producción de etanol. La figura 4. Muestra un esquema de dichas variables en cada etapa del proceso.

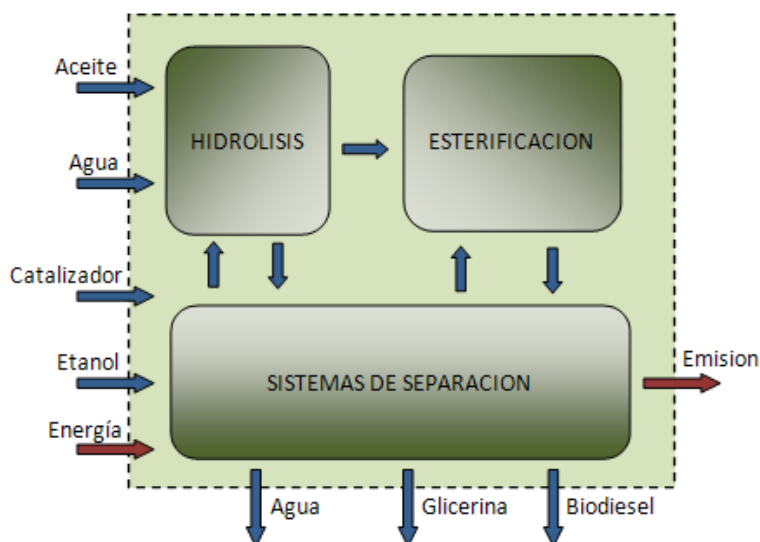


Figura 4. Variables en el proceso de esterificación.

2.2.3.1 Límites, suposiciones y consideraciones.

La planta de biodiesel fue simulada por medio del software Hyprotech HYSYS 3.2, ya que no existe en Colombia un proceso con la tecnología requerida para este estudio. Por consiguiente, con esta herramienta se realizaron los balances de masa y energía necesarios para el inventario. Como ya se mencionó, la planta fue diseñada para mantener una producción de 80000 Ton/año de biodiesel. Los datos y el esquema de la simulación se encuentran en el Anexo D.

El diseño de la planta en HYSYS se dividió en tres etapas fundamentales, modeladas bajo el paquete de fluidos UNIQUAC, ya que éste es el que mejor representa el comportamiento de los compuestos involucrados [9]. Las etapas se muestran a continuación:

- Hidrólisis de los triglicéridos presentes en el aceite de palma. La reacción de hidrólisis se manejó a 290 °C y 20 MPa con una relación molar agua/aceite=60, obteniéndose una conversión de 74% en menos de una hora [10].
- Esterificación heterogénea de los ácidos grasos. Este proceso fue simulado a 120°C y 0,45 MPa y una relación molar etanol/aceite=100 [11]. el catalizador ácido utilizado fue sulfato de zirconio y se aplicó el modelo Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson para predecir el comportamiento del sistema. [11-16].
- Sistema de separación y purificación de los productos. El biodiesel fue purificado para que cumpliera los requisitos de la norma ASTM, necesarios para su posterior distribución y comercialización, tabla 3. La recuperación del etanol se simuló por una destilación azeotrópica usando glicerina como solvente a 1 atm y 78,2°C, con relación molar 0,4 glicerina/etanol. La columna de purificación de la glicerina se trabajó a 130,2°C y 15 mmHg [17].

Tabla 3. Especificaciones de calidad del biodiesel. [18]

PROPIEDAD	UNIDADES	ASTM-D6751	EN-14214
Densidad (15°C)	g/cm ³	-	0,86 a 0,9
Viscosidad (40°C)	Mm ² /s	1,9 a 6,0	3,5 a 5,0
Contenido de agua	Mg/Kg	500 máx.	500 máx.
Glicerina total	% masa	0,24 máx.	0,25 máx.
Contenido alcohol	% masa	-	0,2 máx.
Monoglicéridos	% masa	-	0,8 máx.
Diglicéridos	% masa	-	0,2 máx.
Triglicéridos	% masa	-	0,2 máx.
Contenido de éster	% masa	-	96,5 máx.
Acidez	mgKOH/g	0,8 máx.	0,5 máx.

La producción del catalizador no fue tomada en cuenta para el inventario ya que no se conocen las emisiones generadas en la obtención industrial de este producto.

El etanol fue transportado desde el puerto de Cartagena hasta Sabana de Torres cubriendo una distancia interna por carretera de 635Km. El catalizador fue importado por este mismo puerto.

2.2.3.2 Asignación Másica.

Los factores de asignación másica que se tuvieron en cuenta para evaluar las cargas ambientales de los co-productos, en este caso la glicerina, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Factores de asignación en la esterificación.

PRODUCTOS	% P/P
Biodiesel	90,37
Glicerina	9,63
Total	100

2.2.4 INVENTARIO PARA LA DISTRIBUCIÓN Y USO DEL BIODIESEL

Para llevar a cabo este inventario se estimaron las emisiones producidas por el transporte del biodiesel así como el uso que se le da al mismo.

2.2.4.1 Límites, suposiciones y consideraciones.

El biodiesel fue transportado en carro tanque con capacidades de 15000 L hasta la ciudad de Bogotá recorriendo una distancia de 504Km.

Solo fue contabilizado el transporte del biodiesel mas no el del diesel, pues se supuso que éste ya se encontraba en Bogotá, ciudad donde se mezcla con el biodiesel en una proporción de 10% v/v formando el B10.

Las emisiones producidas por la mezcla de combustible B10 fueron calculadas a partir de algunos ejemplos y pruebas realizadas en estudios como el realizado por EPA [19] y el CIEMAT [20].

3. RESULTADOS

Para seguir los procedimientos de la norma ISO 14042, relacionada con la evaluación de impactos, se tuvieron en cuenta las etapas de clasificación, caracterización y valoración, las cuales se especifican a continuación.

Clasificación

Se asignaron los datos de inventario a cada una de las categorías de impactos consideradas.

Tabla 5. Clasificación de contaminantes por categoría de impacto.

CATEGORIA	CONTAMINANTE	CATEGORIA	CONTAMINANTE	
Cambio climático	Dióxido de Carbono (CO ₂)	formación de oxidantes fotoquímicos	Benceno	
	Metano (CH ₄)		Formaldehidos	
	Oxido de Nitrógeno (N ₂ O)		Hidrocarburos (sin especificar)	
	Monóxido de Carbono (CO)		Hidrocarburos	
Acidificación	Ácido clorhídrico (HCl)	Efectos respiratorios	Metano	
	Ácido fluorhídrico (HF)		Monóxido de Carbono (CO)	
	Amoníaco (NH ₃)		Óxidos de azufre (SO ₂)	
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)		Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	
	Óxidos de azufre (SO ₂)		Amonio (NH ₄)	
Eutrofización	Nitratos (NO ₃ ⁻)		Partículas (sin especificar)	
	Nitrógeno		Óxido Nitroso (N ₂ O)	
	Amonio (NH ₄)		PM10	
	Amoníaco (NH ₃)		Energía no renovable	Crudo
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)			Gas Natural
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)			
	Óxido Nitroso (N ₂ O)			

Caracterización

En esta etapa se cuantificaron las cargas para cada categoría, haciendo uso de factores de equivalencias que permitirán su posterior análisis y comparación. En algunos casos, un contaminante hizo parte de varias categorías pero se le aplicó un factor de equivalencia diferente. En el anexo E se muestran los factores de equivalencia utilizados.

Tabla 6. Cuantificación de cargas ambientales.

CATEGORIA	UNIDAD	CONTAMINANTE	CARGA
Cambio climático	Kg eq. CO2	Dióxido de Carbono (CO ₂)	9,719E+10
		Metano (CH ₄)	1,148E+09
		Oxido de Nitrógeno (N ₂ O)	2,044E+09
		Monóxido de Carbono (CO)	1,618E+09
Acidificación	Kg eq. H+	Ácido clorhídrico (HCl)	1,144E+05
		Ácido fluorhídrico (HF)	2,609E+04
		Amoniaco (NH ₃)	1,220E+05
		Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	4,350E+07
		Óxidos de azufre (SO ₂)	1,659E+07
Eutrofización	Kg eq. PO ₄	Nitratos (NO ₃ ⁻)	6,034E+02
		Nitrógeno	-5,267E+06
		Amonio (NH ₄)	1,883E+06
		Amoniaco (NH ₃)	7,235E+05
		Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	2,571E+08
		Demanda Química de Oxígeno	5,697E+06
		Óxido Nitroso (N ₂ O)	3,538E+06
formación de oxidantes fotoquímicos	Kg eq. etileno	Benceno	5,891E+03
		Formaldehidos	1,887E+05
		Hidrocarburos (sin especificar)	8,770E+06
		Hidrocarburos	5,969E+07
		Metano	0,000E+00
Efectos respiratorios	Kg eq. PM _{2.5}	Monóxido de Carbono (CO)	1,076E+06
		Óxidos de azufre (SO ₂)	4,141E+07
		Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	2,517E+08
		Amonio (NH ₄)	5,443E+05
		Partículas (sin especificar)	1,879E+07
		Óxido Nitroso (N ₂ O)	2,565E+06
		PM ₁₀	1,355E+08
Energía no renovable	MJ	Crudo	1,068E+13
		Gas Natural	5,579E+10

Valoración

Se sumaron de forma ponderada los valores obtenidos en la etapa anterior para cada categoría de impacto. De esta manera se obtuvo el perfil ambiental del sistema, observando claramente que las posibilidades de cambio climático se reducen con el cultivo de palma. Sin embargo las emisiones generadas en la distribución y uso de combustible son relativamente superiores. El perfil del ciclo se muestra en la figura 5.

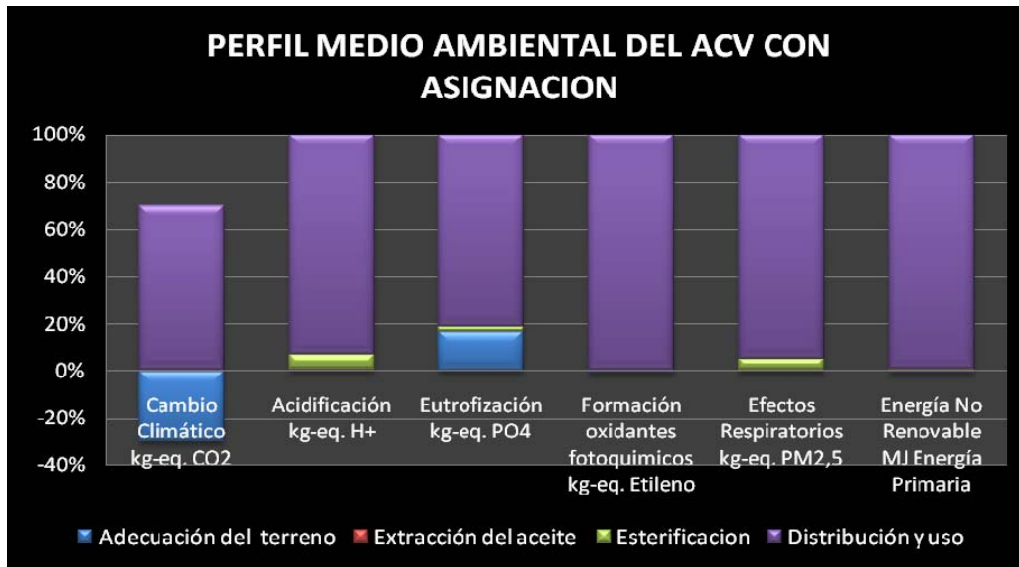


Figura 5. Perfil ambiental para la producción de biodiesel a partir de palma.

3.1 Interpretación de resultados.

Para conocer los contaminantes y las etapas de mayor trascendencia ambiental, se analizan a continuación los resultados por categorías de impacto.

Cambio climático.

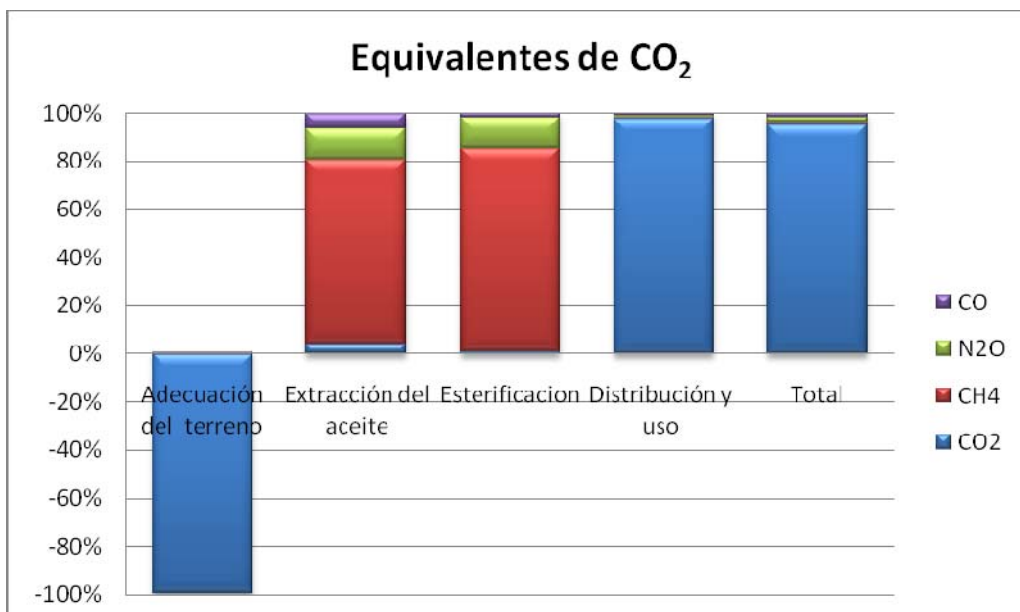


Figura 6. Evaluación del cambio climático.

