

**APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN
DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE DE PALMA EMPLEANDO LA
METODOLOGÍA “DE LA CUNA A LA CUNA”**

**ANDRÉS FELIPE CASTAÑEDA ALVARADO
JAVIER MAURICIO FLÓREZ REYES**

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

2008

**APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN
DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE DE PALMA EMPLEANDO LA
METODOLOGÍA “DE LA CUNA A LA CUNA”.**

**ANDRÉS FELIPE CASTAÑEDA ALVARADO
JAVIER MAURICIO FLÓREZ REYES**

**Trabajo Presentado como Requisito para Optar al 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 FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2008

A Dios quien siempre estuvo conmigo, me apoyo, me guio, me dio fuerza y fue ante todo siempre un gran amigo durante esta etapa de mi vida.

A mi mama quien a pesar de las adversidades siempre estuvo presente con su amor, confianza y verriquera, dándome el aliento necesario para nunca desfallecer y salir adelante. Sin ella no habría podido lograr esta meta.

A mi papa por su apoyo y su constante preocupación por mi formación profesional e integral.

A mis hermanos Camilo y Eduardo quienes siempre estuvieron cerca y pendiente de mi, los quiero un resto.

A mis amigos y compañeros quienes fueron siempre un gran apoyo e hicieron de esta una etapa que nunca olvidare.

A mis abuelas, primos y familia quienes a pesar de la distancia siempre me recibieron con un cálido abrazo.

Andrés F. Castañeda A.

A Dios quien me a dado la oportunidad de conocerlo, de compartir los momentos mas alegres de mi vida y a quien se lo debo todo. Te amo mucho.

A mis padres Javier Flórez e Isabel Reyes por todo el amor, sus consejos y el esfuerzo que han hecho por formarme.

A mi hermana Andrea Fernanda de quien estoy muy orgulloso y quien me ha servido de inspiración para alcanzar mis metas.

A mis amigos, los cuales me han acompañado y con quienes e compartido momentos inolvidables de mi vida. Son un regalo de Dios.

Javier

AGRADECIMIENTOS

Los autores del libro expresan sus agradecimientos:

A Dios porque siempre ha estado con nosotros en todo tiempo apoyándonos y mostrándonos con claridad por dónde debemos avanzar.

A nuestros padres y familia por la ayuda incondicional que nos han brindado.

A nuestros amigos que nos han acompañado a lo largo de la carrera y que han estado a nuestro lado durante este proceso de formación académica universitaria.

A la ingeniera Paola Acevedo quien no solo fue nuestra codirectora, también una amiga que ha estado dispuesta a ayudarnos en todo momento.

Al Dr. Leonardo Acevedo por la dirección y la confianza que depositó en nosotros.

A los profesores de Ingeniería Química, quienes han puesto a nuestra disposición sus conocimientos y su entereza en pro de nuestra formación profesional.

A la UIS en general por abrirnos las puertas y acogernos durante este tiempo trascendental para nosotros.

CONTENIDO

	Pág..
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1 Métodos de evaluación de impacto ambiental	4
1.1.1 Normas ISO 14000	4
1.1.2 Análisis de ciclo de vida (ACV)	4
1.1.2.1 Definición	4
1.1.2.2 Etapas de desarrollo en el Análisis de Ciclo de Vida	5
2. MARCO METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	7
2.1 Objetivo del estudio.	7
2.2 Alcance del Estudio	7
2.2.1 Sistema de producto bajo estudio	8
2.2.2 Función del sistema del producto	8
2.2.3 Unidad Funcional	8
2.2.4 Limites del sistema	8
2.2.5 Procedimientos de asignación	9
2.2.6 Metodología de la evaluación del impacto de ciclo de vida y tipos de impacto	10
2.2.7 Requisitos relativos a los datos.	10
2.2.8 Suposiciones.	10

2.2.9	Requisitos de calidad de los datos	11
3.	ANÁLISIS DE INVENTARIO	12
3.1	Análisis de inventario de la etapa de adecuación y agrícola.	12
3.1.1	Limites, suposiciones y consideraciones.	13
3.2	Análisis de inventario en la extracción de aceite de palma.	14
3.2.1	Limites, suposiciones y consideraciones.	15
3.2.2	Asignación Másica.	15
3.3	Análisis de inventario en la transesterificación de aceite.	16
3.3.1	Limites, suposiciones y consideraciones.	17
3.3.2	Asignación Másica.	17
3.4	Análisis de inventario en la distribución y uso del biodiésel.	18
3.4.1	Limites, suposiciones y consideraciones	18
3.5	Resultados	19
4.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	20
4.1	Selección de categoría de impactos.	20
4.2	Factores de caracterización. Clasificación	20
4.3	Asignación e interpretación de resultados del inventario a las categorías de impacto.	21
	CONCLUSIONES	24
	RECOMENDACIONES	25
	BIBLIOGRAFÍA	26
	ANEXOS	31

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología Análisis de Ciclo de Vida.	6
Figura 2. Diagrama de flujo Etapa de Adecuación y Agro.	11
Figura 3. Diagrama de flujo Etapa Extracción de Aceite de Palma.	14
Figura 4. Diagrama de flujo Etapa Transesterificación de Aceite.	16
Figura 5. Perfil Medioambiental ACV Biodiesel a partir de Aceite de Palma.	22
Figura 6. Porcentaje de Emisiones Contaminantes por Etapa.	23

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Asignación másica en etapa de Extracción.	16
Tabla 2. Asignación másica en etapa de Transesterificación.	18
Tabla 3. Resultados de Análisis de Inventario.	19
Tabla 4. Categorías de Impacto.	20
Tabla 5. Factores de Caracterización.	21

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Antecedentes de la metodología.	31
Anexo B. Generalidades de la palma africana.	33
Anexo C. Extracción del fruto de palma.	35
Anexo D. Transesterificación de aceite de palma	41
Anexo E. Otros resultados de la interpretación del inventario.	45

RESUMEN

Titulo: APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE DE PALMA EMPLEANDO LA METODOLOGÍA “DE LA CUNA A LA CUNA”.*

Autor: Andrés Felipe Castañeda Alvarado, Javier Mauricio Floréz Reyes**

Palabras claves: Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Aceite de Palma, Biodiésel a partir de palma africana, Impacto Ambiental.

Los sistemas naturales fueron percibidos durante mucho tiempo como fuentes y sumideros de recursos ilimitados. Con el crecimiento de la población y consecuente crecimiento de los sistemas de explotación comenzó la escasez de recursos y se comenzaron a percibir los daños causados a ecosistemas por las actividades que se venían desarrollando desde hacía décadas. De ellos, el que más preocupa a la comunidad internacional es el petróleo, razón por la cual se propone el uso de biocombustibles entre ellos: el biodiésel. Colombia a través de maniobras gubernamentales ha propuesto convertirse en potencia mundial en biocombustibles, pero lastimosamente en medio de su carrera maratónica no ha realizado los estudios pertinentes para tal fin. Este trabajo contiene un estudio realizado para la zona de Puerto Wilches (Santander), palmera desde hace décadas y que se proyecta como zona productora de biodiésel en Colombia.

Se utilizó la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV) contemplada dentro las normas ISO 14040-2006 e ISO 14044-2006 con el nuevo paradigma “de la cuna a la cuna” para cuantificar corrientes de entrada y salida en cada una de sus etapas. En el ACV se incluyeron las etapas: cultivo, cosecha, postcosecha, beneficio y preparación de los frutos, proceso de extracción del aceite, esterificación, uso del biodiésel en automotores; además de las emisiones y descargas líquidas de todas las etapas; el ciclo del carbono se cierra con la reincorporación de gases (CO₂) a los cultivos vía fotosíntesis.

Las categorías de impacto evaluadas en este estudio fueron: cambio climático, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos, efectos respiratorios y energía no renovable, dando como resultado el perfil medioambiental a partir del cual se planteen soluciones orientadas a la reducción del consumo de energía y emisiones generadas a lo largo del ciclo de vida del biodiésel obtenido a partir de aceite de palma.

* Proyecto de Grado

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Dir. Dr. Leonardo Acevedo Duarte. Ingeniero Químico Ph.D.

ABSTRACT

Title: APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR THE PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PALM OIL USING THE METHODOLOGY "FROM CRADLE TO CRADLE"

Author: Andrés Felipe Castañeda Alvarado, Javier Mauricio Floréz Reyes**

Key Words: Life Cycle Assessment (LCA), Palm Oil, Biodiesel from African palm oil, Environmental Impact, from Cradle to Cradle.

Natural systems were perceived for a long time as sources and sinks of unlimited resources. With population growth and the consequent growth of the exploitation systems the shortage of resources began and there were begun to perceive the damage caused to ecosystems by the activities that were being developed for decades. From those resources the one that most worries the international community is the petroleum, for this reason it is proposed the use of biofuels like the biodiesel. Colombia through governmental maneuvers has proposed to become world-wide power in biofuels, but in the middle of this marathonic race it has not done the pertinent studies for such aim. This document contains a study realized for the area of Puerto Wilches (Santander), palm zone for decades and is projected as biodiesel-producer area in Colombia.

The Life Cycle Assessment (LCA) methodology was used contemplated inside the procedure ISO 14040-2006 and ISO 14044-2006 with the new paradigm "from cradle to cradle" to quantify the entering and leaving flows in each of its stages. The stages included In the LCA were: cultivation, crop, post crop, benefit and preparation of the fruits, oil extraction process, esterification, biodiesel use in automobiles; as well as emissions and liquid unloading in all the stages; carbon life cycle closes with the reincorporation of gases (CO₂) to crops via photosynthesis.

The impact categories evaluated in this study were: climate change, acidification, eutrophication, photochemical oxidants formation, respiratory effects and non-renewable energy, giving as result the environmental profile from which it can be obtained the solutions oriented to the reduction of the consumption of energy and emission generated throughout the life cycle of the biodiesel obtained from palm oil

* Degree Work

** Universidad Industrial de Santander. Physycal-Chemical Faculty. Chemical Engineering Department. Dir. Dr. Leonardo Acevedo Duarte. Chemical Engineer Ph.D.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo exponencial que ha tenido la humanidad en el último siglo ha convertido al mundo y a la sociedad en una generación adicta y dependiente a los energéticos provenientes de fuentes fósiles utilizándolos de forma indiscriminada y sin ningún tipo de control o planeación. Esta conducta ha provocado una consecuencia que hoy en día ya nadie pone en duda: el cambio climático.

El mayor causante del cambio climático mundial son los gases de efecto invernadero entre los que se encuentran principalmente el Metano y el Dióxido de Carbono, y aunque su existencia es necesaria para conservar la vida en el planeta, el hombre ha generado un exceso de estos gases de invernadero en la atmosfera provenientes principalmente de la combustión de petróleo, carbón y gas, generando así un aumento en la temperatura del planeta y teniendo como consecuencia un daño irreparable al medio ambiente.

Otros componentes que preocupan al mundo actualmente son los altos niveles de contaminación dentro de las grandes ciudades y el incremento de la lluvia ácida en varias regiones del planeta.

Toda esta problemática ha llevado al mundo a experimentar un sorprendente cambio de mentalidad; se ha producido un incremento en la conciencia ambiental dentro la sociedad moderna que ahora prefiere productos que no dañen el medio ambiente o que por lo menos minimicen los impactos. Es por esto que nos encontramos en una búsqueda de combustibles derivados de fuentes naturales renovables que posean un bajo impacto ambiental. Muchas alternativas son propuestas pero dentro de ellas los biocombustibles destacan porque ya han sido

aceptados internacionalmente. Varios países del mundo han implementado su utilización por medio de decretos y leyes que promueven su uso debido a los efectos favorables en la reducción de sustancias contaminantes en las ciudades y su afectación en la salud. El biodiésel y el etanol ahora son mezclados con diésel y gasolina respectivamente en proporciones que van desde el 5% al 30%.

Con la reciente carrera por implementar el uso del biodiésel en el mundo hay una significativa cantidad de plantas productoras de biodiésel en funcionamiento y otras que están siendo construidas desconociendo si realmente se están implementando procesos que ayudarán a remediar o detener la problemática ambiental mundial.

