



UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO
“Hermanos Saíz Montes de Oca”
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

KUNGLIGA TEKNISKA HÖGSKOLAN
ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (KTH)

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química y Tecnología

Producción de Biodiesel a partir de la Jatropha Curcas

Autores: MSc. Yanet Guerra Reyes
MSc. Boris Abel Ramos Robaina

Supervisor: Ph.D. Rolando Zanzi Vigouroux

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	4
1. ANTECEDENTES	6
1.1 Biocombustibles.	6
1.1.1 Obtención de biocombustibles.....	7
1.1.2 Tipos de biocombustibles.....	8
1.1.3 Actividad productiva mundial.....	9
1.1.4 Beneficios de los biocombustibles: Alternativa al petróleo.	11
1.1.5 Biocombustibles en Cuba.	11
1.2 Biodiesel.	12
1.2.1 Antecedentes históricos.	14
1.2.2 Materias primas para la producción de biodiesel.	16
1.2.2.1 Aceites.....	16
1.2.2.2 Alcoholes.....	18
1.2.2.3 Catalizadores.	20
1.2.3 Tecnología actual de producción de biodiesel.	20
1.2.3.1 Catálisis ácida.....	20
1.2.3.2 Catálisis con lipasas.	21
1.2.3.3 Catálisis alcalina no iónica.	21
1.2.3.4 Catálisis heterogénea.....	21
1.2.3.5 Catálisis supercrítica.....	21
1.2.3.6 Catálisis alcalina.....	22
1.2.4 Transesterificación.	22
1.2.4.1 Purificación de ésteres.....	26
1.2.4.2 Factores que influyen en la reacción.	28
1.2.5 Aplicaciones del biodiesel.	29
1.2.6 Ventajas e inconvenientes del biodiesel.	31
1.2.7 Producción actual de biodiesel en el mundo.	33
1.3 Jatropha Curcas.....	34
1.3.1 Características de los frutos.....	35

1.3.2	La madera combustible.....	39
1.3.3	Reproducción.....	40
1.3.4	Resistente a todo.....	40
1.3.5	Propiedades.....	41
1.3.6	Producción de biodiesel a partir de la <i>Jatropha Curcas</i>	42
1.3.7	El glicerol.....	44
1.3.8	Aportes e Impactos.....	46
2.	MATERIALES Y MÉTODOS	47
2.1	Sistema experimental.....	47
2.2	Materiales empleados.....	48
2.2.1	Aceite de Colza.....	48
2.2.2	Catalizador.....	48
2.2.3	Alcohol.....	48
2.2.4	Disolución de H ₃ PO ₄ al 5%.....	48
2.3	Procedimiento experimental.....	49
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
	CONCLUSIONES	60
	RECOMENDACIONES	61
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
	ANEXOS.....	67

INTRODUCCIÓN

El continuo aumento e inestabilidad del precio de los combustibles fósiles y la preocupación mundial por su agotamiento, ha originado la búsqueda de energías renovables más limpias para el ambiente que satisfagan el continuo aumento del consumo energético mundial, máximo estimado en una tasa anual de crecimiento del 2,6 % hasta el año 2030 en los países en desarrollo (Food Drug Administration, 2007).

Siendo necesario que las políticas y programas gubernamentales contribuyan a aumentar la competitividad de las fuentes renovables de energía identificadas en estos países. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos nacionales e internacionales la participación de la energía renovable a nivel mundial será del 8 % de la energía total del consumo en el año 2030 (Food Drug Administration, 2007).

La necesidad de contrarrestar la desertificación de bosques secos y suelos agrícolas en proceso de erosión constituye un espacio propicio para llevar a cabo programas de reforestación a través del cultivo de especies nativas, adaptadas al ambiente de estos suelos. La alternativa para contrarrestar los problemas de desertificación y fuentes para biodiesel es el cultivo de *Jatropha Curcas* especie que se adapta al ambiente y de la cual se tiene bien establecido el proceso de elaboración de biodiesel a partir de la semilla.

Es necesario indicar que el biodiesel obtenido a partir del aceite de la semilla de piñón (*Jatropha Curcas*) tiene propiedades similares a las del diesel convencional y se ha demostrado que opera en motores de compresión de ignición tal como el combustible fósil, de esta forma no requiere modificaciones esenciales, por consiguiente no implica gastos en adecuaciones de tecnología para los consumidores (Ramesh, 2004).

Nuestro país se está poniendo al tanto en el estudio e implementación de estas energías ya que en países de Europa y en EEUU se están implementando actualmente grandes proyectos de investigación y se encuentran funcionando plantas de obtención de biodiesel a gran escala. En Francia y Estados Unidos se comercializa combustibles diesel cortado (mezclado) con un porcentaje de combustible obtenido a partir de materias primas

renovables al cual se denomina Biodiesel en una proporción de 5%. En otros países del viejo continente como Alemania y Austria se vende biodiesel puro.

La causa que motivó a realizar el tema de investigación es lo difícil que es vivir en el planeta, ya que en los actuales momentos nuestra casa grande se encuentra completamente contaminada, por lo que creímos conveniente no dejar pasar por alto que estamos a tiempo en poder recuperar nuestro ambiente sano.

1. ANTECEDENTES

1.1 Biocombustibles.

Los biocombustibles son combustibles orgánicos primarios y/o secundarios derivados de la biomasa. Estos pueden ser sólidos, gaseosos o líquidos (FAO, 2001).

Las principales formas de utilización de los biocombustibles son: la combustión para producir calor aplicable a la calefacción urbana, a procesos industriales o a la generación de electricidad, y a la carburación en motores térmicos, tanto de explosión como de combustión interna (De Juana, 2003).

Dentro de los biocombustibles se encuentran los biocarburantes, término que agrupa al conjunto de combustibles líquidos de origen vegetal que provienen de las distintas reacciones físico-químicas que ha sufrido la materia orgánica. Los biocarburantes se pueden dividir en dos grupos básicos. Por una parte, se encuentran los bioalcoholes, que provienen de la fermentación alcohólica de cultivos vegetales ricos en azúcares y, por otra, los bioaceites, derivados de diversos tipos de especies oleaginosas, así como también de la transformación de los aceites vegetales usados. La ventaja de estos tipos de combustibles radica en su origen. Proviene de material de forraje vegetal, al cual se le ha extraído parte del dióxido de carbono que se podría liberar en la atmósfera. Por eso, su utilización como combustibles no implica un aumento neto de dióxido de carbono a la atmósfera, de manera que contribuye a minimizar el efecto de los gases invernadero (Fundación Terra, 2002; APPA & PricewaterhouseCoopers, 2005; UGT, 2007).

En cuanto a su aplicación en los motores de combustión interna, el biodiesel puede ser mezclado con diesel tradicional o incluso sustituirlo totalmente. Hecho similar ocurre con el bioetanol para sustitución o mezclado con la gasolina convencional (APPA & PricewaterhouseCoopers, 2005).

Para que los biocombustibles de origen agrícola sean una alternativa energética real, se necesita que estos productos, no sólo presenten características equivalentes a los de procedencia fósil, sino también que, en el conjunto de procesos de obtención, se consigan balances energéticos positivos y lleguen al mercado a un coste similar al de los productos derivados del petróleo a los que sustituyen (Ballesteros, 2003). Las emisiones de CO₂ evitadas debido a la utilización de los biocarburantes dependen de su proceso de

producción. Se considera que por la utilización de un litro de combustible se emiten unos 3,2 kg de CO₂ (incluyendo las emisiones derivadas de la producción, el transporte, etc.). Aunque los biocombustibles se consideran neutros desde el punto de vista de emisiones de CO₂, se debe considerar que durante la producción del cultivo, su procesamiento y transformación en combustible, se emplean combustibles fósiles que emiten CO₂ por litro de biocarburante, por lo que se puede considerar de una manera realista que se evitan alrededor de 2-2,5 kg de CO₂ por litro de biocarburante de los 3,2 kg emitidos por diesel convencional (Ballesteros, 2003).

En términos generales, la producción de biocarburantes puede ofrecer la oportunidad de diversificar la actividad agrícola, reducir la dependencia con respecto a los combustibles fósiles (principalmente el petróleo) y contribuir al crecimiento económico regional de forma sostenible (Reijnders, 2006; Comisión de las Comunidades Europeas, 2006; Hilal, 2007).

1.1.1 Obtención de biocombustibles.

Según la naturaleza de la biomasa y el tipo de combustible deseado, se pueden utilizar diferentes métodos para obtener biocombustibles: procesos mecánicos (astillado, trituración, compactación), termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), biotecnológicos (micro bacterianos o enzimáticos) y extractivos. Cada uno de estos procesos se inicia con la biomasa vegetal que se forma a partir del proceso de fotosíntesis, con el aporte de la energía solar que captan y transforman estos organismos.

Tabla 1.1 Proceso de obtención de biocombustibles.

Técnicas	Fermentación	Digestión anaerobia
Productos	Etanol, Varios	Biogás, CO ₂ , CH ₄
Aplicaciones	Transporte, Industria Química	Calefacción, Electricidad

Cada técnica depende del tipo de biomasa disponible. Si se trata de un material seco puede convertirse en calor directo mediante combustión, el cual producirá vapor para generar energía eléctrica. Si contiene agua, se puede realizar la digestión anaeróbica que lo convertirá en metano y otros gases, o fermentar para producir alcohol, o convertir en hidrocarburo por reducción química. Si se aplican métodos termoquímicos es posible

extraer metanol, aceites, gases, etc. El método de la digestión por el cual se obtiene biogás es el más empleado.

1.1.2 Tipos de biocombustibles.

- **Biodiesel:** El biodiesel es un combustible renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales que puede ser utilizado como sustituto o aditivo del diesel convencional, ya que sus características fisicoquímicas son muy similares, pero además presenta grandes ventajas: contribuye a la reducción del calentamiento global, tanto por la sustitución del uso de combustibles fósiles como por el balance positivo de CO₂ en su ciclo de vida; permite una producción a pequeña escala aprovechando recursos locales; su utilización no requiere cambios en los motores diesel, debido a sus propiedades fisicoquímicas muy similares a las del diesel derivado del petróleo; reduce las emisiones de SO₂ y CO, entre otros gases contaminantes, cuando se usa como aditivo o sustituto del diesel.
- **Bioetanol:** Se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas. En este proceso se obtiene el alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5 % de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como combustible. El bioetanol mezclado con la gasolina produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a la gasolina pero con una importante reducción de las emisiones contaminantes en los motores tradicionales de combustión. El etanol se usa en mezclas con la gasolina en concentraciones del 5 o el 10 %, E5 y E10 respectivamente, que no requieren modificaciones en los motores actuales.
- **Biogás:** Este gas es producido por bacterias en el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaeróbicas, es decir, sin oxígeno. El último eslabón de este proceso es el metano, un gas inflamable, que es el producto útil de este proceso y que mediante una sencilla adaptación puede ser utilizado en cualquier cocina o calefactor. Es importante recordar que como subproducto está el barro que, cumplido su ciclo en el digester, es un excelente fertilizante natural. El digester es el aparato que permite generar el biogás y del que hay diferentes modelos. En general, todas las variantes funcionan con un 18 % de residuos sólidos y el resto de agua. El

componente fundamental es el sustrato de bacterias aclimatadas a comida constante, como las que hay en un criadero de cerdos o en un pozo ciego.

- **Biomasa:** Cuando la materia viva se descompone o se degrada, la energía contenida en ella se libera. Esto ocurre mediante el metabolismo de los alimentos, la descomposición de la materia viva o la combustión de la leña. Los elementos contaminantes directamente relacionados con el consumo energético afectan sobre todo a la atmósfera. La materia vegetal al quemarse produce anhídrido carbónico (CO_2) y agua (H_2O), compuestos que forman parte de la atmósfera en ciertas proporciones. Los constantes ciclos a que están sometidos estos componentes les permiten volver a pasar a la materia vegetal en el proceso de crecimiento de las plantas, en un ir y venir incesante, mientras que la composición de la atmósfera se mantiene dentro de valores constantes.

Los combustibles fósiles, sin embargo, liberan grandes cantidades de CO_2 , que estaban retiradas de la dinámica de la biosfera, contribuyendo a elevar la proporción de este gas en la atmósfera. Una de las consecuencias del incremento de CO_2 es el llamado efecto invernadero (calentamiento por retención de la radiación solar reflejada). Los combustibles fósiles, además, producen óxidos de azufre, carbono y nitrógeno (SO_2 , CO , NO_x), partículas, hollines, metales pesados, etc., que son elementos extraños a la atmósfera y, por tanto, agentes contaminantes de la misma. Estos contaminantes ocasionan problemas ambientales tan graves como las lluvias ácidas o el deterioro de la capa de ozono, además de contribuir al efecto invernadero.

1.1.3 Actividad productiva mundial.

Los principales productores de alcohol como combustible son Brasil, Estados Unidos y Canadá. Brasil lo produce a partir de la caña de azúcar y lo emplea como “hidroalcohol” (95 % etanol) o como aditivo de la gasolina (24 % de etanol). El etanol derivado de la caña de azúcar proveniente de la región centro-sur de Brasil es el biocombustible más económico, ya que comienza a ser financieramente rentable cuando el precio del petróleo supera los 35 dólares el barril. La Empresa Brasileña de Pesquisa Agropecuaria (Embrapa), es responsable por las tecnologías que han convertido a Brasil en uno de los mayores graneros del mundo y en pionero en sectores como agroenergía y biotecnología,

ya tiene acuerdos con algunos países de Centroamérica y el Caribe para apoyar sus proyectos de producción de etanol de caña de azúcar. El Programa Nacional de Alcohol establecido en Brasil en la década del 70 estuvo estimulado por la sobrecapacidad de la industria azucarera. Los excedentes en la producción de azúcar y un incremento en la producción de melaza impulsaron el programa de etanol en India.

El segundo mercado más grande de etanol es Estados Unidos y Canadá, lo producen a partir de maíz (con un poco de trigo y cebada) y es el biocombustible más utilizado en diferentes formulaciones que van desde el 5 % al 85 % de etanol. Más de 1 500 millones de galones (5 670 millones de litros aproximadamente) se agregan anualmente a la gasolina para mejorar el rendimiento de los vehículos y reducir la polución atmosférica.

Alemania, un país que se ha incluido recientemente en la búsqueda del reemplazo de los combustibles fósiles por los biocombustibles. El Gobierno de Angela Merkel en asuntos de Medio Ambiente adelantó que las cantidades de biocombustibles producida en Alemania hasta el año 2030 cubrirán difícilmente el 10 % del consumo primario de energía. Alemania tendría que importar grandes cantidades de biocombustibles. Productos cuyos cultivos amenazan con causar graves daños ecológicos en los países que los producen, entre ellos varios latinoamericanos.

En la Argentina el desarrollo de un mercado de biodiesel y bioetanol presenta ventajas que hacen que el gobierno esté impulsando proyectos de producción en diferentes regiones del país. Existe un Proyecto de Ley en Senado, presentado en el 2004 destinado a promover el desarrollo de energías alternativas limpias y a ayudar de forma significativa al desarrollo sustentable de los biocombustibles. La producción de biocombustibles en Argentina, se ve sustentado por la gran cantidad de soja, la cual cubre la demanda que se necesita para la producción. Además, existen grandes superficies aptas para el desarrollo de cultivos oleaginosos siendo el producto de estos (aceites) el principal insumo para la producción del biocombustible. Argentina es uno de los líderes mundiales en exportación de aceites vegetales. (Biocombustibles publicado en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Biocombustibles>, visitado el 30 de abril de 2011).