En esta categoría los mayores porcentajes de participación son del CO₂ y se presentan en las etapas de adecuación del terreno y distribución del combustible; en el primer caso, el CO₂ es absorbido por la planta en el proceso de fotosíntesis mientras en el segundo, el gas es el resultado de la combustión en los motores de los vehículos.

Acidificación

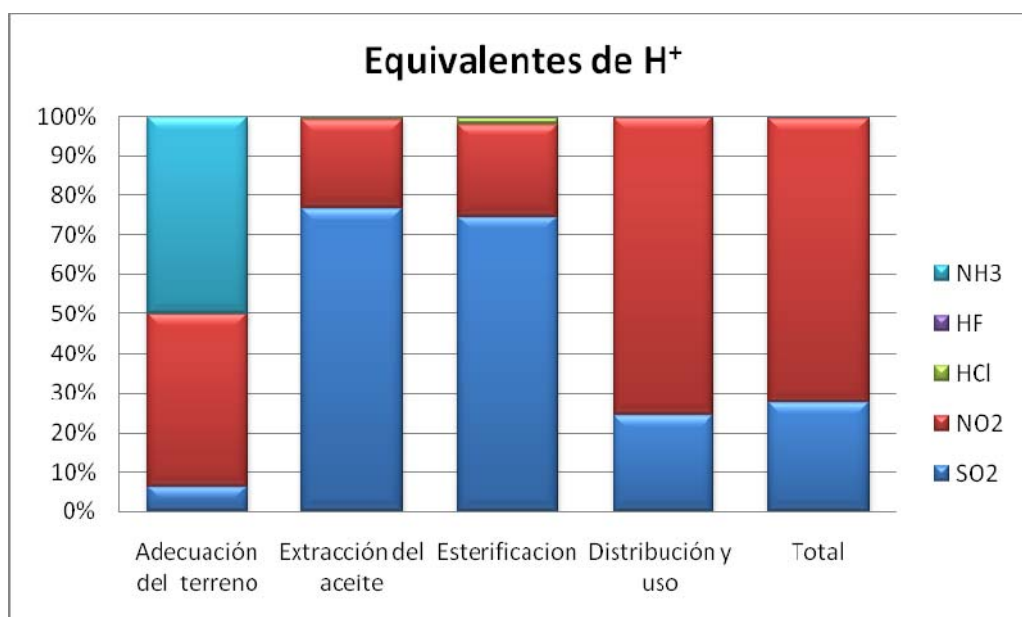


Figura 7. Evaluación de la acidificación.

Los compuestos SO₂ y NO₂ son los responsables de los mayores impactos en esta categoría. El NO₂ tiene mayor participación en la etapa de distribución a causa del diesel fósil presente en la mezcla B10 y el SO₂ en los procesos de extracción y esterificación por el uso de catalizadores sulfatados.

Eutrofización

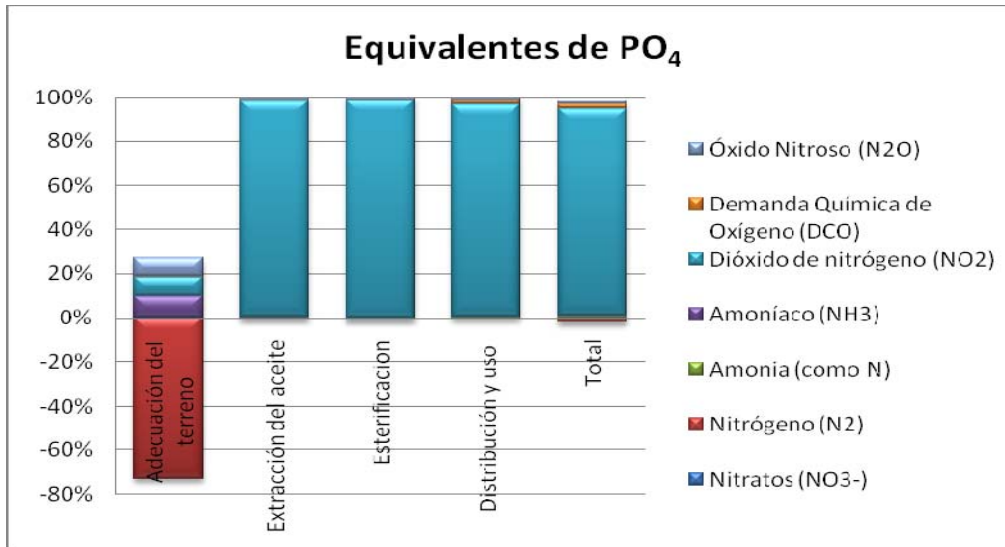


Figura 8. Evaluación de la eutrofización.

Las altas concentraciones de NO₂ favorecen la absorción de nutrientes ricos en fósforo y nitrógeno, principalmente en los ecosistemas acuáticos, aumentando la demanda bioquímica de oxígeno y acelerando el proceso de eutrofización.

Formación de oxidantes fotoquímicos

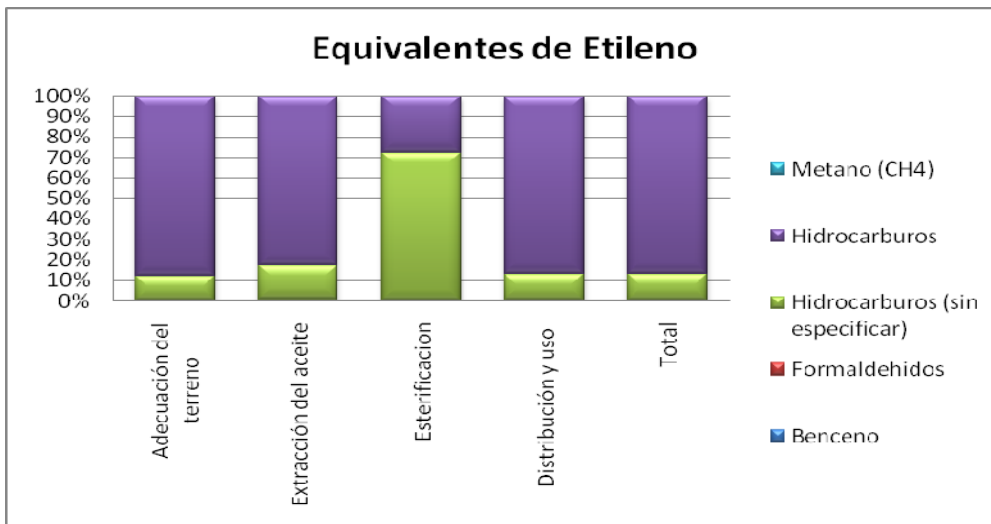


Figura 9. Evaluación de oxidantes fotoquímicos

Las altas concentraciones de hidrocarburos en la atmosfera producen un aumento de radicales libres altamente reactivos en el ambiente, alterando el ciclo fotolítico del ozono y dando lugar a la formación de oxidantes fotoquímicos.

Efectos respiratorios.

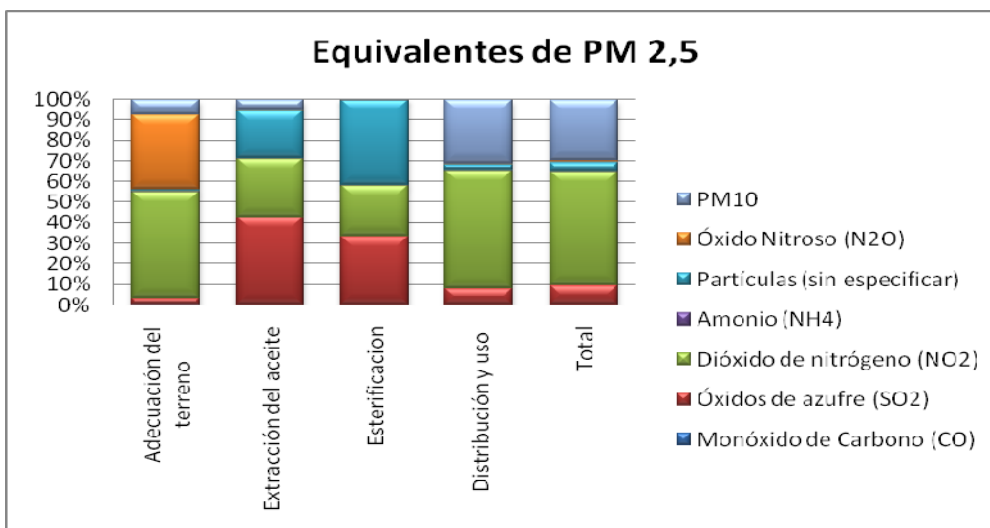


Figura 10. Evaluación de efectos respiratorios.

Esta categoría deja ver la variedad de contaminantes que afectan la salud humana en cada una de las etapas del estudio, siendo el NO2 el compuesto que genera mayores trastornos respiratorios.

Energía no renovable

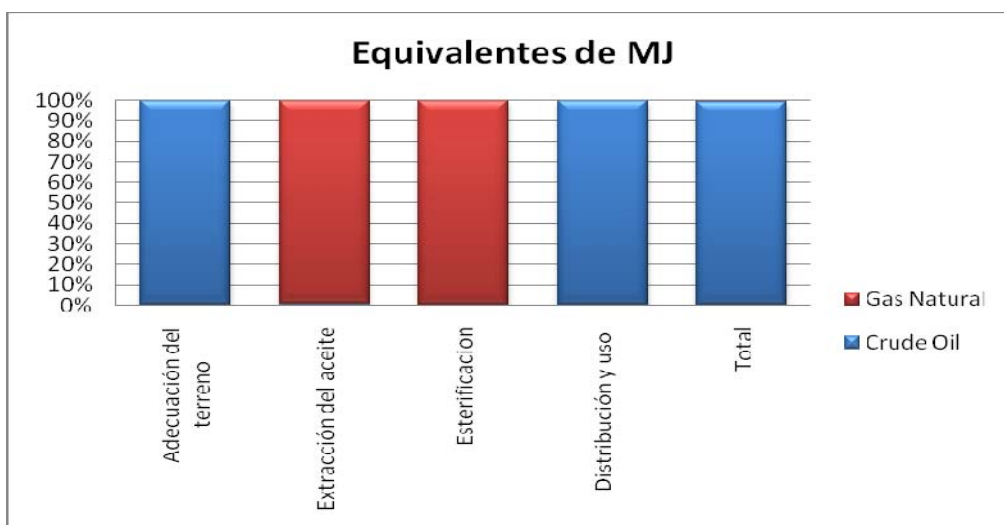


Figura 11. Evaluación de la energía no renovable.

La utilización de caldera en los procesos de extracción y esterificación de aceite justifican el alto consumo de gas natural, el cual es considerado como un combustible limpio, contrario a lo que sucede con los derivados del crudo utilizados en las etapas de adecuación y distribución.

CONCLUSIONES

- Con la integración de los ciclos del carbono y nitrógeno a los procesos de producción de biodiesel se obtuvo un perfil ambiental más real del sistema.
- La etapa de distribución y uso genera los mayores impactos en todas las categorías estudiadas, siendo el CO₂, NO₂, SO₂ y CH₄ los compuestos responsables de los mayores efectos contaminantes.
- Para el tiempo de vida del ACV, el cultivo de palma de aceite reduce considerablemente los gases causantes del cambio climático, pero esta disminución no es apreciable comparada con las cargas generadas en los demás procesos.
- Mediante el ACV aplicado a la producción de biodiesel, es posible afirmar que las únicas cargas ambientales que se redujeron fueron las relacionadas con el cambio climático y la eutrofización en menor medida.

