



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Estudio de factibilidad para el uso de biodiésel en el
transporte interno de Ciudad Universitaria a partir de
aceites comestibles de desecho**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO
PRESENTA:
PLASCENCIA MUÑOZ MARCO ARTURO**



MÉXICO, D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: **Profesor: José Fernando Barragán Aroche**

VOCAL: **Profesor: Juan José Ruiz López**

SECRETARIO: **Profesor: Alejandra Castro González**

1o SUPLENTE: **Profesor: Abraham Rodrigo Flores Ramos**

2o SUPLENTE: **Profesor: José Agustín García Reynoso**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Posgrado de Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, UNAM

ASESOR DEL TEMA: **Dra. Alejandra Castro González**

SUSTENTANTE: **Plascencia Muñoz Marco Arturo**

Índice general

Resumen.....	1
Capítulo 1. Introducción.....	2
1.1 Objetivos.....	3
Capítulo 2. Antecedentes.....	4
2.1 Aceites y Grasas	4
2.1.1 Componentes	5
2.1.1.1 Ácidos Grasos.....	5
2.1.1.2 Acilglicéridos	8
2.1.2 Origen y composición.....	9
2.1.2.1 Origen vegetal.....	9
2.1.2.2 Origen animal	13
2.2 Obtención de aceites y grasas vegetales	14
2.2.1 Extracción de aceites	14
2.2.2 Métodos de refinación y purificación	16
2.2.3 Reacciones de aceites y grasas	18
2.3 Panorama de los aceites.....	21
2.3.1 Mercado internacional	21
2.3.2 Mercado Nacional.....	24
Capítulo 3. Biodiésel	28
3.1 Combustibles y biocombustibles	28
3.2 Biodiésel	29
3.2.1 Estado del arte y pronósticos del uso de biodiésel	30
3.2.2 Materia prima para producción de biodiésel	31
3.2.3 Zonas agrícolas para producción de biodiésel.....	33
3.3 Métodos de obtención.....	35
3.3.1 Métodos catalíticos de transesterificación.....	38
3.3.2 Métodos no-catalíticos de transesterificación.....	41
3.4 Propiedades de biodiésel	43
3.5 Estandarización y normas.....	46
3.5.1 Tipos de biodiésel.....	50
3.6 Costos de producción de biodiésel	50
3.7 Evaluación del biodiésel respecto al diésel	55
3.7.1 Análisis de ciclo de vida.....	56
3.7.2 Ventajas del uso de biodiésel.....	61
3.7.3 Desventajas del uso de biodiésel	66

Capítulo 4. Metodología.....	68
4.1 Antecedentes para la obtención de biodiésel.....	68
4.1.1 Recolección del ACD.....	68
4.1.2 Lugar de obtención de biodiésel.....	69
4.1.3 Caracterización de la materia prima.....	70
4.2 Metodología experimental.....	72
4.2.1 Logística de conversión.....	72
4.3 Antecedentes para el uso de biodiésel.....	73
4.4 Formulación de factibilidad económica.....	77
Capítulo 5. Resultados.....	82
5.1 Cantidad de aceite comestible de desecho.....	82
5.2 Obtención de biodiésel en laboratorio a partir de ACD.....	84
5.2.1 Desarrollo experimental.....	84
5.2.2 Caracterización del producto.....	89
5.3 Uso del biodiésel en el transporte para el caso de estudio.....	90
5.3.1 Almacenamiento.....	91
5.3.2 Distribución.....	92
5.4 Resultados de factibilidad para el caso de estudio.....	92
5.4.1 Factibilidad técnica.....	92
5.4.2 Factibilidad ambiental.....	94
5.4.3 Factibilidad económica.....	95
Capítulo 6. Conclusiones.....	100
Referencias bibliográficas.....	101

Abreviaturas

ACD	Aceites comestibles de desecho	km	Kilometro
AC	Aceites comestibles	L	Litros
ACV	Análisis de ciclo de vida	LAD	Lipoproteína de alta densidad
AV	Aceites vegetales	LBD	Lipoproteína de baja densidad
AG	Ácido graso	Mdb	Miles de barriles al día
AGL	Ácido graso libre	MCI	Motores de combustión interna
BNA	Beneficio neto anual	MD	Motores diésel
cm	Centímetro	mg	Miligramos
cSt	Centi Stoke	MJ	Mega joule
CU	Ciudad Universitaria	ml	Mililitro
CO	Monóxido de carbono	MMbpce	Millones de barriles de petróleo crudo equivalente
CO ₂	Dióxido de carbono	MSC	Metanol supercrítico
COV	Compuestos orgánicos volátiles	Mtep	Millón de tonelada equivalente de petróleo
EMAG	Esteres metílicos de ácidos grasos	NaCl	Cloruro de sodio
FNE	Flujo neto de efectivo	NaOH	Hidróxido de sodio
GEI	Gases de efecto invernadero	NOx	Óxidos de nitrógeno
g	Gramos	PCG	Potencial de calentamiento global
ha	Hectárea	PCS	Poder calorífico superior
HC	Hidrocarburos de combustión incompleta	PF	Partículas finas
HP	Caballos de potencia	ppm	Partes por millón
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico	S	Segundos
hrs	Horas	sem	Semana
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico	T	Tonelada
IDR	Ingesta dietética recomendada	tep	Tonelada equivalente de petróleo
IY	Índice de yodo	TIR	Tasa interna de retorno
kg	Kilogramo	TRI	Tiempo de recuperación de la inversión
KOH	Hidróxido de potasio	\$	Pesos mexicanos

