

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO



Catalizador sólido en la obtención de biodiesel

Por:

JESÚS MIGUEL ANGEL HERNÁNDEZ VÁZQUEZ

Monografía

Presentada como requisito para obtener el grado de:
INGENIERO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Saltillo, Coahuila, Junio de 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Catalizador sólido en la obtención de biodiesel

Por:

JESÚS MIGUEL ANGEL HERNÁNDEZ VÁZQUEZ

Monografía

Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito
Parcial para obtener el título de:

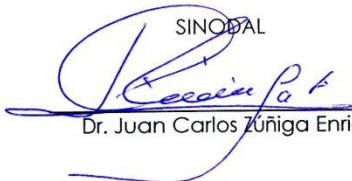
INGENIERO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

APROBADA

PRESIDENTE DE JURADO


Dra. Ana Verónica Charles Rodríguez

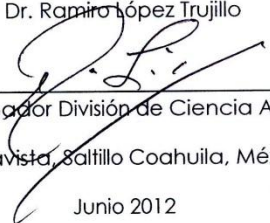
SINODAL


Dr. Juan Carlos Zuñiga Enriquez

SINODAL


M.C. Alberto Guerrero Rodríguez

Dr. Ramiro López Trujillo


Coordinador División de Ciencia Animal

Buenavista, Saltillo Coahuila, México

Junio 2012



DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, y estar siempre a mi lado en lo bueno y malo, para conseguir mi superación tanto profesional como personal.

A mis padres que me dieron la oportunidad de estudiar, por siempre estar pendiente de mí y darme su apoyo en las decisiones que he tomado en mi vida.

A mi hermana por su apoyo, su consejo que cada vez que necesito su amistad siempre está al pendiente de mí.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**: porque nunca me abandona, y me dio la oportunidad de venir a esta vida con una familia maravillosa.

A **mis padres**: por todo su apoyo moral, espiritual y económico por su entrega como padres maravillosos, por sus desvelos, sus sacrificios y esfuerzos por ser mejor cada día.

A la **Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”**: por darme la oportunidad de realizar mis estudios en ella, por prepararme como un profesional en sus aulas, y darme las bases para enfrentarme al mundo laboral.

A la **Dra. Ana Verónica Charles**: por su maravilloso apoyo por el tiempo y esfuerzo que dedicó. También por sus buenos consejos, su gran empuje y su orientación durante el desarrollo de este trabajo.

Al **Dr. Juan Carlos Zúñiga Enriquez**: por su tiempo para el desarrollo de este trabajo.

Al **M.C. Alberto Guerrero**: que me ayudó con el desarrollo de este trabajo, dándome consejos sobre los detalles, para mejorar.

CONTENIDO.

RESUMEN	13
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 ANTECEDENTES	15
2. REVISIÓN DE LITERATURA	16
2.1 BIOCOMBUSTIBLES	16
2.1.1 MATERIA PRIMA	17
2.1.2 VENTAJAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES	18
2.1.3 BIOCOMBUSTIBLES EN EL MUNDO	19
2.1.4 BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO	22
2.2 BIODIESEL	24
2.2.1 CICLO DE VIDA DEL BIODIESEL	25
2.2.2 MATERIA PRIMA PARA BIODIESEL	26
2.2.3 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL BIODIESEL	29
2.2.4 VENTAJAS DEL BIODIESEL	30
2.2.5 COMPARACIÓN ENTRE EL BIODIESEL Y EL DIESEL	31
2.2.6 IMPORTANCIA DE LA UTILIZACIÓN DE BIODIESEL	32
2.2.7 BIODIESEL EN MÉXICO	33
2.3 TRANSESTERIFICACIÓN	34
2.3.1 CATALIZADORES	36
2.3.2 ZEOLITA	38
3. CONCLUSIÓN	41
4. LITERATURA CITADA	42

RESUMEN

Debido a la situación actual de demanda energética y a la cantidad de petróleo cada vez menor, es necesaria la utilización de fuentes alternativas. Una opción es la producción de biodiesel, reduciendo así el consumo que, hasta la fecha, proviene del tratamiento del crudo, de esta manera es una opción donde se han enfocado muchas investigaciones.

El biodiesel es un combustible que presenta características similares a las del diesel de origen fósil, pero que ofrece grandes ventajas. Entre ellas está que al ser obtenido a partir de aceites vegetales o grasas animales, no produce exceso de CO₂, y el contenido de azufre es muy bajo.

La obtención de biodiesel a nivel comercial se consigue por medio de la reacción de transesterificación de grasas y/o aceites vegetales con un alcohol de bajo peso molecular (metanol o etanol). A nivel industrial es necesario que la reacción se lleve a cabo a velocidades productivas, por lo que se hace uso de un catalizador. Generalmente el catalizador usado es una base o un ácido fuerte en el mismo estado físico que los demás componentes en la reacción, es decir, es un catalizador homogéneo.

Sin embargo se han observado algunos inconvenientes en el uso de los catalizadores homogéneos tradicionales.

De esta manera, el presente trabajo de tesis aborda el estudio de la eficiencia de un catalizador en la obtención de biodiesel. La reacción prueba de transesterificación se realizó usando aceite de soya y etanol como agente esterificante. El producto de la reacción se analizó por cromatografía de líquidos.

Palabras clave: Biodiesel, biocombustible, biomasa, transesterificación, catalizador, petróleo, Zeolita.

MANIFIESTO DE HONESTIDAD ACADÉMICA

El suscrito, Jesús Miguel Angel Hernández Vázquez, estudiante de la carrera de Ingeniero en ciencias y Tecnología de Alimentos, con matrícula 264713 y autor de la presente Tesis manifiesto que:

1. Reconozco que el Plagio académico constituye un delito que está penado en nuestro País.
2. Las ideas, opiniones, datos e información publicadas por otros autores y utilizadas en la presente Tesis han sido debidamente citadas reconociendo la autoría de la fuente original.
3. Toda la información consultada ha sido analizada e interpretada por el suscrito y redactada según su criterio y apreciación, de tal manera que no se ha incurrido en el "copiado y pegado" de dicha información.
4. Reconozco la responsabilidad sobre los derechos de autor de los materiales bibliográficos consultados por cualquier vía y manifiesto no haber hecho mal uso de ninguno de ellos.
5. Entiendo que la función y alcance de mi comité de Asesoría, está circunscrito a la orientación y guía respecto a la metodología de la investigación realizada para la presente tesis, así como del análisis e interpretación de mis resultados obtenidos, y por lo tanto eximo de toda responsabilidad relacionando al plagio académico a mi Comité de Asesoría y acepto que cualquier responsabilidad al respecto es únicamente mía.

ATTE



Jesús Miguel Angel Hernández Vázquez
Tesisista de licenciatura/UAAAN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En las últimas décadas los descubrimientos de yacimientos de petróleo se han reducido drásticamente haciendo insostenible los elevados niveles de extracción actuales. Por otra parte la mayoría de las reservas mundiales han entrado en declive y sólo las de oriente medio mantienen un crecimiento sostenido. Se espera incluso esos yacimientos entren en declive, lo que provocaría que toda la producción mundial disminuyera irremediablemente conduciendo a la mayor crisis energética que haya sufrido el mundo industrializado (Bullón, 2006).

Al generarse el caos de la crisis energética se eleva el costo de estos, haciendo referencia a la disponibilidad de petróleo, electricidad u otras fuentes mayormente utilizadas, repercutiendo en el resto de economía, provocando una recesión. En particular, los costos de producción de electricidad crecen, elevando así los costos de manufacturas. Para el consumidor, el precio de la gasolina proveniente de petróleo aumenta, llevando al consumidor a una reducción de gastos y una menor confianza.

El biodiesel es hoy en día una de las fuentes de energía de mayor importancia a nivel mundial. Es un biocombustible que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, ya sean nuevos o usados, mediante el proceso de transesterificación.

Al utilizar biodiesel se reduce la cantidad de dióxido de carbono que emite un motor a la atmósfera en comparación al funcionamiento del mismo utilizando al combustible común.