RECOMENDACIONES

Para posteriores estudios de ACV sobre biodiesel se recomienda tener en cuenta:

- ❖ El ciclo biológico de otros nutrientes distintos al N y C con el fin de hacer más real el estudio y disminuir las cargas ambientales.
- ❖ El uso de una base de datos o software como medio para cuantificar las emisiones en la producción de cada uno de los compuestos involucrados en el proceso.
- ❖ Un porcentaje de biodiesel en el combustible para el transporte de los insumos, aprovechando las políticas nacionales que obligan la distribución de una mezcla B10 para motores diesel.
- ❖ Otras categorías de impacto que sugiere la norma y que pueden ser relevantes para formar un perfil ambiental más completo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CARAZO, Felipe. "ISO 14000: Opción para el Medio Ambiente". XI Congreso Nacional Agronómico. (1999).
- [2] SETAC, (1992). "Life-Cycle Assessment, Society of Environmental Toxicology and Chemistry", Bruselas, Bélgica.
- [3] SETAC, (1993). "Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"", Washington D.C.
- [4] ANTON, VALLEJO., (2004), "Utilización del Análisis de Ciclo del Vida en la Evaluación del Impacto Ambiental del Cultivo bajo Invernadero Mediterráneo".
- [5] UNE – EN ISO 14040. (2006): "Gestión Medio Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Estructura". AENOR. Madrid.
- [6] UNE – EN ISO 14044. (2006): "Gestión Medio Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Estructura". AENOR. Madrid.
- [7] GONZALEZ, Daibor. Ing. Agrónomo. Administrador haciendo "Villa Ali"
- [8] FEDEPALMA – CENIPALMA. Presentación Multimedia.
- [9] SANTANDER, Carlos. "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, Bucaramanga. 2007

- [10] SAKA, Shiro y MINAMI, Eiji. "A Novel Non-catalytic Biodiesel Production Process by Supercritical Methanol as NEDO (High Efficiency Bioenergy Conversion Project)". Kyoto, Japan. The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)", Bangkok, Thailand.
- [11] LOPEZ, Dora; GOODWIN, JR; JAMES, J.; BRUCE, David y FURUTA, Satoshi. Esterification and transesterification using Modified Zirconia catalysts. *Applied Catalysis A: General* 339 (2008) p. 76-83
- [12] KUMAR B., RAJESH Philip. "Esterification of Free Fatty Acids Using Sulfated Zirconia". *World Renewable Energy Congress* (2008). P. 239-242.
- [13] SUWANNAKARN, Kaewta; LOTERO, Edgar; GOODWIN, James "Stability of Sulfated Zirconia and the Nature of the Catalytically Active Species in the Transesterification of Triglycerides". *Journal of Catalysis* 255 (2008). p. 279-286.
- [14] MEKHEMER, Gamal "Surface Characterization of Zirconia, Holmium Oxide/Zirconia and Sulfated Zirconia Catalysts". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical. Eng. Aspects* 274 (2006), p. 211-218.
- [15] COSTA P.; AMALIA L.; MARCHETTI, Sergio G; ALBORNOZ, Alberto. "Effect of Iron on the Properties of Sulfated Zirconia". *Applied Catalysis A: General* 334 (2008), p. 187-198.
- [16] BUSTO, Mariana; SHIMIZU, Kiyoyuki; VERA, Carlos R; GRAU, Javier. "Influence of Hydrothermal aging on the Catalytic Activity of Sulfated Zirconia". *Applied Catalysis A: General* 348 (2008), p.173-182.
- [17] UYAZAN, A.M; GIL, ID.; AGUILAR, J.L.; RODRIGUEZ, G.; CAICEDO, L.A. "Producción de Alcohol Carburante por Destilación Azeotrópica Homogénea con Glicerina". Universidad Nacional de Colombia – Bogotá, Colombia.

- [18] ALPTEKIN, Ertan; CANAKCI, Mustafa. "Determination of the Density and the Viscosities of Biodiesel – Diesel Fuel Blends". *Renewable Energy* 33 (2008), 2623-2630.
- [19] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. "A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions Draft Technical Report". Estados Unidos: EPA, 2002. 126 p.
- [20] CIEMAT. (2005) "Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte". Ministerio del Medio Ambiente. España
- [21] CAPUZ R., Salvador Y GOMEZ, Tomas. "Ecodiseño, Ingeniería del Ciclo de Vida para el Desarrollo de Productos Sostenibles". Editorial Universidad Politécnica de Valencia. 113 p.
- [22] MARTINS G., Camila, TEIXEIRA Sergio, LEDO M., Leticia. "Transesterification of Soybean Oil Catalyzed by Sulfated Zirconia". *Bioresource Technology* 99 (2008), p. 6608-6613
- [23] MARCHETTI, J. M. y ERRAZU, Miguel. "Heterogeneous Esterification of Oil with High Amount of Free Fatty Acids". *Fuel* 86 (2007), p. 906-910.
- [24] CARDOSO, Abiney; GONZAGA, Soraia; DA SILVA, Marcio. "Esterification of Oleic Acid for Biodiesel Production Catalyzed by SnCl₂: A Kinetic Investigation". *Energy* 2008, I, p. 79-92.
- [25] JITPUTTI, Jaturong; KITIYANAN, Boonyarach; BUNYAKIAT, Kunchana; RANGSUNVIGIT, Pramoch. "Transesterification of Palm Kernel Oil and Coconut Oil by Difference Solid Catalysts". The Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE)". (2004). Hua Hin, Thailand.
- [26] MEUNIER, J. NI., "Esterification of Free Fatty Acids in Sunflower Oil Acid Catalysts using Batch and Fixed Bed-Reactors". *Applied Catalysis A: General* 333 (2007) p. 122-130.

- [27] SOHN, Jong; LEE, Si Hoon; LIM, Jun. "New Solid Superacid Catalyst prepared by doping ZrO₂ with Ce and Modifying with Sulfate and its Catalytic Activity for Acid Catalysis". *Catalysis Today* 116 (2006), p. 143-150.
- [28] LOTERO, Edgar; LIU, Yijun; LOPEZ, Dora; SUWANNAKARN, Kaewta; "Synthesis of Biodiesel via Acid Catalysis". Clemson University, South Carolina 29634-0909
- [29] INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA Y MINISTERIO DE ASUNTOS EXTRANJEROS DE FRANCIA., Compendio de Agronomía Tropical. Editorial IICA. Costa Rica (1999).
- [30] CARMO, Alipio; DE SOUZA, Luiz; DA COSTA, CARLOS E.F.; ZAMIAN, José. "Production of Biodiesel by Esterification of Palmitic Acid with Mesoporous Aluminosilicate Al-MCM-41", *Fuel* 88 (2009), p. 461-468.
- [31] YONG, K.C.; DZULKEFLY, K.; WANYUNUS, WMZ. "Characterization of Glycerol Residue from a Palm Kernel Oil Methyl Ester Plant". *Journal of Oil Palm Research* vol 13 No 2, December 2001, p. 1-6.
- [32] MARCHETTI, J. M.; ERRAZU, A. F. "Comparison of Different Heterogeneous Catalysts and Different Alcohols for the Esterification Reaction of Oleic Acid". *Fuel* 87 (2008) 3477-3480.
- [33] DA SILVA, Rondinely ; LIMA, Alcides ; DOS SANTOS, Lucas ; DE OLIVEIRA, Jose; CHAVES, Mariana H. "Catalysts of Cu(II) and Co(II) Ions Adsorbed in Chitosan used in Transesterification of soy bean and Babassu Oils – A new Route for Biodiesel Syntheses". *Bioresource Technology* 99 (2008), p. 6793 - 6798.
- [34] CHEW, Thiam; BHATIA, Subhash. "Catalytic Processes Towards the of Biofuels in a Palm Oil and Oil Palm Biomass – Based Biorefinery". *Bioresource Technology* 99 (2008), p. 7911 - 7922.

- [35] RASHID, Umer; ANWAR, Farooq; MOSER, Bryan; KNOTHE, Gerhard. "Moringa Oleífera Oil: a Possible Source of Biodiesel". *Bioresource Technology* 99 (2008), p. 8175 - 8179.
- [36] LAPUERTA, Magín; HERREROS, José; LYONS, Lizbeth; BRICEÑO, Yolanda. "Effect of the Alcohol Type used in the Production of Waste Cooking Oil Biodiesel on Diesel Performance and Emissions". *Fuel* 87 (2008), p. 3161 - 3169.
- [37] IGBOKWE, P. K.; UGONABO, V. I.; IWEGBU, N. A.; AKACHUKWU, P. C. "Kinetics of the Catalytic Esterification of Propanol with Ethanoic Acid using Catalysts Obtained from Nigerian Clays". *Journal of the University of chemical Technology and Metallurgy*, 43, 3, 2008, p. 345 – 348.
- [38] MAZZOTTI, Marco; NERI, Bernardo; GELOSA, Davino; KRUGLOV, Alexey and MORBIDELLI, Massimo. "Kinetics of Liquid-Phase Esterification Catalyzed by Acidic Resins". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1997, 36, (1), 3 – 10.
- [39] LIU, Yijun.; LOTERO, Edgar.; GOODWIN, James G. "A Comparison of the Esterification of Acetic Acid with Methanol using Heterogeneous versus Homogeneous Acid Catalysis". *Journal of Catalysis* 242 (2006) 278 – 286.
- [40] JEFFERY L. White; MATTHEW J. Truitt, "Heterogeneous Catalysis in Solid Acids". *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* 51 (2007) 139–154.
- [41] YOUNG-MOO Park, DAE-WON Lee, DEOG-KEUN Kim, JIN-SUCK Lee, KWAN-YOUNG Lee, "The Heterogeneous Catalyst System for the Continuous Conversion of Free Fatty Acids in used Vegetable Oils for the Production of Biodiesel", *Catalysis Today* 131 (2008) 238–243
- [42] AVILA, Adrian; BULA, Antonio; SANJUAN, Homero. "Cinética de la Transesterificación de la Oleína de la Palma Africana con Etanol". *Interciencia* Vol. 33 No 3 (2008).

- [43] AL-WIDYAN, Mohammad; AL-SHYOUKH, Ali. "Experimental Evaluation of the Transesterification of Waste Palm Oil Into Biodiesel" *Bioresource Technology* 85 (2002) 253 - 256.
- [44] DARNOKO, D.; CHERYAN, Munir. "Kinetics of Palm Oil Transesterification in a batch Reactor". University of Illinois.
- [45] CHE CHUL YU, YOUN-SIK LEE; BYUNG SOO CHEON; SAN HEE LEE "Synthesis of glycerol Monostearate with HighPurity". *Bull. Korean Chem. Soc.* 2003, Vol. 24, No 8, 1229 – 123.
- [46] FUKUDA, Hideki; KONDO, Akihiko; NODA Hideo. "Biodiesel fuel production by transesterification of oils". *Journal of bioscience and bioengineering.* 2001. Vol 92, N° 5, 405-416.
- [47] BRAUNGART, Michael; McDONOUGH, William. *Cradle to cradle.* Mexico. McGraw-Hill, 2005. 186 p
- [48] BRENTROP, F. et al. application of the life cycle assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilizers. *European journal of agronomy.* Vol. 14 (2001),p. 221-233
- [49] CARDIM DE CARVALHO, Arnaldo. Análisis de ciclo de vida de productos derivados del cemento- aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Universidad politécnica de Cataluña. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Barcelona, España, 2001, 317 p.
- [50] CORPORACION PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL DE LA BIOTECNOLOGIA Y PRODUCCION MAS LIMPIA. Programa estratégico para la producción de biodiesel- combustible automotriz a partir de aceites vegetales. BOGOTA.CORPODIB, 2004. 443 P.

- [51] CARRARERRO, C. et al. Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis and energetic evaluations. *Energy*. Vol.29 (2004); p. 2195-2211
- [52] LAPUERTA, Magín; ARMAS, Octavio; RODRIGUEZ, José. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in energy and combustion science*. (2007); 1-26
- [53] MARCHETTI, J.M.; MIGUEL, V.U.; ERRAZU, A.F. possible methods for biodiesel production. *Renewable and energy reviews*. Vol. 11 (2007); p. 1300-1311
- [54] NI, J; MEUNIER F.C. esterification of free fatty acids in sunflower oil over solid acid catalysts using batch and fixed bed-reactors. *Applied catalysis, A general* 333 (2007) 122-130.
- [55] CARDOZO, Abiney; GONZAGA Soraia; DA SILVA, Neves. "Esterification of Oleic Acid for Biodiesel Production Catalyzed by SnCl₂: A Kinetics Investigation". *Energies* 2008, N° 1, 79-92.
- [56] PEDRAZA, Fabián E. "Producción de biodiesel a partir de palma de aceite, Diseño de una planta industrial para la producción de metilesteres partir de aceite de palma y evaluación técnica, económica y ambiental del proceso". Universidad Industrial de Santander.
- [57] DÍAZ, Carlos A.; LÓPEZ, Néstor A. "Diseño y construcción de una planta piloto de producción de biodiesel de manera continua". Universidad Industrial de Santander
- [58] GONZALEZ, Julián A.; MORENO, Leonel. "Producción y purificación de biodiesel y glicerina, a partir de aceites vegetales y cinética de la reacción de transesterificación". Universidad Industrial de Santander.
- [59] JIMÉNEZ, Andrea C.; MUÑOZ, Danny J."Utilización de catalizadores sólidos básicos para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma". Universidad Industrial de Santander

[60] AMAYA, Bibian H.; BECERRA, Silvia M. "Evaluación del análisis del ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera empleando la metodología "de la cuna a la cuna"". Universidad Industrial de Santander

[61] CHACÓN, Carolina V.; LIZCANO, Javier O. "Estudio del potencial para la integración energética de las plantas extractoras de aceite de palma en Colombia". Universidad Industrial de Santander

[62] LAWRENCE Timothy, "Modeling and simulation of reaction kinetics for biodiesel production". North Carolina State University. 2005

PAGINAS WEB

- <http://www.gratisweb.com/cultivodepalma/cultivo.htm>
- <http://www.gratisweb.com/cultivodepalma/biodiesel.htm>
- <http://portal.veracruz.gob.mx/pls/portal/docs/PAGE/COVECAINICIO/IMAGENES/ARCHIVOSPDF/ARCHIVOSDIFUSION/MONOGRAF%CDA%20DE%20PALMA%20DE%20ACEITE.PDF>
- http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portallG/home_1/recursos/01_general/mapas/contenidos/15042008/red_vial.jsp
- <http://www.fedepalma.com>
- <http://www.cenipalma.com>

ANEXO A: ANTECEDENTES DEL ANALISIS DE CICLO DE VIDA

Los estudios en esta área se iniciaron prácticamente en los años setenta de forma global y, en concreto, en el sector energético, como consecuencia de la reducción de recursos disponibles en el mercado a causa del embargo del petróleo. La mayoría de los estudios realizados durante este período todavía estaban localizados por sectores de producción nacional y no a productos concretos.

En los años ochenta, en la mayoría de los estudios, los balances de energía, materia y residuos todavía se aplicaban de forma separada. En este período, las primeras mejoras metodológicas fueron aportadas por el Programa de Inventario de descargas de tóxicos aplicado en Estados Unidos y por los trabajos de la SETAC, relativos a los métodos internacionales de mejora de los efectos ambientales y el desarrollo de la metodología ACV.