Resumen

Se evaluó en este trabajo la factibilidad del uso de biodiésel en la red de transporte interno universitario, producido a partir de aceites comestibles de desecho (ACD) generados en los establecimientos alimenticios de Ciudad Universitaria (CU).

Para la cantidad de materia prima real, se dispone de 9,726.3 kg/año de ACD recolectados en los establecimientos alimenticios. Del estudio de factibilidad técnica se concluye que para la metodología de reacción seleccionada (transesterificación directa vía catálisis alcalina) y del desarrollo experimental empleado, se estimó una conversión de reacción del 85%, obteniendo 8,267 kg/año de biodiésel y de 973 kg/año de glicerina que es un subproducto de alto valor en el mercado. Se propone en este estudio que la producción de biodiésel se realice en el laboratorio de Ingeniería Química como parte de una práctica académica, incorporada al plan de estudio y para los estudiantes de la Facultad de Química, de esta manera ahorrar recursos y generar conocimientos.

Se determinó a la ruta 2 del transporte PUMABUS, marca Mercedes Benz, modelo Torino tipo 1423 de motor diésel (MD), como la mejor alternativa para el uso del biodiésel producido, empleándose en mezclas del tipo B10 y bajo las especificaciones de la norma ASTM D 7467-08, de esta forma poder cumplir con la demanda del combustible para 4 unidades de transporte de la ruta. Ambientalmente permitirá la disminución de emisiones contaminantes de hasta 10% por unidad, representando en total 269,982.72 g/año de gases de efecto invernadero (GEI) evitados. Económicamente y para un periodo a 5 años de operación financiera, generará utilidades de 36×10^3 \$/año, tasa interna de retorno del 23.86 %, para una inversión de 107×10^3 \$/año y con un tiempo de recuperación de la inversión a 4.4 años. Se concluye que el proyecto es viable porque que el valor de la tasa interna de retorno para el año 1 de la operación es mayor que la tasa efectiva, ($TIR = 13.1 \% > (T_{ef} = 4.37 \%)$) además de un confiable beneficio al corto plazo para el desarrollo del proyecto.

Capítulo 1. Introducción

El intenso uso de baja eficiencia, así como el abastecimiento de las necesidades energéticas humanas, redujo las reservas de los combustibles fósiles considerablemente durante el siglo pasado, pronosticando su agotamiento para las próximas décadas. Esta situación ha generado disminución en la producción del combustible, aumento de precios en el mercado y desestabilización económica mundial. Actualmente los combustibles fósiles representan más del 80,3% de la energía primaria consumida en el mundo y 57,7% de esa cantidad es utilizada en el sector de transporte. Siendo así la principal causa de emisiones contaminantes de GEI a la atmósfera [IEA, 2006].

Como alternativa para sustituir a los combustibles fósiles y en ayuda a las necesidades energéticas mundiales, la producción de biocombustibles aumento durante los últimos 10 años, alcanzando volúmenes sin precedentes. El biodiésel como biocombustible alternativo, renovable y limpio tiene un elevado potencial en el futuro próximo como sustituto parcial de los combustibles fósiles, principalmente por su uso como combustible en motores de combustión interna. Actualmente más del 95% del biodiésel mundial se produce industrialmente por reacción de transesterificación y a partir de materia prima como aceites comestibles vegetales, disponibles en la industria agrícola. [IEA, 2004]. Sin embargo, una continua producción a gran escala a partir de estos recursos sin una planificación adecuada, puede causar efectos negativos mundiales de seguridad alimenticia, que es una necesidad esencial y no debe pasarse por alto.

Como fuentes alternativas para la producción de biodiésel se tienen a aceites y grasas no comestibles, así como también ACD que son aceites ya no aptos para consumo humano. La eliminación de estos aceites es una cuestión problemática en la mayoría de los países, ya que la práctica común de mandarlos a las alcantarillas conduce a obstrucciones del drenaje, contaminación de agua, daño al ecosistema y problemas de salubridad en general. Por lo anterior, el reuso de ACD como productos de valor energético representa una buena alternativa para su disposición final, ya que permite descartar las problemáticas de su eliminación, ayudando al cuidado del medio ambiente y generando bienestar general a la comunidad.