1.1.4 Beneficios de los biocombustibles: Alternativa al petróleo.

El uso de biomasa vegetal en la elaboración de combustibles podría beneficiar la realidad energética mundial con una significativa repercusión en el medio ambiente y en la sociedad, como se detalla a continuación:

- El uso de biocombustibles como fuente de energía renovable puede contribuir a reducir el consumo de combustibles fósiles, responsables de la generación de emisiones de gases efecto invernadero.
- Son una alternativa viable al agotamiento ya sensible de energías fósiles, como el gas y el petróleo, donde ya se observa incremento en sus precios.
- Se producen a partir de cultivos agrícolas, que son fuentes renovables de energía.
- Pueden obtenerse a partir de cultivos propios de una región, permitiendo la producción local del biocombustible.
- Permiten disponer de combustible independientemente de las políticas de importación y fluctuaciones en el precio del petróleo.
- Producen mucho menos emisiones nocivas para los seres vivos, el agua y el aire.

(Biocombustibles publicado en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Biocombustibles>, visitado el 30 de abril de 2011).

1.1.5 Biocombustibles en Cuba.

En la década de 1970, aparecieron las primeras iniciativas de la industria azucarera para sustituir por biomasa de caña los insumos a base de petróleo al sector eléctrico. En la década siguiente, varias instituciones iniciaron estudios sobre alternativas para la producción y uso de biocombustibles en Cuba, y ya en la década de 1990, empezaron proyectos conjuntos sobre biocombustibles.

El mayor potencial nacional de bioenergía en estos momentos lo tiene la industria azucarera, fundamentalmente por la combustión y generación de electricidad, a partir del bagazo y la paja, y por la producción de etanol. El 100 % de las centrales se autoabastece de energía a partir de biomasa durante la zafra. Se ha logrado como promedio 32 kWh/ton de caña molida.

Existe un programa basado en el ahorro y en el aumento de la eficiencia para lograr autoabastecer, a partir de biomasa, las necesidades de energía de todo el sector azucarero durante todo el año. Además, existen proyectos cooperados de investigación entre la industria azucarera y el Ministerio del Transporte sobre mezclas de alcohol hidratado con gasolina.

El Ministerio de Agricultura cuenta con otras fuentes potenciales que podrían ser usadas para producir biocombustibles, incluyendo biomasa forestal y las áreas aprovechables para el cultivo de oleaginosas como materia prima para obtener biodiesel, para lo que se piensa destinar terrenos para bosques energéticos y, sobre todo en las provincias orientales, terrenos semiáridos potencialmente aprovechables para el cultivo de oleaginosas como la *Jatropha Curcas*.

En la Isla de la Juventud se ejecuta un proyecto financiado por el GEF para la generación de energía a base de biomasa forestal, y en Guantánamo se realizan investigaciones con oleaginosas para la producción de biodiesel, para lo que se han plantado varias hectáreas de terrenos áridos de *Jatropha curcas* (Pereira, 2006).

1.2 Biodiesel.

El biodiesel es un combustible sustituto del gasóleo para motores diesel, el cual puede ser producido partiendo de materias primas agrícolas (aceites vegetales y/o grasas animales) (Schmidt, 1996). Posee las mismas propiedades del combustible diesel empleado como combustible para automóviles, camiones, ómnibus y puede ser mezclado en cualquier proporción con el diesel obtenido de la refinación del petróleo (Larosa, 2001, 2003; Ballesteros, 2003).

La ASTM1 lo define como “Ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y que se emplean en los motores de ignición de compresión (motores diesel) o en calderas de calefacción”.

Para el caso chileno, este combustible es definido como “Combustible líquido compuesto por una mezcla de ésteres alquílicos obtenidos mediante la reacción química de

transesterificación o conversión de ácidos grasos a ésteres metílicos o ésteres etílicos. A partir de aceites vegetales, grasa animal o el aceite comestible usado” (CNE, 2007).

Este combustible puede utilizarse puro (B100, conocido como “gasoil verde”), o en mezclas de diferentes concentraciones con el diesel de petróleo. La mezcla más utilizada en nuestros días es al 20 %, es decir 20 partes de éter vegetal y 80 partes de petrodiesel. Cuando es utilizado como aditivo, sus concentraciones normalmente no superan el 5 % (Stratta, 2000; Demirbas, 2007).

Uno de los principales beneficios del biodiesel es su bajo contenido de azufre y que, debido a la presencia de oxígeno en su composición química, su combustión es más completa, reduciendo la emisión de partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, entre otros contaminantes (Larosa, 2001, 2003; Ballesteros, 2003).

Por otro lado, durante su proceso de producción se produce un subproducto altamente valorado, como es el caso de la glicerina, la cual luego de su purificación puede ser utilizada, en múltiples usos, en la industria farmacéutica y cosmética, donde cuenta con una gran demanda (Castro, 2006).

Tabla 1.2 Características del biodiesel y diesel de petróleo.

Propiedad	Diesel de petróleo	Aceite Girasol	Biodiésel girasol	Aceite colza	Biodiésel colza
Densidad específica (Kg/dm ³)	0,835	0,924	0,88	0,0916	0,88
Viscosidad (cSt) a:					
20 °C	5,1	65,8	---	77,8	7,5
50 °C	2,6	34,9	4,22	25,7	3,8
PCS (kcal/l)	9.216	8,76	8.472	8.928	---
PCI (kcal/l)	8.496	8.194	7.930	8.232	7.944
Número de cetano	>45	33	45-51	44-51	52-56
Residuo carbonoso (%)	0,15	0,42	0,05	0,25	0,02
Azufre (%)	0,005	0,01	0,001	0,002	0,001

Fuente: Manzanares, 2007.

1.2.1 Antecedentes históricos.

La transesterificación de los aceites vegetales fue desarrollada en 1853 por los científicos E. Duffy y J. Patrick, muchos años antes de que el primer motor diesel funcionase. El primer modelo de Rudolf Diesel, un monocilíndrico de hierro de 3 metros con un volante en la base funcionó por vez primera en Augusta (Alemania), el 10 de agosto de 1893. En conmemoración de dicho evento, el 10 de agosto se ha declarado "Día Internacional del Biodiesel". Diesel presentó su motor en la Exposición Mundial de París de 1898. Este motor es un ejemplo de la visión de Diesel, ya que era alimentado por aceite de cacahuete, un biocombustible, aunque no estrictamente biodiesel, puesto que no era transesterificado. Diesel quería que el uso de un combustible obtenido de la biomasa fuese el verdadero futuro de su motor. En un discurso de 1912, dice: "el uso de aceites vegetales para el combustible de los motores puede parecer insignificante hoy, pero tales aceites pueden convertirse, con el paso del tiempo, importantes en cuanto a sustitutos del petróleo y el carbón de nuestros días".

Durante los años veinte, los fabricantes de motores diesel adaptaron sus propulsores a la menor viscosidad del combustible fósil (gasóleo) frente al aceite vegetal. La industria petrolera amplió así su hueco en el mercado de los carburantes porque su producto era más económico de producir que la alternativa extraída de la biomasa. El resultado fue, por muchos años, la casi completa desaparición de la producción de combustibles a partir de biomasa. Sólo recientemente la preocupación por el impacto ambiental y la menor diferencia de precios han hecho de los biocombustibles una alternativa válida.

A pesar del increíble uso de los derivados del petróleo como combustibles, durante los años veinte, treinta y la posguerra mundial, varios países (entre ellos Argentina) informaron de haber usado aceites como sustituto del diesel. Se detectaron problemas por la diferencia de viscosidad entre el aceite y el diesel, que producía depósitos dentro de la cámara de combustión y los inyectores. Algunos intentos para superar esto fueron aplicar una pirólisis y craqueo al aceite, mezclarlo con diesel de petróleo o etanol, o calentarlo.

El 31 de agosto de 1937, G. Chavanne de la Universidad de Bruselas, Bélgica, obtuvo la patente por “transformar aceites vegetales para su uso como combustibles”. La patente describía la transesterificación del aceite usando etanol o metanol para separar la glicerina de los ácidos grasos y reemplazarla con alcoholes de cadenas cortas. Esta fue la primera producción de biodiesel.

Más recientemente, en 1977, Expedito Parente, científico brasileño, inventó y patentó el primer proceso industrial de producción de biodiesel. Actualmente, Tecbio, la empresa de Parente, trabaja junto con Boeing y la NASA para certificar bio-queroseno.

Entre 1978 y 1996, el National Renewable Energy Laboratory (NREL) estadounidense ha experimentado el uso de algas como fuente de biodiesel, dentro del Aquatic Species Program. La experimentación del NREL, tras 16 años, está estancada debido a que el programa de investigación carece de financiación.

En 1979 se iniciaron en Sudáfrica investigaciones sobre cómo transesterificar aceite de girasol en diesel. Finalmente en 1983, el proceso de cómo producir biodiesel de calidad fue completado y publicado internacionalmente. Gaskoks, una industria austriaca, obtuvo esta tecnología y estableció la primera planta piloto productora de biodiesel en 1987 y una industrial en 1989. Durante la década de los 90, se abrieron muchas plantas en muchos países europeos, entre ellos la República Checa, Alemania y Suecia.

En los años noventa, Francia ha lanzado la producción local de biodiesel (conocido localmente como diéster) obtenido de la transesterificación del aceite de colza. Va mezclado en un 5 % en el combustible diesel convencional, y en un 30 % en el caso de algunas flotas de transporte público. Renault, Peugeot y otros productores han certificado sus motores para la utilización parcial con biodiesel, mientras se trabaja para implantar un biodiesel del 50 %.

Francia empezó una producción local de biodiesel el cual se mezclaba en un 30 % con diesel para transporte público. Renault y Peugeot certificaron motores de camiones con uso parcial de biodiesel (alrededor del 50 %). Durante el año 1998 se identificaban 21 países con proyectos comerciales de biodiesel. En septiembre del año 2005, Minnesota

fue el primer estado estadounidense que obligaba un uso de, al menos, un 2 % de biodiesel. En 2008, la ASTM (American Society for Testing and Materials) publicó los estándares y especificaciones de mezcla de biodiesel. (Biodiesel publicado en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Biodi%C3%A9sel>, visitado el 10 de mayo de 2011).

1.2.2 Materias primas para la producción de biodiesel.

1.2.2.1 Aceites.

- **Características químicas de los aceites.**

Los aceites, así como las grasas, son triglicéridos de glicerol (también llamado glicerina, 1, 2, 3 propanotriol o solo propanotriol). El glicerol es capaz de enlazar tres radicales de ácidos grasos llamados carboxilatos. Dichos radicales grasos por lo general son distintos entre sí; pueden ser saturados o insaturados. La molécula se llama triacilglicérido o triacilglicerol.

Los radicales grasos pueden ser desde 12 carbonos de cadena hasta 22 y 24 carbonos de extensión de cadena. Existen en la naturaleza al menos 50 ácidos grasos.

Algunos radicales grasos característicos provienen de alguno de los siguientes ácidos grasos, **Tabla 1.3**:

Tabla 1.3 Ácidos grasos insaturados.

Ácido linoleico	C18:2
Ácido linolénico	C18:3
Ácido oleico	C18:1
Ácido palmitoleico	C16:1

Estos ácidos son los llamados ácidos grasos insaturados o ácidos grasos esenciales, llamados así porque el organismo humano no es capaz de sintetizarlos por sí mismo, y es necesario por tanto ingerirlos en los alimentos.

Los ácidos grasos saturados son los siguientes, **Tabla 1.4**:

Tabla 1.4 Ácidos grasos saturados.

Ácido esteárico	C18:0
Ácido palmítico	C16:0

Para el caso de los aceites los carboxilatos contienen insaturados o enlaces dieno o trieno, que le dan la característica líquida a temperatura ambiente. Los aceites son mezclas de triglicéridos cuya composición les da características particulares.

Los aceites insaturados como los casos ya expuestos, son susceptibles de ser hidrogenados para producir mantecas hidrogenadas industriales de determinado grado de insaturación o índice de yodo, que se destinan para margarinas y mantecas de repostería.

Son aceites de gran importancia los omega 3 y los omega 6, que son polinsaturados, muy abundantes en peces de aguas heladas.

La fuente de aceite vegetal suele ser aceite de colza, ya que es una especie con alto contenido de aceite, que se adapta bien a los climas fríos. Sin embargo existen otras variedades con mayor rendimiento por hectárea, tales como la palma de aceite (*Elaeis guineensis*), la curcas o *jatropha*, etc. También se pueden utilizar aceites usados (por ejemplo, aceites de fritura), en cuyo caso la materia prima es muy barata, y además se reciclan lo que en otro caso serían residuos.

Existen otras materias primas de las cuales se puede extraer aceite para utilizarlas en el proceso de producción de biodiesel. Las materias primas más utilizadas en la selva amazónica son la *jatropha* o curcas (piñón en portugués), *sacha inchi*, el ricino (mamona en portugués) y la palma aceitera.

Además, otra materia prima utilizada es la grasa animal, la cual produce mayores problemas en el proceso de fabricación, aunque el producto final es de igual calidad que el biodiesel de aceite, exceptuando su punto de solidificación.

Una gran variedad de aceites pueden ser usados para producir biodiesel. Entre ellos:

- Aceite vegetal sin usar. Los aceites de colza y soja son los más usados. El aceite de soja representa el 90 % de la materia prima para biodiesel en los Estados Unidos. También puede ser obtenido de carraspique (zurrón boliviano), jatropha, lino, girasol, palma, cocotero y cáñamo.
- Aceites vegetales usados.
- Grasas animales: cerdo, gallina y los subproductos de la producción de ácidos grasos omega 3 provenientes del pescado.
- Algas, las cuales pueden crecer usando materiales cloacales y sin desplazar la tierra usada para producir comida.
- Aceite de halófitas como la salicornia. Éstas crecen en agua salada, generalmente en costas, donde no se puede cultivar otra cosa.

Muchas experiencias sugieren que los aceites usados son las mejores materias primas, pero, debido a que la disponibilidad es drásticamente menor a la cantidad de combustible de petróleo que se quema, la solución no es muy usada.

Las grasas animales son subproductos de la producción de carne. A pesar de esto, no es eficiente criar animales (o atrapar peces) simplemente por su grasa, aunque el uso de los subproductos incrementa el valor de la industria ganadera. Sin embargo, producir biodiesel de grasas animales reemplazaría un pequeño porcentaje de uso de diesel de petróleo. Hoy en día, muchas productoras de biodiesel que trabajan con distintas materias primas, hacen combustible biológico a partir de grasas animales de muy buena calidad. Actualmente una empresa valorada en 5 millones de dólares está siendo construida en EE. UU., con la intención de producir 11,4 millones de litros a partir de 1 billón de kilogramos de grasa de gallina.

1.2.2.2 Alcoholes.

El alcohol puede ser metanol, que forma metilésteres, o etanol, que forma etilésteres. El proceso con etanol es más complicado que con metanol, no es recomendado para principiantes.

El metanol proviene del petróleo, aunque puede producirse por pirólisis de la madera. El etanol proviene de las plantas o del petróleo, y hay un método para destilarlo caseramente.

El etanol se conoce con varios nombres: alcohol etílico, $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$, alcohol del vino o de la cerveza. Ambos alcoholes son muy peligrosos, el metanol más.

Los alcoholes que tradicionalmente se usan en la transesterificación son de cadena corta, principalmente metanol (Rashid, 2008) y etanol (Alamu, 2008). Se pueden utilizar otros alcoholes como propanol, isopropanol, butanol y pentanol (Encinar, 2002; Ma, 1999; Georgogianni, 2008), pero estos son mucho más sensibles a la contaminación con agua, además son más costosos y requieren grandes relaciones molares y temperaturas altas.

El metanol tiene un menor costo y presenta algunas ventajas químicas y físicas sobre el resto de los alcoholes, como su rapidez de reacción con los triglicéridos y que disuelve fácilmente el NaOH (Ma, 1999). Es importante resaltar la alta toxicidad del metanol y su inflamabilidad, y que éste se obtiene principalmente de fuentes fósiles no renovables como el gas metano.