En la década de los noventa, se ha ido avanzando en la metodología de los ACV, siendo destacables las nuevas orientaciones de la SETAC respecto a sus diferentes fases. En la primera década del siglo 21 las acciones esta centradas en la aplicación generalizada mediante la gestión del ciclo de vida de los productos. Un ejemplo es el programa Life Cycle Initiative. UNEP-SETAC.

Normas ISO relacionadas con el ACV.

El ACV, según la metodología que finalmente se ha extendido, empezó siendo una herramienta para la evaluación de impactos ambientales de uso particular por la SETAC. Finalmente el ACV se universalizado y, con el objetivo de uniformizar criterios y metodologías, han aparecido una serie de norma internacionales, la serie ISO 14040 (así como una norma española, la UNE 150041).

El objetivo en el momento de publicar la norma, fue marcar las pautas de la metodología y dar unas directrices generales de los principios y requerimientos para realizar estudios y trabajos de análisis de ciclo de vida. Más adelante, y mediante sucesivas publicaciones, se fue desarrollando la metodología y avanzando en diversas etapas del análisis de ciclo de vida, como: la definición de objetivos, el análisis de inventario de ciclo de vida, la evaluación de impactos, etc. [21].

Tabla A1. Normas relacionadas con análisis de ciclo de vida [21]

EQUIVALE	CÓDIGO	TÍTULO
UNE-EN ISO 14040	• ISO 14040	- GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. PRINCIPIOS Y ESTRUCTURA.
UNE-EN ISO 14041	• ISO 14041	- GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE Y EL ANÁLISIS DE INVENTARIO.
UNE-EN ISO 14042	• ISO 14042	- GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. EVALUACIÓN DE IMPACTOS.
UNE-EN ISO 14043	• ISO 14043	- GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. INTRODUCCIÓN.
ISO/WD TR 14047	• ISO 14047	- GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA ISO 14042 (TECHNICAL REPORT).
ISO/TR 14048	• ISO 14048	- GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. FORMATO PARA LA DOCUMENTACIÓN DE DATOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.
SO/DTR 14049	• ISO 14049	- GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA ISO 14041 PARA EL OBJETIVO Y ALCANCE Y EL ANÁLISIS DE INVENTARIO.
UNE 150060 IN	• Guía ISO 64	- GUÍA PARA LA INCLUSIÓN DE ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES EN LAS NORMAS DE PRODUCTO.
UNE-CR 12340	• CR 12340	- ENVASES. RECOMENDACIONES PARA REALIZAR EL ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE ENVASADO.
UNE 150041 EX	• UNE 150041	- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA SIMPLIFICADO.

ANEXO B: LA PALMA AFRICANA

En este anexo se presentan aspectos generales sobre la palma africana y su cultivo [29], los cuales pueden ser relevantes como complemento del estudio.

ORIGEN

El aceite de palma se trata de un aceite de origen vegetal obtenido del mesocarpio de la fruta de la palma *Elaeis* (*E. guineensis*); este aceite es considerado como el segundo más ampliamente producido sólo superado por el aceite de soya. El fruto de la palma es ligeramente rojo y este es el color que tiene el aceite embotellado sin refinar. El aceite crudo de palma es una rica fuente de vitamina A y posee grandes cantidades de vitamina E. La palma es originaria de África Occidental; de ella ya se obtenía aceite hace 5000 años, especialmente en la Guinea Occidental, de allí paso a América introducida después de los viajes de Colón, y en épocas más recientes fue introducida a Asia desde América. El cultivo en Malasia es de gran importancia económica, provee la mayor cantidad de aceite de palma y sus derivados a nivel mundial. En América los mayores productores son Colombia y Ecuador.

La palma aceitera fue introducida en Malasia en 1870 como planta ornamental y los primeros intentos de establecer grandes plantaciones fracasaron en ese país, hasta después de la primera Guerra Mundial, aprovechando las experiencias obtenidas en las plantaciones de Sumatra. En el Continente Americano las primeras plantaciones fueron establecidas en la década de 1940.

ASPECTOS GENERALES DE LA PALMA DE ACEITE PARA LOS PAÍSES TROPICALES,

La palma de aceite (*Elaeis guineensis*) representa una alternativa de excelentes perspectivas para el futuro. Este cultivo produce 10 veces más del rendimiento de aceite proporcionado por la mayoría de los otros cultivos oleaginosos, con materiales genéticos más recientes la diferencia en rendimiento es cada vez mayor y los problemas de salud debidos a las grasas hidrogenadas tendrán que abrirle paso al aceite de palma para la fabricación de productos a base de grasa vegetal. La planta produce dos importantes aceites: (1) aceite de palma, el que es blando y se utiliza extensamente en oleomargarina, manteca y grasas para la cocina y en la fabricación industrial de muchos otros productos para la alimentación humana, y (2), aceite de almendra de palma (palmiste) el que posee un alto contenido de ácido láurico y el cual a su vez produce jabones de excelente espuma y además de los productos arriba mencionados, también los aceites vegetales están siendo transformados en muchos otros productos para uso técnico como: biocarburentes y aceites biológicos naturales. También es de resaltar que la palma aceitera es un cultivo de alta rentabilidad y es aún la mejor opción para las tierras bajas de las regiones tropicales.

LA PALMA DE ACEITE: UN CULTIVO VERDE.

Todas las partes de la palma se utilizan, por lo tanto no hay desperdicios que contaminen. Dentro de los cultivos de semillas oleaginosas, la palma de aceite es la más eficiente en la conversión de energía. Los cultivos de palma de aceite son bosques protectores de los ecosistemas. La técnica de siembra de los cultivos de palma de aceite previene la erosión. Además, esta palma requiere mucho menos fertilizante, pesticida y herbicida que cualquier otro cultivo oleaginoso, tal como la soya, el girasol y la colza. Pero a pesar de los aparentes beneficios ambientales de la palma de aceite, la industria ha sido frecuentemente criticada por organizaciones ambientales. Los detalles son complejos y difieren de un país a

otro, pero casi siempre incluyen problemas asociados con la pérdida de bosques naturales. La pérdida de áreas de bosques amenaza a miles de especies de animales y plantas, muchas de ellas endémicas y ya en peligro de extinción.

CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS

Suelo: Este cultivo requiere que existan suelos profundos y bien drenados, con pH de 4 a 7, como son los cambisoles, vertisoles y acrisoles.

Clima: Debido a la temperatura y humedad que requiere este cultivo el clima propicio para su desarrollo es el Cálido Húmedo y Cálido Sudhúmedo.

Precipitación: Este es un cultivo que requiere de grandes cantidades de agua por lo que la precipitación pluvial idónea es de 1800 mm, bien distribuidos durante todo el año.

Temperatura: Lo ideal para este cultivo es una temperatura de 22° C a 28°C.

Altitud: La altitud requerida por el cultivo es de hasta los 400 metros sobre el nivel del mar.

TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN

La palma africana es la oleaginosa de mayor rendimiento de aceite por unidad de superficie. Los cultivos como soya, girasol, cártamo, cocotero, algodón y ajonjolí, son las especies que más superficie ocupan y las que aportan la mayor proporción de la producción nacional de aceites. Sin embargo, los rendimientos por unidad de superficie de estas especies apenas rebasan los 500 kilogramos de aceite por hectárea. En la actualidad buscan incrementar este rendimiento de aceite por hectárea cultivada vía la aplicación de biotecnología. Por ejemplo, la utilización de materiales transgénicos de soya ha reducido en forma drástica los costos de producción, por lo que la soya y el aceite de soya proveniente de países productores se muestran como una amenaza para la competitividad de la palma

africana. Por ello, no sólo contar con insumos tecnológicos que incorporen nuevos conocimientos, sino con materiales a precios competitivos, puede ser una contribución significativa para mejorar la competitividad del aceite de palma colombiano.

En la actualidad, la totalidad de la semilla que se utiliza para el desarrollo de plantaciones en países de América latina es de importación y esta se trae de ASD (Semillas y Clones de Palma de Alto Rendimiento) de Costa Rica, en donde se contempla un paquete que incluye la capacitación de técnicos y productores en el manejo de la tecnología de producción del cultivo de palma de aceite, mediante cursos. Se requiere de producir oleaginosas como la palma a bajo costo, que a la vez le permita a la industria nacional alcanzar la competitividad en la extracción y refinación de aceite. De otra forma, la producción nacional será sustituida por las importaciones más baratas.

Un factor relevante a considerar para alcanzar la competitividad en la extracción de aceite es la proporción de frutos en el racimo ya que es el principal determinante del contenido total de aceite en el racimo. De acuerdo a resultados de estudios publicados por FEDEPALMA (Federación de Cultivadores de Palma de Colombia), una de las posibles formas de mejorar la baja tasa de extracción industrial, entre febrero y abril, consistiría en incrementar la eficiencia de polinización en los meses de agosto a octubre.

Deben ampliarse las investigaciones sobre los aspectos que intervienen en la obtención de una polinización apropiada, tales como:

- Fluctuación anual del tamaño de la población de los insectos polinizadores.
- Patrón estacional de la producción y viabilidad del polen.
- Aspectos nutricionales que afecten la composición del racimo.
- Las relaciones entre la tasa de extracción industrial y la cantidad de fruta fresca producida.

MANTENIMIENTO DEL CULTIVO

Para darle mantenimiento a las plantaciones de Palma de Aceite se consideran los siguientes rubros:

1. Control de Maleza
2. Fertilización
3. Control de Plagas
4. Restablecimiento de nuevas plantaciones

El mantenimiento de la plantación madura va desde el cuarto año hasta el año 25, donde la fertilización constituye el mayor costo.

Fertilización

Uno de los componentes tecnológicos que requiere de atención específica a cada una de las áreas de producción, es el manejo y aplicación de fertilizantes, ya que por las propias condiciones ambientales tanto de clima y suelo, las necesidades de aplicación son diferentes y la respuesta de la planta igualmente diferente.

Cosecha

Se divide en mano de obra y costos de transporte. El costo de cosecha es alto por el salario de mano de obra. El alto costo del transporte de los frutos a las plantas extractoras es otro de los factores que afectan los costos de producción que han llegado a representar cerca del 40% del precio final. Además, debido a las condiciones climáticas, los caminos para sacar el producto, los puentes y los drenes, sufren un continuo deterioro y, las autoridades no cuentan con los recursos necesarios para mantenerlos en condiciones funcionales.

USOS COMESTIBLES DEL ACEITE

Actualmente, el aceite de palma es el segundo aceite más consumido en el mundo y se emplea como aceite de cocina y para elaborar productos de panadería, pastelería, confitería, heladería, sopas instantáneas, salsas, diversos platos

congelados y deshidratados, cremas no lácteas para mezclar con el café. El contenido de sólidos grasos del aceite de palma les da a algunos productos como margarinas y shortenings una consistencia sólida/semisólida sin necesidad de hidrogenación.

En un proceso de hidrogenación parcial se forman ácidos grasos trans, que tienen un efecto negativo en la salud.

USOS NO COMESTIBLES

El aceite de palma es una materia prima que se utiliza ampliamente en jabones y detergentes, en la elaboración de grasas lubricantes y secadores metálicos, destinados a la producción de pintura, barnices y tintas.

PROBLEMAS AMBIENTALES

En la actualidad, el cultivo de la palma de aceite está asociado a graves problemas sociales y ambientales, que no son causados por el árbol en sí mismo, sino por el modo en el que está siendo implantado. En este sentido, el boom del aceite de palma a gran escala a nivel mundial tiene serias repercusiones sobre los bosques tropicales, sus habitantes y su biodiversidad. Efectos tales como: la tala de bosques, envenenamiento de suelos, agua y aire por medio de venenos agrícolas, así como conflictos de tierra y empobrecimiento de las poblaciones afectadas son algunas de las consecuencias. Las plantaciones de palma también afectan a la tierra provocando una sequía excesiva. Entre otros usos, el aceite de palma, al igual la caña de azúcar o la soya, sirve para la producción de biocombustible. Por ello, muchas empresas están extendiendo sus plantaciones de palma, afectando a comunidades locales que denuncian invasión de sus tierras, daños al medio ambiente y violaciones de los derechos humanos que incluyen asesinatos, desapariciones, torturas y desplazamiento forzado.

Las plantaciones de palma aceitera se están implantando principalmente en las regiones tropicales. En las últimas décadas se produjeron gigantescos incendios forestales en Indonesia, causados por grandes empresas palmicultoras, que prefirieron quemar extensas áreas antes que utilizar tierras ya destinadas a la

agricultura. Las plantaciones de palma aceitera se expanden a expensas de las selvas y territorios de poblaciones indígenas y otras comunidades tradicionales de Colombia, Ecuador y otros países, crecientemente orientados a la producción de biodiesel.

DATOS AGRONÓMICOS DE LA PALMA AFRICANA EN SABANA DE TORRES, SANTANDER

Las características para el cultivo en Sabana de Torres se presentan a continuación.

Tabla B1. Característica del cultivo.