1.1 Objetivos

El objetivo general es evaluar mediante un estudio la factibilidad, técnico, económico y ambiental la alternativa para la disposición final del ACD generado en los establecimientos alimenticios dentro de CU mediante su uso como biocombustible en las unidades del transporte interno de la red escolar universitaria.

Objetivos particulares

- Determinar la cantidad de materia prima disponible mediante un estudio de campo para la cuantificación del ACD generado por los establecimientos alimenticios dentro de CU.
- Definir la técnica y metodología experimental a emplearse en la producción de biodiésel en el laboratorio para obtener alto rendimiento a condiciones estándar de reacción.
- Establecer la mejor alternativa para el uso del biodiésel en la red del transporte universitario, en función de la cantidad producida y la demanda de combustible en las unidades.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Aceites y Grasas

Los aceites y grasas son un componente principal y esencial de la dieta humana, constituyen una fuente de energía de primer orden ya que proporcionan 9 kcal/g en comparación a las proteínas y carbohidratos que rinden sólo unas 4 kcal/g. Los aceites y grasas aportan vitaminas liposolubles que cumplen funciones hormonales y de regulación metabólica, donde su ingestión mejora la absorción de éstas vitaminas independientemente de su origen, además de ser indispensables para lograr una dieta apetitosa y equilibrada. Las principales fuentes de aceites y grasas en la dieta son todas las variedades de carne, productos lácteos, frutos secos y aceites comestibles vegetales [Ziller, 1996].

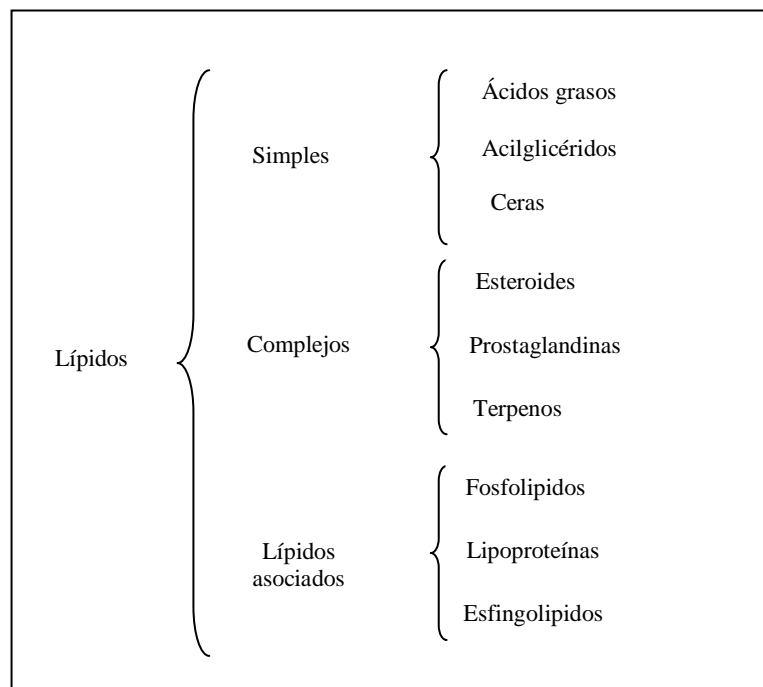
Los aceites y grasas pertenecen al grupo denominado lípidos que engloba una gran variedad de biomoléculas (Figura 2.1). Las definiciones actuales se basan en que las moléculas de los lípidos son derivados reales o potenciales de los ácidos grasos (AG), constituyendo la base de estas moléculas lipídicas, a la vez que determinan marcadamente sus propiedades [Chapman, 1993].

Las características y estado físico de los aceites o grasas a temperatura ambiente se deben principalmente a su estructura molecular, número de átomos de carbono en las cadenas hidrocarbonadas, su grado de saturación, formas isoméricas de los AG y los métodos de producción utilizados. Se aplicó para este trabajo la denominación genérica de aceites, a los productos grasos líquidos a la temperatura igual o menor de 20°C y de sebos, manteca o simplemente grasas a los productos grasos en estado sólido a temperatura mayor a 20°C [Vicente, 1988].

2.1.1 Componentes

El componente mayoritario de todos los aceites y grasas alimenticias procede del grupo de los acilglicéridos, en particular de los triglicéridos, los cuales representan hasta el 95% del peso total de la grasa. Entre los constituyentes minoritarios se encuentran principalmente los AG, monoglicéridos y diglicéridos, además de terpenos, fosfolípidos, esteroides, alcoholes, vitaminas liposolubles (A, D, E, K) y diversos componentes odoríferos [Lawson, 1999].