Haciendo hincapié en la importancia de este punto, ya que hoy en día se vive una situación desalentadora para la vida en el planeta, la cual es denominada calentamiento global.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 BIOCOMBUSTIBLES

El término biocombustible, en su definición más amplia, denota a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en algún proceso biológico para ser utilizado como fuente de energía. Este concepto comprende tanto a los productos de origen vegetal como a los de origen animal, quedando excluidos los combustibles fósiles. Esto último, debido a que aunque derivan de materiales biológicos, a través del tiempo han sufrido transformaciones que han alterado profundamente su naturaleza (Castro, 2007). Como ejemplo, se puede mencionar a la leña, ceras y aceites que se han utilizado como fuente de calefacción e iluminación.

El tema de los biocombustibles no es de reciente descubrimiento, ya que los productos de origen biológico habían representado la principal fuente de energía antes de que la economía mundial tomara como base el petróleo y sus derivados.

Se consideran como ejemplos básicos de biocombustibles al bioetanol y biodiesel obtenidos de la transformación de cultivos, asimismo el biometano y biohidrógeno producidos principalmente de la degradación de materia orgánica.

Existen diversas razones que han motivado al desarrollo y búsqueda de fuentes alternativas de energía. Entre las principales se tiene:

- El alza del precio del petróleo.
- La disminución de las reservas petroleras (que se estima podrían terminarse en 50 años).
- La protección al medio ambiente (calentamiento global).
- La reducción de emisiones de CO₂ generada por la combustión de carburantes de origen fósil.
- La necesidad de cubrir la cada vez más alta demanda de energéticos.
- Potenciar el apoyo al sector agrícola, a fin de mejorar la situación económica de las aéreas rurales (Robert, 2008).

Por ello, es evidente la conclusión de que se requieren acciones concretas y rápidas que coadyuven en la mitigación del calentamiento global y la

degradación del medio ambiente. En este sentido, es importante dedicar esfuerzos al desarrollo de mejoras a los procesos de obtención de biocombustibles.

2.1.1 MATERIA PRIMA

Los biocombustibles adquieren su nombre debido a que se obtienen a partir de biomasa, entendiéndose a biomasa como toda la materia orgánica que tiene su origen en un proceso biológico. Un ejemplo de ello es la biomasa vegetal obtenida mediante la fotosíntesis originando moléculas de alto contenido energético bajo la forma de energía química.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, a biomasa se puede clasificar según su origen en:

- Biomasa natural: la producida en ecosistemas naturales sin la intervención del ser humano. El mejor ejemplo de este grupo es la leña (figura 1), la cual ha sido usada ancestralmente para satisfacer las necesidades básicas de calefacción del hombre.



Figura 1: Leña, materia prima mayormente utilizada como biomasa para generación de energía.

- Biomasa residual: incluye a materia orgánica residual producida por la industria forestal, agrícola, de zonas urbanas (Figura 2).

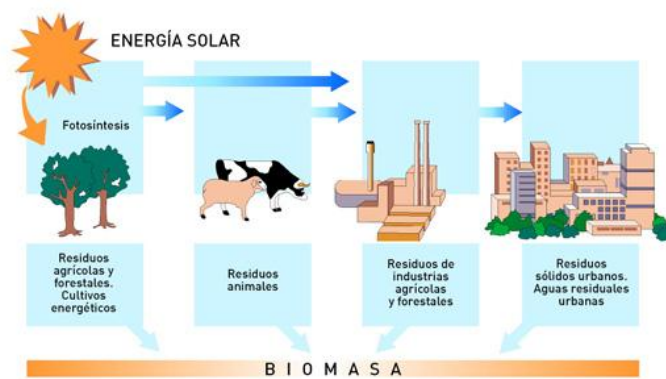


Figura 2: Obtención de biomasa residual.

- Cultivos energéticos: realizados con el único objeto de su aprovechamiento para la producción de biocombustibles. Como ejemplo característico se tiene a *Jatropha sp* (Figura 3) y *Paulownia elongata*.



Figura 3: *Jatropha sp* semillas de arbustos de crecimiento rápido y de pocas necesidades.

- Excedentes agrícolas: constituidos por los productos agrícolas que no emplea el hombre (Fernández, 2002).

2.1.2 VENTAJAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

Es indispensable la búsqueda de nuevas fuentes de energía que sustituyan al petróleo. Las razones más recurridas son los incrementos en el precio de la gasolina y su origen no renovable, que de acuerdo con las predicciones, muy pronto alcanzará un agotamiento. También existe el inconveniente de la generación de emisiones tóxicas las cuales están originando daños al planeta. Así,

como una alternativa para paliar esta problemática, se han estado desarrollando los biocombustibles.

Los biocombustibles brindan la ventaja de ofrecer eficiencias similares a las obtenidas por petróleo. Además al ser originadas a partir de una fuente de energía renovable se ven reducidas sustancialmente las emisiones de la mayoría de gases y partículas nocivas para el medio ambiente y el ser humano.

La combustión del biodiesel y bioetanol producen menor cantidad de humo visible y olores nocivos que el diesel derivado del petróleo (Sheehan, 1998).

Un área emergente en la que se ha dado el uso de biocombustibles es en las minas y construcciones subterráneas, como el trabajo de túneles y excavaciones. Países como Estados Unidos y Austria han promovido el biodiesel en este tipo de trabajos, ya que al ser sus emisiones más limpias, contribuyen a reducir los riesgos a la salud ocupacional de los trabajadores. En Perú también se ha expresado el interés del sector minero en este tipo de combustible. Así, varias empresas mineras han manifestado su intención de empezar a producir o adquirir biodiesel para el uso en sus motores (Castro, 2007).

Otra ventaja es aprovechar la materia orgánica en descomposición que produce biogás, el cual puede utilizarse para producir energía eléctrica mediante turbinas, estufas, secadores, hornos, calderas u otros sistemas de combustión de gas.

2.1.3 BIOCOMBUSTIBLES EN EL MUNDO

La producción de biocombustibles a nivel mundial ha crecido exponencialmente en los últimos años. Su desarrollo se ha favorecido por la subida del precio del petróleo y las políticas adoptadas por los distintos países para cumplir con las exigencias del Protocolo de Kioto (Hibert, 2006).

Debido al gran interés en mejorar tanto en desarrollo como en investigación, se han realizado inversiones en el área de energías renovables que han ido aumentando desde el año 2004; de manera que al año 2009 se alcanzaron los \$150 Billones de dólares en inversión (Figura 4).

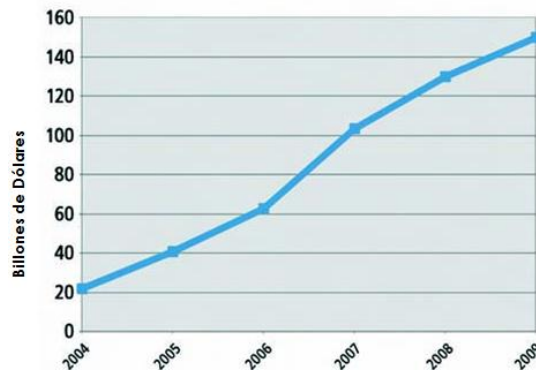


Figura 4: Inversión global en energía renovable.

En el mismo periodo, de 9 años, la producción mundial de biodiesel se ha multiplicado, hasta alcanzar los 16.6 billones de litros al año en 2009. A su vez, la producción de bioetanol ha aumentado significativamente, pasando de menos de 20 billones de litros producidos en 2000 hasta 76 billones de litros en 2009 (Figura 5).

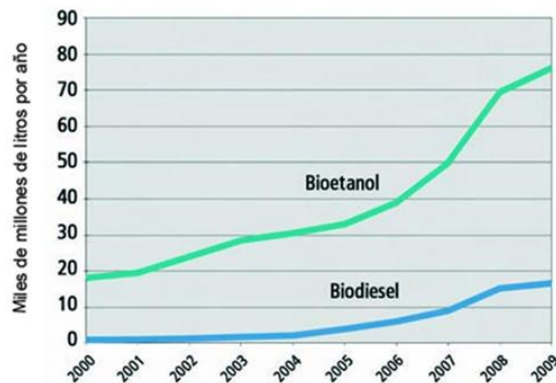


Figura 5: Producción mundial de bioetanol y biodiesel, 2000 – 2009.

La mayor parte de este crecimiento se ha registrado principalmente en Estados Unidos, Brasil y Alemania que conforman más de la mitad de la producción de biodiesel y más de las tres cuartas partes de la producción de bioetanol (Torres, 2010). En los próximos años el sector de los biocombustibles seguirá expandiéndose. Debido a este crecimiento se tiene previsto que entre 2009 y 2020 el volumen de producción aumentará en un 10.1%, pronosticando una duplicación en el caso de bioetanol.