Esta situación no es ajena para Colombia, los cultivos de palma africana se han venido expandiendo de forma acelerada impulsados por políticas nacionales sin ningún tipo de evaluación ambiental seria que mida el riesgo.

A medida que el área plantada aumenta, se incrementan los impactos ambientales que el cultivo provoca. Es que, al igual que en los monocultivos silvestres de pinos y eucaliptos, el problema no es el árbol, sino el modelo en el que se lo implanta.

Los monocultivos generan procesos erosivos a consecuencia del desbroce del terreno antes ocupado por bosques, que deja el suelo desnudo y expuesto a las fuertes lluvias tropicales. Estos procesos erosivos a su vez afectan a los cursos de agua provocando contaminación y sedimentación, lo cual tiene además consecuencias sobre las especies acuáticas que allí habitan y por ende sobre las poblaciones locales que se abastecen de agua y alimentos de la misma.

Adicional a esto, estudios ambientales recientes ponen en tela de juicio la contribución de los biocombustibles a disminuir los gases de efecto invernadero e incluso aseguran que son más nocivos para el ambiente que los combustibles fósiles. La mayoría de éstos estudios fueron realizados utilizando la metodología del Análisis de Ciclo de Vida contemplada dentro de las normas ISO 14040 e ISO

14044, el cual intenta identificar todas las corrientes de entrada y salida posibles que se desarrollan durante un proceso determinado, empezando desde la producción de la materia prima hasta la disposición final de los desechos generados a lo largo de todo el proceso. La enorme diferencia en los resultados finales se debe fundamentalmente a que al utilizar el paradigma “de la cuna a la tumba” cada estudio incluye sólo algunas de las etapas del ciclo de vida del producto.

El nuevo enfoque “de la cuna a la cuna” que se propuso en este trabajo de grado permite superar ésta dificultad, dado que se cierran los ciclos de producto y se incluyen todas las etapas posibles durante el proceso.

Colombia debe realizar estudios que apunten a certificar sus biocombustibles con sellos verdes reconocidos internacionalmente y para conseguir este objetivo será necesario aplicar ACV como se especifica en las normas ISO 14040 y 14044 pero a un ciclo que tenga un enfoque “de la cuna a la cuna”, ya que solo con este nuevo paradigma se logran evaluaciones objetivas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Métodos de Evaluación de Impacto Ambiental.

1.1.1 Normas ISO 14000-2006.

Estas normas forman parte de un sistema de gestión medioambiental. Presentan un enfoque que se puede aplicar para obtener, como resultado final, la conservación y protección del ambiente en su perspectiva más amplia. Es decir, permite mantener y promover la estabilidad de los recursos productivos que se utilizan y del medio que los rodea.

Además, al ser las normas ISO 14000 aceptadas internacionalmente como un sistema de gestión ambiental que se enfoca en la mejora continua, y dado que son consistentes con elementos claves de muchos modelos de gestión ambiental, es necesario actuar conforme a ellas para incorporarse a los mercados internacionales.

1.1.2 Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

1.1.2.1 Definición.

Por Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se entiende "el proceso objetivo dirigido hacia la evaluación de cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad. Para ello será necesario identificar y cuantificar el uso de materias, energía y vertidos al entorno; para determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente, y para llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental". (Fullana, Puig, 1997).

Según lo define la SETAC (Sociedad de Química y Toxicología ambiental) el Análisis del Ciclo de Vida (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 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”*. (SETAC, 1992).

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.

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.

1.1.2.2 Etapas de desarrollo en el Análisis del Ciclo de Vida.

De acuerdo a la normativa ISO 14040, (2006) los estudios del ACV comprenden las siguientes fases que se presentan en la figura 1. como se muestra a continuación.

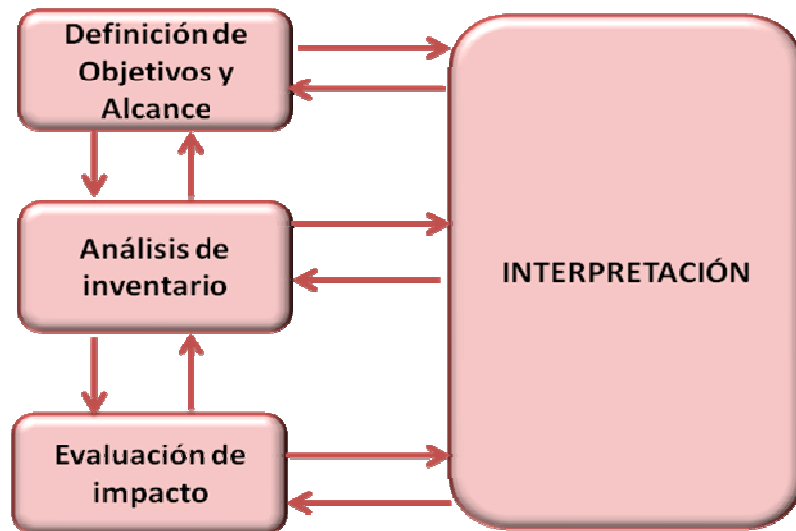


Figura 1. Metodología Análisis de Ciclo de Vida. Fuente UNE EN ISO 14040:2006

✓ *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.

✓ *Interpretación del ciclo de vida.*

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

2. MARCO METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA.

La metodología se realizó de acuerdo a la normatividad propuesta en las normas internacionales ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006) para el análisis de ciclo de vida de biodiésel a partir de aceite de palma utilizando el modelo “de la cuna a la cuna”.

2.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO:

La intención de esta investigación fue esquematizar y compilar un inventario de las entradas y salidas ya sean de materia, energía e importancia ambiental, que son relevantes dentro del sistema de producción de biodiésel a partir de aceite de palma, evaluando y cuantificando las cargas potenciales y analizando su viabilidad ambiental haciendo uso de la herramienta del análisis del ciclo de vida con el paradigma de la cuna a la cuna ; en donde se incluyen las etapas de los cultivos, procesos industriales (Extracción, Transesterificación, etc.), distribución y uso del biodiésel en una mezcla B10 (meta del gobierno colombiano para el año 2020) y disposición de residuos.

Los resultados servirán como herramienta en la toma de decisiones de las distintas políticas y medidas relacionadas con la promoción de los combustibles alternativos para el transporte.

Con este trabajo se intenta contribuir en los estudios que se realizan actualmente como parte del desarrollo de una tesis doctoral en la Universidad Industrial de Santander, y ser un punto de partida para el desarrollo de los análisis de ciclo de vida utilizando esta metodología, dejando esta información pública mediante el presente texto.

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

2.2 ALCANCE DEL ESTUDIO:

2.2.1 Sistema de producto bajo estudio.

Inicialmente el análisis del ciclo de vida parte desde la preparación del terreno para las plantaciones de palma africana, pasando por el pre cultivo, el cultivo, la cosecha de la palma, la extracción de los frutos, la transesterificación del aceite, la distribución, la combustión y el ciclo del carbono que se cierra con la reincorporación de gases (CO₂) a los cultivos vía fotosíntesis (de esta manera nuestro análisis es “de la cuna a la cuna”)

2.2.2 Función del sistema del producto.

El uso del producto final es ser utilizado en una mezcla B10 con diésel fósil para ser consumido como combustible sin necesidad de alterar los motores de los automóviles.

2.2.3 Unidad Funcional.

Debido a que este trabajo hace parte del desarrollo de una tesis doctoral en la Universidad Industrial de Santander, se preestableció que la unidad funcional sea la capacidad de producción de una planta de biodiésel que para este sistema fue de 80.000 ton/año.

2.2.4 Límites del sistema.

Límites Geográficos.

Todos los datos de precultivo, cultivo de palma y de la planta de extracción de aceite fueron tomados de la región palmera de Puerto Wilches, en cuanto a la planta transesterificadora se simuló y se estableció que esta se encuentra

contigua a la planta de extracción. La distribución del biodiésel será en Bogotá y para el acopio de algunas materias primas serán incluidos algunos puertos del país. Por lo tanto el límite geográfico es Colombia.

Límites Temporales.

Debido a que este proyecto será comparado con otros ACV de diferentes cultivos oleaginosos ubicados en diferentes regiones del país, se ha preestablecido un horizonte temporal de 60 años para el ACV de biodiésel a partir de aceite de palma.

Límites para el proceso.

En los cálculos de ACV por lo general, la producción industrial de bienes de capital (Ej. Maquinarias, infraestructuras y construcciones) son normalmente dejados de lado por tener una vida útil demasiado larga para distribuir el desorden ambiental que producen en una gran cantidad de productos.

Para el manejo de materias primas utilizadas dentro del proceso solo se tuvo en cuenta el impacto producido por su transporte desde los puertos del país o ciudades proveedoras, debido a que el objeto de esta investigación es aplicar el ACV únicamente a la producción de biodiésel a partir de aceite de palma, no se tuvo en cuenta las cargas ambientales causadas por la producción de estos insumos y se les estableció una cuna y una tumba para no incluir datos que cambien el sentido de este estudio.

2.2.5 Procedimientos de asignación.

Debido a que en las etapas: extracción de aceite de palma y transesterificación del aceite, se obtienen varios productos diferentes (coproductos) se hace necesaria una regla de asignación de tal manera que distribuya los flujos de entrada o de salida del proceso entre el sistema de producto y el coproducto. Para ello se utilizó el método de asignación másica la cual consistió en representar las fracciones que

hay en cada coproducto en el flujo total de salida del sistema. Para esto se tuvo en cuenta la metodología propuesta por la norma ISO 14040.

2.2.6 Metodología de la evaluación del impacto de ciclo de vida y tipos de impacto.

Las categorías de impacto que se evalúan en este estudio se clasifican en: cambio climático, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos, efectos respiratorios y energía no renovable, las cuales se estimaron a partir de la metodología que propone Anton (2004).

2.2.7 Requisitos relativos a los datos.

En lo posible los datos han sido recogidos de las instalaciones productivas vinculadas a los procesos. Se seleccionaron los procesos cuya contribución a los flujos de masa y energía sean importantes y cuyas emisiones sean relevantes para el medio ambiente. Estos procesos son los incluidos en la producción agrícola de la palma, los procesos que se desarrollan en la extracción del aceite, en la transformación del aceite de palma a biodiésel, y los procesos en la etapa de distribución y combustión de los combustibles en los motores.

En las etapas donde algunos datos primarios son indeterminados, se ha tenido que apelar a datos de fuentes ya publicadas. De igual forma algunos datos reales tomados de las etapas han sido corroborados con publicaciones de estudios en procesos similares a los de este análisis.

2.2.8 Suposiciones.

Para el desarrollo de este estudio se considero la existencia de una planta de biodiésel en la ciudad de Puerto Wilches, la cual obtendría sus insumos principales de la misma zona.

2.2.9 Requisitos de calidad de los datos.

Los requisitos de calidad de los datos recogidos han sido los siguientes:

Ámbito temporal de los datos. La recolección de los datos fue realizada en el año 2008 aunque se debe tener en cuenta que los datos de las fuentes son de años anteriores los cuales no exceden los 5 años de antigüedad.

Ámbito geográfico de los datos. Los datos recogidos deben referirse preferiblemente a las zonas donde tienen lugar los procesos. Es por eso que se obtuvieron los datos reales de plantaciones y de algunas plantas extractoras de la región de Puerto Wilches

Ámbito tecnológico. Esta investigación fue manejada considerando la tecnología empleada actualmente en los viveros, plantaciones, extractoras y la futura planta de biodiésel.

Básicamente éstas son las generalidades que se deben considerar y describir para definir el alcance del estudio de un ACV. Cabe resaltar que existen otras de menor importancia como el tipo de revisión crítica y las comparaciones entre sistemas que no serán tenidos en cuenta para este ACV.

3. ANÁLISIS DE INVENTARIO

3.1 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE LA ETAPA DE ADECUACIÓN Y AGRÍCOLA.

La Figura 2 muestra un bosquejo de las acciones contempladas en los ciclos agrícolas estudiados. Dentro de los límites del sistema se incluyeron todas las labores agrícolas que se realizan en la adecuación y en el cultivo, así como los procesos de producción de Diésel, como también el transporte de los insumos agrícolas: diésel, insecticidas, fertilizantes, cal, raquis y semilla.