Figura 2.1 Clasificación de lípidos [A partir de Chapman, 1993]

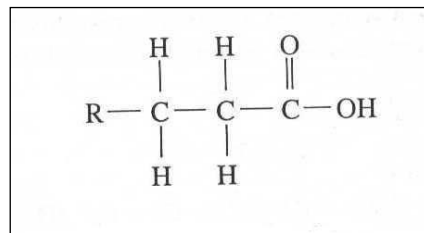


2.1.1.1 Ácidos Grasos

Son largas cadenas alifáticas de ácidos carboxílicos libres (Figura 2.2). Los AG representan la reserva energética más importante de los animales al ser hidrolizados mediante reacciones enzimáticas de la Coenzima A, formando Acetil-CoA que se metabolizan en el ciclo de Krebs dentro del citosol y la membrana interna de las mitocondrias, produciendo moléculas energéticas de ATP.

Tienen entre otras de sus funciones ser constituyentes principales del tejido graso, síntesis de hormonas, absorción de vitaminas, componentes de membranas celulares. Adicionalmente intervienen en la reducción del colesterol transportado en lipoproteínas de baja densidad (LBD o colesterol malo), facilitando el aumento de las lipoproteínas de alta densidad (LAD o colesterol bueno) que limpia las arterias en vez de deteriorarlas [Mataix, 2003].

Figura 2.2 Estructura química de ácido graso saturado [Lawson, 1999]



Los AG presentes en los aceites y grasas se clasifican estructuralmente en saturados, que son aquellos que presentan enlace simple en su cadena alifática (grasas), en mono-insaturados que son aquellos que tienen un doble enlace y poli-insaturados que presentan más de un doble enlace (aceites). Se emplea la escala de índice de yodo (IY) para referir al grado de insaturación de un compuesto orgánico, esta escala es importante porque la presencia de estas insaturaciones en la estructura del AG reduce su punto de fusión. En las Tablas 2.1 y 2.2 se presentan los tipos de los AG saturados e insaturados respectivamente, así como su nombre y fórmula química.

Tabla 2.1 Ácidos grasos saturados [Lawson, 1999]

Nombre común	Nomenclatura	Nº de átomos de carbono	Formula química
Acético	Etanoico	2	CH ₃ COOH
Butírico	Butanoico	4	C ₃ H ₇ COOH
Caproico	Hexanoico	6	C ₅ H ₁₁ COOH
Caprílico	Octanoico	8	C ₇ H ₁₅ COOH
Cáprico	Decanoico	10	C ₉ H ₁₉ COOH
Láurico	Dodecanoico	12	C ₁₁ H ₂₃ COOH
Mirístico	Tetradecanoico	14	C ₁₃ H ₂₇ COOH
Palmítico	Hexadecanoico	16	C ₁₅ H ₃₁ COOH
Esteárico	Octadecanoico	18	C ₁₇ H ₃₅ COOH
Araquídico	Eicosanoico	20	C ₁₉ H ₃₉ COOH
Behénico	Docosanoico	22	C ₂₁ H ₄₃ COOH

Tabla 2.2 Ácidos grasos insaturados [Lawson, 1999]

Nombre común	Nomenclatura	Nº dobles enlaces	Nº de átomos de carbono	Formula química
Miristoléico	Tetradecenoico	1	14	C ₁₃ H ₂₅ COOH
Palmitoléico	Hexadecenoico	1	16	C ₁₅ H ₂₉ COOH
Oléico	Octadecenoico	1	18	C ₁₇ H ₃₃ COOH
Linoléico	Octadecadienoico	3	18	C ₁₇ H ₃₁ COOH
Linolénico	Octadecatrienoico	3	22	C ₁₇ H ₂₉ COOH
Araquidónico	Eicosatetraenoico	4	20	C ₁₉ H ₃₁ COOH
Erúcico	Docosenoico	1	22	C ₂₁ H ₄₁ COOH

Nutricionalmente también se clasifican en 2 grupos, los no esenciales que son aquellos que el organismo puede sintetizar, y los esenciales, que no se producen en el organismo y necesariamente deben ser aportados por la dieta diaria. Del grupo de AG poli-insaturados se derivan los llamados serie omega-3 (linolénico) y omega-6 (linoléico), mientras que de las grasas mono-insaturadas se deriva el grupo de omega-9 (oléico). El consumo de estos AG saturados en la alimentación, con un adecuado equilibrio y cantidad contribuyen a estabilizar el metabolismo de las grasas en el organismo, reduciendo el riesgo a padecer enfermedades cardiovasculares [Mataix, 2003]. La Tabla 2.3 Muestra la fuente de los AG más comunes en la naturaleza, tamaños de cadena, grados de insaturación y su punto de fusión.