Los cinco principales países productores a nivel mundial durante el año 2009 fueron Alemania, Estados Unidos, Francia, Argentina y Brasil, que en conjunto

producen el 68.4% del total de biodiesel del mundo. Europa por su parte lideró el área de producción de biodiesel en 2009, con un porcentaje del 49.8%. El segundo puesto lo ocupó el continente americano con un porcentaje del 32.8% (Figura 6). En la región Asia-Pacífico, Australia es el mayor productor, seguido de China y la India.

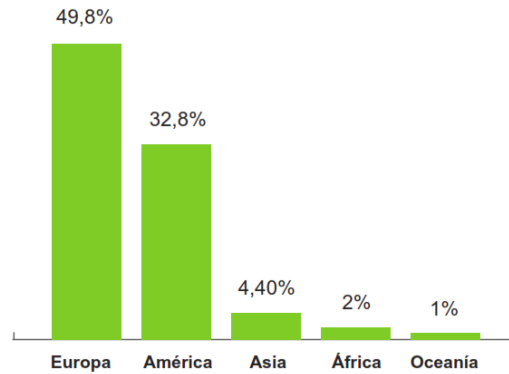


Figura 6: Producción de biodiesel por continentes.

En Europa se ha establecido una normativa con el objeto de contribuir de manera eficiente a reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero, dentro del reto global "20-20-20" que implica entre otras cosas: reducir las emisiones un 20%; que de la energía primaria consumida el 20% proceda de fuentes renovables y disminuir un 20% la energía que es consumida (Greenpeace, 2008).

Países como Alemania, Francia, Italia, España y Reino Unido realizan un mayor consumo de biocombustibles, ya que juntos suman el 71.1% del conjunto de la Unión Europea (Figura 7) (Torres, 2010).

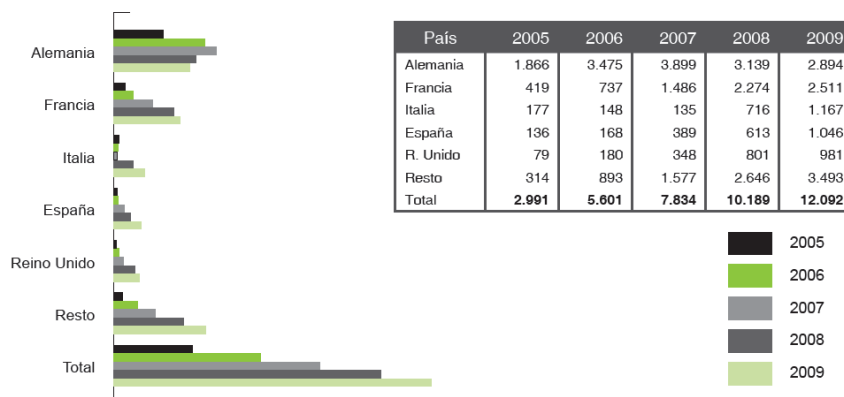


Figura 7: Consumo de biocombustibles en Europa (miles de toneladas de 2005 a 2009).

Cabe recalcar que aún con los cambios realizados, el consumo mundial de energéticos es dependiente de los combustibles fósiles en un 78%. Mientras que la energía nuclear con sus ventajas y desventajas constituye el 2.8% y las energías renovables integran en la actualidad sólo el 19%, dentro de ese porcentaje los biocombustibles solamente representan el 0.6% (Figura 8). La industria de los biocombustibles es aún joven y relativamente pequeña (Sawin, 2010).

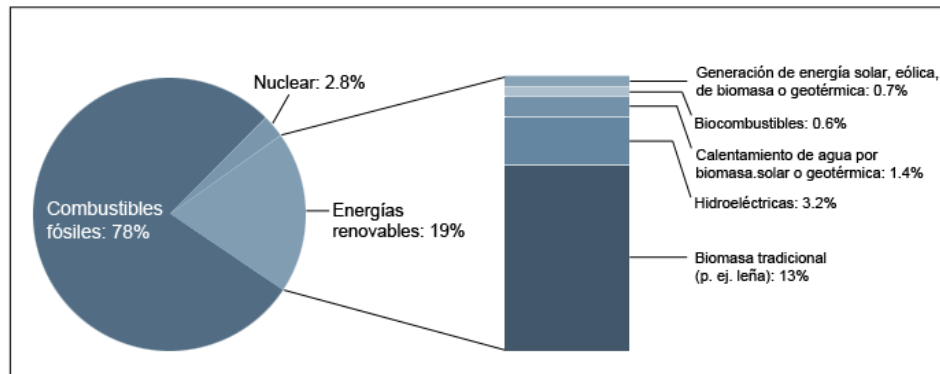


Figura 8: Participación de las energías renovables en el consumo mundial de energía final.

2.1.4 BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO

México cuenta con un potencial muy importante de recursos energéticos renovables, cuyo desarrollo permite al país contar con una diversificación de fuentes de energía con el propósito de atenuar los impactos ambientales ocasionados por la producción, distribución y uso final de las formas de energía convencionales.

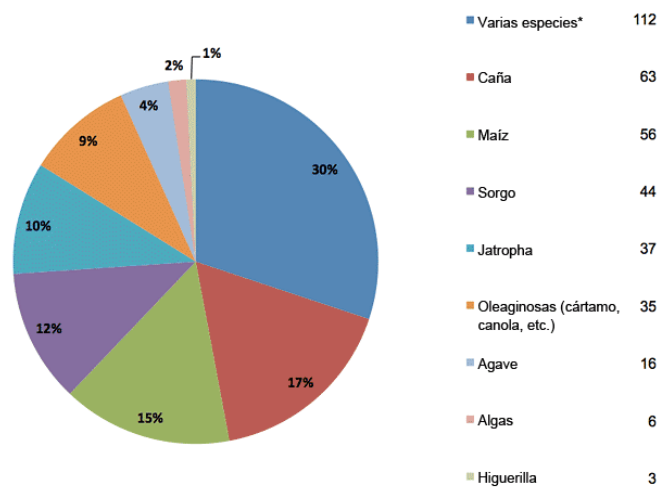
Además, México se verá beneficiado de muchas maneras al utilizar biocombustibles como el bioetanol; principalmente con la creación de empleos desarrollando la economía rural y mejorando la seguridad energética.

Gracias a la biodiversidad de la que es constituido el país, tiene la posibilidad de establecer cultivos potenciales para la producción de biocombustibles, entre los cuales destacan la caña de azúcar, sorgo dulce, y remolacha que forman parte de la materia prima en la elaboración de bioetanol. Por otro lado se cuentan otro tipo de cultivos integrados por *Jatropha*, higuera y palma de aceite para la elaboración de biodiesel (Figura 9).



Figura 9: Áreas identificadas para la producción de biomasa de biocombustibles.

En México principalmente en Sinaloa, Chiapas, Michoacán, Veracruz, Tamaulipas, Morelos, Jalisco y Monterrey existen proyectos para construir plantas para la producción de bioetanol, además de los proyectos que forman parte de la investigación en materia de biocombustibles (Figura 10) buscando impulsar la promoción y desarrollo de los mismos.



* Cebada, maguey, piña, tuna, salicornia, etc.

Figura 10: Proyectos enfocados a los insumos para biocombustibles en México. (SAGARPA, 2010)

En Tuxtla Gutiérrez Chiapas, se encuentra una empresa transportista, que emplea biodiesel en vehículos utilizados para transporte público (Biodiesel Chiapas).

Algunas empresas en la actualidad se encuentran laborando con flotillas de vehículos impulsados con biocombustibles, inclusive la empresa Aeroméxico, ha utilizado una mezcla de turbosina y biodiesel en vuelos transcontinentales que permiten el ahorro de tonelada y media de turbosina el combustible tradicional (BBC, 2011).

2.2 BIODIESEL

Desde una visión general, el biodiesel corresponde a un combustible líquido renovable derivado de lípidos naturales, como aceites vegetales o grasas animales, obtenido a través de un proceso de transesterificación del aceite vegetal o animal (Ribeiro, 2007).

Para una definición técnica de biodiesel, se puede tomar la utilizada por la ASTM (American Society for Testing and Material Standard) donde se describe como la mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables, tales como aceites vegetales o grasas de animales (Elizalde, 2009).