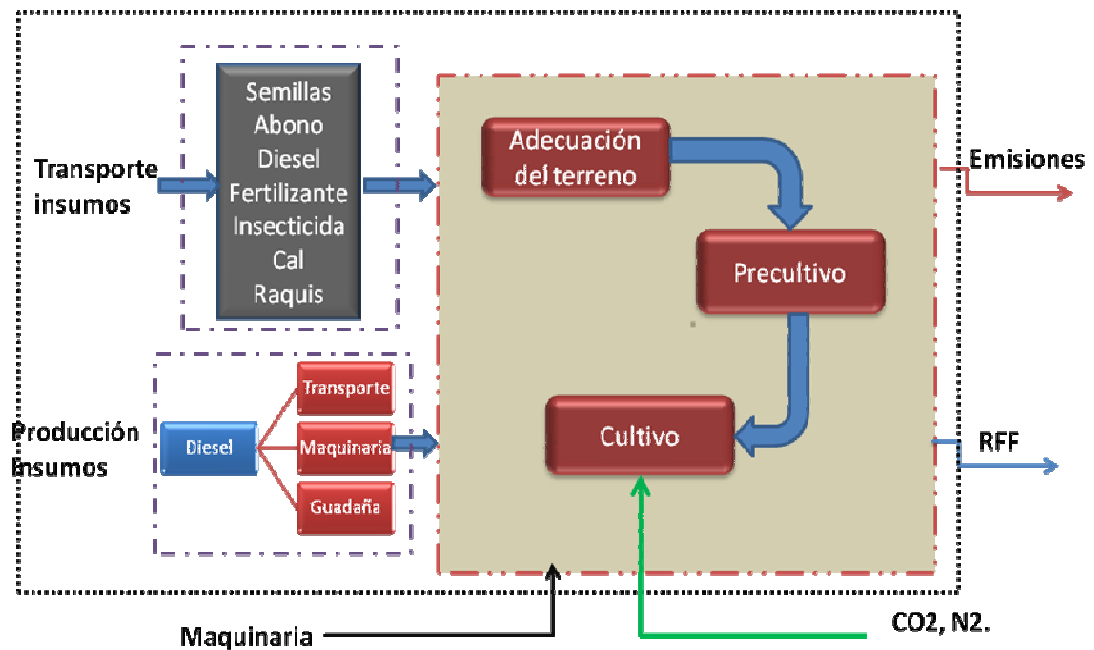


Fig. 2 Diagrama de flujo Etapa de Adecuación y Agro

3.1.1 Límites, suposiciones y consideraciones: Debido a que en esta etapa se pueden generar una gran cantidad de variables en la selección del escenario a evaluar, se hizo necesario especificarlo de la siguiente manera:

La Región objeto de estudio fué Puerto Wilches y allí se realizaron las actividades agrícolas, estableciendo inicialmente que el terreno donde se levantó el cultivo era un suelo franco arcilloso así como también era árido con baja biomasa superficial.

Se estableció que la etapa de crecimiento de la palma durara 5 años, en donde se abarcaron las fases de previvero, vivero y plantación, y que el periodo productivo de la palma fuera de 25 años. Este ciclo se repitió 2 veces para cumplir con el límite temporal propuesto inicialmente.

Para asegurar un alto rendimiento y calidad de aceite en el cultivo de la palma, se utilizó en su mayoría semillas tipo IRHO traídas desde Costa Rica, pero solo se tuvo en cuenta las emisiones producidas por su transporte desde el puerto de Buenaventura en donde recorrió una distancia de 962 Km hasta Puerto Wilches.

En la etapa, tanto de crecimiento como productiva de la palma, la distribución de herbicidas, insecticidas y fertilizantes fue manual. Ya en la etapa productiva solo se hizo uso de guadañadoras para el plateo de las palmas.

Se desprecio el uso de fungicidas básicamente por dos aspectos. El primero es que la palma tiene diferentes enfermedades y existe un fungicida para tratar cada una lo cual hace difícil inventariarlos. Además su uso no es frecuente y su impacto dentro del estudio según la literatura sería mínimo.

Para el suministro de materias primas, estas fueron trasladadas desde diferentes puntos del país hasta la región de Puerto Wilches. En el caso de los fertilizantes, los herbicidas y los fungicidas, se recorrieron 694 Km transportándolos en camión desde Cartagena. De igual forma el traslado en camión de la cal necesaria para la

plantación se efectuó desde la ciudad de Bucaramanga recorriendo una distancia de 135 Km.

Así mismo se considero que la distancia promedio entre los cultivos y la planta extractora fuera de 20 Km ya que se transporto el raquis desde la planta extractora para que fuese utilizado como fertilizante natural.

3.2 ANÁLISIS DE INVENTARIO EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA

La Figura 3 muestra un bosquejo de las acciones contempladas en el sistema de extracción estudiado. Dentro de los límites del sistema se incluyeron los procesos necesarios en cada etapa para llevar a cabo la extracción del aceite de palma. Los procesos de producción de diésel y energía, como también el transporte de las materias primas: diésel, Racimos de Frutos Frescos (RFF), fueron también considerados.

Asimismo, no se incluyeron en los límites del sistema el refinado del aceite, ya que se tuvo en cuenta en el proceso de transformación a biodiésel.

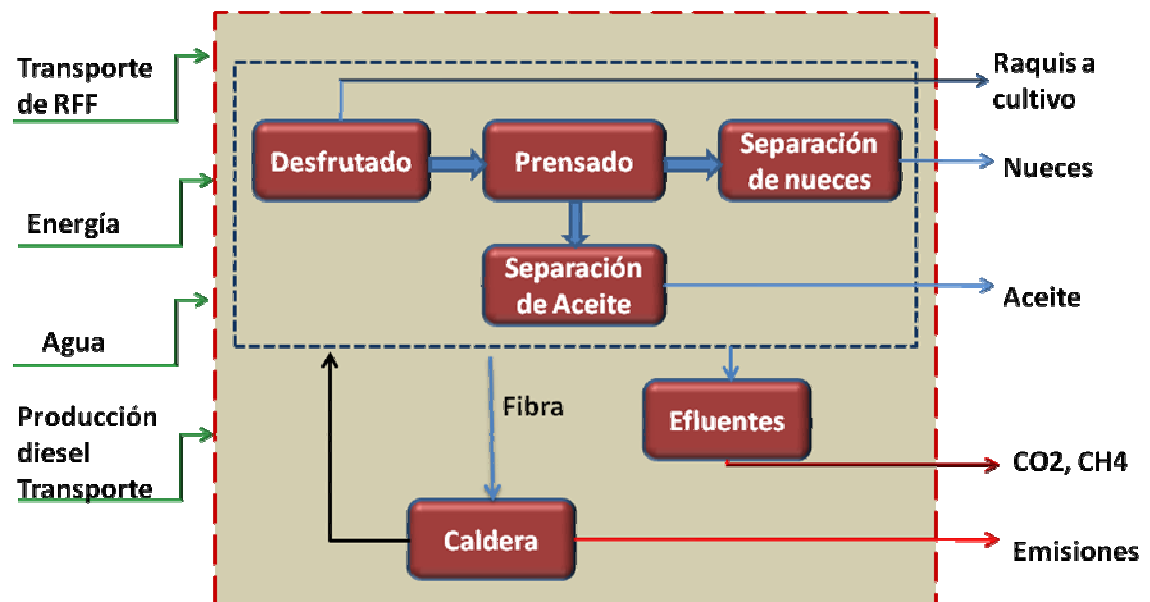


Fig. 3. Diagrama de flujo Etapa Extracción de Aceite de Palma.

3.2.1 Límites, suposiciones y consideraciones: Para esta etapa se consideró únicamente como mecanismo de extracción el prensado, ya que en Puerto Wilches, región en donde se desarrolló el estudio, las plantas extractoras existentes en su mayoría solo utilizan este proceso como método de extracción.

Así mismo gracias a los datos suministrados por las extractoras de la región, se pudo conocer la cantidad promedio real de agua requerida en las etapas de esterilización y digestión dentro del proceso de extracción, así como la cantidad promedio de efluentes que se producen.

Se calcularon las emisiones promedio de los gases de chimenea de la caldera en base a varios estudios isocinéticos realizados a varias plantas localizadas en Puerto Wilches.

Para la estimación de la energía requerida para el desarrollo del proceso de extracción, se recurrió a datos reales promedios suministrados por extractoras de la región.

La distancia que se manejó para el transporte de los Racimos de Frutos Frescos desde la plantación de palma hasta la planta extractora fue en un promedio de 20 Km y se consideró el traslado en camiones con capacidad de 15,5 Ton.

Para el suministro de combustible a la caldera se supuso que era alimentada con toda la fibra y cascara proveniente de la etapa de prensado (esta suposición es válida ya que en la práctica las extractoras utilizan este combustible para sus calderas).

3.2.2 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; de tal manera que sirva como parámetro para determinar las cargas ambientales producidas por cada coproducto en el momento que abandonan el sistema.

A partir de los datos obtenidos se elaboró la tabla 1 en donde se obtuvieron los siguientes factores de asignación.

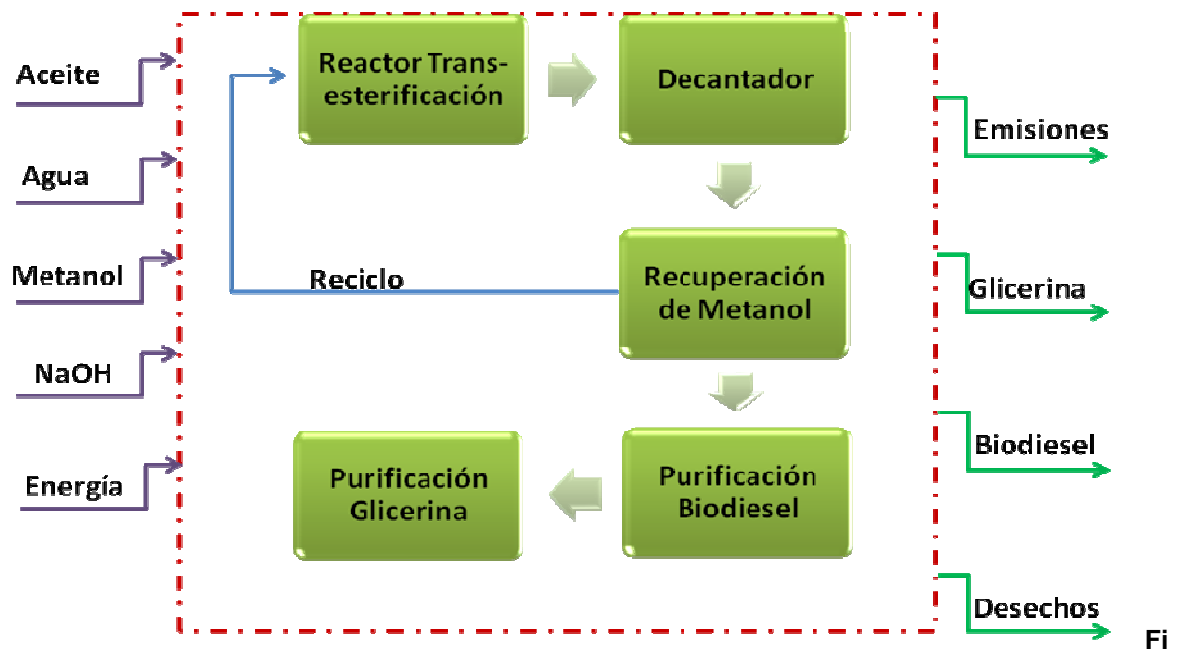
Co- Productos	Sustancia	%
	Aceite de palma	78.95
	Almendras	21.05
	<i>Total</i>	100.00

Tabla 1. Asignación másica en etapa de extracción.

3.3 ANÁLISIS DE INVENTARIO EN LA TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE.

En la figura 4 se muestra el esquema de las diferentes etapas y procesos que se estudiaron en la producción de biodiesel a partir de aceite de palma.