Característica	Unidad	Valor
Rendimiento palma	Ton/ha*año	26
RFF necesarios	Ton/año	362262,523
Área necesaria	Ha.	13933,174
Arboles necesarios	-	1992443,88
Producción racimos	rac/arb*año	13
Peso prom. Racimo	Kg	14
Producción racimos	Kg/arb*año	182
Distribución	Árbol/Ha.	143
Peso promedio fruto	(g)	11,8
Pulpa	(g)	9,31
Cuesco	(g)	1,21
Almendra	(g)	1,28
Semilla	(g)	2,49
Semillas necesarias +15%	-	2291310,46
Peso semilla nece. +15%	(g)	5705363,04
Peso semilla nece. +15%	(Ton)	5,70536304

ANEXO C. EXTACCION DEL ACEITE DE PALMA

FACTORES TECNOLÓGICO DEL PROCESO UTILIZADO.

El proceso de extracción se basó en un estudio realizado por Cenipalma donde recopila los factores tecnológicos de cada etapa del proceso, para las extractoras de la región del Magdalena Medio. La figura C1, esquematiza el proceso utilizado [8].

DESCRIPCION DEL PROCESO DE EXTRACCION DEL ACEITE

A continuación se muestran las etapas que conforman el proceso de extracción del aceite de palma [8].

Recepción de fruto.

Está conformado por las tolvas de recepción de racimos de fruta fresca, son el primer equipo que se encuentra en las extractoras de aceite de palma africana. Sirve para entregar la fruta en las canastas ó góndolas para su esterilización, control y evaluación de la calidad del fruto recibido y a la vez para almacenar y tener listas la fruta para su utilización posterior.

Esterilización.

Es la segunda etapa del proceso en la cual los racimos sufren una transformación. El correcto esterilizado de los racimos es fundamental para las etapas posteriores del proceso y en gran medida la tasa de extracción de aceite depende de esta etapa.

Objetivos de la esterilización son:

- Inactivar la enzima lipasa, responsable de la hidrólisis del aceite en ácidos grasos y glicerol (Desacelera la acidificación del fruto).

- Secar el punto de unión de la fruta y el raquis para facilitar la separación en el desfrutado.
- Ablanda el mesocarpio para permitir el rompimiento de las celdas que contienen el aceite, durante la digestión y el prensado.
- Reduce el tamaño de la almendra dentro de la nuez lo que facilita su desprendimiento de la cáscara en el momento del rompimiento.
- Coagula las proteínas y el material mucilaginoso para evitar la formación de emulsiones que impiden el clarificado del aceite.

Las condiciones necesarias para la esterilización son:

- Presión de vapor de 45 PSI
- Temperatura del vapor de 140°C.

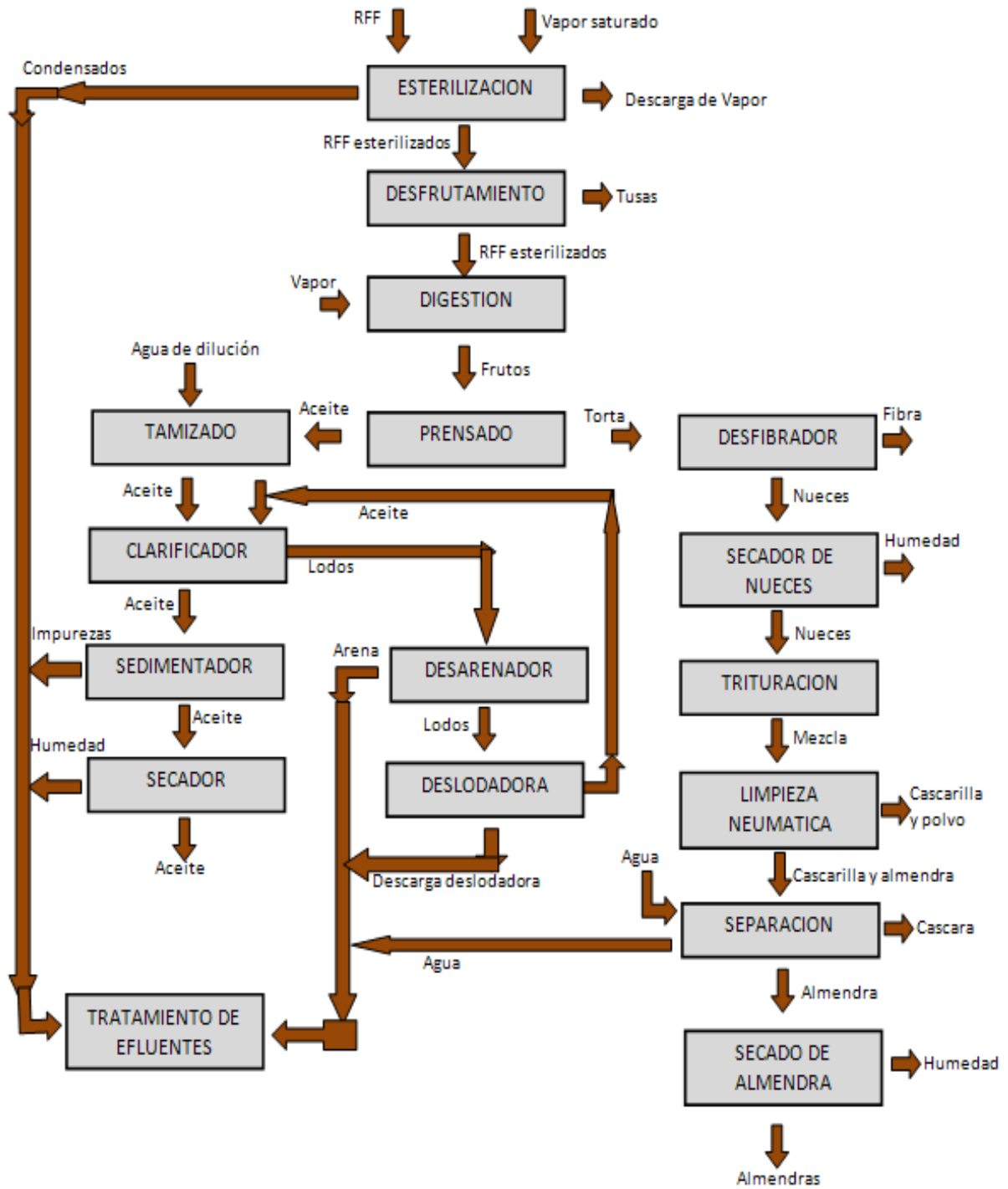
Desfrutamiento.

Es la sección en que el fruto después de cocido es desprendido de los raquis mecánicamente mediante desgranadores rotativos, para permitir su procesamiento posterior. La sección consta de dos elevadores puente grúas de volteo, dos alimentadores de racimos y dos desgranadoras.

Digestión.

Los digestores son cilindros compuestos por un eje vertical rotativo con brazos agitadores cuya función es: La fruta es maxilada ó macerada y calentada separándola del mesocarpio y rompiendo las celdas que contienen el aceite, preparándola para el paso siguiente que es el prensado. Es esencial mantener el digestor lo más lleno posible, no solo para asegurar el máximo tiempo si no la mejor maxilación adicionados con un sistema de inyección directa de vapor ó camisas para mantener una temperatura de 90 a 95°C., para la eliminación del cemento péptico con un tiempo aproximado de 20 a 30 min. Dependiendo del tamaño del digestor.

Figura C1. Proceso para la extracción del aceite de palma



Prensado.

Sección donde se extrae mecánicamente el aceite contenido en el mesocarpio. El objetivo de esta etapa es romper, mediante calor y presión mecánicamente las celdas que contienen el aceite del mesocarpio. La presión aplicada debe ser tal que se extraiga la mayor cantidad de aceite y se minimice la rotura de nueces y almendras.

Desfibrado.

Está compuesto por el sinfín rompedor de torta la cual es un transportador de paletas que se ha diseñado especialmente para lograr una separación efectiva entre las nueces y las fibras que salen de las prensas mezcladas y comprimidas. El equipo logra esto por medio de sus paletas que actuando a gran velocidad como palas sacuden y desparraman la torta de fibras y nueces procedentes de las prensas en un trayecto largo. Separándola y preparando la fibra para su utilización posterior como combustible y las nueces para ser procesadas.

Clarificación.

El aceite crudo extraído del mesocarpio por prensado contiene cantidades variables de impureza de material vegetal, parte de las cuales se presentan como sólidos insolubles y partes disueltos en el agua que contiene el aceite. Tanto el agua como las impurezas deben removerse, lo que se logra mediante la clarificación. Está conformado por un tanque clarificador continuo de aceite y está diseñado para separar el aceite del agua y los sólidos con los cuales está mezclado, al salir del tanque de aceite crudo después del tamiz vibratorio, obrando en una forma continua. En este tanque es necesario tener una dilución adecuada para mejorar la decantación estática y una altura optima entre la salida del aceite clarificado y el lodo, para lograr un trabajo continuo y acelerado en la separación de aceite. El siguiente cuadro muestra los principales flujos del proceso de extracción del aceite.

EXTRACCIÓN DEL ACEITE VS. CONTAMINACIÓN

El procesamiento del aceite de palma produce grandes cantidades de desperdicios sólidos, en la forma de hojas, racimos vacíos, fibras cáscaras y residuos de la extracción. Los racimos contienen muchos alimentos recuperables, y pueden causar molestias y problemas, al tratar de desecharlos. Normalmente, las fibras, cáscaras y otros residuos sólidos se queman como combustible, para producir vapor. La quema incontrolada de los desechos sólidos, y el escape del aire utilizado para separar las cáscaras de las pepas, causan contaminación atmosférica.

Los desperdicios líquidos se producen, principalmente, en los esterilizadores, y en el clarificador del aceite. Las causas principales de contaminación son las siguientes:

- La demanda de oxígeno bioquímico y químico,
- Los sólidos en suspensión,
- El aceite y la grasa
- El nitrógeno
- Ceniza orgánica.

Sin embargo se está desarrollando por diferentes partes del mundo sistemas de tratamiento ecológicos de los desechos de la industria. Muchas empresas se concentran en el tratamiento mediante biodigestión de los desechos. Esta actividad tiene muchas ventajas:

- Tratamiento de calidad de los desechos.
- Generación de biogas, una energía alternativa, permitiendo reducir la cantidad de gases a efecto invernadero.
- Generación de un fertilizante de muy buena calidad, lo cual permite reducir indirectamente las producciones de grandes firmas fitosanitarias.
- Mejora del rendimiento económico de las plantas, ya que producen la energía necesaria para su funcionamiento y la energía sobrante puede venderse a la red eléctrica nacional.

Tabla C1. Flujos en la extracción del aceite.

EXTRACCION			
Descripción	Unidades	Valor	Total ACV
RFF	Ton/año	3,623E+05	2,174E+07
Consumo agua	Ton/año	1,032E+05	6,195E+06
Almendra/RFF	-	0,056	
Aceite/RFF	-	0,210	
Aceite final	Ton/año	7,608E+04	4,565E+06
Torta	Ton/año	1,268E+05	7,608E+06
Tusas	Ton/año	7,970E+04	4,782E+06
Almendra Tratada	Ton/año	2,029E+04	1,217E+06
Lodos	Ton/año	1,449E+05	8,694E+06
Vapor	Ton/año	1,132E+05	6,792E+06
Consumo E. Eléctrica	KWh/año	8,050E+06	4,830E+08
tiempo de trabajo planta	h/día	18	

Tabla C2. Composición de aceite de palma [8].

COMPOSICION DEL ACEITE		
TRIGLICERIDO	% Peso	PM
POP	33,13	833,37
POO	24,68	859,41
PLO	10,00	857,39
PLP	9,71	831,35
POS	6,18	861,42
PPP	5,87	807,33
OOO	4,09	885,45
SOO	2,85	887,46
PLL	2,24	855,38
PPS	1,24	835,39

Tabla C5. Información de los vehículos.

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

Tabla C3. Propiedades físico-químicas del aceite

CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS		
característica	máx.	Min
Punto de fusión (K)	313,15	303,15
Densidad a 298.15 K	0,876	0,868
Índice de Yodo	58	50
Materia insaponificable (%)	1	
Acidez con acido Palmítico (%)	5	
Índice de refracción a 313,15 K	1,4590	1,4560
Índice de saponificación	205	195
Humedad e impurezas (%)	1	
Poder calorífico (J/Kg)	36950	
Punto de chispa (K)	553,15	
Viscosidad absoluta	A 313,15 K (Kg/m*s)	0,0378
	A 343,15 K (Kg/m*s)	0,0136
Índice de cetano	35	

Tabla C4. Especificaciones de la caldera

DATOS SOBRE LA CALDERA			
Descripción	Unidades	Valor	Tipo
Nº pasos de Humos	Pasos	3	
Tipo de combustible	-	-	Gas
Consumo de combustible	Ton/año	138240	
Longitud	Mm	3820	
Altura	Mm	2080	
Anchura	Mm	2380	
Diámetro cámara de combustión	Mm	840	
longitud cámara de combustión	Mm	2800	
Peso total	Ton	5,3	

ANEXO D. PRODUCCIÓN DEL BIODIESEL

Como ya se menciona el proceso de producción de biodiesel fue dividido en tres etapas fundamentales: hidrólisis, esterificación y sistemas de separación y purificación. Los flujos principales de cada etapa se muestran a continuación:

Tabla D1. Hidrólisis.

HIDRÓLISIS			
Corriente	Kg./h	P (atm)	T (°C)
Aceite fresco	8.806,1	1,0	25,0
Agua	12.760,0	1,0	94,0
Glicerina cruda	979,8	1,0	186,8
Ácidos grasos	15.240,0	1,6	411,0

Tabla D2. Esterificación.

ESTERIFICACION			
Corriente	Kg./h	P (atm)	T (°C)
Ácidos grasos	15.240,0	1,6	411,0
Etanol	1.475,8	1,0	25,0
Biodiesel crudo	22.040,0	4,0	140,6
Etanol impuro	178.800,0	1,0	122,9

Tabla D3. Sistemas de separación y purificación.