Tabla 2.3 Ácidos grasos más importantes presentes en la naturaleza [Lawson, 1999]

Ácido graso	Átomos de carbono	Dobles enlaces	Punto de fusión (°C)	Fuentes
Butírico	4	0	-8	Mantequilla
Láurico	12	0	44	Aceite de coco
Mirístico	14	0	54	Mantequilla, aceite de coco, aceite de palma
Palmítico	16	0	63	Aceite de palma, mantequilla, grasas animales
Esteárico	18	0	69	Sebo, manteca de cacao,
Oléico	18	1	14	Oliva, cacahuate, manteca de cerdo, palma, sebo, maíz, semilla de colza
Linoléico	18	2	-5	Soya, cártamo, girasol, maíz y semilla de algodón
Linolénico	18	3	-11	Soya, colza
Gadoléico	20	1	-	Aceites de pescado
Araquidónico	20	4	- 40	Manteca de cerdo, sebo
	20	5	-	Aceite de pescado
Behénico	22	0	80	Cacahuate, semilla de colza
Erúcico	22	1	33	Semilla de colza
	22	6	-	Aceites de pescado

2.1.1.2 Acilglicéridos

Los acilglicéridos o glicéridos son ésteres formados por ácidos grasos unidos a una molécula de glicerol (Figura 2.3). Se clasifican de acuerdo a la cantidad y secuencia en que los ácidos están unidos a una molécula de glicerol: monoglicéridos (1 AG unido al glicerol), diglicéridos (2 AG) y triglicéridos (una molécula de glicerol, a la cual están unidos 3 AG de cadena larga). Cuando los AG de un triglicérido son idénticos, se le denomina triglicérido simple, pero los más comunes son los compuestos que se forman por 2 ó 3 ácidos diferentes (Figura 2.4). Los triglicéridos comprenden del 90% al 95% de los lípidos presentes en los alimentos [IESN, 2001].

Figura 2.3 Glicerol [Lawson, 1999]

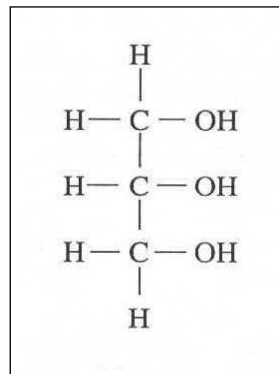
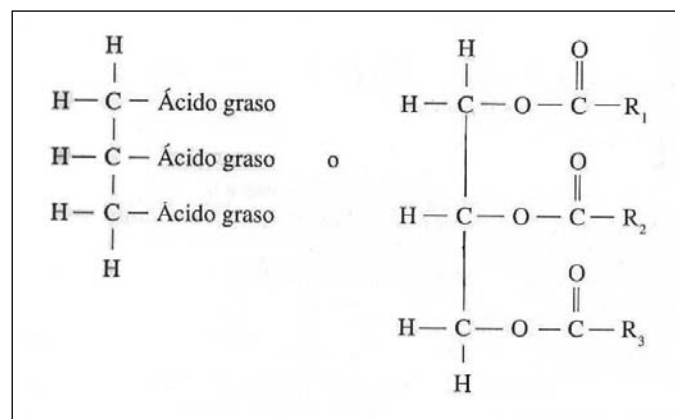


Figura 2.4 Triglicérido compuesto [Lawson, 1999]



Los triglicéridos se encuentran en la naturaleza como componentes de grasas y aceites de fuente vegetal y animal. Los aceites vegetales (AV) proceden de las semillas o frutos de plantas oleaginosas, mientras que las grasas animales provienen de los tejidos o depósitos adiposos de animales. Si hay exceso en nuestra alimentación, es inevitable que se almacenen como grasas en el organismo. Necesitan ser emulsionados por la acción de la bilis para ser absorbidos por el intestino, en general un alto consumo representa un riesgo para la salud [IESN, 2001]. Para la ingesta dietética recomendada (IDR) de la población adulta, la Asociación Americana del Corazón [AHA, 2009], emitió las siguientes recomendaciones:

- 1) La ingesta diaria de energía proveniente de grasa y aceites no deben superar el 35% del aporte total de energía en la alimentación.
- 2) Las grasas deben componerse de 10% de AG saturados y 25% de AG insaturados, de estas últimas, el 20% deben ser mono-insaturadas (omega-9) y el restante 5% de poli-insaturadas, siendo el grupo omega-3 en 4% y omega-6 en 1% de la IDR.
- 3) En la dieta actual se consume en general un exceso de grasas saturadas y de omega 6, por lo que se recomienda una disminución en la ingesta de grasas saturadas y un aumento de omega-3, que se encuentra principalmente en el pescado y actualmente en algunos alimentos enriquecidos.

2.1.2 Origen y composición

2.1.2.1 Origen vegetal

Aceite de Soya

Procedente del prensado de la semilla soja (*Glycine max*). Es el aceite de mayor producción mundial. Contiene hasta 80% de AG insaturados, de los cuales 54% es ácido linoléico (poli-insaturado), su principal uso es culinario. Tiene coloración ámbar, que después de la refinación se vuelve amarillo brillante.