Dentro de los límites del sistema se incluyeron los procesos necesarios para llevar a cabo la transesterificación del aceite de palma. Las emisiones en los procesos de producción de energía, como también en el transporte de las materias primas: Metanol y NaOH, fueron considerados. La planta transesterificadora tiene una producción anual de 80.000 Ton de biodiesel.



g. 4 Diagrama de flujo Etapa Transesterificación de Aceite.

3.3.1 Limitaciones, suposiciones y consideraciones.

El proceso de transesterificación fue diseñado para mantener una producción de 80.000 Ton/año de biodiésel, ya que este trabajo hace parte del desarrollo de una tesis doctoral y será comparado con otros análisis de ciclo de vida de diferentes cultivos oleaginosos.

Debido a que al momento de realizar este estudio en Puerto Wilches no existían plantas de transformación de aceite de palma a biodiésel, se supuso que la planta debía ubicarse aledañosamente a las extractoras de aceite con el fin de no generar altas emisiones por transporte de materia prima.

La consecución de datos reales tales como energía, materia prima, agua, etc., demandada por las plantas transesterificadoras existentes en el país no fue posible. Por tal razón se hizo necesario utilizar la herramienta Hyprotech HYSYS 3.2 donde se simuló la planta de producción de biodiésel y así se encontraron los requerimientos del proceso.

Las materias primas tuvieron una cuna y una tumba y solo fueron contabilizadas las emisiones producidas por su transporte así como tampoco se contemplaron las emisiones en su producción. Entre los insumos utilizados esta el Metanol, transportado 625 Km en carro tanque con capacidad de 15000 L desde la ciudad de Cartagena; y el Hidróxido de Sodio el cual fue traído desde la ciudad de Bogotá recorriendo en camión con capacidad de 15 Ton una distancia de 465 Km.

3.3.2 Asignación Másica.

La tabla 2 muestra los factores de asignación másica que se tuvieron en cuenta durante el proceso de producción de biodiesel ya que en este proceso ocurren reacciones las cuales generaron varios subproductos entre los que se encontraron la glicerina y en una baja proporción algunos ácidos grasos.

Co- Productos	Sustancia	%
	Biodiesel	90.19
	Glicerina	9.81
	<i>Total</i>	<i>100.00</i>

Tabla 2. Asignación másica en Transesterificación

3.4 ANÁLISIS DE INVENTARIO EN LA DISTRIBUCIÓN Y USO DEL BIODIÉSEL

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

3.4.1 Limitaciones, suposiciones y consideraciones:

El biodiesel fue transportado en carro tanques con capacidades de 15000 L hasta la ciudad de Bogotá recorriendo una distancia de 465 Km.

Solo fue contabilizado el transporte del biodiesel mas no el del diesel pues se supuso que éste ya se encontraba en Bogotá, ciudad en 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, 2002, y el CIEMAT, 2006.

3.5 RESULTADOS

Se recopilaron todos los datos posibles utilizando la herramienta Microsoft Excel, en donde se calcularon las diferentes corrientes de entrada y salida que se requieren y producen durante la etapa agrícola, la etapa de extracción del aceite, la etapa de la transesterificación del aceite y la etapa de distribución y uso del biodiesel, necesarios para evaluar el impacto al medio ambiente durante el tiempo establecido para el ACV. La tabla 3 muestra los resultados encontrados.

	DESCRIPCIÓN	Etapa				TOTAL
		ADECUACION DEL TERRENO	EXTRACCIÓN	TRANSESTERIFICACIÓN	DISTRIBUCIÓN Y USO	
Emisiones en el Aire (Kg)	Hidrocarburos	1.03E+06	5.06E+04	1.19E+07	3.59E+08	3.72E+08
	CO	2.54E+06	1.78E+09	6.51E+05	1.16E+09	2.94E+09
	NO2	1.41E+07	1.69E+06	2.80E+06	1.97E+09	1.99E+09
	PM10	1.18E+05	4.55E+04	5.61E+05	2.95E+08	2.96E+08
	SO2	6.46E+05	5.17E+06	2.27E+07	7.63E+05	2.92E+07
	CH4	9.68E+04	1.15E+11	5.26E+06	1.59E+05	1.15E+11
	N2O	3.49E+06	8.57E+03	1.52E+04	9.92E+03	3.52E+06
	CO2	6.43E+08	3.36E+09	1.13E+09	1.59E+11	1.64E+11
	HCL	4.76E+02	4.51E+04	6.06E+04	3.39E+03	1.10E+05
	HF	3.79E+02	5.63E+03	7.66E+03	8.31E+02	1.45E+04
	NH3	2.49E+06	3.06E-01	4.05E-01	1.84E-02	2.49E+06
Emisiones en el Agua (Kg)	DBO5	9.855E+03	2.47E+04	5.82E+04	1.36E+05	2.29E+05
	DCO	8.339E+04	2.09E+05	4.93E+05	1.15E+06	1.94E+06
	Metales*	3.88E+02	9.97E+02	2.65E+03	5.35E+03	9.39E+03
	Amonia (como N)	1.441E+03	3.72E+03	8.65E+03	1.99E+04	3.37E+04
	Nitratos (NO3)	3.736E-01	7.14E+01	9.64E+01	5.16E+00	1.73E+02
Energía (MJ)	Energía Primaria	6.817E+08	1.36E+10	5.65E+10	9.41E+09	8.02E+10
	Energía Fossil	6.810E+08	1.35E+10	5.63E+10	9.40E+09	7.99E+10

* Sin especificar

Tabla 3. Resultados de Análisis de Inventario.

4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

4.1 Selección de categoría de impactos

Mediante el método del ACV fue posible valorar la composición y las cantidades de contaminantes generados y de recursos consumidos en términos de sus respectivos impactos al medio ambiente agrupándolos en diferentes categorías de impacto. La tabla 4 muestra las categorías evaluadas dentro de esta investigación.

		Indicador	Unidad de Referencia
Categoría	Cambio Climático	GWP	Kg-eq CO ₂
	Acidificación	AP	Kg-eq H ⁺
	Eutrofización	EP	Kg-eq PO ₄
	Formación de foto Oxidantes	POCP	Kg-eq Etileno
	Efectos Respiratorios	REP	Kg-eq PM
	Energía no Renovable	NREP	MJ

Tabla 4. Categorías de Impacto

4.2 Factores de caracterización. Clasificación

En esta fase se asignaron los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.

La siguiente tabla (Tabla 5) muestra el factor de caracterización usado para evaluar las diferentes categorías de impacto.

	Contaminante	GWP ₅₀₀	AP	EP	POCP	REP	NREP
Factor de caracterización GWP kg CO ₂ kg-1 para cambio climático	Dioxido de Carbono (CO ₂)	1					
	Metano (CH ₄)	7					
	Óxido de Nitrógeno (N ₂ O)	156					
	Monóxido de Carbono (CO)	1.57					
Factor de equivalencia, AP,g eq. H+ g-1 para categoría acidificación	Ácido clorhídrico (HCl)		0.0274				
	Ácido fluorhídrico (HF)		0.05				
	Amoníaco (NH ₃)		0.059				
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)		0.022				
	Óxidos de azufre (SO ₂)		0.0313				
Factor de equivalencia, EP,g eq. PO ₄ g-1 para categoría de eutrofización	Nitratos (NO ₃)			0.095			
	Nitrógeno			0.42			
	Amoníaco (NH ₃)			0.35			
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)			0.13			
	Demanda Química de Oxígeno			0.022			
	Óxido Nitroso (N ₂ O)			0.27			
Factor de equivalencia, POCP,g eq. etileno g-1 para categoría formación de oxidantes foto- químicos	Hidrocarburos				0.416		
	Metano				0.007		
Factor de equivalencia, kg eq. PM _{2,5} kg-1 para categoría efectos respiratorios	Monóxido de Carbono (CO)					0.00104	
	Óxidos de azufre (SO ₂)					0.078	
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)					0.12728	
	Amonio (NH ₄)					0.12142	
	Óxido Nitroso (N ₂ O)					0.19571	
	PM ₁₀					0.53571	
Factor de equivalencia, MJ energía primaria kg-1 para categoría energía no renovable	Petroleo Crudo						45.8
	Gas Natural						40.3

Tabla 5. Factor de caracterización. TEAM 1999, IPCC 2001

4.3 Asignación e interpretación de resultados del inventario a las categorías de impacto

La interpretación es la fase de un ACV en la que se combinaron los resultados de análisis del inventario con la evaluación de impacto. Permitted determinar la fase del ciclo de vida del producto en donde se generaron las principales cargas ambientales, y por tanto qué puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse. En los casos de comparación de distintos productos se podrá determinar cual presenta un mejor comportamiento ambiental.

Una vez clasificados los datos, se realizó la asignación de éstos para cada una de las categorías empleando los factores de equivalencia y la siguiente ecuación:

$$Ind. \text{ categoría impacto} = \sum_i m_i * (\text{factor de equivalencia})_i$$

donde m_i es la emisión en masa del recurso utilizado y $(\text{factor de equivalencia})_i$ es propio para cada recurso y categoría (Antón, 2004).

Con estos resultados fue posible obtener el perfil medio ambiental (Figura 5) demostrando que la etapa de uso y distribución es la que más influye en las categorías.

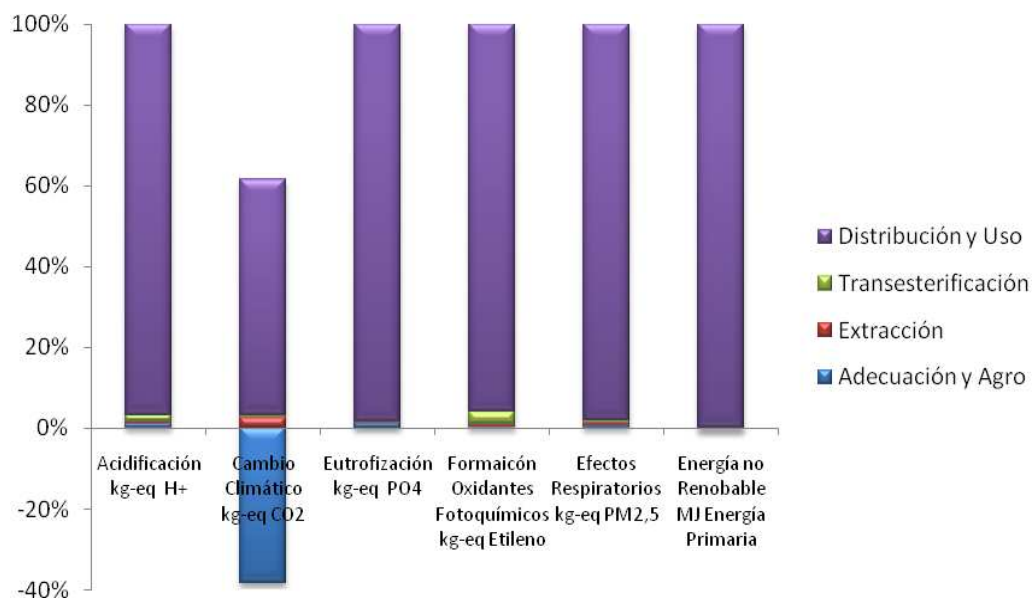


Figura 5. Perfil Medioambiental ACV Biodiesel a partir de Aceite de Palma.

También se calculó el porcentaje de participación en las etapas de cada una de las emisiones consideradas por la producción del biodiesel a partir de aceite de palma (Figura 6).