El etanol, en cambio, proviene de materias primas renovables: caña de azúcar, remolacha azucarera, y otros vegetales celulósicos (Girard, 2006). Por eso el etanol es de particular interés principalmente porque es menos costoso que el metanol en algunas regiones del mundo (Moser, 2009). También es posible obtenerlo mediante destilación seca de la madera, pero este proceso aún no se aplica a gran escala. Sin embargo, la formación de éster etílico comparativamente es más difícil que la de éster metílico, especialmente la formación de una emulsión estable durante la etanolisis es un problema (Zhou, 2006).

El etanol y el metanol no se disuelven con los triglicéridos a temperatura ambiente y la mezcla debe ser agitada mecánicamente para permitir la difusión. Durante la reacción generalmente se forma una emulsión, en la metanolisis esta emulsión desciende rápidamente formándose una capa rica en glicerol quedándose en la parte superior otra zona rica en éster metílico. En cambio en la etanolisis esta emulsión no es estable y se complica mucho la separación y purificación de los ésteres etílicos. La emulsión está

causada en parte por la formación de monoglicéridos y diglicéridos intermedios que contienen tanto grupos hidróxidos polares como cadenas de hidrocarburos no polares.

1.2.2.3 Catalizadores.

El catalizador puede ser hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH). Los productores domésticos experimentados usan KOH, con el cual se genera un subproducto utilizable: fertilizante de potasio. Para ambas sustancias el proceso es el mismo, salvo que se necesitaría 1,4 veces más KOH que NaOH.

Estos últimos productos son también peligrosos, hay que tener los siguientes cuidados: evitar el contacto con los ojos o la piel, no respirar los vapores, alejarlos de los alimentos y los niños. Más allá, reaccionan con aluminio, cobre y zinc. Para el reactor se recomienda usar recipientes de vidrio, esmaltados, acero inoxidable o polietileno de alta densidad. (Biodiesel publicado en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Biodi%C3%A9sel>, visitado el 10 de mayo de 2011).

1.2.3 Tecnología actual de producción de biodiesel.

Actualmente existen diversos procesos industriales de producción de biodiesel, siendo los más difundidos la catálisis ácida, catálisis enzimática y catálisis alcalina, donde este último es uno de los métodos más atractivos desde el punto de vista industrial. Los métodos de producción más conocidos se presentan a continuación (CORPODIB, 2003; Van Gerpen, 2004; Vera, 2005; Bunyakiat, 2006; Van Kasteren, 2007; Marchetti, 2007).

1.2.3.1 Catálisis ácida.

La transesterificación es catalizada por ácidos de Bronsted como el sulfónico o el sulfúrico: las conversiones a ésteres son elevadas, superando el 99 %, pero la velocidad de reacción es lenta, sobrepasando en algunos casos las tres horas para condiciones normales. Además, se requieren temperaturas superiores a los 100 °C, la separación del glicerol es difícil de realizar y se requieren materiales de construcción resistentes para los equipos.

1.2.3.2 Catálisis con lipasas.

Las enzimas hidrolíticas se han aplicado en las síntesis químicas gracias a su estabilidad, tolerancia a los solventes y a que no requieren de coenzimas. La aplicación de este método aún no es viable comercialmente, debido a que posee cinéticas relativamente lentas, y a que las condiciones de operación son bastante rigurosas.

1.2.3.3 Catálisis alcalina no iónica.

Para simplificar las manipulaciones del proceso se han realizado numerosos estudios acerca del desempeño de bases orgánicas. Se han empleado guanidinas, amidinas, piperidina, trietilamina, entre otras. Los resultados han variado de acuerdo a la sustancia utilizada, pero en general, se obtienen conversiones altas y tiempos mínimos de reacción. Sin embargo, este método tiene como desventajas la dificultad de separación de los productos y un costo elevado del catalizador.

1.2.3.4 Catálisis heterogénea.

Se han probado polímeros con unidades químicas que proporcionan sitios activos básicos no iónicos, como poliestireno/divinilbenceno, poliuretanos y alquilguanidinas soportadas, entre otros, los cuales presentan la ventaja, de que el catalizador no se incluye como una impureza y la cinética de separación de los productos es rápida. A pesar de esto, el método no es viable para grandes volúmenes de producción, pues es muy susceptible a las impurezas, y el catalizador es costoso.

1.2.3.5 Catálisis supercrítica.

En este método los reactivos se llevan a las condiciones críticas del alcohol utilizado (generalmente metanol), y se cargan al reactor. La cinética es 10 veces más rápida que el mejor de los anteriores casos, con conversiones superiores al 99 %. Posee como desventajas las condiciones extremas de operación (350 °C y 30 MPa), que lo hacen inviable para la producción a gran escala.

1.2.3.6 Catálisis alcalina.

Es el proceso industrialmente más desarrollado y empleado, puesto que los catalizadores empleados, como hidróxidos o carbonatos de sodio o potasio, son baratos, son menos corrosivos que los catalizadores ácidos y se alcanzan conversiones superiores al 99 %; la cinética es relativamente rápida, no requiere equipos complicados y la separación de los productos es fácil de realizar. Su desventaja consiste en la necesidad de tener ausencia total de agua, puesto que ésta induce una hidrólisis con formación de jabones y pérdidas de éster.

1.2.4 Transesterificación.

Los triglicéridos o triacilglicéridos, en presencia de un alcohol más base, promueven una reacción denominada transesterificación, reacción bien conocida y descrita como hidrólisis alcalina (Allinger, 1976). De modo general, la transesterificación es la reacción de un lípido con un alcohol, produciéndose un éster y un subproducto, o glicerol (**Figura 1.1**) (Van Kasteren, 2007). El proceso global de transesterificación de aceites vegetales y grasas es una secuencia de tres reacciones reversibles y consecutivas, en que los monoglicéridos y los diglicéridos son los intermediarios. Los triglicéridos son convertidos a diglicéridos, los cuales son convertidos en monoglicéridos y posteriormente, en glicerol (Hilal, 2007). Cada etapa produce una molécula de éster de un ácido graso. Si la reacción es incompleta, habrá tri, di y monoglicéridos mezclados. Cada uno de estos componentes todavía contiene una molécula de glicerol que puede ser liberada. Este glicerol se denomina glicerol ligado. Cuando este último es sumado al glicerol libre obtenemos el glicerol total. Cada molécula de aceites y grasas de plantas y animales tiene la misma configuración y sólo difieren en la longitud de la cadena de carbono o en el número de dobles enlaces, lo cual produce diferentes puntos de fusión, estabilidad de oxidación, etc. (CORPODIB, 2003).

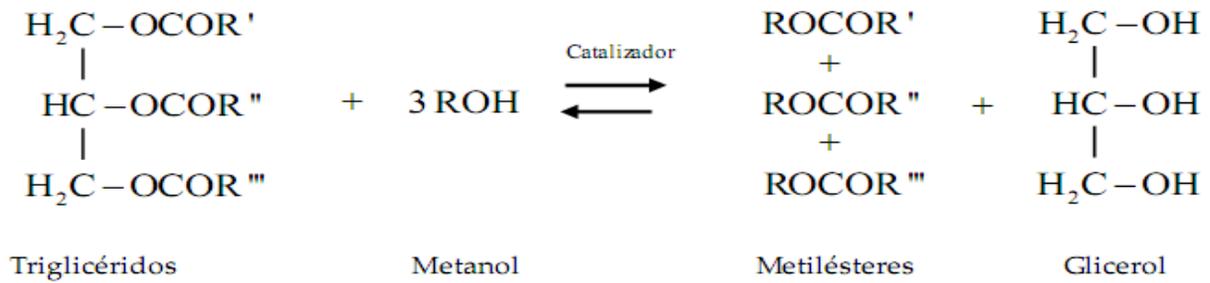


Figura 1.1 Reacción de transesterificación.

En esta reacción, son necesarios 3 moles de alcohol por cada mol de triglicérido. En la práctica, se utiliza siempre exceso de alcohol. La conversión de equilibrio de este proceso es usualmente baja en temperaturas moderadas (Ma, 1998; SAGPyA, 2006; CEPAL, 2007).

El desplazamiento de equilibrio favorece la producción de éster pudiendo ser obtenido a través de grandes excesos de alcohol o simplemente retirando el glicerol (subproducto formado), siendo este último el modo más atractivo desde el punto de vista económico (Ma, 1999; Ishikura, 2005). La elección del alcohol está generalmente relacionada con factores económicos y aspectos técnicos del proceso de producción, como la facilidad de separación de ésteres y de glicerina. Los más utilizados son el metanol y el etanol, aunque otros alcoholes como el isopropanol y butílico también pueden ser utilizados. El metanol presenta ventajas sobre el etanol, destacando: i) requiere menor cantidad de alcohol en exceso; ii) posee mayor eficiencia de conversión de aceites; iii) requiere menores temperaturas de reacción; iv) posee menor tiempo de reacción; v) separación de fases más fácil y vi) recuperación más fácil (CEPAL, 2007).

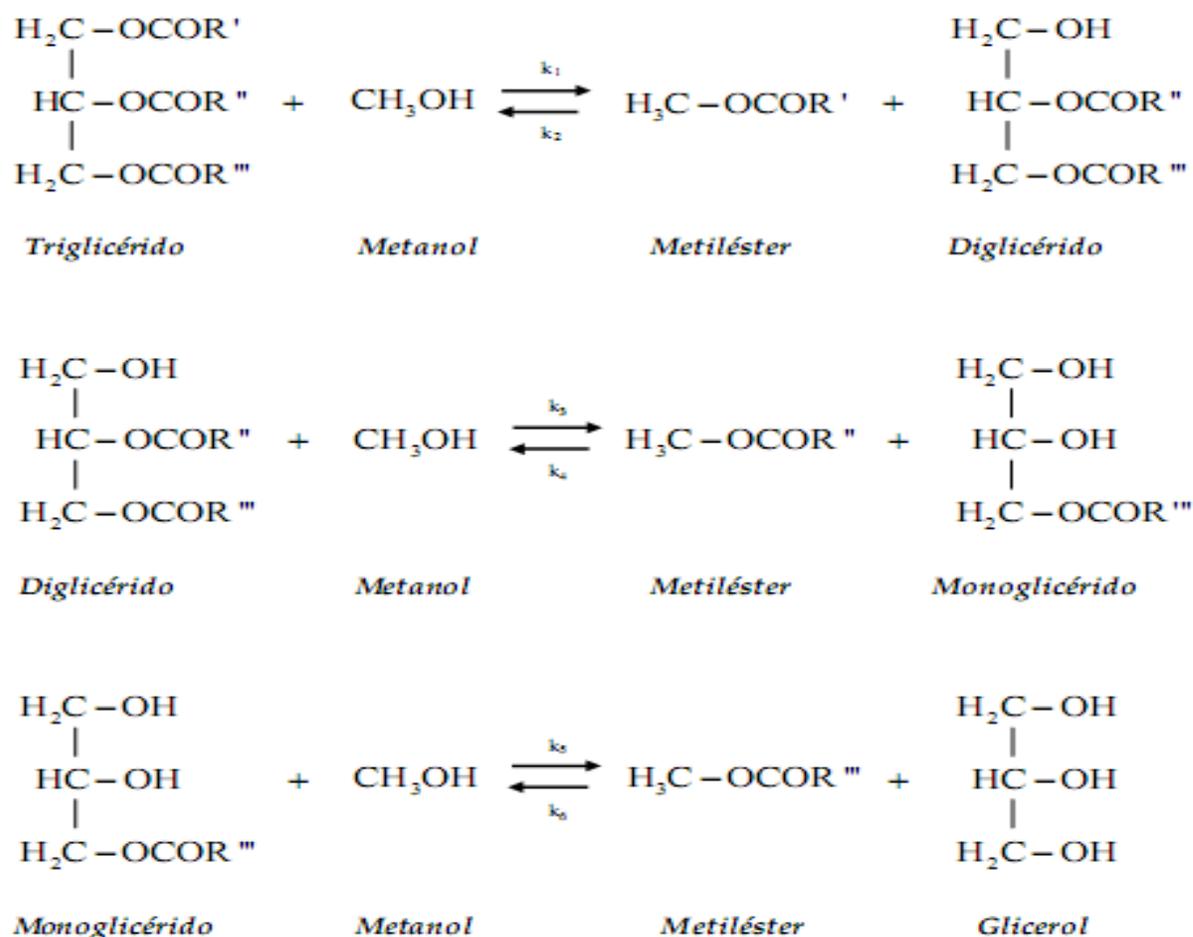


Figura 1.2 Etapas en la reacción de transesterificación.

En tanto, la utilización de etanol puede ser atractiva desde el punto de vista ambiental, dado que puede ser producido a partir de fuentes renovables y, al contrario del metanol, no posee grandes problemas de toxicidad. El principal parámetro a ser observado en la elección del alcohol es el contenido de humedad y su forma de reaccionar ante ella. El agua interfiere en la reacción de transesterificación, traduciéndose en un bajo rendimiento y elevados niveles de jabones, ácidos grasos libres y triglicéridos en el producto final.

Lamentablemente, todos los alcoholes de bajo peso molecular son higroscópicos y capaces de absorber agua del aire. Para acelerar la reacción de transesterificación se utiliza normalmente un catalizador (NaOH, NaOCH₃ o KOH). En relación a los catalizadores básicos, los alcóxidos y los hidróxidos de metales alcalinos son los más

utilizados. De los alcóxidos, principalmente el metóxido de sodio y de potasio, son los catalizadores más activos, produciendo rendimientos muy elevados (98 % y 97 % respectivamente, frente a 90 % del hidróxido de potasio 85 % del hidróxido de sodio) y reduciendo el tiempo de reacción. En tanto, estos catalizadores son desactivados por el agua por lo que necesitan que la proporción de agua en el alcohol y en el aceite sea muy baja (Vicente, 2004). Otros problemas que presentan los alcóxidos son sus elevados precios de venta y su alta toxicidad. La utilización de hidróxidos de sodio y potasio como catalizadores es una buena alternativa a los alcóxidos, a pesar de ser menos activos (CORPODIB, 2003). De hecho, es posible alcanzar las mismas conversiones, bastando aumentar apenas la cantidad de catalizador utilizado. Sin embargo, tienen el inconveniente de producir agua en su reacción con el alcohol (Ishikura, 2005).

Cuando una reacción de transesterificación se lleva a cabo, puede observarse inicialmente la formación de dos fases, fase de alcohol y fase de aceite vegetal, que se mezclan en el transcurso de la reacción. Al concluir, dentro del reactor se forman dos nuevas fases bien diferenciadas, fase de “cima” constituida básicamente por éster y la fase de “fondo” formada por glicerol (Ishikura, 2005).

Como se ha mencionado anteriormente, en la transesterificación se debe tener en cuenta el contenido de agua y ácidos grasos libre de la materia prima, debido a que la presencia del agua puede causar la saponificación del éster y puede consumir el catalizador y reducir la eficacia del mismo (CEPAL, 2007). El contenido máximo de ácidos grasos libre debe ser de 0,5 % (CORPODIB, 2003). La presencia del agua tiene un efecto negativo mayor que el de los ácidos grasos libres. (Ma, 1998) Indica que el contenido en agua se debe estar por debajo de 0,06 % para asegurar una correcta reacción y así evitar la formación de jabón.

1.2.4.1 Purificación de ésteres.

Difícilmente la reacción de transesterificación consigue ser completa, por lo que los productos obtenidos de la reacción se encuentran contaminados con otros compuestos. Estos compuestos pueden ser los triglicéridos que no reaccionaron, alcohol, catalizador, mono y diglicéridos, jabones y glicerol. Por esta razón, después de la transesterificación es necesario realizar una o más etapas de purificación. Las etapas siguientes describen uno de los procesos más difundidos para purificación de biodiesel (Ishikura, 2005).