De tal forma que la ASTM ha especificado un rango de distintas características que debe cumplir el biodiesel para que pueda ser utilizado en procesos de combustión (Cuadro 1).

Cuadro 1: Requisitos determinados por la ASTM para biodiesel.

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Métodos de Ensayo
Densidad a 15°C	kg/m ³	860	900	ASTM D 1298
Punto de Inflamación	°C	120	---	ASTM D 93
Punto de Turbidez	°C		Reportar ¹	
Φ Agua y sedimento	%	---	0,05	ASTM D 1796
Contenido de Agua	mg/kg	---	500	ASTM D 95
Viscosidad Cinemática a 40° C	mm ² /S	3.5	5	ASTM D 445
Cenizas Sulfatadas	% (m/m)	---	0.02	ASTM D 874
Contenido de Azufre	mg/kg	---	10	ASTM D 1552
W Carbón Residual²	%	---	0.05	ASTM D 4530
Corrosión lámina de cobre	Clasificación	---	3	ASTM D 130
Número de cetano	---	49	---	ASTM D 613

Temperatura de destilación al 90% recuperado	°C	---	360	ASTM D1160
W Glicerina libre	%	---	0.02	ASTM D 6584
W Glicerina total	%	---	0.25	ASTM D 6584
W Contenido de ésteres	%	96.5	---	EN 14103
Índice de yodo	g yodo/100 g	---	120	EN 14111
W Contenido de metanol	%	---	0.20	ASTM D 4815
Contenido de fósforo	mg/kg	---	10	ASTM D 4951
Contenido de metales alcalinos (Na + K)	mg/kg	---	5	EN 14108
Contenido de metales alcalinos (Ca + Mg)	mg/kg	---	5	EN 14538
Número de acidez	mg KOH/g	---	0.5	ASTM D 664
¹ El punto de turbidez del biodiesel generalmente es mayor que el diesel de origen fósil y debe ser tomado en consideración para los procesos de mezcla				
² Debe ser determinado en el 100% de la muestra				

2.2.1 CICLO DE VIDA DEL BIODIESEL

El ciclo de vida del biodiesel inicia en las plantas, que son los seres vivos que aprovechan en mayor proporción la luz solar para realizar la fotosíntesis. En este proceso se transforma la materia inorgánica como dióxido de carbono (CO₂) y agua, en materia orgánica. Como parte de su desarrollo, la planta produce semillas y frutos que pueden contener aceites. De estos productos se extrae el aceite que servirá de materia prima para la fabricación de biodiesel. El aceite así obtenido es considerado como crudo y es necesario pasar por un proceso de refinación.

La siguiente etapa consiste en la transesterificación del aceite con un alcohol, en presencia de un catalizador. Como resultado se obtiene el biodiesel y un subproducto (glicerina) que puede ser aprovechado en la industria de alimentos, cosméticos y farmacéutica.

Durante el uso del biodiesel, en un proceso de combustión, se produce dióxido de carbono (CO₂) en cantidad necesaria para cubrir la necesidad de las plantas para su alimentación.

De esta manera, se dice que en el ciclo de vida del biodiesel existe una emisión neta de CO₂ nula. Es decir, todo el dióxido de carbono que se genera en la combustión, se consume en la fotosíntesis (Figura 11).

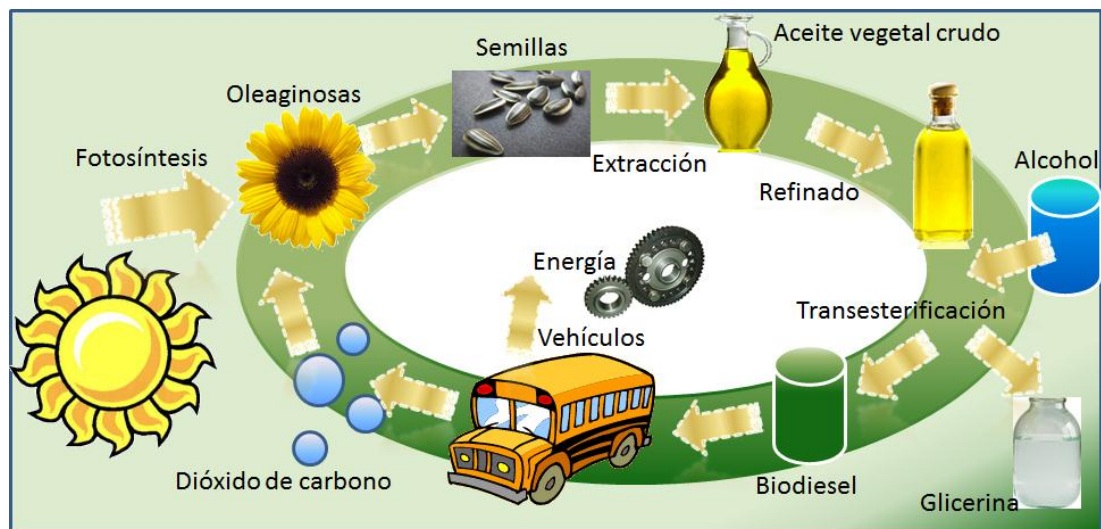


Figura 11: Esquema del ciclo de vida de biodiesel.

2.2.2 MATERIA PRIMA PARA BIODIESEL

A nivel internacional, la producción de biodiesel tiende a provenir mayoritariamente de los aceites extraídos de plantas oleaginosas. Como ejemplo se pueden mencionar al girasol, soya y colza. Sin embargo, cualquier materia que contenga en su composición triacilglicérols -TAG- (triglicéridos) puede ser usada en la producción de biodiesel.

A continuación en el cuadro 2 se mencionan las principales materias primas para la elaboración de biodiesel (Vicente, 1998):

Cuadro 2: Principales materias primas para la producción de biodiesel.

Aceites convencionales	Aceites Vegetales Alternativos	Otras Fuentes
Girasol	<i>Brassica arinata</i>	Aceite de semillas modificadas genéticamente
Colza	<i>Cynara curdunculus</i>	Grasas animales (sebo de vaca)
Coco	<i>Camelina sativa</i>	Aceites de microalgas
Soya	<i>Crambe abyssinica</i>	Aceites de producciones microbianas
Palma	<i>Jatropha curcas</i>	Aceites usados de fritura

- Aceites vegetales convencionales:

Las materias primas utilizadas convencionalmente en la producción de biodiesel han sido los aceites de semillas oleaginosas como el girasol, la soya y el coco; y los aceites de frutos oleaginosos como la palma.

Algunos vegetales como la colza (*Brassica napus*), que se produce principalmente en el norte de Europa y el girasol (*Helianthus annuus*) en los países mediterráneos del sur, como España o Italia.

- Aceites alternativos:

Además de los aceites vegetales convencionales, existen otras especies más adaptadas a las condiciones climatológicas adversas, posicionándose así en el ámbito de los cultivos energéticos. En este sentido, destacan como materias primas para la producción de biodiesel, los aceites de *Camelina sativa*, *Crambe abyssinica* y *Jatropha curcas*.

Existen otros cultivos que se adaptan mejor a las condiciones climatológicas de diferentes países y que presentan rendimientos de producción mayores. Por ejemplo en España, se ha observado gran potencial en cultivos de *Brassica carinata* y *Cynara cardunculus*.

- Aceites vegetales de plantas modificadas genéticamente:

Los aceites y las grasas se diferencian principalmente en su contenido en ácidos grasos. Los aceites con proporciones altas de ácidos grasos insaturados, como el aceite de girasol o de *Camelina sativa*, mejoran la operatividad del biodiesel a bajas temperaturas. Pero disminuye su estabilidad a la oxidación, que se traduce en un índice de yodo elevado.

Por este motivo, se pueden tener en consideración, como materias primas para producir biodiesel, los aceites con elevado contenido en insaturaciones, que han sido modificados genéticamente para reducir esta proporción, como el aceite de girasol de alto oléico.

- Aceites usados:

El aceite de fritura usado es una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiesel, ya que es la materia prima más barata, y con su utilización se evitan costos de su tratamiento como residuo. Por otra parte, los aceites presentan un bajo nivel de reutilización, por lo que no sufren grandes alteraciones y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustibles. Por lo demás, como valor añadido, la utilización de aceites usados incide en la buena gestión y uso de residuos.