Aceite de Maíz

Una de las principales características es su elevado contenido de AG insaturados, alrededor de 87%, con 58% de ácido linoléico. Proporcionado buena cantidad de AG esenciales para el organismo. Útil para ser consumido crudo por realzar el sabor de los alimentos.

Aceite de Algodón

Se obtiene a partir de las semillas de la planta de algodón (*Gossypium*). Se compone principalmente de 54% de ácido linoléico y 26% de AG saturados. El aceite obtenido bruto tiene un olor y sabor fuerte, así como un color oscuro marrón-rojizo, se procesa para obtener un sabor más suave y un color relativamente claro.

Manteca de Palma

Obtenido de la pulpa del fruto de la palma (*Elaeis guineensis*). Contiene 50% de AG saturados, 40% de palmitoléico (mono-insaturado) y una alta cantidad de grasas trans, por lo que su ingestión debe ser limitada. Es el segundo aceite mas producido en el mundo. Tiene una apariencia semisólida por su alto punto de fusión y color rojo intenso.

Aceite de Cacahuete

Procedente de la semilla del cacahuete (*Arachis Hipogaea*), se emplea virgen o refinado. Su composición es alta en AG insaturados, hasta 83%. El aceite crudo es amarillo pálido y tiene el olor característico y sabor delicado de los cacahuates, además de ser estable a la oxidación.

Aceite de Oliva

Es el líquido oleoso extraído de los frutos maduros del olivo (*Olea Europea*). Contiene una cantidad mayor a 70% de ácido oléico (mono-insaturado), que le confiere excelentes propiedades nutricionales El aceite de oliva virgen no es desodorizado para conservar sus componentes aromáticos, los cuáles son considerados muy agradables y deseables para quien usa éste aceite en forma culinaria.

Aceite de Colza

Se denomina al aceite obtenido a partir de la planta de colza. La planta crece en climas relativamente fríos. La clave de aceptación de la colza es su bajo contenido de AG saturados del 6% y de alta en ácido oléico con 62%. Por cuestiones de salud, es posible que la colza pueda llegar a convertirse en la segunda fuente de aceite vegetal.

Aceite de Cártamo

Proveniente de la semilla de la planta de cártamo (*Carthamus tinctorius*). El aceite de cártamo es insípido y de coloración amarilla. Tiene alto valor nutricional dado su alto contenido de ácido linoléico, alrededor del 75-80%, que es el más elevado entre los aceites existentes.

Aceite de Girasol

Procedente de la semilla del girasol cultivado (*Helianthus annuus*). Es una planta de cultivo relativamente sencillo. Se compone mayoritariamente de 88 % de AG insaturados, con 68% de ácido linoléico. El aceite refinado es de color amarillo tenue, carece de sabor y olor intenso, mientras que el aceite sin refinar tiene un aroma intenso y muy agradable. Su principal uso es culinario por conservar su sabor.

Manteca de Coco

El aceite de coco se obtiene a partir de la copra, que es la carne del coco desecada. Se caracteriza por un elevado porcentaje de 83% de AG saturados, por lo que lo hace estable y resistente a la oxidación. Su principal uso es como humectante de piel, a la vez que ejerce una acción protectora de agresiones externas como sol, viento y frío.

Aceite de Palmiste

Procedente de la semilla del fruto de la palma (*Elaeis guineensis*) altamente refinado. Representa entre el 4 y 6% del peso del racimo de fruta fresca y tiene un contenido total entre 47 y 50% de AG, posee características diferentes de las del aceite rojo de palma y se asemeja al aceite de coco.

Manteca de Cacao

La procedente del fruto del cocotero (*Cocos nicifera*), es una de las grasas más estables porque contiene los antioxidantes naturales, de color blanco y tiene un suave aroma por lo que es usado para la fabricación de chocolate [Vicente, 1988; Lawson, 1999].

En las Tablas 2.4 y 2.5 se presenta la composición media en AG de las principales grasas y aceites de origen vegetal y animal, respectivamente. Los datos de composición fueron obtenidos por cromatografía de gases. Los AG fueron clasificados en base a su estructura química (número de átomos de carbono: número de dobles enlaces), las cantidades en trazas fueron excluidas [Ziller, 1996].