S. DE SEPARACION Y PURIFICACION			
Corriente	Kg/h	P (atm)	T (°C)
Biodiesel crudo	22.040,0	4,0	140,6
Etanol impuro	178.800,0	1,0	122,9
Glicerina cruda	979,8	1,0	186,8
Biodiesel refinado	9.259,3	1,0	25,0
Etanol refinado	178.100,0	1,0	50,2
Glicerina refinada	1.014,0	1,0	80,0

Tabla D4. Consumo de electricidad.

Proceso	Consumo Energético		
	kW	KJ/año	kW.h/año
Hidrólisis del aceite y separación de glicerina	2590,950	8,059E+10	2,24E+07
Producción y purificación de Biodiesel	38363,145	1,193E+12	3,31E+08
Purificación de Glicerina y recuperación de etanol	0,00478	1,487E+05	4,13E+01
<i>Total</i>	4,0954E+04	1,2738E+12	3,5384E+08

Tabla D5. Consumo de vapor.

Proceso	Cantidad de Vapor [Ton/año]
Hidrólisis del aceite y separación de glicerina	48.040,0
Producción y purificación de Biodiesel	212.000,0
Purificación de Glicerina y recuperación de etanol	256.800,0
<i>Total</i>	516.840,0

Tabla D6. Especificaciones para el Biodiesel

PROPIEDAD	UNIDADES	ASTM-D6751	EN-14214	SIMULACION
Densidad (15°C)	g/cm ³	-	0,86 a 0,9	0,863
Viscosidad (40°C)	mm ² /s	1,9 a 6,0	3,5 a 5,0	3,7
Contenido de agua	mg/Kg	500 máx.	500 máx.	0,000066
Glicerina total	% masa	0,24 máx.	0,25 máx.	0,169
Contenido alcohol	% masa	-	0,2 máx.	0,001746
Monoglicéridos	% masa	-	0,8 máx.	0
Diglicéridos	% masa	-	0,2 máx.	0
Triglicéridos	% masa	-	0,2 máx.	0
Contenido de Ester	% masa	-	96,5 máx.	99,44
Acidez	mgKOH/g	0,8 máx.	0,5 máx.	0,4258

La siguiente lista muestra los equipos usados en la simulación.

Tabla D7. Equipos utilizados en la simulación.

EQUIPOS USADOS EN LA PRODUCCION DE BIODIESEL			
Equipo	Descripción	Equipo	Descripción
E-100	Intercambiador – calentador	MIX-102	Mezcladores
E-101	Intercambiador – calentador	MIX-103	Mezcladores
E-102	intercambiador – enfriadores	MIX-104	Mezcladores
E-103	Intercambiador – calentador	MIX-105	Mezcladores
E-104	Intercambiador – calentador	PFR-100	Reactor lecho empacado
E-106	intercambiador – enfriadores	TEE-100	Divisor
E-107	Intercambiador – calentador	TEE-101	Divisor
E-108	intercambiador – enfriadores	V-100	Separadores FLASH
E-109	intercambiador – enfriadores	V-101	Separadores FLASH
E-110	intercambiador – enfriadores	V-102	Separadores FLASH
T-100	columna separación Glicerina	V-103	Separadores FLASH
T-101	columna separación etanol	V-105	Separadores FLASH
T-102	columna separación Biodiesel	V-107	Separadores FLASH
T-103	columna separación Agua	CRV-100	Reactor de Conversión
X-100	Columna Purificación glicerina	VLV-100	Válvulas
B1	Bombas	VLV-101	Válvulas
B2	Bombas	VLV-102	Válvulas
B3	Bombas	VLV-103	Válvulas
B4	Bombas	VLV-104	Válvulas
B5	Bombas	VLV-105	Válvulas
B6	Bombas	VLV-106	Válvulas
MIX-100	Mezcladores	VLV-107	Válvulas
MIX-101	Mezcladores		

EL CATALIZADOR: *Sulfato de zirconio.*

Este catalizador es preparado mediante dos métodos diferentes: solvente libre y precipitación. En el primero, el $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ reacciona con $(NH_4)_2SO_4$ en una relación 1:6 durante 20 minutos a una temperatura de $25^\circ C$. Después se estabiliza con aire por un periodo de 18 horas y finalmente es calcinado a $600^\circ C$ por 5 horas. En el segundo método, SZ se prepara por precipitación de $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ con $(NH_4) OH$ a un pH de 8.5. El producto ($ZrO_2 \cdot xH_2O$) es lavado con agua para eliminar los iones cloruro, se seca durante 24 horas a $100^\circ C$. El soporte es impregnado con 15 ml de H_2SO_4 0.5 molar por gramo de sólido por 24 horas. Posteriormente se seca a $100^\circ C$ por el mismo periodo. Finalmente se calcina a $650^\circ C$ durante 4 horas, produciendo así el SO_4/ZrO_2 (SZ). [22]

Tabla D8. Propiedades del sulfato de zirconio

Catalizador	T calcinación	PROPIEDADES		
		Área superficial BET (m^2/g)	Volumen de poro (cm^3/g)	Diámetro de poro (nm)
SZ	400	252	0,24	3,3
	500	152	0,16	4,1
	600	145	0,17	3,7
	700	74	0,12	4,7
	800	13	0,04	8,1
	900	2	0,07	77,7

Regeneración del catalizador

El catalizador puede ser regenerado mediante tres etapas, las cuales se muestran a continuación [11].

- Separación y lavado con etanol.
- Secado a $120^\circ C$ durante 1 hora.
- Re-calcinado a $500^\circ C$ por un periodo de 2 horas.

MODELO LANGMUIR-HINSHELWOOD-HOUGENS-WATSON.

El modelo cinético LHHW para una reacción heterogénea $A + B \rightarrow R + S$

Se expresa de la siguiente forma:

$$(-r_A) = \frac{(\text{Factor Cinético}) * (\text{Factor Motriz})}{(\text{Termino de Adsorción})^n}$$

$$(-r_A) = \frac{k_1 + k_2 * X_A + k_3 * X_A^2}{k_4 + k_5 * X_A + K_6 * X_A^2}$$

Para el manejo en Hysys de una reacción de este tipo, es necesaria una transformación al modelo:

$$rate = \frac{Numerador}{denominador}$$

$$Numerador = k * f(Basis) - k' * f'(Basis)$$

$$Denominador = (1 + K1 * f1(Basis) + K2 * f2(Basis) + \dots)^n$$

$$k = A * e^{-E/R*T} * T^\beta \quad k' = A' * e^{-E'/R*T} * T^{\beta'}$$

$$K1 = A1 * e^{-E1/R*T} \quad K2 = A2 * e^{-E2/R*T}$$

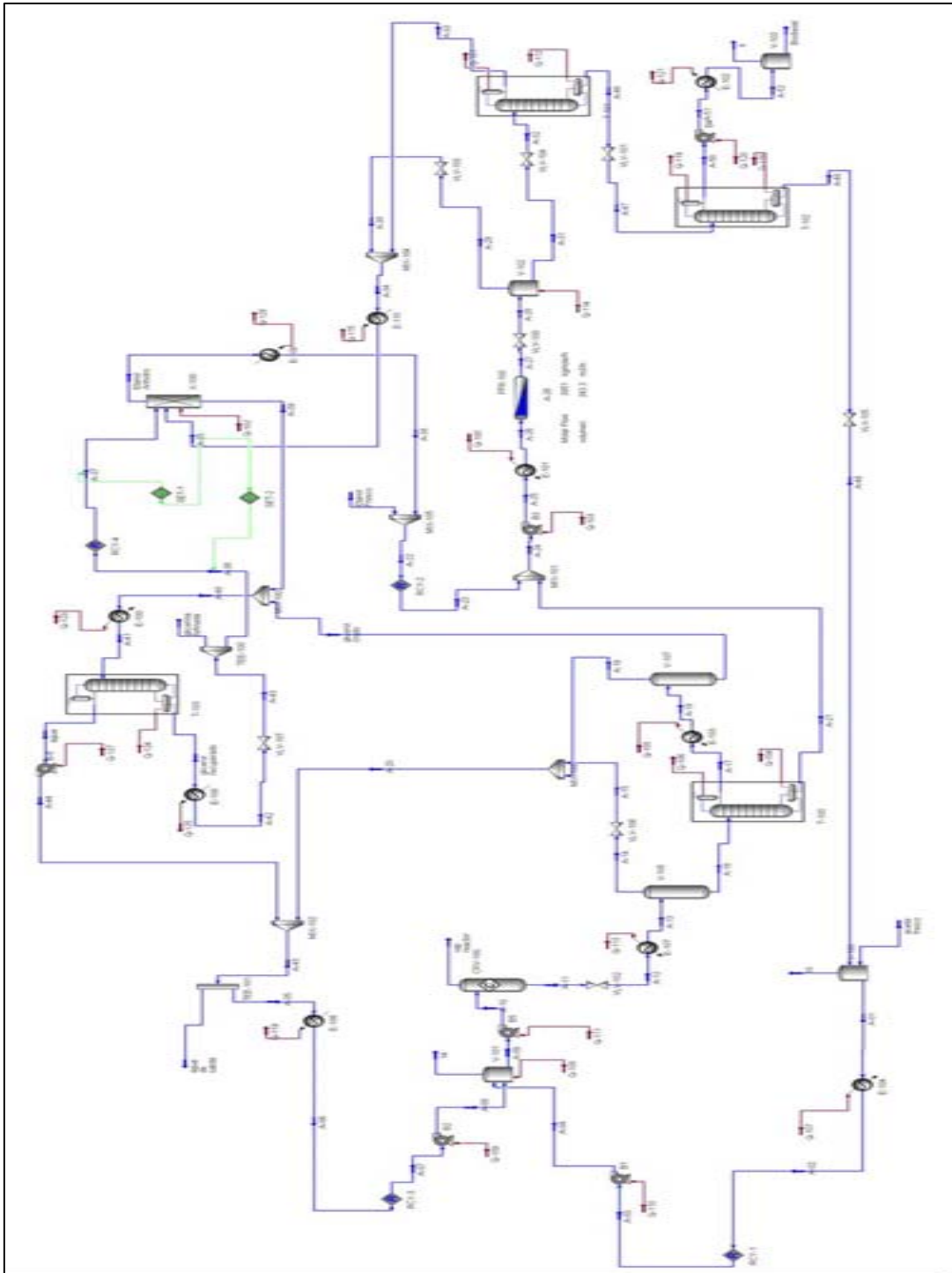


Figura D1. Simulación en Hysys de la planta de biodiesel

ANEXO E. RESULTADOS

Tabla E1. Emisiones por etapa y categoría.

Categoría	Asignación	Adecuación del terreno	Extracción del aceite	Esterificación	Distribución y uso	Total
Cambio Climático Kg.-eqv. CO2	CO2	-7,561E+10	4,455E+05	3,340E+06	1,728E+11	9,719E+10
	CH4	8,495E+05	8,290E+06	2,355E+08	9,036E+08	1,148E+09
	N2O	3,435E+08	1,410E+06	3,645E+07	1,663E+09	2,044E+09
	CO	1,135E+06	6,994E+05	5,244E+06	1,611E+09	1,618E+09
	Total	-7,526E+10	1,085E+07	2,806E+08	1,770E+11	1,020E+11
Acidificación Kg.-eqv. H+	SO2	1,539E+04	1,293E+05	2,803E+06	1,364E+07	1,659E+07
	NO2	1,066E+05	3,746E+04	8,874E+05	4,247E+07	4,350E+07
	HCl	1,417E+01	1,171E+03	5,781E+04	5,541E+04	1,144E+05
	HF	4,675E+00	2,742E+02	1,319E+04	1,262E+04	2,609E+04
	NH3	1,220E+05	1,710E-02	8,486E-01	5,330E-01	1,220E+05
	Total	2,440E+05	1,682E+05	3,762E+06	5,618E+07	6,036E+07
Eutrofización Kg.-eqv. PO4	Nitratos (NO3 ⁻)	1,832E-01	6,428E+00	3,182E+02	2,786E+02	6,034E+02
	Nitrógeno (N2)	-5,267E+06	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-5,267E+06
	Amonia (como N)	3,329E+02	6,321E+02	5,237E+03	1,876E+06	1,883E+06
	Amoníaco (NH3)	7,235E+05	1,014E-01	5,034E+00	3,162E+00	7,235E+05
	(NO2)	6,301E+05	2,213E+05	5,244E+06	2,510E+08	2,571E+08
	(DQO)	1,323E+03	1,786E+03	9,417E+03	5,685E+06	5,697E+06
	Óxido Nitroso (N2O)	5,946E+05	2,440E+03	6,309E+04	2,878E+06	3,538E+06
	Total	-3,317E+06	2,262E+05	5,322E+06	2,614E+08	2,636E+08
Formación oxidantes fotoquímicos Kg.-eqv. Etileno	Benceno	4,821E-01	1,659E+00	1,155E-03	5,889E+03	5,891E+03
	Formaldehídos	6,264E+01	1,365E+02	9,547E-02	1,885E+05	1,887E+05
	Hidrocarburos (sin especificar)	5,683E+03	3,685E+03	6,207E+04	8,699E+06	8,770E+06
	Hidrocarburos	4,083E+04	1,801E+04	2,355E+04	5,961E+07	5,969E+07
	Metano (CH4)	0,000E+00	0	0	0,000E+00	0,000E+00
	Total	4,658E+04	2,183E+04	8,562E+04	6,850E+07	6,866E+07
Efectos Respiratorios Kg.-eqv. PM2,5	Monóxido de Carbono (CO)	7,550E+02	4,652E+02	3,488E+03	1,072E+06	1,076E+06
	Óxidos de azufre (SO2)	3,841E+04	3,226E+05	6,997E+06	3,406E+07	4,141E+07
	(NO2)	6,170E+05	2,167E+05	5,134E+06	2,457E+08	2,517E+08
	Amonio (NH4)	9,624E+01	1,827E+02	1,514E+03	5,425E+05	5,443E+05
	Partículas (sin especificar)	6,647E+03	1,756E+05	8,647E+06	9,964E+06	1,879E+07
	Óxido Nitroso (N2O)	4,310E+05	1,769E+03	4,573E+04	2,086E+06	2,565E+06
	PM10	9,068E+04	4,090E+04	2,494E+04	1,353E+08	1,355E+08
	Total	1,185E+06	7,583E+05	2,085E+07	4,287E+08	4,515E+08
Energía No Renovable MJ Energía Primaria	Crude Oil	7,298E+09	9,719E+07	2,088E+06	1,067E+13	1,068E+13
	Gas Natural	0,00E+00	1,203E+10	4,376E+10	0,000E+00	5,579E+10
	Total	7,298E+09	1,212E+10	4,376E+10	1,067E+13	1,073E+13