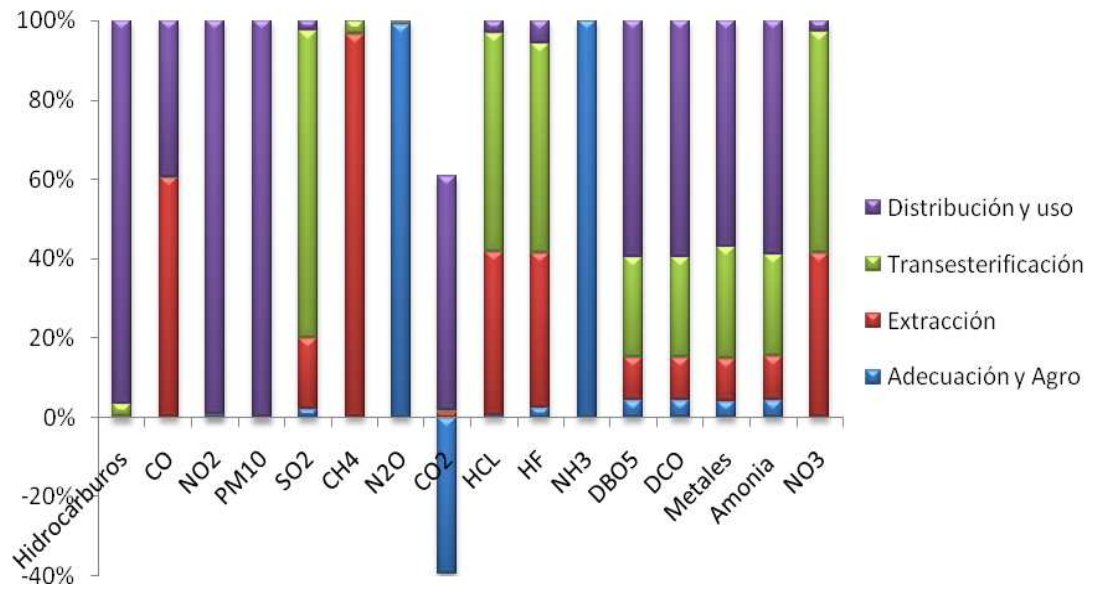


Figura 6. Porcentaje de Emisiones Contaminantes por Etapa.

Los indicadores de categorías de impacto ambiental también fueron evaluados (Anexo E), mostrando la influencia que tiene cada etapa en cada categoría, en donde se analizan los puntos clave a los cuales se les pueda desarrollar algún tipo de acción en pro de mejorar el proceso enfatizándose en el aspecto ambiental.

CONCLUSIONES

- ✓ El uso del paradigma de la cuna a la cuna permitió evaluar los ciclos del C y N y consecuentemente obtener el impacto ambiental real que genera la producción de biodiesel.
- ✓ El estudio realizado supone una aproximación ambiental del proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de palma. Hay todavía datos de calidad insuficiente para realizar afirmaciones categóricas.
- ✓ La mayor parte del impacto generado por la producción de biodiesel a partir de aceite de palma, se presenta evidentemente en la distribución y uso, pero a diferencia de lo que comúnmente se conoce en cuanto a las emisiones, se demostró que el proceso de extracción también contribuye de manera sustancial, pues es allí donde se emite la mayor cantidad de CH₄, gas responsable en un alto porcentaje del impacto en el cambio climático. Es por eso que se hace necesario un proceso de recolección de gases metano con el fin de utilizarlo como subproducto del sistema y no como una emisión.
- ✓ Hysys 3.2 como herramienta de simulación es de gran relevancia, debido a que ante la escasez de información referente a la transesterificación allí es posible no solo simular el proceso sino encontrar datos puntuales de algunos compuestos que no están totalmente explícitos en la literatura, como los puntos críticos.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda utilizar los poliductos en un futuro para la distribución del biocombustible hacia las diferentes regiones del país pues esto reduce el gasto energético y las emisiones por el transporte.
- ✓ También se recomienda en lo posible utilizar datos reales y no datos simulados en el proceso de transesterificación para obtener un mejor y más acertado resultado.
- ✓ Mejorar los límites del sistema y sustituir paulatinamente algunos datos de la bibliografía por datos suministrados por los proveedores.
- ✓ Es trascendente mejorar el manejo de los fertilizantes a base de nitrogenados para disminuir de manera significativa el impacto que produce en la eutrofización y acidificación de las masas de agua y de los suelos.

BIBLIOGRAFÍA.

ALFARO, MARCOS (2006). "Proceso de producción del aceite de palma". Ministerio de Agricultura. San Jose. Costa Rica.

ALPTEKIN ERTAN, CANAKCI MUSTAFA. (2008): "Determination of the density and the viscosities of biodiesel– diesel fuel blends". Kocaeli University, Kocaeli, Turquia. Pag 2, 3.

ANTÓN VALLEJO, M^o ASUNCIÓN. (2004) "Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo".

ARAGÓN CORREA (1998). "Empresa y medio ambiente. Gestión estratégica de las oportunidades medioambientales", Comares, Granada.

BENJUMEA PEDRO, AGUDELO JOHN, AGUDELO ANDRÉS. (2007): "Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends". Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia. Pag 3,4.

BERNAL, FERNANDO., (2001) "El cultivo de la palma de aceite y su beneficio, Guía general para el nuevo palmicultor". FEDEPALMA. Bogotá.

CARRARETTO C., MACOR A., MIRANDOLA A., STOPPATO A., TONON S., (2004): "Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations". University of Padova, Padova, Italia. Pag 1, 5.

CHRISTIANSEN K.: (1997). "Simplifying LCA: Just a cut? LCA screening and streamlining working group". Final report SETAC-Europe.

CIEMAT., (2005) "Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte". Ministerio del Medio Ambiente. España.

EEVERA T., RAJENDRAN K., SARADHA S., (2008). Biodiesel Production process optimization and characterization to assess the suitability of the product for varied environmental conditions. Periyar University. India.

FANGRUI MA, MILFORD A. HANNA. (1999): "Biodiesel production: a review". University of Nebraska, Lincoln, NE, USA. Pags 2-3.

FULLANA P., PUIG R. (1997) "Análisis de Ciclo de Vida", Ed. Rubes, Barcelona.

GARCÍA, CARLOS M., (2007). "Simulación de una planta de producción y purificación de Biodiesel a partir de aceite de palma y etanol usando el simulador comercial Hysys Planta 3.2." Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

GERHARD KNOTHE, ROBERT O. DUNN AND MARVIN O. BAGBY., "Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels"., Oil Chemical Research, National Center for Agricultural Utilization Research, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture

HENN, C. L. Y FAVA, J. A. (1994): "Life cycle analysis and resource management", en Kolluru, R. V., ed. *Environmental Strategies Handbook. A guide to effective policies & practices*, McGraw Hill, New York y otros, págs. 541-642.

IGLESIAS, DANIEL H. (2005): "Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de productos y su aplicación en el sistema agroalimentario" Contribuciones a la Economía. Argentina.

KENGA P.S., BASRIA M., ZAKARIAA M.R.S. (2008): "Newly synthesized palm esters for cosmetics industry". University Putra Malaysia. Malasia. Pag 3.

KRAWCZYK, T., (1996): "Biodiesel: alternative fuel makes inroads but hurdles remain", INFORM 7, 801–829.

MITTELBACH, M., REMSCHIMDT. C., (2004) "Biodiesel the comprehensive handbook". Primera edición. Editorial Fedepalma, , pag. 8.

NARAYANAN, D., ZHANG, Y. AND MANNAN M. S., (2007) "Engineering for sustainable development (esd) in bio-diesel production".

ORTS, RAMÓN., GÓMEZ-SENENT, M. ELISEO, PERE FULLANA PALMER. "Análisis de Ciclo de Vida, herramienta para el Diseño Ambiental. Aplicación práctica en la industria conservera". Randa Group. Barcelona

PÉREZ BAYER JUAN F, BENJUMEA H. PEDRO N., AGUDELO S. JOHN R., (2004): "Pruebas cortas en ruta en un vehículo tipo microbus con biodiesel de aceite de palma colombiano". Scientia et Technica. Pag 163.

RAYGADA, RUPERTO Z. (2005): "Manual técnico para el cultivo de la palma Aceitera". PRODATU, DEVIDA. Lima, Peru.

RIVEROS, LINA., MOLANO, MIGUEL A., (2006): "Transesterificación del aceite de palma con metanol por medio de una catálisis heterogénea empleando un catalizador ácido". Universidad de los Andes. Revista de Ingeniería No 24.

SÁNCHEZ, LUIS ENRIQUE., (2000): "Evaluación de Impacto Ambiental". Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica de la Universidad de São Paulo., Il curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental. Sao Paulo. Brasil.

SETAC., (1993). "Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"", Washington D.C.

SETAC., (1992) "Life-Cycle Assessment, Society of Environmental Toxicology and Chemistry", Brussels, Belgium.

SIEW, W L y NG, W L. (2000): "Differential scanning thermograms of palm oil triglycerides in the presence of diglycerides". Kuala Lumpur, Malaysia. Journal of Oil Palm Research Vol. 12 No. 1, pag. 1-7

THIAM LENG CHEW, SUBHASH BHATIA. (2008): "Catalytic Process towards the production of biofuels in a palm oil and oil palm biomass-based biorefinery". Malasia. Pag 3.

UNE-EN ISO 14040. (2006): "Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y estructura". AENOR. Madrid.

UNE-EN ISO 14044. (2006): "Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y estructura". AENOR. Madrid.

VAN GERPEN JON (2005): "Biodiesel processing and production". University of Idaho, Moscow, USA. Pag 6.

VILLAMIZAR, ÁLVARO., SOLANO, VÍCTOR., (1966): "Planta Extractora de Aceite de Palma", Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

WICKE BIRKA. (2008): "Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications". Utrecht University. Holanda.

WENZEL H. (1998): "Application dependency of LCA methodology: Key Variables and Their mode of influencing the Meted. Int. J. LCA". University of Denmark. Lyngby, Denmark.

YACOB SHAHRAKBAH, MOHD ALI HASSAN, YOSHIHITO SHIRAI. (2004): "Baseline study of methane emission from open digesting tanks of palm oil mill effluent treatment". Kuala Lumpur. Malasia.

ZHANG, Y. (2003): "Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment". En: Bioresource technology. New york. N°89; p.1-16.

ZAPATA, Carlos David *et al.* Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos. En: Dyna, Vol 74, Nro.151 (mar 2007); p.71-82.

PAGINAS WEB

1. <http://www.eumed.net/ce/>
2. <http://www.femisca.org.mx/publicaciones/XVcongreso/XVCNIS076.pdf>
3. [http://www.impivadisseny.es/disseny/index.php?option=com_content&task=view&id=120&Itemid=80.](http://www.impivadisseny.es/disseny/index.php?option=com_content&task=view&id=120&Itemid=80)
4. http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UAB/AVAILABLE/TDX-1222103-154811/lmc1de2.pdf
5. <http://www.unizar.es/aeipro/finder/MEDIO%20AMBIENTE/CC23.htm>
6. <http://www.unizar.es/aeipro/finder/MEDIO%20AMBIENTE/CC23.htm>
7. <http://www.usc.es/biogrup/presentacv.htm>
8. <http://www.viarural.org/524acvG.htm>
9. http://www.ecopetrol.com.co/especiales/CartaPetroleraDic06/rev_empresa.htm
10. <http://fichas.infojardin.com/palmeras/elaeis-guineensis-palmera-aceite-palma-aceitera-africana.htm>

Anexo A. ANTECEDENTES DE LA METODOLOGÍA.

Evaluación de Impacto Ambiental.

La evaluación de impacto ambiental (EIA) es un instrumento de política ambiental adoptado actualmente en numerosas jurisdicciones (países, regiones o gobiernos locales, así como por organizaciones internacionales como bancos de desarrollo y entidades privadas). Se reconoce en tratados internacionales como un mecanismo potencialmente muy eficaz de prevención de los daños ambientales y de promoción del desarrollo sustentable. El principio de actuar de forma preventiva en el campo ambiental, al ser incorporado a las legislaciones nacionales, modificó radicalmente los procesos, tanto públicos como privados, de toma de decisiones entonces existentes. Si bien la idea no es nada reciente, su formulación ocurrió por primera vez en los Estados Unidos, a través de una ley aprobada en 1969. A partir de entonces, la EIA se diseminó alcanzando hoy una difusión mundial. (SANCHEZ, L., 2000)

Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

Se puede considerar que el origen del ACV recae en la crisis energética que se generó en las décadas de los sesentas y setentas del siglo pasado cuya consecuencia sobre las industrias fue el surgimiento de un interés por la búsqueda de eficiencia en la elaboración de sus productos. De esta forma, el concepto de ciclo de vida del producto nació. El primer estudio considerado como un ACV es un proyecto auspiciado por The Coca-Cola Company al Midwest Research Institute en 1969, con el objetivo de comparar diferentes posibilidades de empaques desde el punto de vista de emisiones de gases y el consumo de

energía y materiales. Este estudio fue llamado REPA (Resource and Environmental Profile Analysis).