Tabla 2.4 Composición porcentual en ácidos grasos de los principales aceites vegetales [A partir de Ziller, 1996]

Aceites y grasas	% del total de ácidos grasos													
	Estructura química	Soya	Maíz	Algodón	Palma	Cacahuete	Oliva	Colza	Cártamo	Girasol	Coco	Semilla de palma	Manteca de cacao	Mantequilla
Butírico	4:0													4
Caproico	6:0										1			2
Caprílico	8:0										8	3		1
Cáprico	10:0										6	4		3
Láurico	12:0										47	48		3
Mirístico	14:0			1	1						18	16		11
Palmítico	16:0	11	11	22	45	11	13	4	7	7	9	8	26	27
Esteárico	18:0	4	2	3	4	2	3	2	2	5	3	3	34	12
Araquidónico	20:0					1	1						1	
Palmitoléico	16:1			1	40		1							2
Oléico	18:1	24	28	19		48	71	62	13	19	15	15	34	29
Gadoléico	20:1					2								
Linoléico	18:2	54	58	54	10	32	10	22	78	68	2	2	3	2
Linolénico	18:3	7	1	1		1	1	10		1				1

2.1.2.2 Origen animal

Grasa Láctea

Se refiere a la obtenida a partir de leche de vaca y es uno de los alimentos más importantes en la dieta humana, presentando una alta calidad nutritiva en relación al aporte de proteína, energía y calcio de algunas vitaminas y minerales. Ejemplo de esto es la mantequilla que es mezcla de grasa láctea, agua y sal.

Manteca de cerdo

Es la grasa obtenida por calentamiento del tejido adiposo acumulado en los tejidos del tórax y abdomen del cerdo y separando después la grasa fundida. Presenta consistencia blanda, sabor insípido, olor débil y temperatura de fusión de 26 a 31°C.

Sebo Vacuno

El sebo comestible se obtiene principalmente a partir de los huesos del ganado vacuno, *posteriormente centrifugado y estabilizado con antioxidantes para su conservación*. A temperatura ambiente es más firme y duro que la manteca de cerdo y su principal uso es para alimentación animal [Vicente, 1988; Lawson ,1999].

Tabla 2.5 Composición porcentual en ácidos grasos de las principales grasas animales [A partir de Ziller, 1996]

Aceites y grasas	% del total de ácidos grasos			
	Estructura química	Grasa láctea (%)	Manteca de cerdo (%)	Sebo vacuno (%)
Butírico	4:0	4		
Caproico	6:0	3		
Caprílico	8:0	1		
Cáprico	10:0	2		
Láurico	12:0	3		
Mirístico	14:0	12	2	3
Palmítico	16:0	26	26	24
Esteárico	18:0	13	14	19
Araquidónico	20:0			
Palmitoléico	16:1		3	4
Oléico	18:1	29	44	43
Gadoléico	20:1		1	
Linoléico	18:2	3	10	3

2.2 Obtención de aceites y grasas vegetales

Las grasas y aceites son componentes esenciales de casi todas las formas de vida animal y vegetal. Por lo tanto, se dispone de amplias fuentes que pueden ser procesadas para obtener productos derivados de oleaginosas y animales con valor comercial. Los aceites y grasas primero son extraídos de la fuente, obteniendo aceites crudos que no son aptos para consumo humano ya que contienen altas cantidades de impurezas que provocan malas propiedades organolépticas y reacciones posteriores de descomposición en el aceite crudo. Estas impurezas son eliminadas mediante procesos posteriores de refinación y purificación para obtener productos alta calidad y de características particulares.

2.2.1 Extracción de aceites

Antes de pasar al proceso de extracción, las semillas y frutos de oleaginosas primero son acondicionadas (limpiadas, descascarilladas y trituradas) para después ser almacenadas en silos y disminuir su contenido de humedad (menor al 15%). En esencia, la extracción de la oleaginosa se puede realizar por 2 métodos: mecánica y con disolventes. Industrialmente la extracción con disolventes combinada, que involucra un prensado previo para mejorar el rendimiento es la más recurrida [Ziller, 1996].

Extracción mecánica

En este tipo de extracción, las semillas oleaginosas previamente tratadas son secadas y trituradas, obteniendo un producto homogéneo que pasa a la prensa de tornillo donde son exprimidas a elevadas presiones, procediendo a la separación del aceite de la torta proteínica. El aceite obtenido se pasa a un tamiz para eliminar grandes impurezas y después se filtra para obtener el aceite crudo. Este método se usa cuando el aceite de la fuente oleaginosa es mayor al 20%.

Extracción con disolventes

Es el principal proceso para la obtención de AV a partir de oleaginosas. Las semillas pretratadas se mezclan con un disolvente orgánico puro, generalmente hexano comercial o mezcla de disolventes para después separar las fases formadas. El uso de extracción con disolventes permite mayor rendimiento de aceite y menor cantidad de impurezas, el calentamiento es mínimo y así el aceite producido es de mejor calidad, ahorrando energía y mejorando el proceso respecto a la extracción mecánica [Lawson, 1999].

La Tabla 2.6 presenta las propiedades físicas y químicas más importantes de aceites no comestibles, la Tabla 2.7 corresponde a las propiedades de colza, soya, palma que son las fuentes de AV comestible más utilizadas industrialmente en el mundo para la obtención de biodiésel.