- Grasas animales:

Además de los aceites vegetales y los aceites de fritura usados, las grasas animales, y más concretamente el sebo de vaca, pueden utilizarse como materia prima en la reacción de transesterificación para obtener biodiesel. El sebo tiene diferentes grados de calidad respecto a su utilización en la alimentación, empleándose los de peor calidad en la formulación de los alimentos de animales. La aplicación de grasas animales surgió a raíz de la prohibición de su utilización en la producción de piensos (forraje), como salida para los mismos como subproducto.

- Aceite de otras fuentes:

Finalmente, es importante mencionar la creciente producción de lípidos de composiciones similares a los aceites vegetales, mediante procesos microbianos, a partir de algas, bacterias y hongos, así como a partir de microalgas.

Como se ha mencionado anteriormente, en la producción de biodiesel por medio de la transesterificación es requerido un alcohol de bajo peso molecular.

Los alcoholes que más comúnmente se utilizan para producir biodiesel son metanol y etanol. Se puede utilizar otros alcoholes como propanol, isopropanol, butanol y pentanol pero estos son mucho más sensibles a la contaminación con agua, es decir, la presencia de agua en mínimas cantidades inhibe la reacción (Bradshaw, 1942).

El metanol es tóxico cuando se ingiere, se inhala o al contacto con la piel y además es altamente inflamable. Existe riesgo de explosión e incendio cuando el metanol está expuesto al calor, chispas, llamas o descargas de energía estática.

Por otro lado, el etanol es menos tóxico, sin embargo, también es altamente inflamable. Su uso requiere de menores medidas de seguridad ocupacional, pero sí de seguridad contra incendios.

Cabe mencionar además que el metanol se obtiene principalmente de fuentes fósiles no renovables: del gas natural o gas metano. El etanol, en cambio, puede provenir de materias primas renovables; caña de azúcar, remolacha azucarera, papa, vegetales celulosos (Bullón, 2006).

En la Cuadro 3 se presentan las principales características de los alcoholes usados en la producción de biodiesel.

Cuadro 3: Propiedades de los alcoholes empleados en la producción de biodiesel.

Alcohol	Peso molecular	Punto de ebullición (°C)	Punto de condensación (°C)	Densidad (g*ml)
Metanol	32.042	65	-93.9	0.7914
Etanol	46.069	78.5	-117.3	0.7893
1-propanol	60.096	97.4	-126.5	0.8035
2-propanol (iso-propanol)	60.096	82.4	-89.5	0.7855
1-butanol (n-butanol)	74.123	117.2	-89.5	0.8098
2-butanol	74.123	99.5	--	0.8080
2-metil-1-propanol (iso-butanol)	74.123	108	--	0.8018
2-metil-2-propanol (ter-butanol)	74.123	82.3	25.5	0.7887

2.2.3 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL BIODIESEL

El uso por primera vez de aceites vegetales como combustibles, se remonta al año de 1900, siendo Rudolf Diesel, quien lo utilizara por primera vez en su motor de ignición por compresión (Figura 12).



Figura 12: Motor de Rudolf Diesel.

Posteriormente durante la Segunda Guerra Mundial ocurrió una escasez de combustibles fósiles, motivo por el cual suscitó a las primeras investigaciones de combustible de origen vegetal.

Sin embargo, fue hasta el año 1970 cuando el biodiesel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética que sucedía en ese momento y al elevado costo del petróleo.

A continuación en el año de 1982 se realizaron las primeras pruebas técnicas con biodiesel en los países de Austria y Alemania, dando como origen de las pruebas a la construcción de la primera planta piloto en Austria en el año de 1985 (León, 2009).

Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiesel en automóviles.

Así mismo, en Europa se obtiene biodiesel esencialmente del aceite de la semilla de colza y el metanol utilizándolo en maquinaria de combustible diesel.

Por otra parte, se están realizando proyectos para experimentar con diferentes aceites y grasas animales para mejorar los resultados que son obtenidos en la actualidad. De esta manera se tiene un panorama futuro del biodiesel (Figura 13) (Gazzoni, 2009).

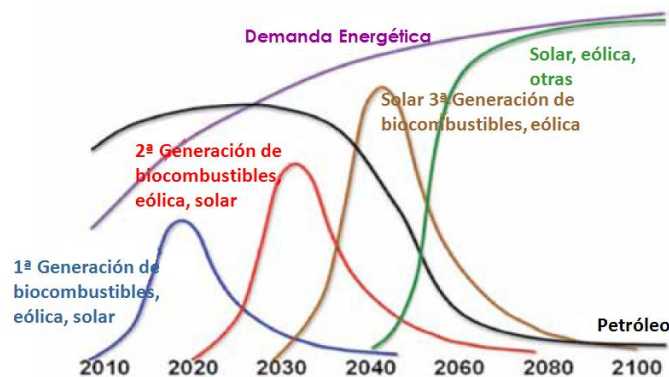


Figura 13: Línea de tiempo de la evolución de la energía renovable.

2.2.4 VENTAJAS DEL BIODIESEL

El biodiesel tiene características muy importantes que pueden considerarse como ventajas sobre el biodiesel convencional. Entre ellas destacan las siguientes:

- Las emisiones de gas de invernadero por la producción y la combustión de biodiesel es 41% menos que las generadas por el uso de combustibles fósiles (Hill, 2006).
- El contenido de azufre en el biodiesel es de alrededor de las 11 ppm, el diesel de origen fósil asciende a 1600 ppm (Knothe, 2004).

- Mejoran el aprovechamiento de tierras con poco valor agrícola que en coacciones se abandonan por la escasa rentabilidad de los cultivos tradicionales.
- El biodiesel se degrada 89% en 28 días mientras que el diesel fósil se degrada 26% en el mismo lapso de tiempo y puede ser utilizado como solvente para limpiar derrames de diesel fósil (IICA, 2007).
- Promueve la competitividad al no tener que importar fuentes de energía tradicionales.
- Proporcionan una fuente de energía reciclable por lo tanto inagotable.
- El biodiesel no contamina fuentes de agua superficial ni acuíferos subterráneos (IICA, 2007).
- Revitalizan y generan empleos en el ámbito agrícola.
- El biodiesel es más seguro de transportar y almacenar, ya que tiene un punto de inflamación 100 °C mayor que el diesel fósil (IICA, 2007).

2.2.5 COMPARACIÓN ENTRE EL BIODIESEL Y EL DIESEL

Al realizar una comparación entre el biodiesel y el diesel fósil se observa gran similitud entre ellos, haciendo posible la utilización del biodiesel como combustible.

En la Cuadro 4 se presenta una comparación entre los principales parámetros de calidad determinados para el biodiesel fósil y el biodiesel (NREL, 2009).

Cuadro 4: *Propiedades fisicoquímicas del diesel y biodiesel*

Propiedad	Diesel	Biodiesel
Estándar del combustible	ASTM D975	ASTM D6751
Composición del combustible	C10-C21 HC	C12-C22 FAME
Poder calorífico bajo, Btu/gal	137,640	124,042
Gravedad específica	0.85	0.88
Contenido de agua, ppm por peso	161	0.05% MAX
Oxígeno % peso	0	11
Azufre % peso	0.0015 MAX	0.0 – 0.0024
Punto de ebullición °C	180 – 340	315 – 350
Número de cetano	40 – 55	48 – 65

2.2.6 IMPORTANCIA DE LA UTILIZACIÓN DE BIODIESEL

Se ha discutido mucho acerca de las razones para remplazar al diesel por el biodiesel y entre ellas se debe remarcar la necesidad de tomar acciones para mitigar el cambio climático.

Es importante mencionar que el Sr. Al Gore, quien recibió el Premio Nobel de la Paz de 2007 por sus esfuerzos dirigidos a evitar el calentamiento global, participó en el Congreso Americano de Biocombustibles, demostrando la importancia que tienen los biocombustibles en el contexto de la ecología mundial.

Dentro de los factores significativos, se puede mencionar que los vehículos que funcionan con biodiesel reducen las emisiones de bióxido de carbono (CO₂) hasta en un 78 % y disminuyen los hidrocarburos cancerígenos hasta en un 75%.

En contraparte, el uso de combustibles tradicionales genera otros gases contaminantes que producen daños a la atmósfera (Cuadro 5).

Cuadro 5: Principales gases contaminantes liberados a la atmósfera.