- **Decantación o separación de fases.**

Como se ha referido anteriormente, después de la reacción existen dos productos principales: glicerina y ésteres. Estos dos productos tienen densidades diferentes. Los ésteres tienen densidad del orden de $0,83 \text{ g/cm}^3$, mientras que el glicerol tiene una densidad de orden de $1,05 \text{ g/cm}^3$ o más. La densidad de la fase de glicerol depende de la cantidad de alcohol, agua y catalizador que contenga. Esta diferencia de densidad es suficiente para que las fases puedan ser separadas por gravedad en un decantador. Como alternativa a la decantación puede ser utilizada una centrífuga para separar estos dos compuestos, siendo esta operación más rápida pero requiere de una mayor inversión en equipos; o la utilización de aditivos que promuevan la aglomeración de moléculas de glicerol tornando el proceso más rápido. La glicerina arrastra consigo la mayor parte del jabón, catalizador y alcohol. Aún con esto, la tasa de separación es afectada por diversos factores. La mayoría de los procesos utilizan una agitación intensa durante la reacción, al menos en su inicio para la incorporación del alcohol en exceso en la fase de aceite. Si este grado de agitación se prolonga durante todo el tiempo de reacción, el glicerol se dispersará en el medio en partículas más pequeñas. Esta dispersión acarrearán un mayor tiempo de decantación de las partículas en la fase de glicerol (Van Gerpen, 2004).

Otro factor importante es el PH del medio de reacción. Cuanto más cerca al neutro, más rápida será la separación de fases. Ésta es una de las razones por las cuales se debe minimizar la cantidad de catalizador utilizado. La presencia de alcohol en una o ambas fases también afectaría el proceso de separación. Esto se debe al hecho de que el alcohol es miscible en ambas fases, tornando el éster soluble en glicerol y viceversa.

- **Lavado del biodiesel.**

Los ésteres aún deben ser lavados para remover vestigios de catalizador, de jabón y de glicerol libre y ligado. El lavado se realiza por aspersion de agua templada (50 a 60 °C). La aspersion debe ser tal, que no promueva la agitacion para prevenir la formacion de emulsion. La utilizacion de agua levemente acida elimina contaminaciones de calcio y magnesio, ademàs de trazas de hierro y cobre, que disminuyen la estabilidad del combustible (Van Gerpen, 2004).

El lavado tambièn proporciona un medio para la adiciòn de una soluciòn acida (ácido fosfórico o acético por ejemplo) con el objetivo de neutralizar el catalizador remanente en la mezcla, formando una sal que es eliminada conjuntamente con el agua de lavado. La separaciòn de fases entre el éster y el agua ocurre ràpidamente y de forma bien definida.

- **Secado.**

Por último, el biodiesel sufre un proceso de secado antes de ser enviado para almacenamiento. En algunos sistemas industriales, se procede aún a la destilaciòn del biodiesel con vista a la obtenciòn de un producto de mayor pureza (CORPODIB, 2003).

- **Recuperaciòn del alcohol.**

En las reacciones de transesterificaciòn se utiliza un exceso de alcohol de 100 %. La razòn para utilizar este exceso es que conduce la reacciòn a elevados niveles de rendimientos. Este exceso puede ser recuperado para su posterior utilizaciòn por medio de destilaciòn flash (Bouaid, 2005).

- **Control de calidad.**

Dado que la calidad del biodiesel producido es un factor fundamental, que define el modo de funcionamiento y el tiempo de vida de un motor, es esencial garantizar un producto de calidad. Especificaciones y controles de calidad durante la producciòn y distribuciòn del biodiesel son de suma importancia para asegurar la confiabilidad y compatibilidad de los combustibles. Para ser aceptado como combustible, el biodiesel debe cumplir con todas

las especificaciones impuestas por la normativa vigente. Esta normativa es independiente de los procesos de producción y del tipo de materia prima utilizado, por lo que el proceso de refinado de los ésteres obtenidos de la transesterificación es extremadamente importante.

1.2.4.2 Factores que influyen en la reacción.

- **Temperatura y presión.**

La transesterificación puede ocurrir a presión atmosférica y a diferentes temperaturas dependiendo de la materia prima utilizada. El rendimiento de la reacción es directamente proporcional a la temperatura (Ma, 1999; Meher, 2006). Frecuentemente la transesterificación se lleva a cabo a una temperatura cercana al punto de ebullición del alcohol (a 60 °C cuando se utiliza metanol); sin embargo se han estudiado temperaturas que varían desde 25 a 250 °C (Fukuda, 2001). El biodiesel también puede ser producido mediante métodos a alta presión, por ejemplo a 100 bares y 250 °C usando grandes cantidades de metanol y sin necesidad de pretratamiento de la materia prima o también usando metanol a condiciones supercríticas a 350 °C y 43 MPa. Sin embargo, debido a los altos costos estos procesos no son apropiados para la producción de biodiesel (Pinzi, 2009; Mittelbach, 2004).

- **Tiempo de reacción.**

El rendimiento de la transesterificación es directamente proporcional al tiempo de reacción, sin embargo puede variar dependiendo del tipo de materia prima y del catalizador que se utilice (Ma, 1999). La formación de metilésteres es abundante en los primeros minutos con una buena agitación y condiciones óptimas, pero es casi nula con el avance de la reacción después de 90 minutos (Darnoko, 2000).

1.2.5 Aplicaciones del biodiesel.

El biodiesel puede ser utilizado en estado puro (B100) o puede ser mezclado con diesel de petróleo en las operaciones de concentración en la mayoría de las bombas de inyección diesel. La nueva extrema alta presión (29 000 psi) de los motores tiene límites estrictos de fábrica de B5 o B20, según el fabricante. El biodiesel tiene diferentes propiedades disolventes que el petrodiesel y degradará las juntas de caucho natural y las mangueras en los vehículos (en su mayoría vehículos fabricados antes de 1992), aunque éstos tienden a reemplazarlos en su mantenimiento normal por lo que es muy probable que ya hayan sido reemplazadas por FKM, que no es reactiva al biodiesel. Se sabe que el biodiesel elimina los depósitos de residuos en las líneas de combustible en las que se ha utilizado el petrodiesel. Como resultado, los filtros de combustible pueden ser obstruidos con partículas si se realiza una transición rápida de biodiesel puro. Por lo tanto, se recomienda cambiar los filtros de combustible en los motores y calentadores poco después de comenzar el cambio a una mezcla de biodiesel.

En septiembre de 2005 Minesota fue el primer estado en obligar a que el diesel comercializado contenga al menos un 2 % de biodiesel.

- **Uso para vehículos y aceptación de fabricantes.**

En 2005, Chrysler lanzó la Jeep Liberty CRD basada en diesel con mezcladores de 5 % de biodiesel. En 2007, la misma marca indicó que incrementaría la mezcla a 20 % si se estandarizaba el biodiesel en los Estados Unidos.

Desde el 2004, la ciudad Halifax, Nueva Escocia, actualizó su sistema de transporte público para que los autobuses anduvieran con biodiesel puro de aceite de pescado. En un principio surgieron dificultades técnicas, pero con el tiempo se superaron.

En 2007 McDonald's del Reino Unido anunció que convertiría su aceite usado en biodiesel para abastecer a los ómnibus de este país.

- **Uso en trenes.**

Virgin Trains (compañía de trenes británica) dijo que tiene el primer tren a biodiesel B20 y que reducía en un 14 % las emisiones.

El Tren Real el 15 de septiembre de 2007, completó su primer recorrido con B100 abastecidos por Green Fuels Ltd. La realeza, el príncipe de Gales y el director de Green Fuels, fueron los primeros pasajeros en un tren corriendo 100 % biodiesel. Desde ese entonces, el tren opera exitosamente con biodiesel puro.

También en Disney, los trenes del parque corren con B98 desde el 2007. En el 2008 se canceló el proyecto por falta de abastecimiento, pero en 2009 lo retomaron usando biodiesel a partir de aceites usados del parque.

- **Aceite de calefacción.**

El biodiesel puede ser usado también como combustible de calefacción en calderas domésticas y comerciales. Una mezcla de 20 % de biodiesel y 80 % de aceite es la recomendada para no tener que modificar nada.

Se debe tener cuidado en el primer uso porque los residuos del diesel son removidos y pueden obstruir cañerías: es necesario un cambio de filtro. Otra idea es usar biodiesel progresivamente para que las obstrucciones no ocurran con tanta facilidad. Esto genera una ventaja: el sistema se limpia y su rendimiento aumenta.

Algunos estudios afirman que si se usara biodiesel B20 en los hogares, las emisiones de CO₂ se reducirían en 1,5 millones de toneladas por año.

En Massachusetts, una ley ordena que todo diesel para calentar debe ser 2 % biodiesel para 2010 y para 2013, 5 %.

1.2.6 Ventajas e inconvenientes del biodiesel.

Ventajas.

- El biodiesel disminuye de forma notable las principales emisiones de los vehículos, como son el monóxido de carbono y los hidrocarburos volátiles, en el caso de los motores de gasolina, y las partículas, en el de los motores diesel.
- La producción de biodiesel supone una alternativa en el uso del suelo que evita los fenómenos de erosión y desertificación a los que pueden quedar expuestas aquellas tierras agrícolas que, por razones de mercado, están siendo abandonadas por los agricultores.
- El biodiesel supone un ahorro de entre un 25 % a un 80 % de las emisiones de CO₂ producidas por los combustibles derivados del petróleo, constituyendo así un elemento importante para disminuir los gases invernadero producidos por el transporte.
- Por su mayor índice de octano y lubricación reduce el desgaste en la bomba de inyección y en las toberas.
- No tiene compuestos de azufre por lo que no los elimina como gases de combustión.
- El biodiesel también es utilizado como una alternativa de aceite para motores de dos tiempos, en varios porcentajes; el porcentaje más utilizado es el de 10/1.
- El biodiesel también puede ser utilizado como aditivo para motores a gasolina (nafta) para la limpieza interna de éstos.

Inconvenientes.

- La explotación de plantaciones para palmas de aceite (utilizadas para hacer biodiesel) fue responsable de un 87 % de la deforestación de Malasia hasta el año 2000. En Sumatra y Borneo, millones de hectáreas de bosque se convirtieron en tierra de cultivo de estas palmeras y en los últimos años se ha conseguido más que doblar esa cifra, la tala y los incendios perduran. Hasta deforestaron por completo el famoso parque nacional Tanjung Puting de Kalimantan. Orangutanes, gibones, rinocerontes, tapires tigres, panteras nebulosa, etc. se van a extinguir por la

destrucción del hábitat. Miles de indígenas han sido desalojados de sus tierras y 1 500 indonesios fueron torturados. Pero los gobiernos, mientras Europa siga comprando su palma de aceite para hacer biodiesel, seguirán promoviendo el cultivo de estas plantas para su propio beneficio.

- Debido a su mejor capacidad disolvente con respecto al petrodiesel, los residuos existentes son disueltos y enviados por la línea de combustible, pudiendo atascar los filtros, caso que se da únicamente cuando se utiliza por primera vez después de haber estado consumiendo diesel mineral.
- Tiene una menor capacidad energética, aproximadamente un 3 % menos, aunque esto, en la práctica, no es tan notorio ya que es compensado con el mayor índice de cetano, lo que produce una combustión más completa con menor compresión.
- Ciertas hipótesis sugieren que se producen mayores depósitos de combustión y que se degrada el arranque en frío de los motores, pero esto aún no está documentado.
- Otros problemas que presenta se refieren al área de la logística de almacenamiento, ya que es un producto hidrófilo y degradable, por lo cual es necesaria una planificación exacta de su producción y expedición. El producto se degrada notoriamente más rápido que el petrodiesel.
- Hasta el momento, no está claro el tiempo de vida útil del biodiesel; algunos sostienen que posee un tiempo de vida muy corto (meses), mientras que otros afirman que su vida útil llega incluso a 10 años o más. Pero todos concuerdan que depende de su manipulación y almacenamiento.
- El rendimiento promedio para oleaginosas como girasol, maní, arroz, algodón, soja o ricino ronda los 900 litros de biodiesel por hectárea cosechada. Esto puede hacer que sea poco práctico para países con poca superficie cultivable; sin embargo, la gran variedad de semillas aptas para su producción (muchas de ellas complementarias en su rotación o con subproductos utilizables en otras industrias) hace que sea un proyecto sustentable. No obstante, se está comenzando a utilizar la *jatropha* para producir aceite vegetal y, posteriormente, biodiesel y que puede cultivarse incluso en zonas desérticas.

1.2.7 Producción actual de biodiesel en el mundo.

La Unión Europea es el mayor productor de biodiesel del mundo. La producción mundial durante el año 2006 llegó a los 6,7 millones de toneladas, siendo el principal productor Alemania con 2,7 millones de toneladas de producción, lo que equivale al 40 % de la producción total, le sigue Francia con un 11 %, Italia con un 6,7 %, EE.UU. con un 5 % e Inglaterra con 3 %. En la **Tabla 1.5** puede apreciarse la producción durante el período 2003 – 2006.

Tabla 1.5 Producción anual de biodiesel en Europa.

Producción anual de biodiésel (Miles de toneladas)				
País	2003	2004	2005	2006
Alemania	450	1.035	1.669	2.662
Francia	366	348	492	743
Italia	210	320	396	447
EE.UU	67	83	250	336*
Inglaterra	3	9	51	192
Australia	27	29	36	187*
China	20	45	64	150*
Austria	25	57	85	123
Polonia	--	--	100	116
República Checa	--	60	133	107
Tailandia	--	--	79	100*
España	--	13	73	99
Portugal	--	--	--	91
Eslovaquia	--	15	78	82
Dinamarca	10	70	71	80
Otros	1	6	36	1.177
Total	1.179	2.090	3.613	6.692

Fuente: Cifras obtenidas de Steenblik, 2006; EBB, 2007.

1.3 Jatropha Curcas.

El piñón de leche es una planta originaria de América Latina, perteneciente a la familia de las Euphorbiaceae, más conocida como Jatropha Curcas. La planta se encuentra distribuida en zonas de variados tipos climáticos, en donde crece de forma espontánea y es utilizada para la cura de distintas enfermedades. A pesar de que aún la mayoría de la población del planeta no conoce sus nuevos usos, actualmente está siendo objeto de múltiples investigaciones. Debido a que de ella se extrae el mejor aceite para ser utilizado como combustible en sustitución de la gasolina o el diesel, aportando muchas ventajas medioambientales y económicas. Luego de dos años de siembra, la planta se encuentra en condiciones de ofrecernos su semilla. Y cuenta con la ventaja de no existir variabilidad en ella, debido a su nula posibilidad de cruce con otras plantas. La India es actualmente el país que más ha trabajado en los usos de la Jatropha, utilizando su aceite en vehículos de motor. Los grandes empresarios agropecuarios se dedican a cultivarla en sus tierras improductivas, con la finalidad de obtener su aceite y utilizarlo en sus maquinarias agrícolas y de transporte. Esto ha logrado imponer una independencia en el uso de combustible, que por lo general es un producto importado. Una gran cantidad de países de África se encuentran actualmente enfrentados a la desertización de una gran cantidad de terrenos, para lo que han establecido el cultivo de la planta como una manera de resolver la problemática. Dado a que la jatropha regenera la tierra haciéndola reutilizable. En Brasil durante décadas se ha estudiado la utilización de la caña de azúcar como un medio de obtener una producción propia de combustible, o bien, utilizarlo en la mezcla con este carburante. Pero actualmente el interés de los brasileños también ha recaído en la jatropha, la intención de sustituir los carburantes de fósiles, los que son altamente contaminantes, se vería enfocada en la utilización de este producto. El que lo supera en rendimiento y además de producir menor cantidad de agentes contaminantes, aportaría una forma de abastecerse de manera independiente en lo que a combustibles se refiere. Ya que su alta resistencia lo hace apto para el cultivo en zonas de altas precipitaciones así como también en climas desérticos (La Jatrofa Curcas y sus estudios internacionales Publicado en: <http://www.jatrofa.com/la-jatrofa-curcas-y-sus-estudios-internacionales/> Internacional | Julio 6th, 2010, visitado el 10 de mayo de 2011).