Tabla E2. Factores de Equivalencia usados

CATEGORIA	INDICADOR	UNIDAD	CONTAMINANTE	EQUIVALENCIA
Cambio climático	GWP500	Kg eq. CO2 Kg-1	Dióxido de Carbono (CO ₂)	1
			Metano (CH ₄)	7
			Oxido de Nitrógeno (N ₂ O)	156
			Monóxido de Carbono (CO)	1,57
Acidificación	AP	Kg eq. H+ Kg-1	Ácido clorhídrico (HCl)	2,740E-02
			Ácido fluorhídrico (HF)	5,000E-02
			Amoníaco (NH ₃)	5,900E-02
			Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	2,200E-02
			Óxidos de azufre (SO ₂)	3,125E-02
Eutrofización	EP	Kg eq. PO ₄ Kg-1	Nitratos (NO ₃)	9,500E-02
			Nitrógeno	4,200E-01
			Amonio (NH ₄)	4,200E-01
			Amoníaco (NH ₃)	3,500E-01
			Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	1,300E-01
			Demanda Química de Oxígeno (DCO)	2,200E-02
			Óxido Nitroso (N ₂ O)	2,700E-01
formación de oxidantes fotoquímicos	POCP	Kg eq. etileno Kg-1	Benceno	1,100E-01
			Formaldehidos	2,200E-01
			Hidrocarburos (sin especificar)	1,940E-01
			Hidrocarburos	1,950E-01
			Metano	0,000E+00
Efectos respiratorios	REP	Kg eq. PM _{2.5} Kg-1	Monóxido de Carbono (CO)	0,001044286
			Óxidos de azufre (SO ₂)	0,078
			Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	0,127285714
			Amonio (NH ₄)	0,121428571
			Partículas (sin especificar)	0,157142857
			Óxido Nitroso (N ₂ O)	0,195714286
Energía no renovable	NREP	MJ Kg-1	Crudo	4,580E+01
			Gas Natural	4,030E+01

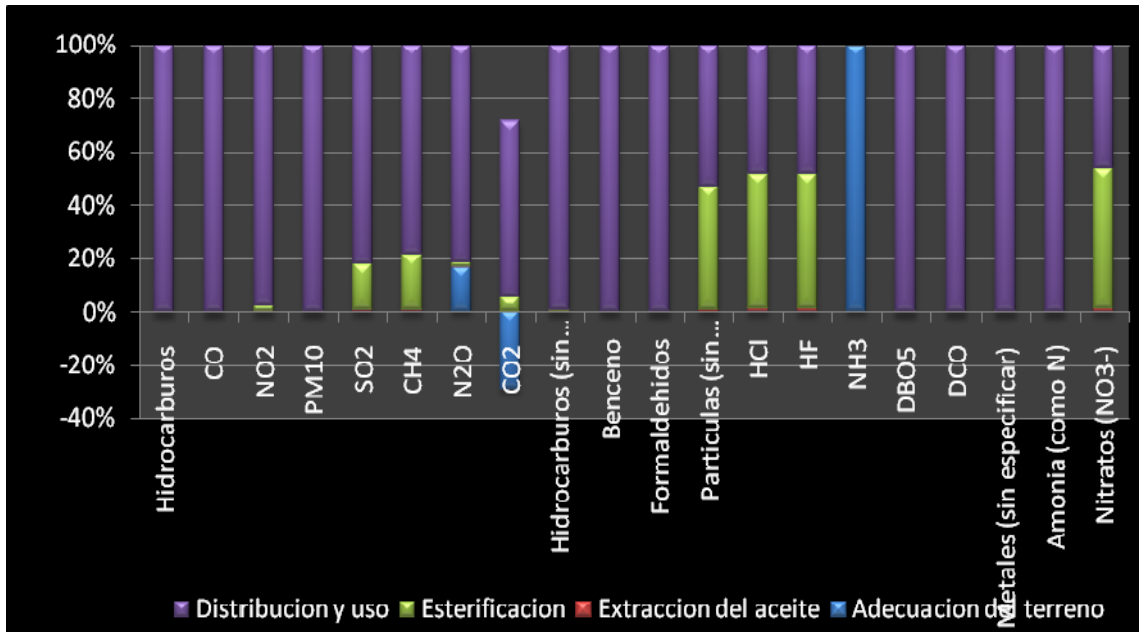


Figura E1. Participación de las emisiones en las etapas del proceso.

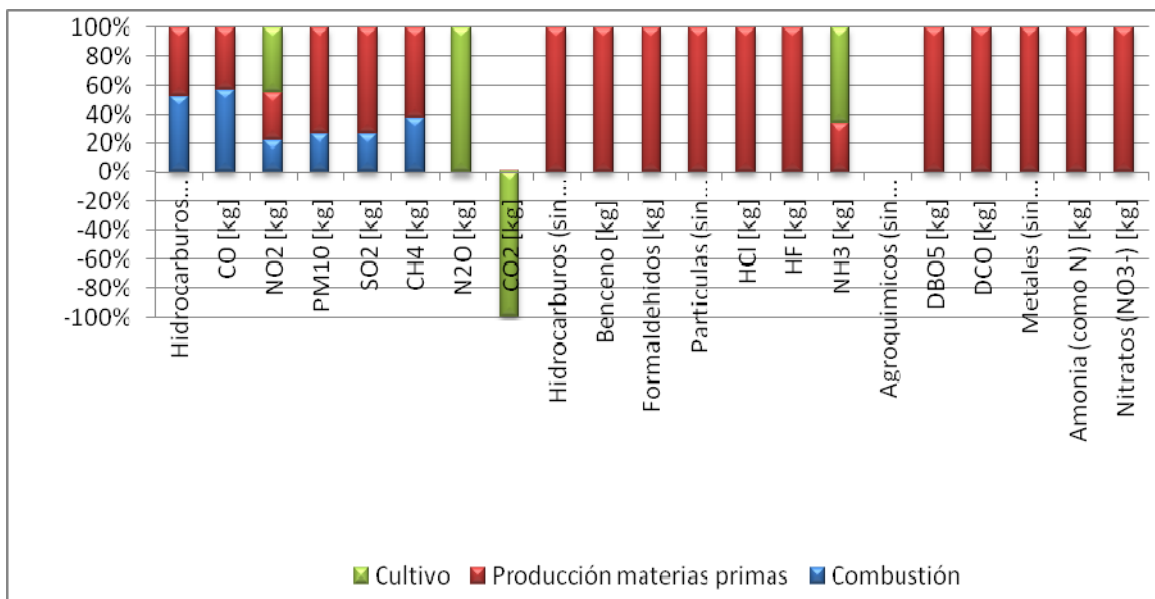


Figura E2. Participación de las emisiones en la adecuación de terreno.

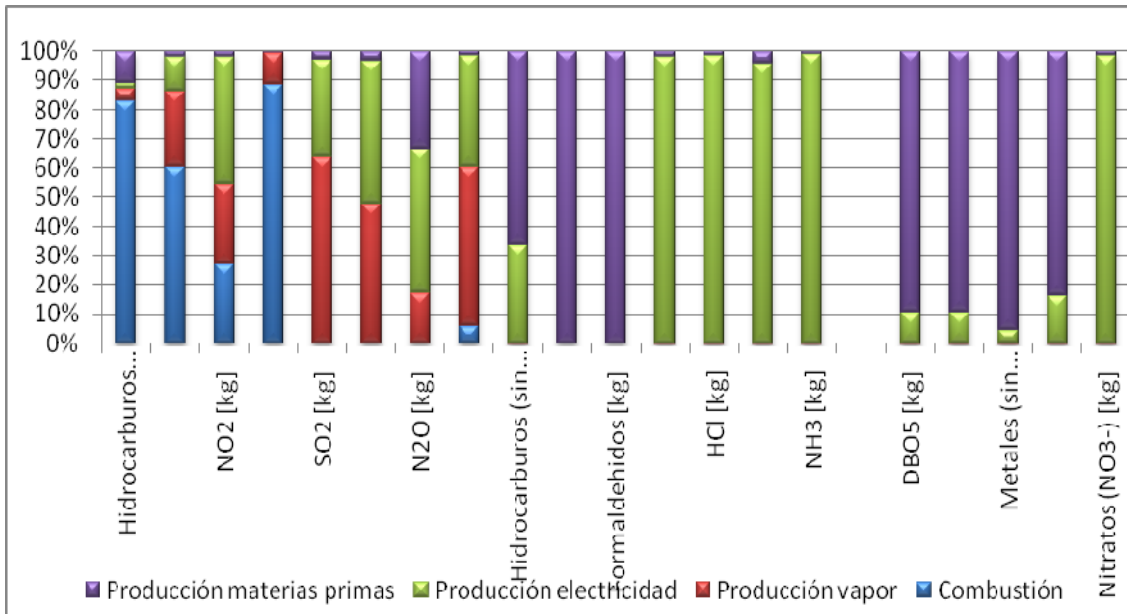


Figura E3. Participación de las emisiones en la extracción del aceite.

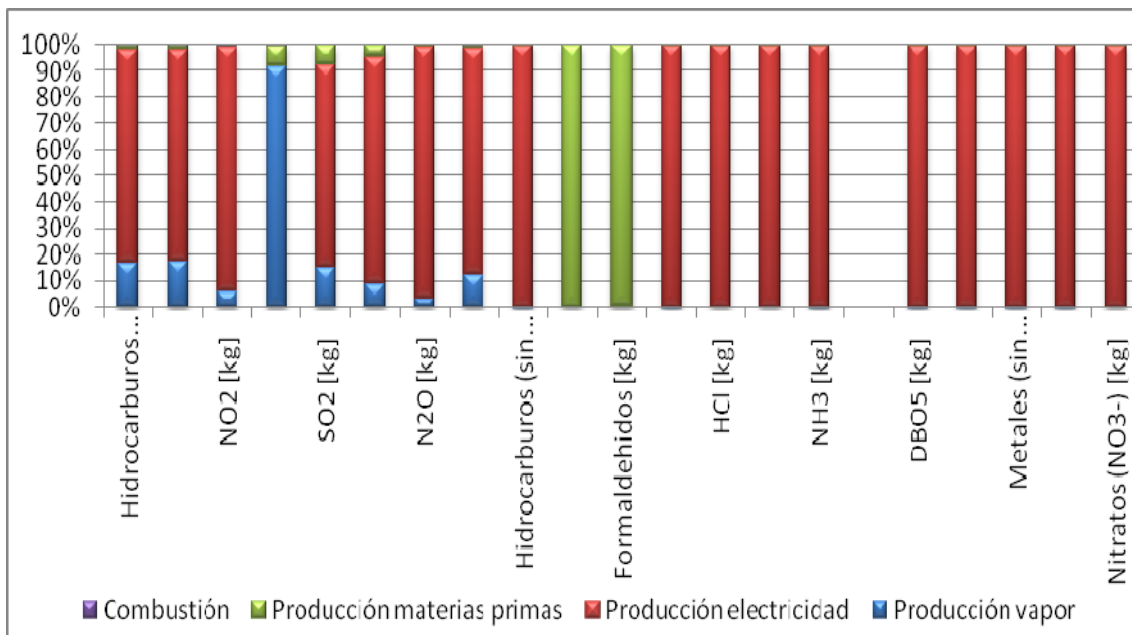


Figura E4. Participación de las emisiones en la esterificación.