GAS	FUENTE DE ORIGEN	PERMANENCIA EN LA ATMÓSFERA
Bióxido de carbono (CO₂)	Gas de efecto invernadero producido por uso de combustible fósil (petróleo, gas, carbón, etc.) y por el cambio de uso de la tierra (deforestación). El CO ₂ ha contribuido a mantener una temperatura constante dentro de la tierra, sin embargo, en la actualidad es responsable de casi 76% del calentamiento global.	100 años
Metano (CH₄)	Al igual que el CO ₂ , es producido por la combustión de combustible fósil, asimismo, se produce en los pozos de petróleo, minas de carbón al aire libre, cultivos de arroz y por la digestión alimenticia de los animales.	10 años
Óxido Nitroso (N₂O)	Liberado por la combustión de vehículos diesel, así como el empleo de fertilizantes nitrogenados.	170 años
Hidrofluorocarbonos (HFC)	Utilizado por el ser humano como disolvente para los aerosoles, refrigerantes y dispersores de espuma de uso industrial y doméstico.	60 – 100 años

Además de la contaminación generada, la velocidad con la que se está consumiendo el petróleo, que llega a ser de alrededor de 85 millones de barriles por día (un barril contiene 158.9 litros) es otro factor que se debe tomar en cuenta.

Asociado a este factor el descubrimiento de nuevos pozos petroleros va disminuyendo con el paso del tiempo, haciendo más difícil la localización de los pozos (Figura 14) (Ireland, 2012).

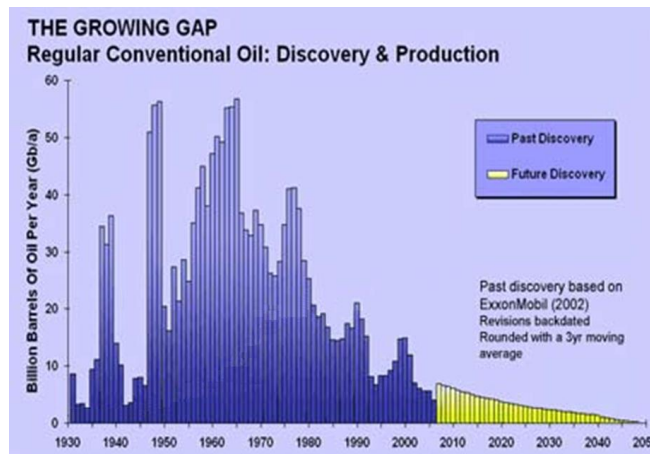


Figura 14: Descubrimiento y producción de petróleo.

De esta manera se puede pronosticar que la producción de petróleo para el año 2050 disminuya es un 50% (Figura 15) (Glynn, 2011).

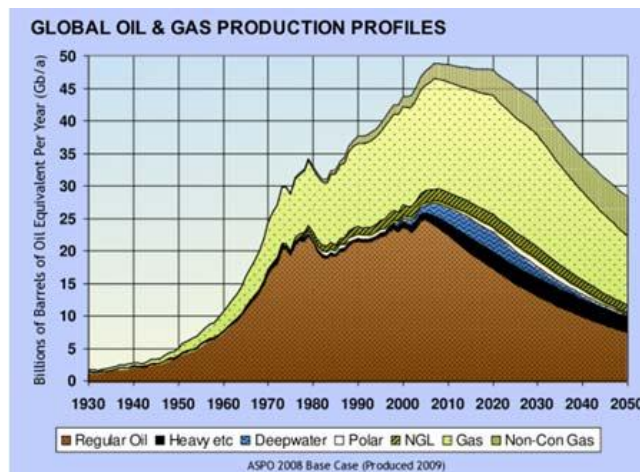


Figura 15: Perspectiva de producción de hidrocarburos para los próximos años.

2.2.7 BIODIESEL EN MÉXICO

México ha puesto interés en impulsar el desarrollo de fuentes alternativas de energía debido a la problemática del calentamiento global, la reducción de petróleo y la búsqueda de generación de empleos en el país.

Actualmente en algunos estados de la república mexicana se han dado iniciativas de desarrollo de biocombustibles. Tal es el caso de Chiapas, donde ya

se cuenta con una planta y un centro de investigación de biodiesel con el objetivo de producir biodiesel para el uso de transporte público. Es importante señalar que en la planta productora de biodiesel funciona casi en su totalidad con energía solar (Ecoperiodico, 2010).

Yucatán es otro estado que cuenta con plantas productoras de biocombustibles, entre ellas se encuentra Biofuels y Kuo empresas establecidas desde 2008 generando biodiesel a partir de *Jatropha* (NextFuel, 2010).

También en la Ciudad de México opera una empresa llamada Biofuels que se dedica a la recolección de aceite vegetal usado por empresas restauranteras para transformarlo en biodiesel (Biodiesel, 2012).

Uno de los factores que promueven el desarrollo de empresas en la República mexicana es debido a que México adoptó oficialmente el Protocolo de Kyoto, que busca hacerle frente al cambio climático global y prevenir sus efectos.

Como consecuencia fue originado el Comité Mexicano para proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero (COMEGEI) integrado por siete dependencias de gobierno (Figura 16). Las funciones de este comité son identificar oportunidades, facilita y aprueba la realización de proyectos de reducción de emisiones y captura de gases de efecto invernadero (Instituto Nacional de Ecología, 2010).



Figura 16: Dependencias de gobierno que forman parte de COMEGEI

2.3 TRANSESTERIFICACIÓN

La transesterificación es el método utilizado comercialmente para la obtención de biodiesel. Se basa en la reacción de moléculas de triglicéridos con

alcoholes de bajo peso molecular y un catalizador para producir ésteres y glicerina (Schuchardt, 1998).

El triglicérido es el principal componente del aceite vegetal o grasa animal (Figura 17).

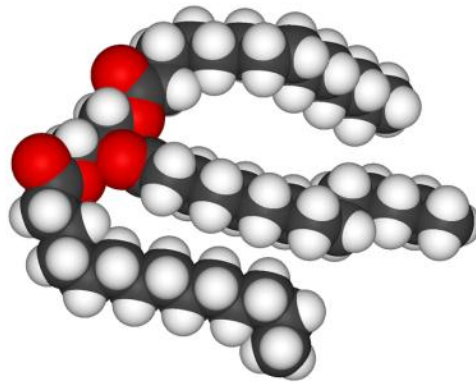


Figura 17: Modelo tridimensional de triglicérido formado por un glicerol y ácidos grasos.

En la reacción de transesterificación, por cada mol de triglicérido se necesitan tres moles del alcohol, obteniendo como resultado tres moles de ésteres y un mol de glicerina (Figura 18).

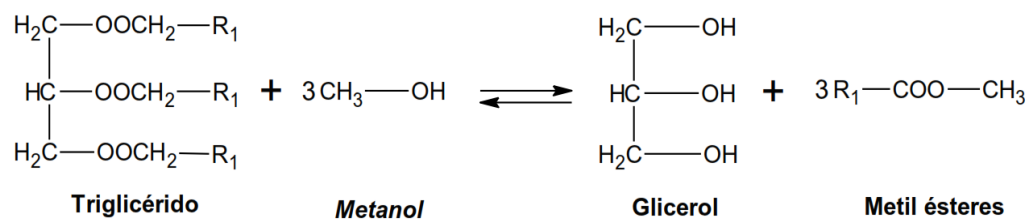


Figura 18: Reacción global de transesterificación de un triglicérido para conversión completa.

La reacción de aceites vegetales o grasas animales con alcoholes ligeros consta de tres etapas sucesivas (reversibles) en las que el triglicérido es convertido

consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina (Freedman, 1986) (Meher, 2006).

El proceso de la transesterificación da como resultado biodiesel y glicerina como subproducto (Figura 19).