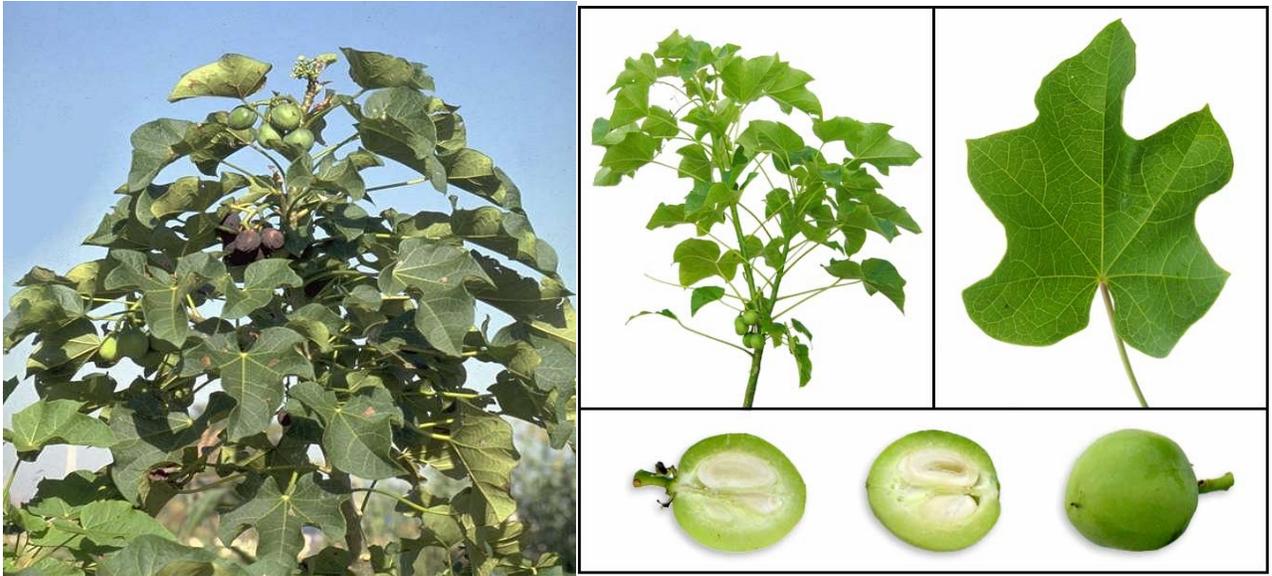


Figura 1.3 Jatropha Curcas.

1.3.1 Características de los frutos.

Los frutos son cápsulas drupáceas de 2 cm de diámetro como una pelotita de ping-pong de color café claro, donde se encuentran de dos a tres semillas del tamaño, forma y apariencia de una almendra, aunque más blancuzca, rodeadas por un material en forma de pulpa y la cáscara del fruto, que se convierte en un material pergaminoso al secarse. Una hectárea de cultivo energético de JCL (en base a 400 árboles/ha) puede producir 3 500 kg de frutos (con un peso promedio por fruto de 3,3g).



Figura 1.4 Frutos de la Jatropha Curcas.

- **Cáscara del Fruto.**

Para obtener la almendra, es preciso pelar o descascarar el fruto, lo que puede hacerse de forma manual o con una máquina descascaradora. La producción de cáscara del fruto es de 1 000 kg/ha (30 % del peso del fruto), la cual también puede pasarse por un molino de bola y convertirse en un material magnífico como biofertilizante después de convertirse en compost. La cáscara tiene un valor calórico de aproximadamente 2 651 kcal/kg (15 % de humedad), la cual también puede ser empleada como combustible.

La cáscara también puede transformarse a través de un proceso de digestión anaerobia en biogás y biofertilizante (efluente del digestor), lo que podría optimizar los rendimientos energéticos. En Nicaragua fue investigada la bioconversión de este material en digestores anaerobios de flujo ascendente, a temperatura ambiente con tiempos de retención de 3 días, alcanzándose producciones de biogás adecuadas.

- **La semilla.**

Una hectárea de la variedad nativa podría producir unos 2 500 kg de semillas (70 % del peso del fruto y 5 % de humedad) de color negras y oblongo elipsoidales con estrías oscuras y prominentemente reticuladas, que pueden medir como promedio alrededor de 17,41 mm largo (16,30 mín – 19,00 máx) y 11,45 mm ancho (10,00 mín – 12,80 máx). El peso de la semilla (para 1 000 unidades) es aproximadamente 840 g; esto es 1 190,5 semillas por kg como promedio. Cada semilla pesa como promedio 0,84 g en la variedad nativa, según los resultados experimentales obtenidos en el segundo año del cultivo, de este peso el 74 % corresponden a la nuez y un 26 % a la cascarilla o pergamino. Este último no se puede eliminar para su uso como portador energético en el caso de usar máquinas extractoras Sundhara (proyecto alemán), debido que la misma facilita el proceso de extracción del aceite. La cascarilla tiene un valor calórico de 4 108 kcal/kg (10 % de humedad), por lo que este material puede ser empleado como portador energético.

La variedad de Cabo Verde, posee una semilla más pequeña (el peso de 1 000 granos es aproximadamente 682 g, la longitud de semilla es aproximadamente 16,8 mm). Esta variedad casi se encuentra en todos los países del mundo, excepto Centroamérica (en

Cuba se han sembrado unas 9 ha recientemente, en las provincias de Guantánamo y Granma, adaptándose muy bien a las condiciones climáticas de esas regiones secas, estando en proceso de evaluación.

La semilla de la variedad de Nicaragua tiene un peso por 1 000 granos de aproximadamente 878 g, la longitud de semilla es aproximadamente 20,3 mm. El rendimiento de los árboles parece ser el mismo, pero tiene menos frutas por árbol que la variedad africana.

Otra variedad mexicana reportada como no tóxica (el peso de 1 000 granos está entre 524 g y 901 g). Birgit y Schmook reportan existencia de estas semillas en la zona de Misantla, Veracruz, la cual es muy apreciada por la población como alimento.

Las variedades nativas de Centroamérica (Nicaragua, México y Cuba) son diferentes a la de Cabo Verde, con hojas más grandes y redondeadas y una talla mayor, con semillas más grandes. Aunque esta última en Cuba parece ser más resistente ante el estrés por sequía.

Cada 100 g, la semilla puede contener 6,6 g de H₂O, 18,2 g de proteína, 38,0 g de aceite vegetal, 33,5 g de hidrato de carbono total, 15,5g de fibra, y 4,5g de ceniza (Duque y Atchley, 1983).

Las semillas son longevas, debiéndose reducir su humedad hasta alcanzar un 5 a 7 % antes de almacenarse. A la temperatura ambiente del local las semillas pueden retener una alta viabilidad por lo menos durante un año, esa característica de longevidad le da ventajas con relación a otras oleaginosas. Sin embargo, con el tiempo el aceite varía su PH afectando después el proceso de transesterificación para producir biodiesel, haciéndolo más ácido y encareciendo el proceso industrial, al requerir de un consumo mayor de materias primas.

Las semillas pueden ser prensadas en cualquier máquina extractora de aceite diseñada para su procesamiento a presión en frío obteniéndose dos productos:

1) El aceite vegetal.

Las semillas contienen alrededor de un 38 % de aceite en peso (aunque hay autores que reportan cifras hasta aproximadamente un 50 %). De esta cifra se puede obtener entre un 27 y 32 % usando máquinas extractoras a presión en frío. Este aceite es principalmente usado para la producción de jabón, insecticida y como combustible en forma de aceite puro o después de transesterificar (metilester o etilester) como biodiesel para ser usado en motores, cocinas y faroles para el alumbrado. Como biodiesel se emplea en mezclas B2, B5, B10, B20 o puro (B100), si se usan algunos extractos como solventes orgánicos, la extracción puede aumentar.

Usando una máquina Sundhara de fabricación local se han obtenido extracciones de aceite del orden de 29 % y se ha logrado rendimientos de 3,3 kg semillas para producir 1 kg de aceite puro (1,086 litros de aceite), con las siguientes características físico químicas, **Tabla 1.6**, determinadas en el Laboratorio de la Refinería Hermanos Saíz de Santiago de Cuba.

Tabla 1.6 Características físico químicas.

VCI kcal/ kg	8955,8
VCS kcal/ kg	9335,0
Densidad a 60 °F g/cm ³	0,9207
Viscosidad cinemática a 20 °C cst	44,31
Relacion C/H	13,11
% de azufre en peso	0,04
% de H ₂ O en peso	0,21

Una hectárea podía producir en las condiciones predeterminadas en este trabajo unos 750 kg de aceite puro de JCL (30 % del peso de la semilla), con un valor calórico de 9 335,0 kcal/kg, el cual fresco puede alcanzar menos de un 4 % de acidez.

2) La torta o cake.

Es una mezcla de carbohidratos, fibra, proteína y aceite que no se pudo extraer, la cual contiene algunos componentes tóxicos, aun así es muy útil como biofertilizante por su alto contenido en nitrógeno, una vez eliminados los elementos tóxicos, se podría transformar en un excelente alimento balanceado para el ganado, con un contenido proteínico superior al 50 %. Aproximadamente 1 000 kg de este material podrían obtenerse por ha, que también puede usarse como combustible ya que tiene un valor calórico de 2 651 kcal/kg (3 % de humedad). La variedad mexicana es no toxica (contenidos de ácido forbólico y curcina muy bajos) por lo que sus semillas producen una torta de mayor calidad para usos económicos, estando en los planes de la investigación adquirir estas semillas para su evaluación. Investigaciones en Nicaragua ya han demostrado que este material es un buen sustrato para la producción de biogás en reactores UASB.

1.3.2 La madera combustible.

Una hectárea de JCL puede aportar unas 20 t de biomasa (base seca) (considerando 200 kg de biomasa por árboles (población de 400 árboles/ha) después de los 6 años.

La madera de las podas obligatorias de este cultivo (mantenimiento y de formación) tiene un valor calórico de 3 702 kcal/kg (15 % de humedad), la cual puede ser empleada como estacas para regeneraciones de la JCL en potreros como cercas vivas o como leña combustible o para producir carbón. La producción de leña combustible aún no se ha podido definir con exactitud en las condiciones de este estudio, teniendo en cuenta que las plantaciones aún son jóvenes.

Desde el punto de vista ambiental cada árbol puede contribuir a fijar 6 kg de CO₂ (disminución de las emisiones de gases contaminantes) y 9 kg de O₂, además de contribuir a la reforestación de zonas semiáridas y secas, ayudando a incrementar la biodiversidad, evitar la erosión, restablecimiento del ciclo hídrico y formación de suelos.

Estudios internacionales de varios países del trópico; arrojan que si el nivel de nutriente suministrado es suficiente (en especial nitrógeno), el desarrollo de la planta es función de la disponibilidad de agua y la producción primaria neta de biomasa (NPP), la cual es la

producción de todos los tipos de biomasa en un período anual (hojas del árbol, biomasa de la madera, frutos, etc.), puede alcanzar un rango promedio de 1,2 t/ha/año de materia seca al aire seco con precipitaciones anuales de 200 mm hasta 11,8 t/ha/año de materia seca al aire donde las lluvias alcanzan 1 500 mm.

Cada planta tiene después de 7 años aproximadamente 200 kg de biomasa, incluyendo las raíces, entonces considerando un 25 % de materia seca, se aportarían 50 kg de materia seca (biomasa)/árbol (Sotolongo, 2007).

1.3.3 Reproducción.

La *Jatropha Curcas* se multiplica por distintos métodos de propagación:

- Vía generativa (por semillas).
- Por vía vegetativa (estaca).
- In-vitro (reproducción de porta injertos por micro propagación).

Los países productores solo usan 2 métodos de propagación, por semilla y por estaca. En estos últimos años se está estudiando el comportamiento y desarrollo del cultivo in vitro en distintos países.

1.3.4 Resistente a todo.

La *Jatropha* resiste altas temperaturas y sequías, al tiempo que protege y fertiliza el suelo. El secreto que hace a la *Jatropha* resistente a todo es su veneno. En lugares desérticos donde no pone una raíz ni la mala hierba, la *Jatropha* es capaz de crear, con sus arbustos que alcanzan los seis metros, auténticos bosques verdes. Más de ocho meses de sequía al año y temperaturas que rondan los 40 grados no marchitan a la *Jatropha*, como bien ha observado Becker en Gujarat, en la India.

La erosión del suelo por el viento y el agua tampoco hace mal a la *Jatropha*. Y no solo eso, gracias a ella, el suelo erosionado vuelve a ser fértil. "En África comprobamos que el viento y el agua, junto con partículas de la *Jatropha*, crean capas de preciados sedimentos

de hasta 0,7 centímetros por año. Con el paso del tiempo, los suelos erosionados se convierten en aptos para el cultivo", dijo Becker.

Extensiones de tierra hasta ahora inservibles podrían ser cultivadas, creando puestos de trabajo y beneficios a países con pocos recursos. Mientras, la *Jatropha* protege el suelo de la erosión y libra al cielo de parte de los gases contaminantes.

1.3.5 Propiedades.

El aceite producido a partir de la semilla de la *Jatropha Curcas* es semejante al diesel obtenido del petróleo.

- Es la única planta oleaginosa que su ciclo productivo se extiende por más de 40 años.
- Se adapta a suelos de poca fertilidad.
- La semilla genera un rendimiento de aceite entre el 30 y 40 % (Últimos estudios dan un promedio del 38 %).
- Es un cultivo social ya que se pueden generar pequeños emprendimientos de 3 a 5 has, manejados por una familia como técnica de autogestión de empleo, teniendo un rendimiento de explotación importante.
- Si el terreno lo permite, se puede asociar el cultivo con una forrajera y obtener un rendimiento adicional para la misma superficie de plantación.
- Empresas que generaron transferencia tecnológica en Brasil, determinaron que se puede hacer una primera cosecha de hasta 250 kg en los primeros 6 a 8 meses de crecimiento de la planta. La verdadera cosecha comercial se da luego del primer año de crecimiento y la producción se estabiliza cuando la planta tiene 4 años, obteniéndose de 1 500 kg a 2 000 kg en terrenos áridos o semiáridos. Esta producción de cosecha se duplica de 3 000 kg a 4 000 kg con el agregado de irrigación a la plantación.
- Investigaciones efectuadas en Brasil, determinaron que el aceite de la *Jatropha Curcas* es muy parecido al de la Colza o Canola.
- La *Jatropha* resiste altas temperaturas y sequías, al tiempo que protege y fertiliza el suelo.

- La planta es tan venenosa que ni siquiera hace falta cuidarla de sus depredadores. Estudios en la India, determinaron que durante más de ocho meses de sequía al año y temperaturas que rondan los 40 grados no marchitan a la *Jatropha*.
- Extensiones de tierra hasta ahora inservibles podrían ser cultivadas, creando puestos de trabajo y beneficios a regiones con pocos recursos.
- La *Jatropha* protege el suelo de la erosión y libra al cielo parte de los gases contaminantes.

(*Jatropha Curcas* " Una planta mágica ", publicado en: http://buenasiembra.com.ar/ecologia/agricultura/planta_magica_jatropha_curcas.htm, visitado el 10 de mayo de 2011).

1.3.6 Producción de biodiesel a partir de la *Jatropha Curcas*.

La *Jatropha curcas*, conocida como "piñón de tempate" o "jatrofa", es una Euphorbiacea que sus semillas rinden entre un 20 y 40 % de aceite no comestible, debido a la presencia de compuestos antinutricionales tóxicos (Shah, 2004). Este aceite está constituido por ácidos grasos saturados y no saturados, presenta un 14,1 % de ácido palmítico, 6,7 % de ácido esteárico y dentro de los ácidos insaturados el ácido oleico representa el 47 % y 31,6 % el ácido linoleico (Augustus, 2002). Recientemente, Martínez-Herrera ha reportado que el mayor valor de ácidos grasos encontrados en el aceite es de 34,6-44,4 % del oleico, 10,5-13,0 % de ácido palmítico y 2,3–2,8 % de ácido esteárico (Martínez-Herrera, 2006). Resultados similares a los obtenidos por Augustus en el 2002.