Más estudios como el descrito funcionaron durante los setentas, pero a finales de estos y hasta mediados de los ochentas el interés por estos análisis fue descendiendo probablemente debido a la mejora de la economía.

Desde mediados de los ochentas, sin embargo, el interés por el consumo de recursos y la minimización de las emisiones aumento de nuevo, así como también lo fue la práctica de inventarios del ciclo de vida (LCI). Al mismo tiempo diferentes instituciones desarrollaron métodos para la agregación de sustancias dentro de las “categorías de impacto”.

En los noventas el uso generalizado del ACV como una herramienta de soporte para el inicio de la toma de decisiones en el sector industrial y en el sector publico. En este sentido, la publicación de varias guías metodológicas de diferentes instituciones (U.S. Environmental Protection Agency; CML; SETAC; BUWAL) fue crucial. Estas instituciones también proveyeron una base de datos de información básica.

Normas y documentos técnicos ISO para el Análisis del ciclo de vida.

Norma	
UNE-EN-ISO 14040 (1998)	Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y estructura.
UNE-EN-ISO 14041 (1999)	Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida, Definición de objetivos y alcance y análisis de inventario.
UNE-EN-ISO 14042 (2001)	Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Evaluación de impacto del ciclo de vida.
UNE-EN-ISO 14043 (2001)	Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Interpretación del ciclo de vida.
ISO 14040:2006	Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y estructura.
ISO 14044:2006	Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Análisis de inventario.
Documentos técnicos	
ISO TR 14047 (2003)	Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Ejemplos de aplicación de la ISO 14042.
ISO TS 14048 (2002)	Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Normalización de datos e información para una evaluación del ciclo de vida.
ISO TR 14049 (2000)	Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Ejemplo de aplicación de la ISO 14041 para la definición de objetivos y alcance y análisis de inventario.

Anexo B. GENERALIDADES DE LA PALMA AFRICANA

El origen de la palma de aceite se ubica en las costas del golfo de Guinea en el África occidental. Desde ahí se expandió en forma natural a lo largo de las márgenes de los grandes ríos, según fue encontrando condiciones favorables de suelo y clima.

Su introducción a la América tropical se atribuye a los colonizadores y comerciantes de esclavos portugueses, quienes utilizaron los frutos de palma en los viajes trasatlánticos, en el siglo XVI, como parte de la dieta alimentaria a que estaban habituados los esclavos que traían de Brasil. Así se estableció la palma de aceite detrás de la línea costera, en la región de San Salvador, antigua capital de Brasil.

Florentino Claes introdujo la palma africana de aceite en Colombia, en 1932. Estas primeras palmas fueron sembradas con fines ornamentales en lugares públicos de algunos pueblos de la región amazónica y en la estación agrícola de Palmira, en el Valle del Cauca.

Botánicamente a la palma de aceite se la conoce como *Elaeis guineensis*, y es una planta monocotiledonea perteneciente al orden de las *palmales* y a la familia *palmaceae*. Es monoica, es decir, que en una misma planta se producen las inflorescencias masculinas y femeninas. La apariencia es la de un árbol esbelto, cuyo tallo llega a los 25 m. de altura y está coronado por hojas largas y arqueadas (BERNAL, 2005).

Condiciones climáticas que permiten un alto potencial de rendimiento de la Palma de Aceite.

Parámetro	Valor o rango ideal
Precipitación anual	2.000 a 2.500 mm
Precipitación mensual	Ningún mes inferior a 100 mm
Déficit de agua anual	Menos de 200 mm
Brillo solar	Más de 2.000 horas / año (más de 5,5 horas/día)
Temperatura media	22-31 oC
Humedad relativa	75 a 85%

Tabla B1. Condiciones climáticas ideales para palma aceitera. (RAYGADA, 2005).

Además de su alto rendimiento por unidad de superficie, la palma de aceite es importante por la gran variedad de productos que genera, los cuales se utilizan en la alimentación y la industria. Tanto el aceite de pulpa como el de almendra se emplean para producir margarina, manteca, aceite de mesa y de cocina, y jabones. El aceite de pulpa se usa en la fabricación de acero inoxidable, concentrados minerales, aditivos para lubricantes, crema para zapatos, tinta de imprenta, velas. Se usa también en la industria textil y de cuero, en la laminación de acero y aluminio, en la trefilación de metales y en la producción de ácidos grasos y vitamina A.

Anexo C. EXTRACCIÓN DEL FRUTO DE PALMA

El proceso de extracción se lleva a cabo en la región de Puerto Wilches, gracias a que allí se ubican algunas plantas extractoras fue posible adquirir datos reales correspondientes a esta parte del estudio. En la figura que se muestra a continuación se presentan las diferentes etapas que hacen parte del proceso de extracción con sus respectivas corrientes.

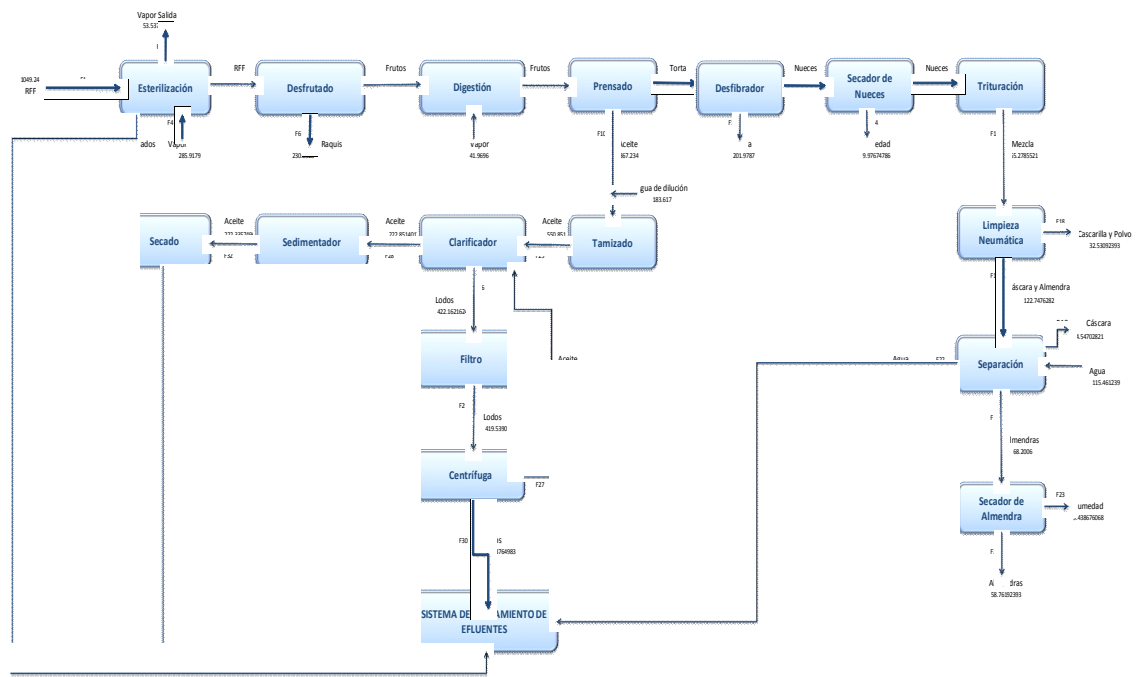


Figura C1. Proceso de Extracción de aceite del fruto de palma.

Recepción del fruto y esterilización: La esterilización es un paso esencial en el proceso de beneficio de la palma africana; de ella depende en gran parte, la cantidad de aceite recuperado: por lo tanto el fruto debe someterse lo más pronto

posible a este proceso a fin de aprovechar mas convenientemente las ventajas que de él se derivan.

La esterilización tiene por objeto:

- Inactivar las enzimas que causan el desdoblamiento del aceite y en consecuencia el incremento del porcentaje de ácidos grasos libres.
- Disminuir la resistencia de los tejidos de la pulpa para lograr el fácil rompimiento de las celdas de aceite durante los procesos de digestión y prensado.
- Acelerar el proceso de ablandamiento de la unión de los frutos con su soporte natural (raquis o tuza).
- Deshidratar parcialmente las almendras contenidas en las nueces, para facilitar su recuperación posterior.
- La coagulación de la materia nitrógena y mucilaga, para evitar que se formen emulaciones en el aceite crudo.

El proceso de esterilización se lleva a cabo sometiendo los racimos de fruto fresco de palma a la acción de vapor de agua en recipientes cilíndricos horizontales (autoclaves), en donde los factores principales son el tiempo de cocción (Aproximadamente 90 minutos) y la temperatura, dependiendo del tamaño de los racimos y del grado de madurez del racimo (ALFARO, 2006).

Desfrutado: Luego de haber esterilizado los racimos se procede a desprender los frutos de los racimos en un tambor rotatorio que consiste en un cilindro formado por dos barras acanaladas de pequeña sección aseguradas a un eje central colocadas a una distancia suficiente para permitir el paso de los frutos desprendidos, que luego serán enviados al digestor por medio de un elevador. Los racimos vacíos son llevados al campo para utilizarlos como abono orgánico. Se

produce el racimo vacío como desecho que representa un 23% sobre la fruta. (ALFARO, 2006)

Digestión o Malaxación: Es una etapa muy importante en el procedimiento de extracción de aceite. Las frutas sueltas y limpias pasan a un elevador conectado a un tornillo transportador que las distribuye a los malaxadores. En estas calderas verticales, se efectúa una malaxación muy eficaz debido a unos agitadores que giran en un eje vertical. El objeto de este procedimiento es el de calentar la masa uniforme y detenidamente y de romper las células aceitosas del pericarpio, para facilitar de esta manera la extracción del aceite. (VILLAMIZAR A. 1966).

Para este proceso se puede realizar la extracción por diferentes métodos siendo los más importantes los siguientes:

Extracción por Prensado: En esta etapa, en la actualidad la extracción por presión se lleva a cabo casi exclusivamente por prensas continuas en donde se somete la masa dentro de unas camisas perforadas, debido a la economía de sus instalaciones, pero no realiza una profunda extracción de las materias grasas contenidas en sus semillas.

Extracción con Solvente: Este sistema se caracteriza por su gran rendimiento, poco empleo de mano de obra y fuerza motriz. Permitiendo la recuperación del solvente utilizado. El disolvente usado es el hexano, siendo este el más inofensivo para la salud y el que produce aceite más puros.

Clarificación: El aceite rojo del mesocarpio que sale de la prensa es aceite crudo, con altos contenidos de impurezas y gran cantidad de material fibroso proveniente del mesocarpio, además contiene materias no oleaginosas que se deben eliminar para lograr una buena calidad de los aceites. Esto puede ser logrado sometiéndolo a una decantación estática y centrifugado.