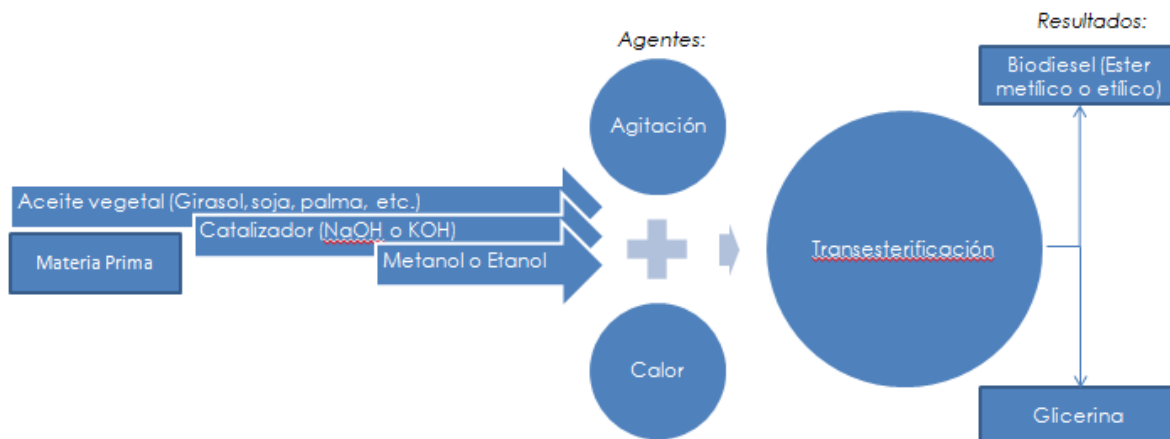


Figura 19: Diagrama de transesterificación.

2.3.1 CATALIZADORES

Para que la reacción de transesterificación se verifique a velocidades que puedan ser de interés industrial, se requiere de la acción de un catalizador. Este catalizador tradicionalmente se encuentra en el mismo estado físico que la mezcla de reacción y por lo general es una base o un ácido fuerte (NaOH, KOH, CH_3ONa) (Tomasevic, 2003) (Jain, 2011).

Bajo estas condiciones la temperatura típica de reacción es del orden de 40 – 60 °C y se requiere de un exceso del alcohol correspondiente en la mezcla de reacción. Con estas condiciones se facilita la separación de la glicerina obtenida y se alcanza un mayor rendimiento del éster metílico (biodiesel).

A nivel industrial, los catalizadores que suelen usarse para llevar a cabo la transformación de grasa o aceites vegetales a biodiesel, son los catalizadores homogéneos básicos. Estos tipos de catalizadores hacen que la reacción sea muy rápida y las condiciones de operación son relativamente fáciles de alcanzar.

A pesar de que la reacción de transesterificación con catalizadores homogéneos se verifica en periodos de tiempo cortos y a conversiones altas, se han observado algunos inconvenientes entre los que destacan que:

- El catalizador debe ser separado del producto final y no puede ser reutilizado.
- Se produce como subproducto un glicerol de bajo grado de pureza.
- Se generan grandes cantidades de aguas residuales que requieren de un tratamiento previo a su disposición final (Lee, 2010) (Gryglewicz, 1999).

De esta manera, debido a las restricciones ambientales cada vez más estrictas por parte de las normas gubernamentales, la atención se ha dirigido al estudio de la eficiencia de catalizadores heterogéneos que sean más amigables con el medio ambiente ya que generan residuos menos contaminantes además de que el proceso puede resultar más sencillo al momento de realizar la separación de los productos finales.

En el caso de la reacción de transesterificación, cuando se utiliza un catalizador ácido, se requieren temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos. Por ello es frecuente la utilización de derivados de ácidos más activos o super-ácidos, lo cual se consigue usando catalizadores sólidos ácidos modificados químicamente para aumentar su acidez.

Se ha observado que al utilizar catalizadores ácidos de tipo Bronsted (ácidos sulfúricos y sulfónicos), se obtienen altos rendimientos en la producción de ésteres alquílicos. Sin embargo, las reacciones suelen ser lentas, de manera que requieren de temperaturas superiores a los 100 °C y más de tres horas para conseguir una conversión cercana al 100% (Gryglewicz, 1999).

Igualmente se ha valorado la actividad de metales alcalino-térreos como catalizadores en la transformación del aceite de colza. Sin embargo, se concluyó que la reacción es más lenta (Gryglewicz, 1999).

De la misma manera, en una serie de óxidos analizados, la actividad catalítica del hidróxido de sodio presentó mayor actividad con 85% de transformación en 30 minutos y de 95% después de hora y media. Mientras que el hidróxido de bario presentó conversión del 75% después de 30 minutos y el metóxido de calcio sólo el 55%, en el mismo lapso de tiempo.

Otras opciones interesantes en el área de los catalizadores heterogéneos son los de tipo enzimático, estos son altamente selectivos y puede resolver algunos problemas presentados por los catalizadores homogéneos y algunos heterogéneos sólidos (Morita, 2007).

Asimismo, se ha estudiado la actividad catalítica en la reacción de transesterificación, usando como catalizador zeolita de tipo *Clinoptilolita*, brindando resultados prometedores (Martínez, 2010), sin embargo, es necesario

realizar estudios utilizando la misma zeolita en una segunda reacción, esta posibilidad sería una gran diferencia con respecto a los demás catalizadores que existen para la transesterificación, ya que no son reutilizables.

2.3.2 ZEOLITA

Las zeolitas son materiales que pertenecen a una familia de minerales, descrita por primera vez en 1756 por Cronstedt, un mineralogista sueco.

Cronstedt observó que al calentar el mineral éste perdía agua, dando la apariencia de estar hirviendo. De este suceso surgió el nombre genérico que se le ha dado a este grupo de minerales: zeolita, el cual proviene de las raíces griegas *zeo*, que significa hervir y *lithos* piedra (Olguín).

Ahora se sabe que el fenómeno observado por Cronstedt se debe a la capacidad que tiene el mineral de adsorber agua en el interior de su estructura, que mediante la aplicación de calor puede ser desorbida o desprendida.

Estructuralmente, las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos, constituidos por arreglos tetragonales de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{5-}$ unidos por átomos de oxígeno compartidos. Estos arreglos se unen formando redes tridimensionales que constituyen canales y cavidades de dimensiones moleculares.

En el interior de la red tridimensional se pueden encontrar alojados cationes metálicos y/o moléculas de agua que compensan la carga neta negativa de la estructura cristalina (Figura 20).

Estos cationes pueden ser fácilmente removidos y sustituidos por otros, confiriendo a las zeolitas una de sus propiedades más importante, su capacidad de intercambio iónico.

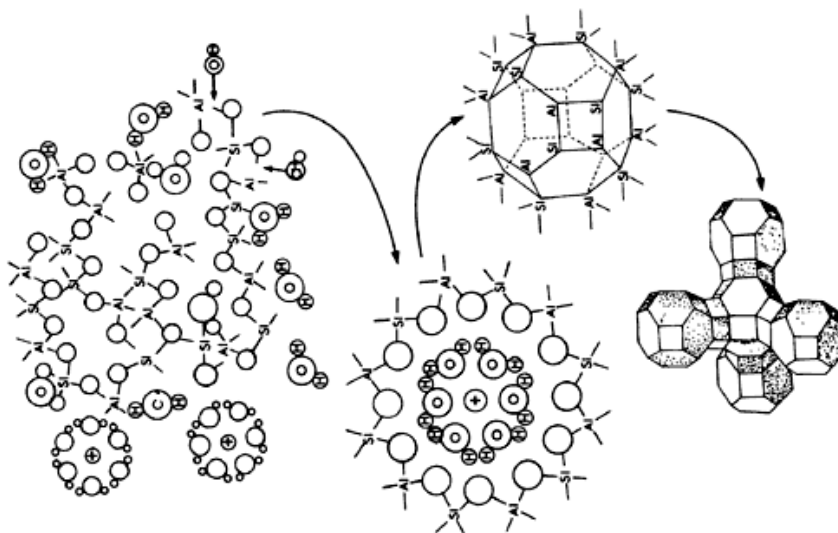


Figura 20: Representación tridimensional de la estructura de una zeolita.

La microporosidad de estos sólidos es abierta y la estructura permite la transferencia de materia entre el espacio intracristalino y el medio que lo rodea.

Esta transferencia está limitada por el diámetro de los poros de la zeolita, ya que sólo podrán atravesar el espacio intracristalino aquellas molécula cuya dimensión sea inferior al tamaño de poro (Cuadro 6).

Cuadro 6: Diámetro de poro presente en zeolitas.