El aceite de la *jatropha* puede ser utilizado directamente como combustible en lámparas y motores de combustión o se puede transformar en biodiesel, por lo que es considerada como un potencial sustituto del diesel. No es recomendable el uso directo del aceite obtenido de la *jatropha* por su mayor viscosidad con relación al diesel y menor tiempo de iniciación de la combustión. Por éstas razones el uso directo no ha sido ampliamente probado por largos períodos (Openshaw, 2000). Neyda y colaboradores reportan en enero de 2008 un estudio teórico y experimental de la reacción de transesterificación del aceite de la *jatropha curcas* para la producción de biodiesel. Realizan modelaciones mecánico cuánticas para la simulación del mecanismo de reacción, considerando los puntos de

mayor energía durante la reacción, así como la estructura de transición. Los cálculos se realizan mediante el método semiempírico (Gaussian 2003).

Describen las etapas por las que transcurre el proceso. Para el proceso experimental purifican, lavan y desodoran el aceite obtenido de la especie y utilizan 100 g calentando hasta 45 °C, utilizando una solución catalítica básica de 0,8 % disuelta en alcohol. Al transcurrir 60 minutos de reacción separan el glicerol del medio de reacción. El catalizador y el alcohol remanente son eliminados mediante lavados con agua caliente y solución de ácido cítrico al 15 %. Finalmente los ésteres fueron secados durante 1 hora a 130 °C bajo corriente de nitrógeno.

En la revista *Biochemical Engineering*, Sriappareddy Tamalampudi y colaboradores publican un artículo en el 2008 relacionado con la producción enzimática de biodiesel a partir del aceite de *jatropha*, realizando un estudio comparativo entre células inmovilizadas y las enzimas lipasas comerciales.

Las cepas fueron adquiridas en laboratorios especializados comerciales. Partieron de 5 g de aceite y una relación molar alcohol-aceite (3:1) y 0,2 g de lipasas para la conversión completa de los triglicéridos en ésteres metílicos. Los alquilésteres fueron analizados por cromatografía capilar (Sriappareddy, 2008).

En el 2007, ya Shweta Shah y Munishwar N. Gupta, habían realizado trabajos relacionados con la preparación de biodiesel a partir del aceite de *jatropha* utilizando enzimas lipasas, partiendo de 0,5 g de aceite y etanol en una relación de 1:4 con 0,05 g de enzimas incubadas a 45 °C. Reportan enzimas que producen mayores rendimientos y grado de influencia del alcohol empleado (Shweta, 2006).

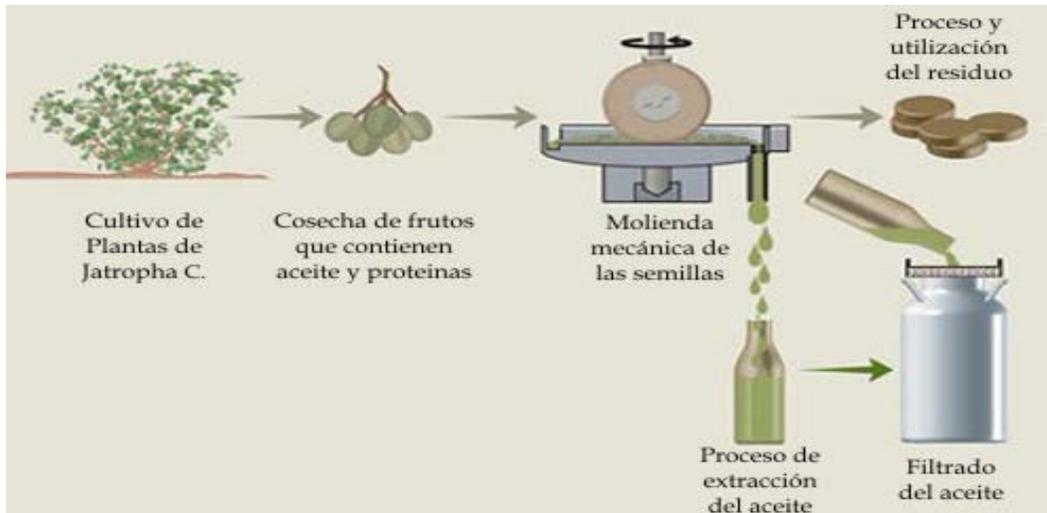


Figura 1.5 Extracción del aceite de la Jatropha Curcas.

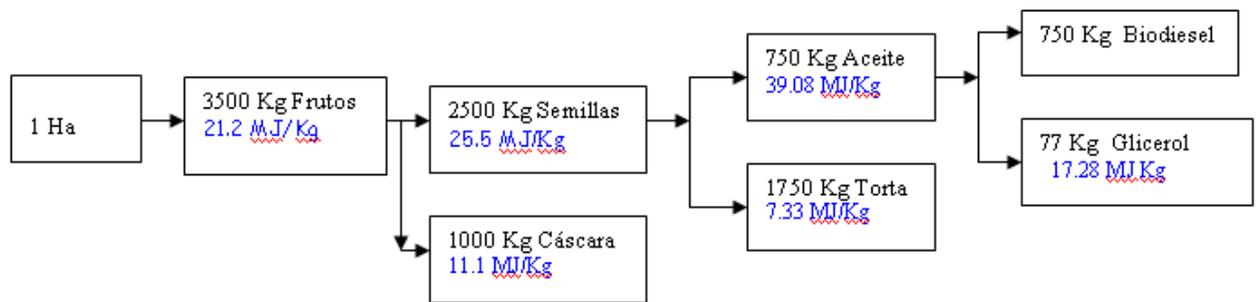


Figura 1.6 Rendimiento de la Jatropha Curcas.

1.3.7 El glicerol.

En el proceso de transesterificación del aceite para producir biodiesel por regla general se forman 79 ml de glicerina por cada litro de aceite usado 7,9 %, o sea unos 64,35 litros de este material por hectárea. La glicerina pura no es sólida a temperatura ambiente, pero la "capa de glicerina" no es solo glicerina, es una mezcla de glicerina, jabones, metanol sobrante y catalizador (lejía). Esta se puede destilar para convertir en Glicerina farmacéutica que tiene un alto valor añadido como materia prima industrial o como combustible en la producción de biogás.

Hay dos rutas para producir energía de los desechos del proceso de Biodiesel, la bioconversión y termo-conversión, aunque la generación del Biogás combinada es mejor que

la combustión. La mezcla correcta de proteínas, glicerina y sales necesita ser cuidadosamente resuelto a través de futuras investigaciones.

Desde 2001 se está investigando la conversión en gas de la glicerina obtenida como coproducto en la transesterificación. Este proceso podría aportar también, una notable ayuda en la depuración del resto de residuos de la planta que se incorporarían como materia prima en los digestores.

La termo conversión de la glicerina será otra opción en el futuro, teniendo en cuenta que la relación de poderes caloríficos inferiores de la glicerina y el gasoil es 0,377 (4128,2 kcal/kg). En cuanto a la combustión se refiere, la glicerina se quema bien, pero ha de ser quemada a altas temperaturas para evitar que emita vapores de acroleína que es tóxica por inhalación y por contacto a través de la piel. El límite legal de exposición humana a la acroleína es de 0,1 ppm como promedio durante una jornada de trabajo de 8 horas y en ningún momento se puede exceder de 0,3 ppm durante más de 15 minutos. Los vapores de acroleína se producen al quemar la glicerina entre 200 y 300 °C.

Así pues, la opción de quemar la glicerina debe contar con unos quemadores que permitan alcanzar una combustión completa a una temperatura del orden de los 1 000 °C y mantenerlo en los quemadores un tiempo superior a 5 segundos, siendo conveniente incorporar también un proceso previo de precalentamiento y atomización.

La glicerina tiene más de 1 500 usos conocidos, no obstante en este momento las aplicaciones más importantes se derivan de su destino para la industria farmacéutica de la alimentación que además, es también el que más crece con tasas del 4 % anual. La cosmética le sigue en importancia con tasas de crecimiento anual que superan el 3,5 %.

1.3.8 Aportes e Impactos.

Los principales aportes e impactos de un agrosistema forestal de *Jatropha Curcas* se pueden enmarcar en los beneficios económicos, sociales y medioambientales:

- **Económicos:** el país podrá disponer de nuevos combustibles renovables (cáscara, cascarilla, leña, y el aceite vegetal para producir biodiesel) lo que tendrá una influencia positiva en el mejoramiento de la matriz energética; así como posibilitará una mayor diversificación de los combustibles que participan en la economía energética, en especial la biomasa (al aportar nuevos combustibles renovables). Estas materias primas y sus subproductos (residuos) de los procesos industriales (aceites, glicerol, torta, cáscara, etc.) pueden tener otros empleos económicos (insecticidas, abono, alimento animal, etc.) de acuerdo con la factibilidad económica, así como generar empleos, desarrollo de agroindustrias y reducción de las importaciones de combustibles y otras materias primas y generar nuevos rubros exportables.
- **Sociales:** puede contribuir a la solución de problemas de la energización rural como: un nuevo combustible para las cocinas, lámparas de alumbrado, las maquinarias, etc., lo que influye en una elevación de la calidad de vida.
- **Medioambientales:** el desarrollo de un agrosistema de *Jatropha Curcas* y el aprovechamiento de su biomasa pueden propiciar un incremento de las áreas boscosas y frenar la reforestación en los ecosistemas más frágiles, en especial en las regiones semiáridas y secas no aprovechadas por la agricultura cubana, la regeneración de esos suelos, incremento de la biodiversidad, disminución de las emisiones de gases contaminantes, etc.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Sistema experimental.

Los principales componentes del sistema experimental utilizado en el análisis son:



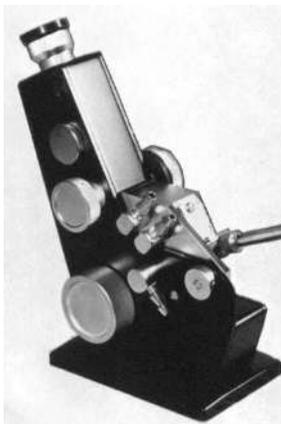
Balanza Electrónica.



Calentador de agua.



Agitador electromagnético.



Refractómetro.



Viscosímetro.

Figura 2.1 Componentes.

2.2 Materiales empleados.

2.2.1 Aceite de Colza.

La materia prima utilizada es el aceite de colza, del cual se conoce su densidad y masa molar. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.1 Propiedades del aceite de colza.

Densidad (g/ml)	Masa molar (g/mol)
0,9159	880

2.2.2 Catalizador.

Se utiliza hidróxido de sodio, NaOH, como catalizador. Su masa molar es 40 g/mol.

2.2.3 Alcohol.

Se utiliza etanol, EtOH y metanol, MeOH, como alcohol, de los cuales se conoce su densidad y masa molar. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.2 Propiedades del alcohol.

Alcohol	Densidad (g/ml)	Masa molar (g/mol)
Etanol	0,7890	46,08
Metanol	0,7919	32,04

2.2.4 Disolución de H₃PO₄ al 5%.

Para el lavado del biodiesel se utilizó una disolución de H₃PO₄, preparada al 5 %, a partir de una solución al 85 %.



Figura 2.2 Materiales.

2.3 Procedimiento experimental.

Con el objetivo de obtener el volumen final de biodiesel se realiza una serie de experimentos dinámicos. Estos experimentos se llevan a cabo mezclando el catalizador con el alcohol y se pone en el agitador, que se encuentra dentro del calentador a una temperatura de 40 °C y una frecuencia de rotación de 730 rpm. Se mantendrá bajo estas condiciones hasta lograr diluir el catalizador en el alcohol.

El aceite se mezcla con el alcohol-catalizador. Esta mezcla se coloca en el agitador durante una hora y media para que ocurra la reacción de transesterificación a una temperatura de 40 °C y una frecuencia de rotación 730 rpm. Después de transcurrido el tiempo de reacción la mezcla se coloca en un embudo de separación, donde ocurre la separación de las dos fases, dejándolo que repose hasta el siguiente día.

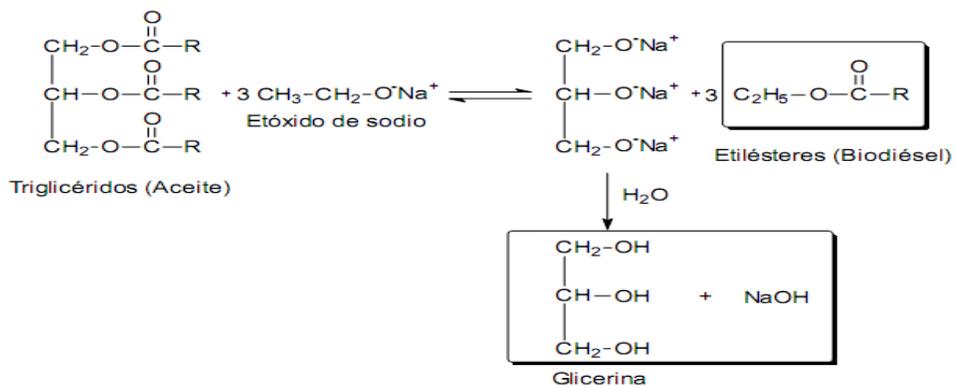


Figura 2.3 Reacción del etóxido de sodio con la mezcla de triglicéridos.

Obtenidas las dos fases como se muestra en la **Figura 2.4**, se procede a medir la cantidad de biodiesel y glicerina.



Figura 2.4 Separación de fases.

Se separa la glicerina (volumen inferior) de la mezcla de ésteres de ácidos grasos. Se le adicionan 50 ml de disolución de H_3PO_4 al 5% y se agita suavemente. Se deja en reposo hasta separación de las fases. Se repite hasta neutralización del biodiesel. Posteriormente es medido su volumen.



Figura 2.5 Lavado del biodiesel.

Se seleccionaron como variables de estudio las siguientes:

- Cantidad de catalizador (NaOH) en gramos: 0,2; 0,3 y 0,6.
- Cantidad de etanol (EtOH) en mililitros: 20, 30 y 40.
- Cantidad de metanol (MeOH) en mililitros: 15, 20 y 30.

Teniendo en cuenta estas variables: cantidad de catalizador y cantidad de alcohol; se obtienen unos resultados porcentuales que corresponden a la importancia de cada uno de estos factores en la varianza de unas variables objetivo, que en este caso son: volumen de biodiesel, viscosidad, densidad, índice de refracción y volumen de glicerina.

Haciendo todas las combinaciones posibles de cantidad de catalizador y cantidad de alcohol, el número final de experimentos a realizar es de 18, los resultados se pueden ver en la **Tabla 2.3**.

Tabla 2.3 Matriz con los experimentos.

No.	T (°C)	t (min)	Aceite (ml)	NaOH (g)	Etanol (ml)	Aceite (mol)	Etanol (mol)	Etanol (mol)/ Aceite (mol)
1	40	90	75	0,6	40	0,078	0,686	8,795
2	40	90	75	0,6	30	0,078	0,515	6,596
3	40	90	75	0,6	20	0,078	0,343	4,398
4	40	90	75	0,3	40	0,078	0,686	8,795
5	40	90	75	0,3	30	0,078	0,515	6,596
6	40	90	75	0,3	20	0,078	0,343	4,398
7	40	90	75	0,2	40	0,078	0,686	8,795
8	40	90	75	0,2	30	0,078	0,515	6,596
9	40	90	75	0,2	20	0,078	0,343	4,398
					Metanol (ml)		Metanol (mol)	Metanol (mol)/ Aceite (mol)
10	40	90	75	0,6	30	0,078	0,741	9,505
11	40	90	75	0,6	20	0,078	0,494	6,337
12	40	90	75	0,6	15	0,078	0,371	4,753
13	40	90	75	0,3	30	0,078	0,741	9,505
14	40	90	75	0,3	20	0,078	0,494	6,337
15	40	90	75	0,3	15	0,078	0,371	4,753
16	40	90	75	0,2	30	0,078	0,741	9,505
17	40	90	75	0,2	20	0,078	0,494	6,337
18	40	90	75	0,2	15	0,078	0,371	4,753

En el proceso se analizaron las siguientes respuestas: volumen de biodiesel, viscosidad, densidad, índice de refracción y volumen de glicerina.