Para este proceso fue necesario hacer una visita técnica a la región de pto Wilches y por supuesto a una de las plantas extractoras que se encuentran allí, de donde se obtuvo información (ver tabla C), con base en la cual se realizaron los cálculos para la obtención de 220,3404ton/día de aceite.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDADES	ESPECIFICACIONES
<i>Fruto procesado</i>	121000	ton/año	
<i>Consumo agua</i>	403	m ³ /día	
<i>Hollín en caldera</i>	3,5	ton/8h	
<i>Consumo E.eléctrica</i>	450	kwh	
<i>RFF procesado</i>	500	ton/18h	
<i>Aceite en RFF</i>	20	%	
<i>Efluentes, fibra, cascarilla y tusa en RFF</i>	71,7	%	
<i>Almendra en RFF</i>	8,3	%	
<i>Tiempo trabajo planta</i>	18	h/día	
<i>Distancia Pto W - Planta extractora</i>	6	km	
<i>D. Pto W - Bogotá</i>	462,2	km	
<i>D. Pto W - Medellín</i>	508,2	km	
<i>D. Pto W - Bucaramanga</i>	135	km	
<i>Distancia promedio Cultivo - Planta extractora</i>	15	km	
<i>Consumo Vapor</i>	555 - 667	RFF	Por cada 25 ton RFF

Tabla C. Datos planta visitada

Los datos obtenidos en el proceso de extracción se presentan en la tabla C1 a continuación:

EXTRACCIÓN			
<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valor</i>	<i>total acv</i>
Fruto procesado	Ton/día	692.4984	1.26E+07
Consumo agua en planta	m3/día	903.5122222	1.65E+07
Consumo agua en proceso	Ton/día	626.9657393	1.14E+07
Hollín en caldera	Ton/8h	7.846880342	3.58E+05
Almendra/RFF	%	8.83	
Aceite/RFF	%	21	
Consumo E. Eléctrica	kwh	1008.884615	3.31E+08
RFF procesado	Ton/día	1049.24	1.91E+07
Tiempo trabajo de la planta	h	18	
Aceite extraído	Ton/día	220.3404	4.02E+06
Torta	Ton/día	367.234	6.70E+06
Tusas o Raquis	Ton/día	230.8328	4.21E+06
Lodos	Ton/día	804.2610683	1.47E+07
Almendras	Ton/día	58.76192393	1.07E+06
Vapor	Ton/día	327.8875	5.98E+06

Tabla C1. Datos en Extracción.

La composición del aceite producto de la extracción se muestra a continuación:

COMPOSICIÓN DEL ACEITE DE PALMA		
GLICERIDO	Porcentaje en peso	Peso molecular
Laureina	0.1	638.38
Mistirina	1.0	723.4
Oleína	40.6	885.4
Palmitina	42.8	807.29
Linolenina	0.2	882.37
Linoleina	10.7	882.36
Estearina	4.6	891.45

Tabla C2. Composición Aceite de Palma.

Las principales características del aceite de palma extraído son las siguientes:

CARACTERÍSTICAS FISICO-QUÍMICAS		
CARACTERÍSTICA	MÁXIMO	MÍNIMO
Punto de fusión (K)	313.15	303.15
Densidad a 313.15/298.15 K	0.876	0.868
Índice de yodo	58	50
Materia insaponificable (%)	1	
Acidez como ácido palmítico (%)	5	
Índice de refracción a 313.15°C	1.4590	1.4560
Índice de saponificación	205	195
Humedad e impurezas (%)	1	
Poder calorífico (J/Kg.)	36,950	
Punto de chispa (K)	553.15	
Viscosidad absoluta a 313.15K (Kg./m*s)	0.0378	
a 343.15K (Kg/m*s)	0.0136	
Índice de cetano	35	

Tabla C3. Características del Aceite de Palma.

De la caldera se obtuvieron los siguientes datos:

CALDERA			
<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valor</i>	<i>Tipo</i>
Consumo combustible	Ton/h	3.362948718	
Tipo combustible			Fibra y cascarilla
Emisión	kg/h	50.27451396	
Area transversal chimenea	m ²	1.431	
Velocidad flujo a través chimenea	m ³ /h	33367.087	
Humedad absoluta	%	1.0141	
Velocidad prom gas chimenea	m/s	10.8416	
PM gas chimenea base seca	g/gmol	30.089	
PM gas chimenea base humeda	g/gmol	29.879	

Tabla C4. Datos Caldera.

Anexo D. TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE DE PALMA.

Debido a la falta de información real, pues en Colombia no existen aún plantas transesterificadoras y las que existen en el mundo hacen muy difícil el acceso a la información, se hizo necesario recurrir a la simulación del proceso de obtención de biodiesel, el cual se llevo a cabo mediante el uso del simulador Hyprotech Hysys 3.2. La Figura D1 muestra el proceso simulado.

La transesterificación o alcoholisis como también es llamada, consta básicamente de una primera etapa de reacción, en donde el reactor se alimenta con el aceite de palma refinado, metanol y NaOH como catalizador; de allí sale por el fondo la corriente más importante, la cual contiene el biodiesel y la glicerina; estos pasan a un separador, que a su vez se encarga de dividir este flujo, en uno por donde circula el biodiesel y otro la glicerina, resaltando que estos dos contienen impurezas; seguido de esto se procede a purificar el biodiesel y paralelamente la glicerina, la cual lleva consigo la mayor parte de metanol y NaOH, lo que hace necesario el uso de dos fases mas. La primera de ellas se usa para la recuperación del metanol que posteriormente se recicla para ser mezclarlo con metanol fresco que entra al proceso. Como segunda fase se tiene la obtención del NaOH, que al igual que el metanol se recircula para ingresar nuevamente al proceso

A continuación en la tabla D1 se presenta la lista de equipos utilizados en la transesterificación:

Equipo	Descripción	Equipo	Descripción
P-100	Bomba Aceite Refinado	E-105	Intercambiador de Calor (Calentador)
P-101	Bomba Mezcla Metanol y NaOH	Mix-100	Mezclador de Metanol fresco - Recirculado
P-102	Bomba Glicerina a Purificación		
P-103	Bomba Metanol Recirculado	Mix-101	Mezclador NaOH – Metanol
E-100	Intercambiador de Calor (Calentador)	V-100	Separador Metanol
E-101	Intercambiador de Calor (Calentador)	V-102	Separador Glicerina
E-102	Intercambiador de Calor (Enfriador)	CRV-100	Reactor
E-103	Intercambiador de Calor (Calentador)	X-100	Separador
E-104	Intercambiador de Calor (Calentador)	X-101	Separador Biodiesel

Tabla D1. Equipos Utilizados en Transesterificación.

Para la simulación se consideraron los dos triglicéridos de mayor porcentaje dentro del aceite de palma: tripalmitina y trioleina, los cuales se especificaron con una composición de 0.5222 y 0.4778 respectivamente (García Santander,1999). Esta composición se obtuvo con base en la información para el aceite de palma, despreciando los porcentajes de los otros triglicéridos y de algunos ácidos grasos.

El biodiesel obtenido fue una mezcla de los metilesteres correspondientes a cada uno de los triglicéridos, es decir el metil oleato y el metil palmitato.

Los compuestos correspondientes al aceite de palma y al biodiesel no se encuentran en la base de datos de Hysys 3.2. Por este motivo fue necesaria su creación a partir de propiedades utilizando la herramienta *Hypo Manager*. Los coeficientes de interacción binaria no disponibles en la librería del simulador se estimaron con el método UNIFAC (*Universal Functional Group Activity Coefficient*) para equilibrio líquido-líquido. (García Santander,1999).

El paquete de fluidos escogido para la simulación fue el modelo de actividad NRTL (*Non Random Two Liquids*), ya que se tienen compuestos altamente polares como el metanol y la glicerina. (Zapata et al. 2006)

Le relación molar alcohol-aceite empleada en el proceso fue de 6:1 respectivamente, por los argumentos expuestos anteriormente en la teoría. La eficiencia de la reacción fue del 99%. En las bombas se tomó una caída de presión de 50kPa.

Las condiciones de operación de las corrientes de proceso se presentan en la siguiente tabla:

Corriente	Metanol	Metanol Purificado	Aceite	Aceite Reactor	Mezcla a Rxn	Producto	NaOH	Biodiesel	Glicerina
T (°C)	25	130	25	60	60	60	25	60	320
P (kPa)	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	31.3	101.3	101.3	51.32
Flujo Molar (kgmole/h)	59.58	6.68	11.04	11.04	68.58	61.16	2.312	32.8	12.76
Flujo Másico (kg/h)	1909	214.5	9309	9309	2216	10930	92.47	9260	1035

Las condiciones de operación estuvieron sujetas a las restricciones de descomposición térmica de los compuestos. Zhang et al. reporta una temperatura de 250°C para el biodiesel. Para la glicerina la mayor temperatura que se consideró fue de 320°C debido a que su temperatura de ebullición es de 288.85°C según lo reporta la base de datos de Hysys 3.2 y esto se realizó para separarla del NaOH, cuya temperatura de ebullición es de 388.26°C .

Las composiciones de las corrientes del proceso se presentan a continuación:

Fracción Másica	Metanol	Metanol Purificado	Aceite	Aceite Reactor	Mezcla a rxn	Producto	NaOH	Biodiesel	Glicerina
Trioleina	0	0	0.4778	0.4778	0	0.004068	0	0	0
Tripalmitina	0	0	0.5222	0.5222	0	0.004446	0	0	0
Metanol	1	0.996419	0	0	0.957929	0.043949	0	0	0.071975
NaOH	0	0	0	0	0.041724	0.008458	1	0	0
Metil Oleato	0	0	0	0	0	0.404565	0	0.477693	0
Metil Palmitato	0	0	0	0	0	0.442349	0	0.522307	0
Glicerina	0	0.003581	0	0	0.000347	0.092165	0	0	0.928025

Anexo E. OTROS RESULTADOS DE LA INTERPRETACIÓN DEL INVENTARIO

Tabla E1. Resultados Evaluación de Impacto.

Categoría		ETAPA				Total
		Adecuación y Agro	Extracción	Transesterificación	Distribución y Uso	
Acidificación kg-eq H+	SO2	2.02E+04	1.62E+05	7.08E+05	2.38E+04	9.14E+05
	NO2	3.10E+05	3.72E+04	6.16E+04	4.34E+07	4.38E+07
	HCl	1.30E+01	1.24E+03	1.66E+03	9.29E+01	3.00E+03
	HF	1.90E+01	2.82E+02	3.83E+02	4.15E+01	7.25E+02
	NH3	1.47E+05	1.81E-02	2.39E-02	1.09E-03	1.47E+05
	Total	4.78E+05	2.00E+05	7.72E+05	4.34E+07	4.48E+07
Cambio Climático kg-eq CO2	CO2	-1.05E+11	3.36E+09	1.13E+09	1.59E+11	5.78E+10
	CH4	6.78E+05	1.04E+09	3.68E+07	1.12E+06	1.08E+09
	N2O	5.44E+08	1.34E+06	2.37E+06	1.55E+06	5.50E+08
	CO	3.99E+06	2.79E+09	1.02E+06	1.82E+09	4.62E+09
	Total	-1.05E+11	7.19E+09	1.17E+09	1.61E+11	6.41E+10
Eutrofización kg-eq PO4	NO3	3.55E-02	6.79E+00	9.16E+00	4.90E-01	1.65E+01
	N	6.05E+02	1.56E+03	3.63E+03	8.35E+03	1.42E+04
	NH3	8.73E+05	1.07E-01	1.42E-01	6.46E-03	8.73E+05
	NO2	1.83E+06	2.20E+05	3.64E+05	2.56E+08	2.59E+08
	DCO	1.83E+03	4.60E+03	1.08E+04	2.53E+04	4.26E+04
	N2O	9.42E+05	2.31E+03	4.11E+03	2.68E+03	9.51E+05
	Total	3.65E+06	2.28E+05	3.83E+05	2.56E+08	2.61E+08
Formación Oxidantes Fotoquímicos kg-eq Etileno	Hidrocarburos	4.28E+05	2.10E+04	4.96E+06	1.49E+08	1.55E+08
	Metano	6.78E+02	1.04E+06	3.68E+04	1.12E+03	1.08E+06
	Total	4.29E+05	1.06E+06	5.00E+06	1.49E+08	1.56E+08
Efectos Respiratorios kg-eq PM2,5	CO	2.65E+03	1.86E+06	6.79E+02	1.21E+06	3.07E+06
	SO2	5.04E+04	4.03E+05	1.77E+06	5.95E+04	2.28E+06
	NO2	1.79E+06	2.15E+05	3.57E+05	2.51E+08	2.53E+08
	NH4	2.25E+02	5.80E+02	1.35E+03	3.10E+03	5.26E+03
	N2O	6.83E+05	1.68E+03	2.98E+03	1.94E+03	6.90E+05
	PM10	6.33E+04	2.44E+04	3.01E+05	1.58E+08	1.59E+08
	Total	2.59E+06	2.50E+06	2.43E+06	4.10E+08	4.18E+08
Energía no Renovable MJ Energía Primaria	Crude Oil	4.95E+09	1.49E+09	3.57E+09	9.918E+12	9.93E+12
	Gas Natural	0	0	5.221E+03	0	
	Total	4.95E+09	1.49E+09	3.57E+09	9.918E+12	9.93E+12

Figura E1. Evaluación categoría de impacto: Acidificación.