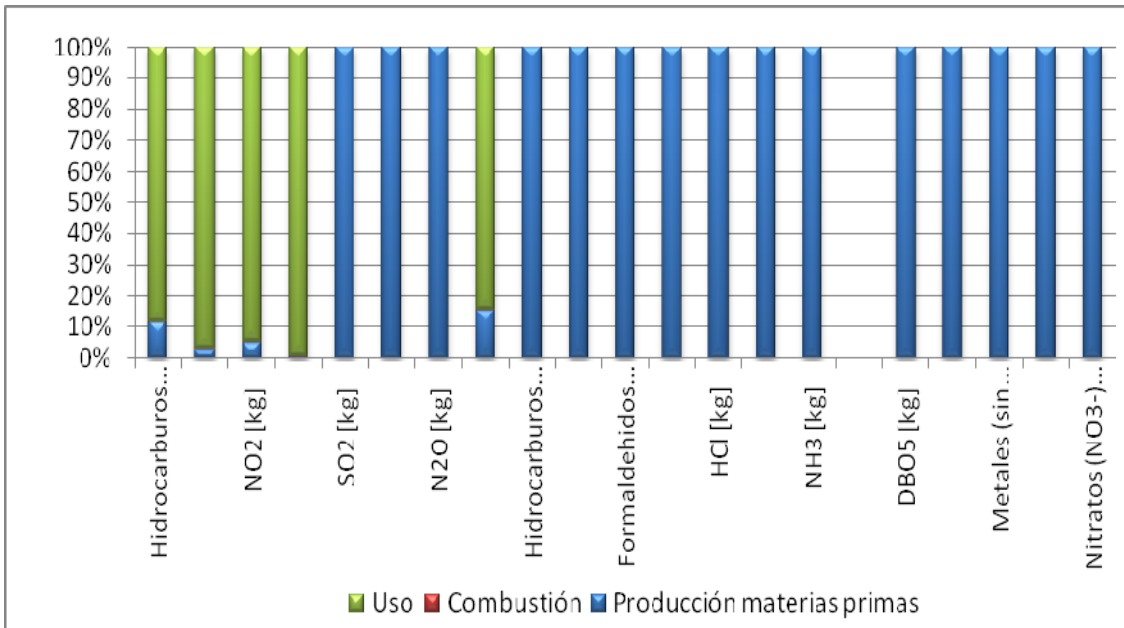


Figura E5. Participación de las emisiones en la distribución y uso.

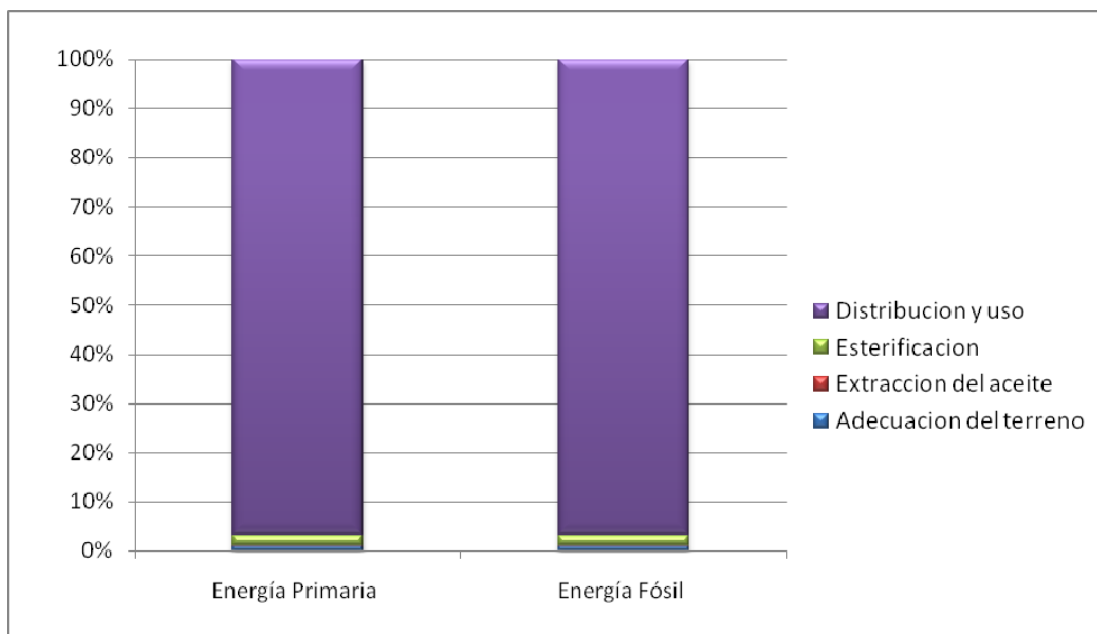


Figura E6. Participación de la energía en las etapas del proceso.

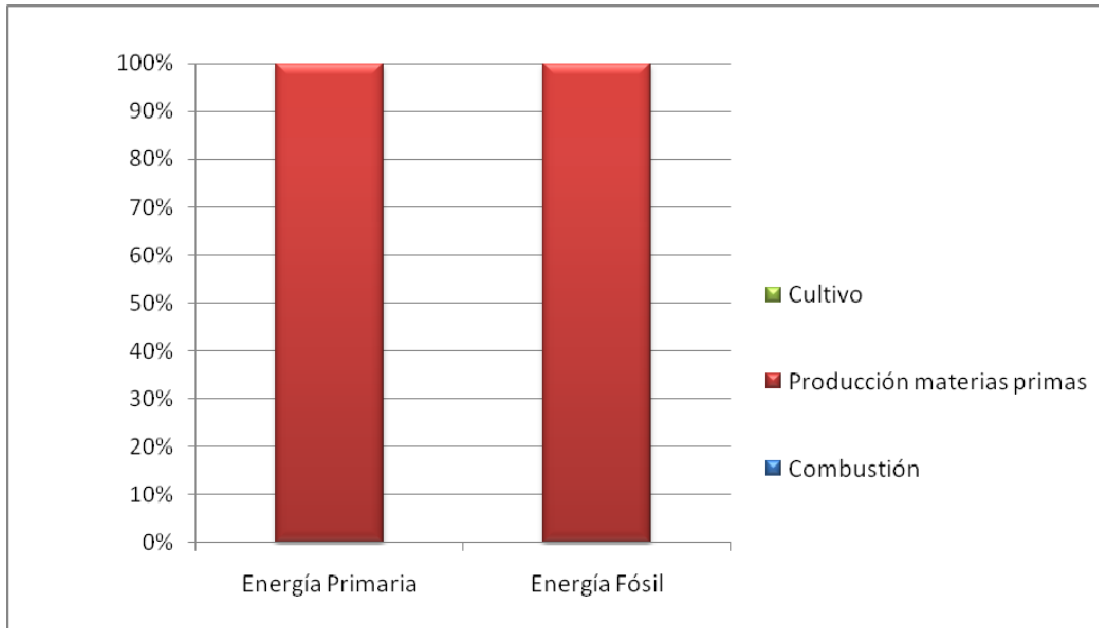


Figura E7. Participación de la energía en la adecuación de terreno.

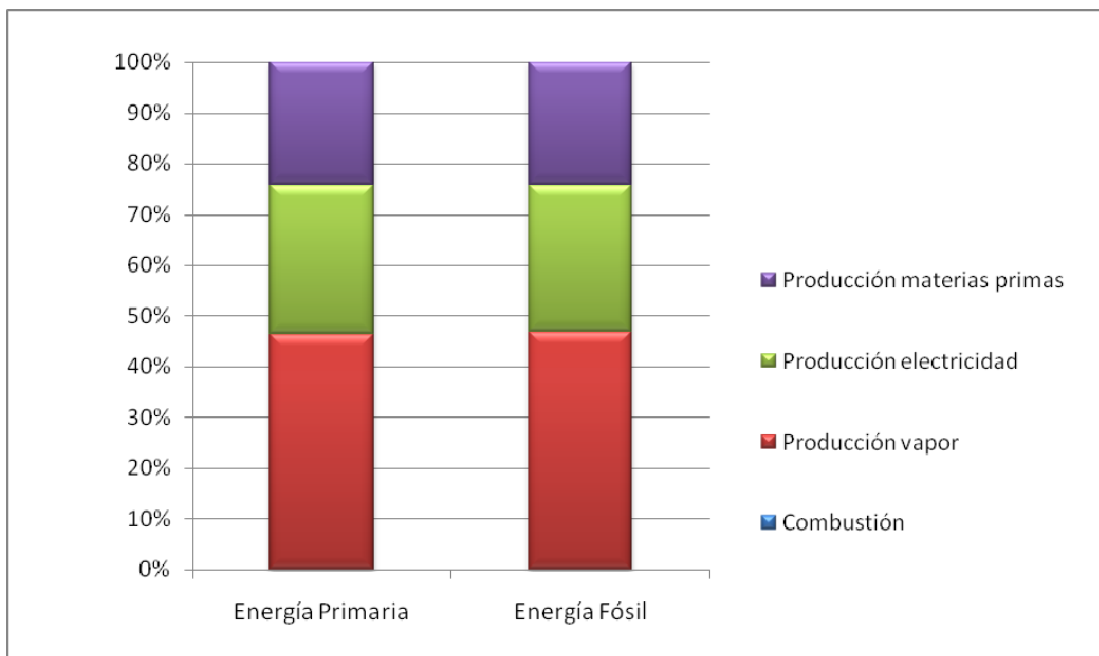


Figura E8. Participación de la energía en la extracción del aceite.

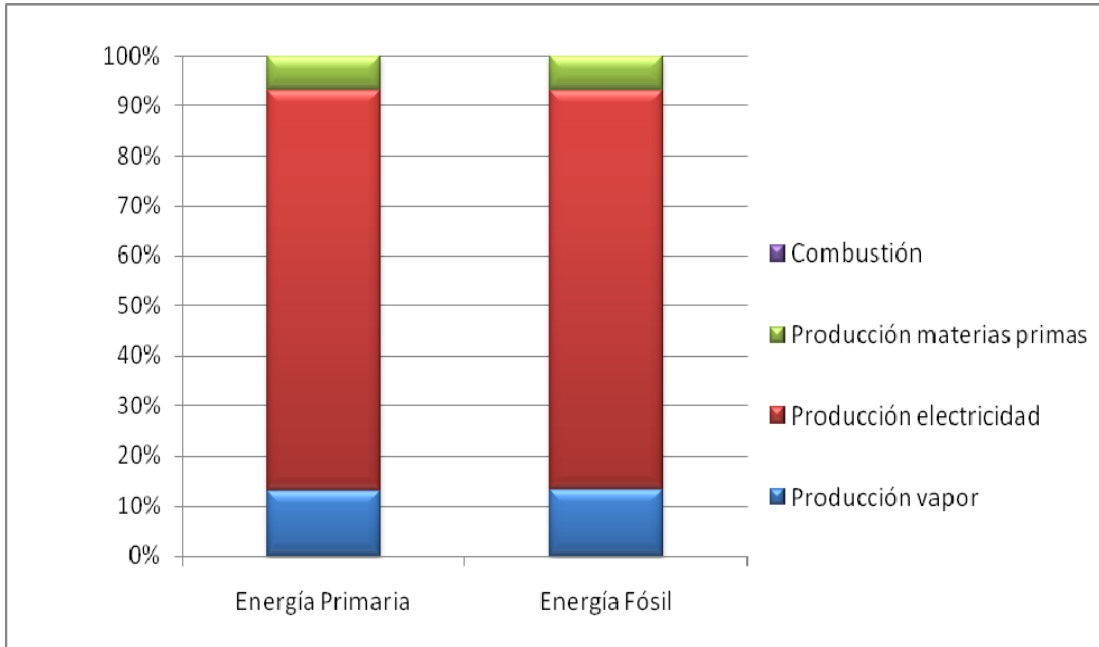


Figura E9. Participación de la energía en la esterificación.

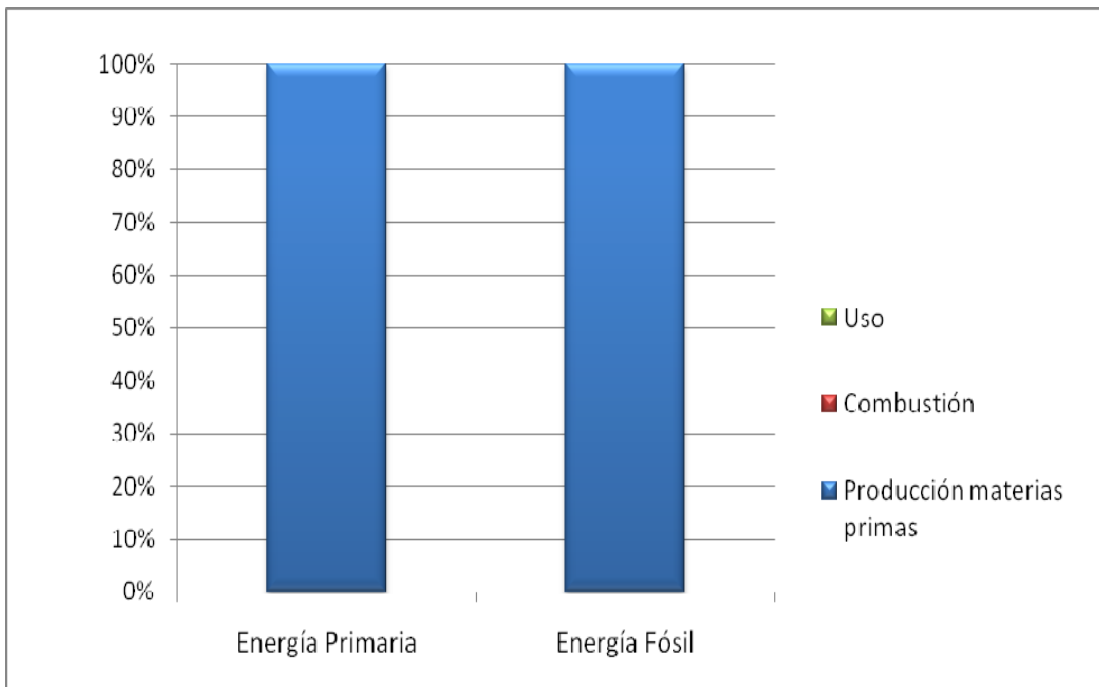


Figura E10. Participación de la energía en la distribución y uso.