Las respuestas analizadas se definen:

- **Densidad:**

La densidad del biodiesel se obtiene mediante determinación gravimétrica. Se determina la masa de un volumen exacto y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{Biodiesel} = \frac{m_{Biodiesel}}{V_{Biodiesel}} \quad (2.1)$$

Donde: $m_{Biodiesel}$ = masa del biodiesel determinada en balanza analítica.

$V_{Biodiesel}$ = volumen del biodiesel.

- **Viscosidad:**

La viscosidad se determina haciendo uso de un viscosímetro a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = k \cdot t(\rho_{esfera} - \rho_{biodiesel}) \quad (2.2)$$

Donde: k = una constante que se determina cuando se calibra el viscosímetro.

ρ_{esfera} = densidad de la esfera.

$\rho_{biodiesel}$ = densidad del biodiesel.

t = tiempo que dura la esfera en recorrer dos puntos en el viscosímetro.

Para determinar la constante se prepara una muestra de glicerina al 20 % y mediante la expresión:

$$\eta = k \cdot t(\rho_{esfera} - \rho_{media}) \quad (2.3)$$

Despejando k se obtiene:

$$k = \frac{\eta}{t \cdot (\rho_{esfera} - \rho_{media})} \quad (2.4)$$

La densidad de la esfera se calcula determinando su masa y el volumen que desplaza mediante la ecuación siguiente:

$$\rho_{esfera} = \frac{m_{esfera}}{V_{desplazado}} \quad (2.5)$$

La densidad de la muestra es la de un fluido conocido, en este caso glicerina.

- **Índice de refracción:**

Se determina el índice de refracción en un refractómetro ZEISS de fabricación alemana.

- **Volumen de biodiesel y glicerina:**

Los volúmenes se determinan por una probeta calibrada.

- **Rendimiento:**

$$\eta = \frac{V_{real}}{V_{teórico}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

$$V_{teórico} = \frac{moles_{biodiesel} \cdot \rho_{biodiesel}}{\rho_{biodiesel\ exp}} \quad (2.7)$$

$$moles_{biodiesel} = 3 \cdot moles_{aceite} \quad (2.8)$$

$$moles_{aceite} = V_{aceite} \cdot \frac{\rho_{aceite}}{M_{aceite}} \quad (2.9)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Densidad.

Empleando la **Ecuación 2.1** obtenemos los valores de densidad del biodiesel en los 18 experimentos mostrados en la **Tabla 3.1**.

Podemos observar que en los experimentos realizados con etanol la densidad varía entre 0,85 y 0,89 g/ml, mientras que en los experimentos realizados con metanol varía entre 0,86 y 0,87 g/ml.

Tabla 3.1 Densidad del biodiesel obtenido en los experimentos.

No.	Masa (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)
Etanol			
1	43,1325	50	0,86265
2	43,0405	50	0,86081
3	43,3676	50	0,86735
4	42,8411	50	0,85682
5	42,7643	50	0,85529
6	44,0391	50	0,88078
7	43,0077	50	0,86015
8	43,6083	50	0,87217
9	44,3873	50	0,88775
Metanol			
10	43,2205	50	0,86441
11	43,3554	50	0,86712
12	43,3694	50	0,86738
13	43,6370	50	0,87274
14	43,7217	50	0,87443
15	43,5512	50	0,87102
16	43,3892	50	0,86778
17	43,9833	50	0,87967
18	43,4240	50	0,86848

3.2 Viscosidad.

Empleando las **Ecuaciones 2.4** y **2.5** podemos determinar la densidad de la esfera y la constante k para posteriormente, empleando la **Ecuación 2.3**, calcular la viscosidad del biodiesel obtenido en los experimentos. Estos resultados se muestran en la **Tabla 3.2**.

Datos:

$$m_{\text{esfera}} = 2,3970 \text{ g}$$

$$V_{\text{esfera}} = 2,2 \text{ ml}$$

$$\rho_{\text{esfera}} = 1,0895 \text{ g/ml}$$

$$\rho_{\text{glicerol}} = 1,0469 \text{ g/ml}$$

$$\eta_{\text{glicerol}} = 1,769 \text{ centipoises}$$

$$t_{\text{glicerol}} = 1,81 \text{ s}$$

$$k = 22,94$$

Tabla 3.2 Viscosidad del biodiesel obtenido en los experimentos.

No.	Tiempo (s)	Viscosidad (cp)
Etanol		
1	1,65	8,5865
2	1,345	7,0561
3	1,525	7,7716
4	1,25	6,6721
5	1,35	7,2532
6	1,97	9,4324
7	1,395	7,3395
8	1,61	8,0267
9	2,355	10,8993
Metanol		
10	1,425	7,3581
11	1,525	7,7796
12	1,62	8,2546
13	1,675	8,3289
14	1,555	7,6719
15	1,74	8,7208
16	1,54	7,8328
17	1,555	7,4850
18	1,85	9,3799

En la tabla se observa que la viscosidad varía entre 6 y 11 centipoises en los experimentos realizados con etanol, mientras que en los realizados con metanol varía entre 7 y 10 centipoises.

3.3 Volumen de biodiesel y glicerina e índice de refracción.

Los resultados obtenidos para las respuestas analizadas se muestran en la **Tabla 3.3**.

Tabla 3.3 Resultados de los experimentos.

No.	Glicerina (ml)	Biodiesel (ml)	Biodiesel Lavado (ml)	Índice de refracción
1	6,6	102,8	98	1,4420
2	11,5	82	61	1,4520
3	14,1	75	70,5	1,4530
4	9,2	104	93,5	1,4465
5	9,3	91	85	1,4452
6	1	88	78	1,4550
7	7,6	104	94	1,4470
8	7	92	82	1,4500
9	0,2	87	75	1,4550
10	19,6	83	80	1,4546
11	11,6	79	78	1,4551
12	5	65	60	1,4550
13	10,8	75	73	1,4551
14	10,5	81	79	1,4550
15	6,2	76	72,5	1,4551
16	17,2	85	82	1,4551
17	11	80	76	1,4550
18	6,8	77	75	1,4555

3.4 Rendimiento.

Empleando la **Ecuación 2.6** calculamos el rendimiento del biodiesel obtenido en los experimentos. Los resultados se muestran en la **Tabla 3.4**.

Datos:

$$\rho_{\text{biodiesel}} = 301 \text{ g/mol}$$

$$\text{moles}_{\text{aceite}} = 0,078$$

$$\text{moles}_{\text{biodiesel}} = 0,234$$

Tabla 3.4 Rendimiento del biodiesel obtenido en los experimentos.

No.	Vteórico (ml)	Rendimiento (%)
Etanol		
1	81,6484	100
2	81,8229	75
3	81,2060	87
4	82,2040	100
5	82,3510	100
6	79,9678	98
7	81,8857	100
8	80,7572	100
9	79,3400	95
Metanol		
10	81,4822	98
11	81,2275	96
12	81,2032	74
13	80,7044	90
14	80,5485	98
15	80,8638	90
16	81,1657	100
17	80,0687	95
18	81,1003	92

3.5 Análisis de los resultados.

3.5.1 Influencia de la relación molar en el rendimiento del biodiesel.

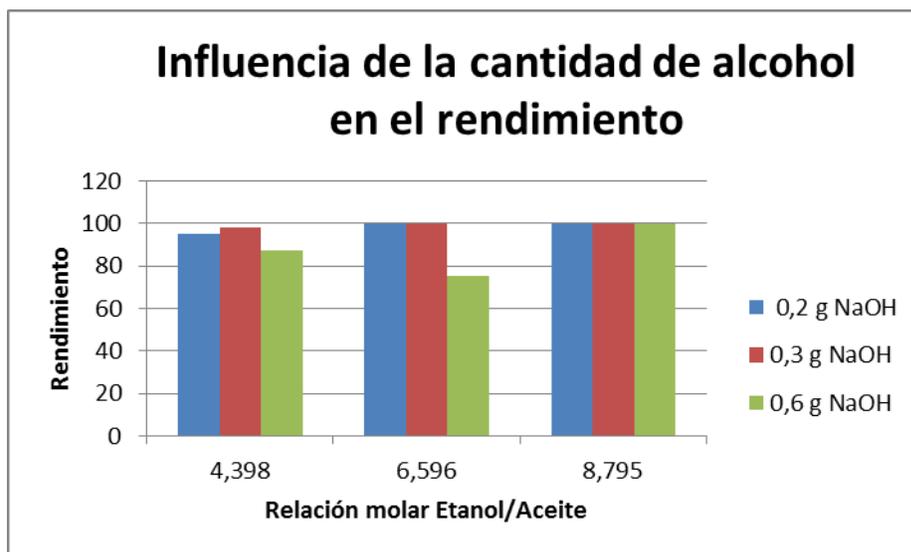


Figura 3.1 Influencia de la cantidad de Etanol en el rendimiento de biodiesel.

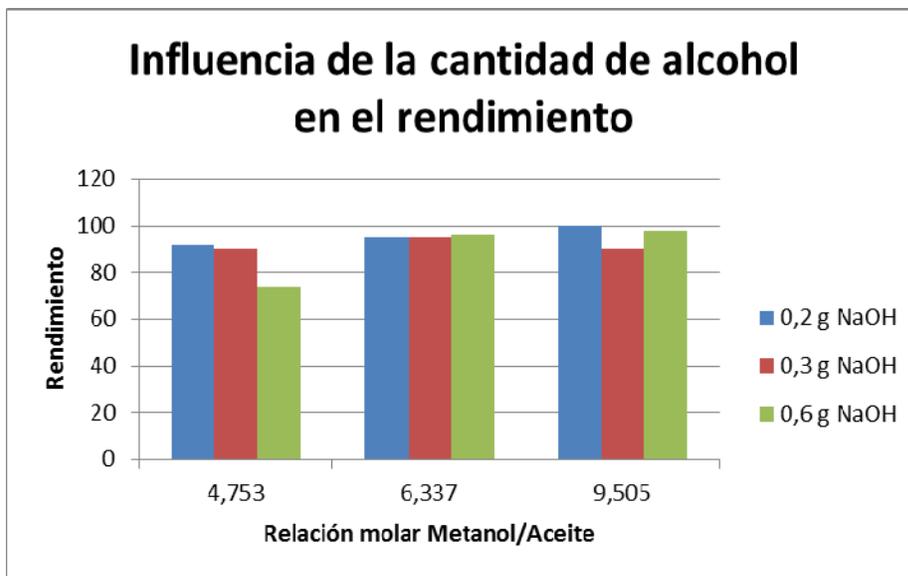


Figura 3.2 Influencia de la cantidad de Metanol en el rendimiento de biodiesel.

En ambos esquemas se muestra el efecto de la cantidad de alcohol en la producción de biodiesel. En general, un aumento de la cantidad de alcohol resultó en un aumento de la producción de biodiesel.

En todos los experimentos con NaOH como catalizador, la cantidad de aceite de colza se mantuvo en un valor constante de 75 ml.

3.5.2 Influencia de la cantidad de catalizador en el rendimiento del biodiesel.

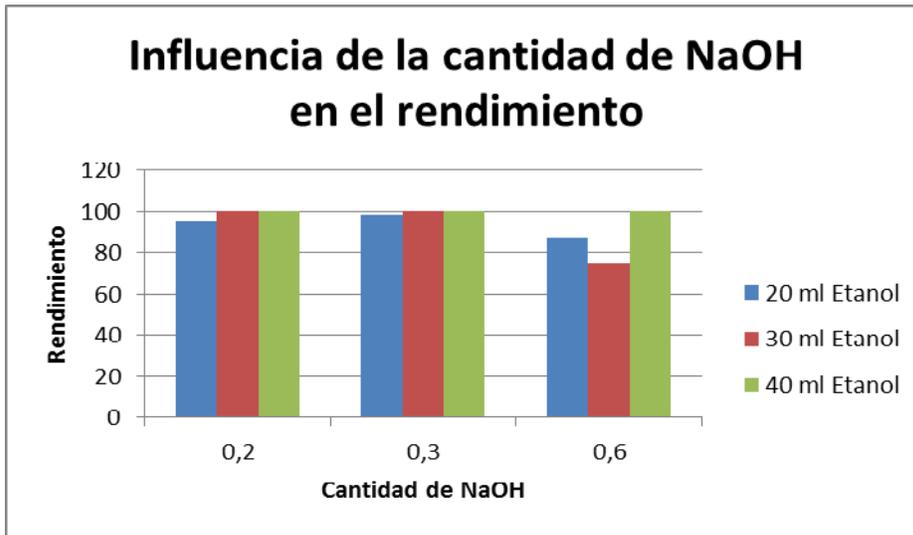


Figura 3.3 Influencia de la cantidad de NaOH en el rendimiento de biodiesel, usando Etanol.

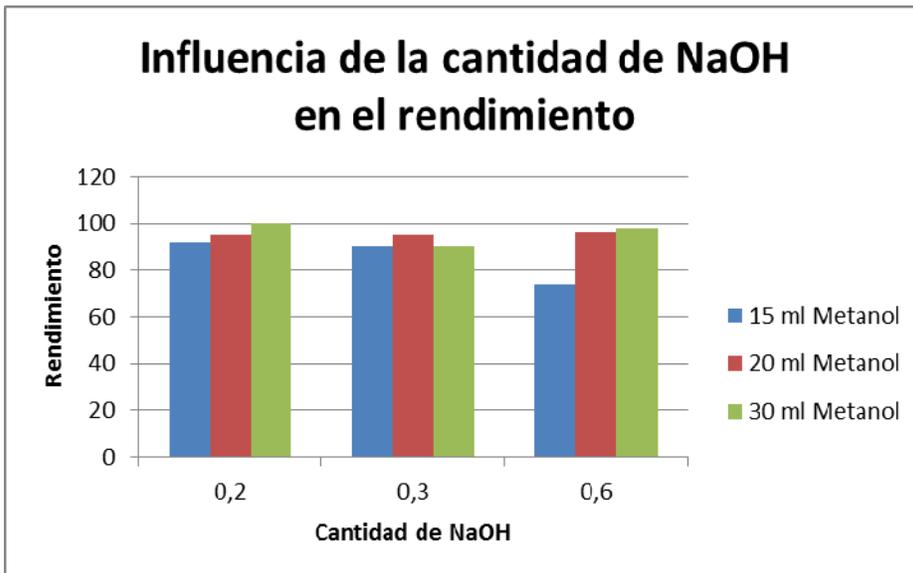


Figura 3.4 Influencia de la cantidad de NaOH en el rendimiento de biodiesel, usando Metanol.

Como se muestra en los gráficos anteriores, un ligero aumento de la cantidad de catalizador no produce alteración significativa en el rendimiento.