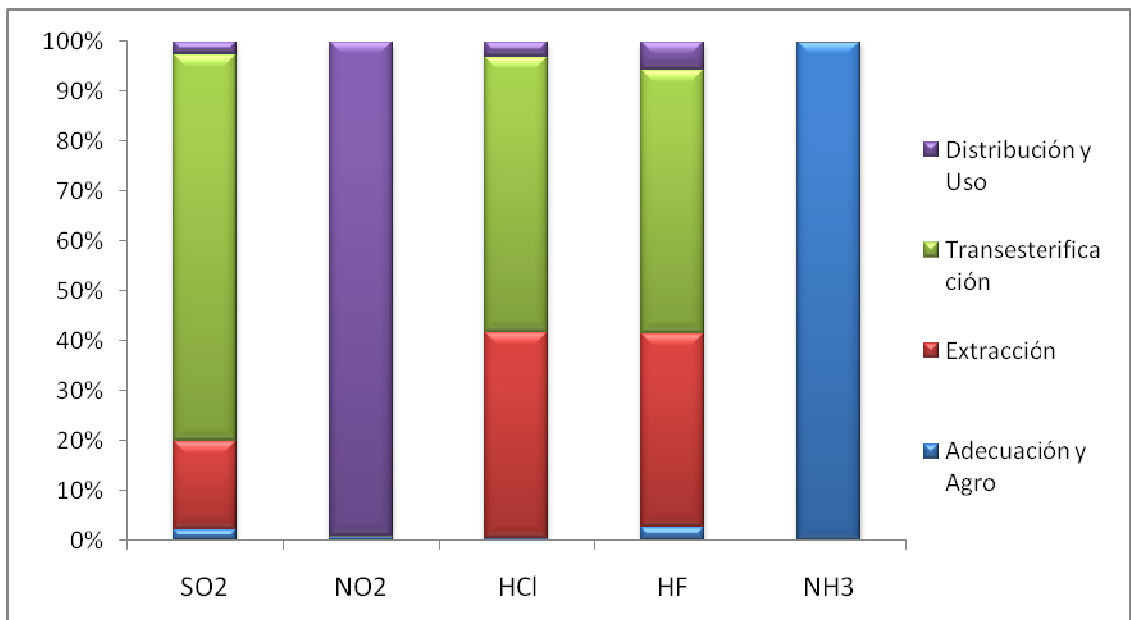


Figura E2. Evaluación categoría de impacto: Cambio Climático.

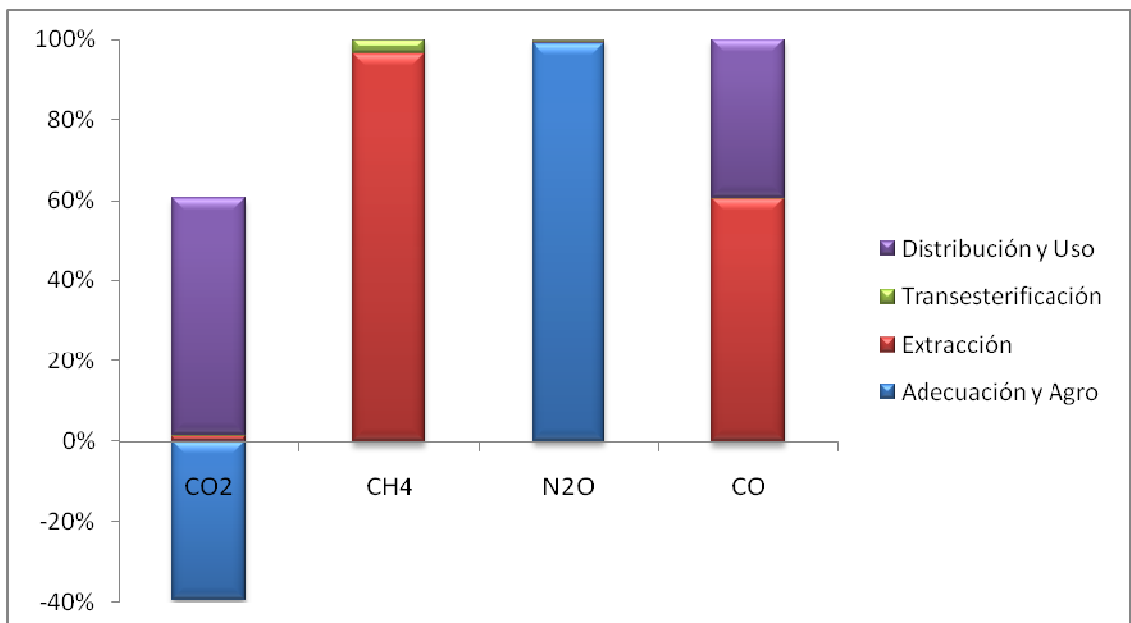


Figura E3. Evaluación categoría de impacto: Eutrofización.

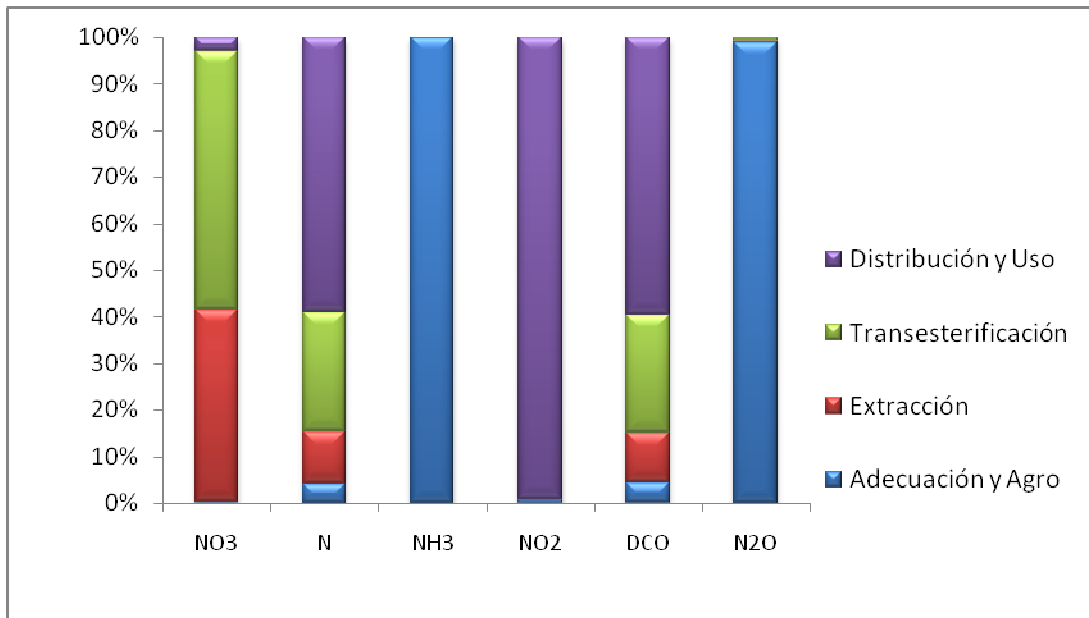


Figura E4. Evaluación categoría de impacto: Formación Oxidantes Fotoquímicos.

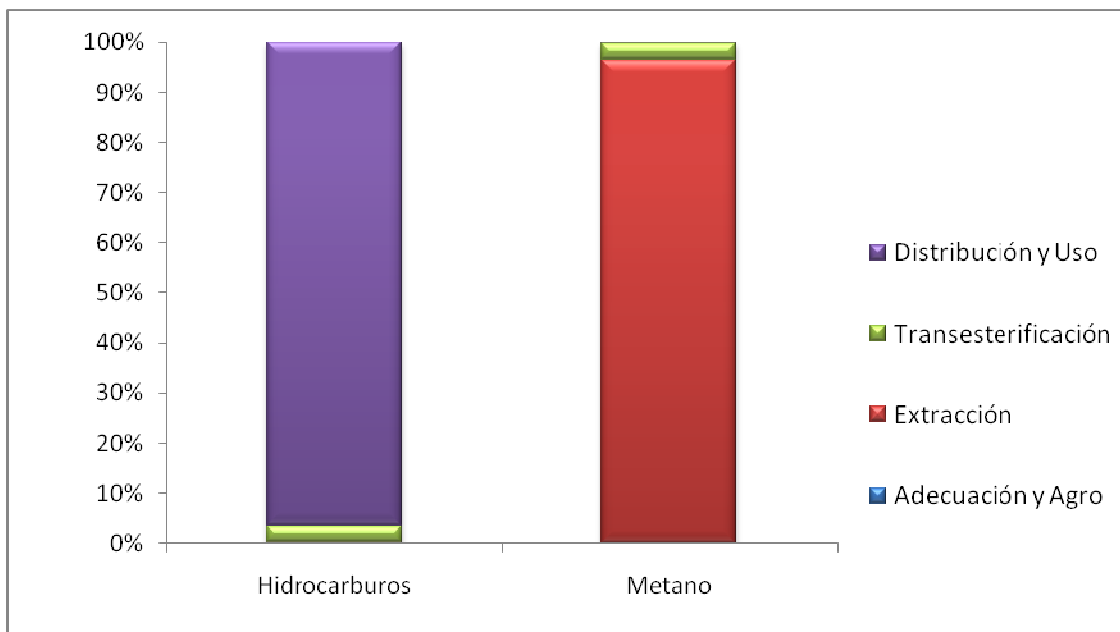


Figura E5. Evaluación categoría de impacto: Efectos Respiratorios.

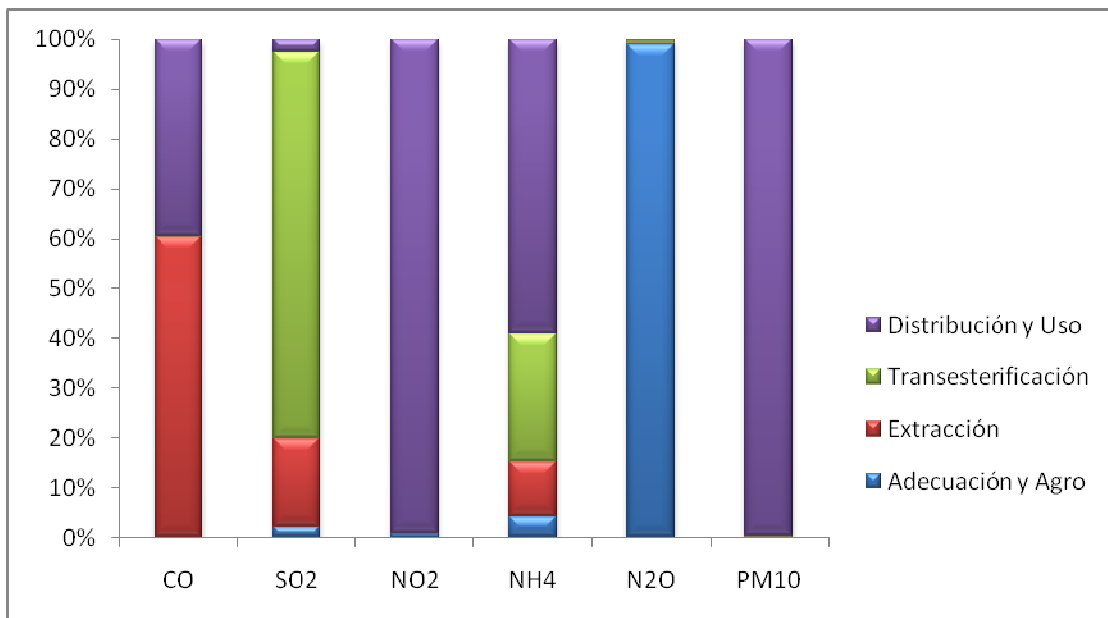


Figura E5. Evaluación categoría de impacto: Energía No Renovable.