Zeolita	Átomos de Oxígeno que forman la abertura	Diámetro de poro (Å)
Poro Extra grande	18	$\theta > 9$
Poro Grande	12	$6 < \theta < 9$
Poro Mediano	10	$5 < \theta < 6$
Poro Pequeño	8	$3 < \theta < 5$

Las zeolitas se pueden encontrar de manera natural en yacimientos minerales de muchas regiones del planeta. En México, los primeros yacimientos de zeolitas fueron descubiertos en el Estado de Oaxaca, durante la década de 1970 (Mumpton, 1973). Posteriormente, se encontraron otros yacimientos de estos minerales en Sonora y Puebla (Galán, 1996). En la actualidad, se ha observado la presencia de estos minerales en varios estados de la república, entre los que se encuentran: Oaxaca, Puebla, Sonora, Chihuahua, San Luis Potosí, y Zacatecas (Figura 21).



Figura 21: Principales estados con yacimientos de zeolitas en México.

Las zeolitas poseen una serie de propiedades fisicoquímicas muy interesantes, desde el punto de vista de su aplicación, razón por la que se han posicionado como los catalizadores más utilizados en la industria por sus características intrínsecas.

La razón del éxito de las zeolitas es que poseen características estructurales muy importantes que les confieren aplicaciones en varios campos como son:

- Adsorción:
Las zeolitas suelen tener una alta capacidad de adsorción debido a su elevada superficie específica ($>700 \text{ m}^2/\text{g}$), la cual está directamente relacionada con el tamaño de sus poros.
- Propiedad de tamiz molecular:
Debido a que en la estructura de una zeolita se encuentran cavidades de diferente tamaño, éstas pueden servir como mallas moleculares.
- Alta estabilidad térmica y mecánica:
Las zeolitas son altamente estables a temperaturas hasta de $700 \text{ }^\circ\text{C}$ y presiones elevadas manteniendo intacta su estructura porosa.

3. CONCLUSIÓN

El biodiesel se presenta como una alternativa muy interesante en lo referente a materia medioambiental y utilización de energías renovables.

Con su uso se podría reducir de manera importante las emisiones de gases de efecto invernadero.

La Zeolita *Clinoptilolita* empleada como catalizador, muestra una opción en la búsqueda de economizar el proceso de obtención de biodiesel por medio de la reacción de transesterificación a partir de aceite de soya.

Es necesario realizar investigaciones para obtener mayores rendimientos buscando reducir la materia prima, la cantidad de alcohol y el catalizador, con la menor temperatura y tiempo necesarios.

4. LITERATURA CITADA

- ∞ Álvarez D. (2011). Simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites de *Jatropha e higuera*. pag 19.
- ∞ BBC. (2011). MUNDO una voz independiente. http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2011/08/110802_biocombustible_aviacion_mexico_an.shtml
- ∞ Biodiesel. (2012). Biofuels de México. <http://www.recoleccionaceite.com/>
- ∞ Biodiesel Chiapas. (SF). Estación de Servicio de biodiesel en Tuxtla Gutierrez, Chiapas, primera en México. http://www.biodieselchiapas.mx/Biodiesel_Chiapas/Biodiesel_Chiapas_Bienvenidos.html
- ∞ Bradshaw G., Meily W. (1942). Process of making pure soaps. U.S. Patent No. 2,271,619.
- ∞ Bullón F. (2006). El Mundo ante el Cenit del Petróleo. http://www.crisisenergetica.org/ficheros/El_mundo_ante_el_cenit_del_petroleo.pdf
- ∞ Castro P. (2007). Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú. Soluciones Prácticas-ITDG. pag. 36, 119.
- ∞ Ecoperiodico. (2010). Primera planta productora de biodiesel en México. <http://www.ecoperiodico.com/primeraplantaproductora-de-biodiesel-en-mexico/>
- ∞ Elizalde X., Rodríguez L. (2009). Diseño preliminar de una planta de producción de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* en la región sur del Ecuador. pag. 4, 17.
- ∞ Fernández G. (2002). Barreras para el desarrollo del empleo de los biocombustibles sólidos y líquidos. Ponencia en las Jornadas sobre Aportación de la Biomasa al Desarrollo de las Energías Renovables.
- ∞ Freedman B., Butterfield R., Pryde E. (1986). Transesterification kinetics of soybean oil. pag. 1375 – 1380.
- ∞ Galán P., Chávez P., García M. (1996). Sedimentary Zeolites in the Sierra Madre del Sur and Sierra Madre Occidental. pag. 188 – 200.
- ∞ Gazzoni D. (2009). Biocombustibles y alimentos en América Latina y el Caribe. pag. 28
- ∞ Glynn J. (2011). A review of Green Energy Growth Prospects at the Oil Economy Maxima. <http://aspoireland.org/2011/05/08/a-review-of-green-energy-growth-prospects-at-the-oil-economy-maxima/>

- ∞ Greenpeace. (2008). Posición de Greenpeace sobre los criterios de sostenibilidad de los biocombustibles. [Http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/posicion-de-greenpeace-sobre-b.pdf](http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/posicion-de-greenpeace-sobre-b.pdf)
- ∞ Gryglewicz. (1999). Rapeseed oil methyl esters preparation using heterogeneous catalysts. pag. 249 – 253.
- ∞ Hibert. (2006). 1 foro de cultivos alternativos “Generación de Materias Primas con Fines Energéticos”. Programa nacional de biocombustibles. Sede INTA Chile. pag. 2.
- ∞ Hill J., Nelson E., Polasky S., Tilman D. (2006). Environmental, economic, and energetics costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. pag. 2 – 4.
- ∞ IICA. (2007). Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles. pag. 6 – 7.
- ∞ Instituto Nacional de Ecología. (2010). El Comité Mexicano para proyectos de reducción de emisiones y captura de gases de efecto invernadero, COMEGEI. http://cambio_climatico.ine.gob.mx/sectprivcc/comegei.html
- ∞ Ireland ASPO. (2012). Association for the Study of Peak Oil & Gas. <http://aspoireland.org/>
- ∞ Jain S., Sharma M., Rajvanshi S. (2011). Acidbase catalyzed transesterification kinetics of waste cooking oil. Fuel Process. pag. 32 – 38.
- ∞ Knothe G., Gerpen J., Krahl J. (2004). The biodiesel Handbook. pag. 28.
- ∞ Lee J., Saka S. (2010). Biodiesel production by heterogeneous catalyzt and supercritical technologies. Bioresour. pag. 7191 – 7200.
- ∞ León G. (2009). Los Biocombustibles. pag. 5.
- ∞ Martínez, M. (2010). Actividad Catalítica de una *Clinoptilolita* Mexicana en la Obtención de Biodiesel.
- ∞ Meher L., Vidya D., Naik S. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification. Renewable and Sustainable Energy Reviews. pag. 248 – 268.
- ∞ Morita T., Konishi M., Fukuoka T., Imura T., Kitamoto D. (2007) Microbial conversión of glicerol into glycolipid biosurfactants, mannosylerythritol lipids, by a basidiomycete yeast, *Pseudozyma* antártica. pag. 78 – 81.
- ∞ Mumpton. F. (1973). Am. Miner. pag. 287 – 289.
- ∞ NextFuel. (2010). Portal de información y noticias sobre Biodiesel y energías renovables. <http://biodiesel.com.ar/3289/cultivo-de-jatropha-para-producir-biodiesel-en-mexico>
- ∞ NREL. (2009). Biodiesel Handling and Use Guide. pag. 11.
- ∞ Olguín M. Zeolitas Características y Propiedades. pag. 1 – 3.
- ∞ Ribeiro L. (2007). Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras. pag. 14 – 15.

- ∞ Robert P. (2008). Conferencia internacional sobre biocombustibles. pag. 2.
- ∞ SAGARPA. (2010) Proyectos de Investigación. <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/programas/proyectos-de-investigacion.html>
- ∞ Sawin J. L. (2010). Renewables Global Status Report. http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR_2010_full_revised%20Sept2010.pdf
- ∞ Schuchardt U., Sercheli R., Matheus R. (1998). Transesterification of vegetable oils: a review. pag. 199 – 210.
- ∞ Sheehan J., Cambreco V., Duffiel J., Graboski M., Shapouri H. (1998). An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles. National Renewable Energy Laboratory of U.S. Department of Energy (DOE), U.S.A.
- ∞ Tomasevic A., Siller S. (2003). Methanolysis of used frying oil. Fuel Process Technol. pag. 1-6
- ∞ Torres., Carrera. (2010). Biocombustibles Informe. pag. 4 – 8.
- ∞ Vicente G., Martínez M., Aracil J. (1998). Ésteres metílicos como combustible. Materias primas y propiedades, Tecno-Ambiente. pag. 9 – 12.