CONCLUSIONES

1. El biodiesel es una alternativa sostenible con el fin de disminuir la emisión de contaminantes (monóxido de carbono y los hidrocarburos volátiles) a la atmósfera, en el mundo.
2. Es fácil de obtener este tipo de combustible, no es necesario un equipo especial. Usted puede obtener de aceites usados de aceite no comestible.
3. Los principales problemas en el procedimiento experimental se han encontrado en la separación de la glicerina del biodiesel y la posible formación de restos de jabón, debido a la humedad o la presencia de ácidos grasos en las muestras.
4. En la producción de biodiesel a base de etanol, la separación de la glicerina a partir de ésteres de etilo, es más difícil y toma más tiempo que el proceso a base de metanol.
5. Los resultados de la producción de biodiesel en las condiciones estudiadas muestran que un tiempo de reacción de 90 min es suficiente para obtener un alto rendimiento.
6. Los resultados obtenidos muestran que con una temperatura de 40 °C, una alta producción de biodiesel se obtuvo.
7. Un aumento de la cantidad de alcohol en las condiciones estudiadas resultó en un aumento de la producción de biodiesel.
8. Un pequeño aumento de la cantidad de catalizador no produce alteración significativa en el rendimiento.

RECOMENDACIONES

1. Emplear para la determinación de los rendimientos métodos de análisis instrumental. Pudiendo ser cromatografía gaseosa o métodos espectroscópicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alamu, O.J., Waheed, M.A., Jekayinfa, S.O. (2008) Effect of ethanol-palm kernel oil ratio on alkali-catalyzed biodiesel yield. *Fuel* 87 (8-9): p. 1529-1533.
2. Appa & Pricewaterhousecoopers. Una Estrategia de Biocarburantes para España (2005-2010). 2005. Adaptación a los objetivos de la Directiva 2003/30/CE. España. 192 p.
3. Augustus, G.D.P.S., Java Beans, M., Seiler, G.J. Evaluation and bioinduction of energy components of *Jatropha curcas*. *Biomass Bioenerg.* 2002. 23, 161–164.
4. Ballesteros, M. Fuentes, cultivos y PAC. Producciones aspectos legislativos. 2003. CIEMAT. España. 31 p.
5. Biocombustibles publicado en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Biocombustibles>, visitado el 30 de abril de 2011.
6. Biodiesel publicado en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Biodi%C3%A9sel>, visitado el 10 de mayo de 2011.
7. Bouaid, A.; Diaz, Y.; Martinez, M.; Aracil, J. Pilot plant studies of biodiesel production using *Brassica carinata* as raw material. *Catalysis Today* 106 (2005) 193–196.
8. Bunyakiat K, Makmee S, Sawangkeaw R, Ngamprasertsith S. Continuous production of biodiesel via transesterification from vegetable oils in supercritical methanol. *Energy Fuels* 2006;20:812–817.
9. Castro, P.; Castillo, L.; Nazario, M.; Coello, J.; Calle, J. Producción de biodiesel a pequeña escala a partir de Aceites usados en la ciudad de lima. Intermediate Technology Development Group (ITDG) y la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). 2006. Lima, Perú. 5 p.
10. CNE, Comisión Nacional de Energía de Chile. Especificaciones de calidad, para la producción, importación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización, de bioetanol y biodiésel. 2007. Proyecto de Ley. Chile. 3 p.
11. Comisión de las Comunidades Europeas. Comunicación de la Comisión. Estrategia de la UE para los biocarburantes. 2006. {SEC(2006) 142}. Bruselas. 31 p.
12. CORPODIB, Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y producción limpia. Programa estratégico para la producción de biodiesel - combustible automotriz a partir de aceites vegetales. 2003. Informe final. Bogotá. Colombia. 445 p.

13. Darnoko, D., Cheryan, M. (2000) Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *Journal of the American Oil Chemists Society* 77 (12): p. 1263-1267.
14. De Juana, J.; De Francisco, A.; Santos, F.; Herrero, M.; Crespo, A. *Energías Renovables para el desarrollo*. 2003. Thomson Editores. Paraninfo S.A. España. 311 p.
15. Demirbas, A. Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy* 35 (2007) 4661–4670.
16. Encinar, J.M., Gonzalez, J.F., Rodriguez, J.J., Tejedor, A. (2002) Biodiesel fuels from vegetables oils: Transesterification of *Cynara cardunculus* L. oil with ethanol. *Energy & Fuels* 16: p. 443-450.
17. FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *UWET - Unified Wood Energy Terminology Uwet*. 2001. Departamento de Montes. 24 p.
18. Food Drug Administration. *Bosques y Energía*, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma 2007.
19. Fukuda, H., Kondo, A., Noda, H. (2001) Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 92 (5): p. 405 - 416.
20. Fundación Terra. *Perspectivas Ambiental 24: Biocombustibles*. 2002. Barcelona. España. 34 p.
21. Georgogianni, K.G., Kontominas, M.G., Pomonis, P.J., Avlonitis, D., Gergis, V. (2008) Conventional and in situ transesterification of sunflower seed oil for the production of biodiesel. *Fuel Processing Technology* 89 (5): p. 503-509.
22. Girard, P., Fallot, A. (2006) Review of existing and emerging technologies for the production of biofuels in developing countries. *Energy for Sustainable Development* 10 (2): p. 92-108.
23. Hilal, A.; Demirbas, I. Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 2386–2398. HILBERT, J. Selección de indicadores que permitan determinar cultivos óptimos para la producción de biodiesel en las eco-regiones Chaco-Pampeana de la República Argentina. 2007. Instituto de Ingeniería Rural INTA. Argentina. 111 p.

- 24.** Ishikura, C. Relatório de estágio produção de biodiesel a partir de óleos usados de fritura. 2005. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Engenharia Química e Alimentos. Brasil. 54 p.
- 25.** Jatropha Curcas "Una planta mágica", publicado en: http://buenasiembra.com.ar/ecologia/agricultura/planta_magica_jatropha_curcas.htm, visitado el 10 de mayo de 2011.
- 26.** La Jatrofa Curcas y sus estudios internacionales Publicado en: <http://www.jatrofa.com/la-jatrofa-curcas-y-sus-estudios-internacionales/> Internacional | Julio 6th, 2010, visitado el 10 de mayo de 2011.
- 27.** Larosa, R. Proceso para la producción de BIODIÉSEL (metilester o ésteres metílicos de ácidos grasos). Refinación de glicerina. 2001. 8 p.
- 28.** Larosa, R. Proceso para la producción de BIODIÉSEL (metilester o ésteres metílicos de ácidos grasos). Descripción, materias primas y servicios necesarios. 2003. 4 p.
- 29.** Ma, F.; Clements, L.; Hanna, M. The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. *Trans ASAE* 1998;41:1261–4.
- 30.** Ma, F.; Hanna, M. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology* 70 (1999) 1-15.
- 31.** Marchetti, J.; Miguel, V.; Errazu, A. Possible methods for biodiésel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 1300–1311 REIJNDERS, L. Conditions for the sustainability of biomass based fuel use. 2006. *Energy Policy* 34, 863–876.
- 32.** Martinez-Herrera, J., Siddhuraju, P., Francis, G., Davila-Ortiz, G., Becker, K., Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chem.* 2006; 96, 80–89.
- 33.** Meher, L.C., Vidya Sagar, D., Naik, S.N. (2006) Technical aspects of biodiesel production by transesterification--a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10 (3): p. 248-268.
- 34.** Mittelbach, M., Remschmidt, C. (2004) Biodiesel - The comprehensive handbook. 1st ed. Graz: Mittelbach, M. p.

35. Moser, B. (2009) Biodiesel production, properties, and feedstocks. In *Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant* 45 (3): p. 229-266.
36. Openshaw, K. A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. *Biomass Bioenerg.* 2000; 19, 1–15.
37. Pereira, G., Situación actual y perspectivas del uso de biocombustibles en Cuba, 2006.
38. Pinzi, S., Garcia, I.L., Lopez-Gimenez, F.J., de Castro, M.D.L., Dorado, G., Dorado, M.P. (2009) The Ideal Vegetable Oil-based Biodiesel Composition: A Review of Social, Economical and Technical Implications. *Energy & Fuels* 23: p. 2325-2341.
39. Ramesh D., Samapathrajan A., Venkatachalam P. Production of Biodiesel from *Jatropha curcas* oil by using pilot Biodiesel Plant. Tamil Nadu Agricultural University Coimbatore, Tamil Nadu, India 2004.
40. Rashid, U., Anwar, F., Moser, B.R., Ashraf, S. (2008) Production of sunflower oilmethyl esters by optimized alkali-catalyzed methanolysis. *Biomass & Bioenergy* 32(12): p. 1202-1205.
41. SAGPyA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Proceso de elaboración de Biodiésel. [En línea] <http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/agricultura/otros/biodiésel/biodiésel_3.php> [consulta: 25 de agosto, 2007].
42. Schmidt, K.; Van Gerpen, J. The effect of biodiesel fuel composition on diesel combustion and emissions. *Soc Automot Eng* 1996;SP-1181:113–24.
43. Shah S., Sharma S., M.N. Gupta. Biodiesel preparation by lipase-catalyzed transesterification of *Jatropha* oil, *Energy Fuel* 2004, 18, 154–159.
44. Sotolongo Pérez, José A; “Evaluación de las fuentes de energía, sus potencialidades y principales impactos medioambientales en la provincia Guantánamo “; Tesis en Opción al Grado de Master en Energía (2007).
45. Sriappareddy Tamalampudi a, Mahabubur Rahman Talukder e, Shinji Hamad, Takao Numatab, Akihiko Kondo, Hideki Fukuda. Enzymatic production of biodiesel from *Jatropha* oil: A comparative study of immobilized-whole cell and commercial lipases as a biocatalyst. *Biochemical Engineering Journal* 2008,39, 85–189.
46. Stratta, J. Biocombustibles: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiésel. 2000. Departamento de Capacitación y Desarrollo de Mercado. Bolsa de Comercio de Rosario. Argentina. 15 p.

47. UGT. Unión General de Trabajadores. Escenarios Energéticos de España. 2007. Ministerio de Medio Ambiente. España. 203 p.
48. Van Gerpen, J.; Shanks, B.; Pruszko, R.; Clements, D.; Knothe, G. Biodiesel Production Technology - August 2002–January 2004. 2004. Subcontractor report. National Renewable Energy Laboratory. 110 p.
49. Van Kasteren, J.; Nisworo, P. A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification. Resources, Conservation and Recycling 50. 2007. p.442–458.
50. Vera, C.; D' Ippolito, S.; Pieck, C.; Parera, J. Optimización de un proceso de producción de biodiesel basado en transesterificación supercrítica no catalítica. 2005. Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica (INCAPE), Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería Química. Santa Fe, Argentina. 9 p.
51. Vicente, G.; Martinez, M.; Aracil, J. Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. Bioresource Technology 92 (2004) 297–305.
52. Zhou, W.Y., Boocock, D.G.B. (2006) Phase behavior of the base-catalyzed transesterification of soybean oil. Journal of the American Oil Chemists Society 83 (12): p. 1041-1045.

ANEXOS

Tabla 1 Propiedades del biodiesel.

<i>Propiedad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límites</i>		<i>Método de ensayo</i>
		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	
Contenido en éster ^a	% (m/m)	96,5 ^b		EN 14103
Densidad a 15°C ^c	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidad a 40°C ^d	mm ² /g	3,50	5,00	EN ISO 3104
Punto de inflamación	°C	120	-	prEN ISO 3679 ^e
Contenido de azufre	mg/kg	-	10,0	prEN ISO 20846 prEN ISO 20884
Residuo de carbón (en 10% de residuo destilado) ^f	% (m/m)	-	0,30	EN ISO 10370
Índice de cetano ^g		51,0		EN ISO 5165
Contenido de cenizas sulfatadas	% (m/m)	-	0,02	ISO 3987
Contenido en agua	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
Contaminación total ^h	mg/kg	-	24	EN 12662
Corrosión de la tira de cobre (3h a 50°C)	Clasificación		Clase 1	EN ISO 2160
Estabilidad a la oxidación 110°C	Horas	6,0	-	EN 14112
Índice de ácido	mg KOH/g		0,50	EN 14104
Índice de yodo	g de yodo/100g		120	EN 14111
Éster de metilo de ácido linoléico	% (m/m)		12,0	EN 14103
Ésteres de metilo poli-insaturados ⁱ (> = a 4 dobles enlaces)	% (m/m)		1	
Contenido de metanol	% (m/m)		0,20	EN 14110
Contenido en monoglicéidos	% (m/m)		0,80	EN 14105
Contenido en diglicéidos	% (m/m)		0,20	EN 14105
Contenido en triglicéidos ^j	% (m/m)		0,20	EN 14105
Glicerol libre ^j	% (m/m)		0,02	EN 14105 EN 14106
Glicerol total	% (m/m)		0,25	EN 14105
Metales del grupo I (Na+K) ^k	mg/kg		5,0	EN 14108 EN 14109
Metales del grupo II (Ca+Mg) ^l	mg/kg		5,0	prEN 14538
Contenido de fósforo	mg/kg		10,0	EN 14107

Tabla 2 Propiedades de los aceites.

Aceite/ Composición química	Algodón	Aguacate	Cacahuete	Canola	Cártamo	Cártamo Alto Oleico	Coco	Girasol	Maíz	Oliva	Palma	Soya
Color	50 amarillo/4.0 rojo máx.	Amarillo- verdoso	20 amarillo/2.0 rojo máx.	15 amarillo / 1.5 rojo máx.	15 amarillo / 1.5 rojo máx.	15 amarillo / 1.5 rojo máx.	10 amarillo / 1.0 rojo máx.	15 amarillo / 1.5 rojo máx.	35 amarillo / 4.5 rojo máx.	Verdoso	20 amarillo / 3.5 rojo máx.	20 amarillo / 2.0 rojo máx.
Índice de yodo	99-119	80 - 90	83 - 107	110 - 126	136 - 148	91 - 95	5 - 13	118 - 145	107 - 135	75 - 94	49 - 55	118 - 139
Ácidos grasos libres	0.05% máx.	1.0% máx.	0.1% máx.	0.05% máx.	0.05% máx.	0.05% máx.	0.05% max.	0.05% max	0.10% max.	1.0% max.	0.10% max.	0.05% max.
Ácido oleico (monoinsaturado)	14.7 – 21.7	56 - 74	36.4 – 67.1	52 - 67	8.4 – 30.0	74 - 80	5.4 - 9.9	13 - 40	20 – 42.2	55 - 83	36 - 44	17.7 – 28.5
Ácido linoleico (polinsaturado)	46.7 – 58.3	10 - 17	14.0 – 43.0	16 - 25	67.8 – 83.2	13 - 18	0.8 – 2.1	48 - 74	39.4 – 65.0	3.5 - 21	6.5 – 12.0	49.8 – 57.1
Ácido linolénico (polinsaturado)	0 – 0.4	0 - 2	0 – 0.1	6 - 14	6 - 14	6 - 14	0 – 0.2	0 – 0.3	0.5 – 1.5	0 – 1.5	0 – 0.5	5.5 – 9.5
Ácido palmítico (saturado)	21.4 – 26.4	9 - 18	8.3 – 14.0	3.3 – 6.0	5.3 – 8.0	5 - 6	7.7 – 10.2	5 - 8	9.2 – 16.5	7.5 - 20	40 - 48	9.7 – 13.3
Ácido esteárico (saturado)	2.1 – 3.3	0.4 – 1	1.9 – 4.4	1.1 – 2.5	1.9 – 2.9	1.5 – 2.0	2.3 – 3.5	2.5 – 7.0	0 – 3.3	0.5 – 5.0	3.5 – 6.5	3.0 – 5.4
Valor de peróxido (al envasar)	2.0 máx.	Datos no disponibles	2.0 máx.	2.0 máx.	2.0 máx.	2.0 máx.	2.0 máx.	2.0 máx.	2.0 máx.	1.5 máx.	2.0 máx.	2.0 máximo
Estabilidad AOM	15-25 horas	25 + horas	25 + horas	7 horas min.	10 horas min.	25 + horas	200 + horas	10 horas mín.	10 horas mín.	Dato no disponible	50 horas min.	10 horas mín.
Apariencia	Cristalina	Cristalina	Cristalina	Cristalina	Cristalina	Cristalina	Líquida o sólida	Cristalina	Cristalina	Cristalina	Sólida	Cristalina