Tabla 2.6 Propiedades de aceites no comestibles

Parámetros	Jatropha	Semillas de caucho	Aceite de ricino	Árbol de Haya
Viscosidad cinemática (mm ² /s) 40 °C	48.0	58.1	-	48.0
Densidad (g/cm ³)	-	1.14	1.05	-
Poder calorífico superior (MJ/kg)	39.23	36.50	39.50	-
Punto de inflamabilidad (°C)	135	130	260	150
Punto de nube(°C)	-	4	-12	-
Punto de gota (°C)	2	-	-32	-
Cenizas (%)	0.012	-	0.02	0.005
Número ácido (mg KOH/g aceite)	0.40	0.188	-	0.62
Referencias bibliográficas	Tiwari y col., 2007	Ramadhas y col., 2005	CastorOil y col., 2007	Saka, 2005

Tabla 2.7 Propiedades de aceites comestibles

Parámetros	Colza	Soya	Palma
Viscosidad (mm ² /s) a 40°C	45.0	40.8	44.2
Densidad (g/cm ³)	1.13	1.13	0.85-0.90
Poder calorífico superior (MJ/kg)	37.00	39.75	38.05
Punto de inflamabilidad (°C)	170	69	182
Punto de nube (°C)	-4	-2	15
Punto de gota (°C)	-12	-3	15
Cenizas (%)	-	-	0.02
Número ácido (mg KOH/g aceite)	-	-	0.08
Referencias bibliográficas	Ramadhas y col., 2005	Ramadhas y col., 2005	Cheng y col., 2005

2.2.2 Métodos de refinación y purificación

Desgomado

El objetivo es eliminar los fosfolípidos provenientes de las semillas disueltas del aceite crudo, así como gomas, resinas, ceras, lectinas, lipoproteínas. Es importante debido a que sin este proceso, los triglicéridos se alteran con mayor facilidad y adquieren sabores y olores desagradables. El método consiste en la formación de compuestos insolubles de las impurezas y su precipitación mediante tratamiento en fase acuosa con NaCl o H₃PO₄ para después eliminarlas por centrifugación. Los aceites se desgoman antes de la neutralización para facilitar la refinación del aceite y la recuperación de la capa emulsionada de fosfolípidos, que se obtiene a partir de aceites como el de maíz, rico en lecitina y que es un emulgente muy usado en la industria alimenticia.

Neutralización

Es el proceso por el cual se reducen los AGL por reacción de esterificación; pero también los fosfolípidos que pudieron haber quedado después del desgomado. El método más usado es agregando una disolución alcalina (NaOH o KOH) para efectuar la saponificación. La disolución obtenida se mezcla y calienta a una temperatura de 180 a 240°C en un reactor. Para la purificación de la disolución resultante se recomienda destilar al vacío especialmente si los aceites se utilizarán para el proceso de hidrogenación. Los AG, catalizador y otras impurezas de la emulsión resultante son retirados del fondo del tanque por decantación. El rendimiento de esterificación de una buena neutralización es mínimo de 0.1% de AGL.

Decoloración

Proceso de eliminación de compuestos cromóforos en el aceite crudo, mediante cuerpos adsorbentes (arcillosa o silíceas). La cantidad de adsorbente necesaria depende de la cantidad de color del aceite y del grado de decoloración que se desee, después estos cuerpos son tratados con HCl o H₂SO₄ diluidos para su reuso, el aceite y el adsorbente se agitan a temperaturas máximas de 90°C. A veces se utilizan mezclas de tierras y carbón activado (5-10%) para obtener mejores resultados. El aceite decolorado se filtra mediante prensado y la tierra usada se desecha. Generalmente la decoloración se hace después de la refinación, pero también, el color de los aceites también disminuye considerablemente durante la hidrogenación.

Desodorización

Tiene como objetivo eliminar trazas de componentes relativamente volátiles, como: aldehídos, cetonas, carotinoides, tocoferoles, AGL de cadena corta (butírico, isovaleriánico, caproico), esteroides y algunos compuestos de azufre. Estos compuestos aportan olores y sabores no deseados a los aceites y grasas. Consiste en calentar el aceite a 150°C y ser destilado al alto vacío para arrastrar con vapor las sustancias volátiles. Se suele añadir cerca de un 0.01 % de ácido cítrico a los aceites desodorizados para inactivar las trazas de metales como hierro y cobre, que podrían provocar la oxidación y enranciamiento del aceite.

Fraccionamiento

Los aceites con un índice de yodo de aproximadamente 105, contienen glicéridos de puntos de fusión lo suficientemente altos como para depositarse en forma de cristales sólidos cuando se mantienen a temperaturas moderadamente bajas, perjudicando las propiedades del aceite. El aceite de mesa debe mantenerse claro y brillante sin enturbiarse o solidificarse a temperaturas de refrigeración. El fraccionamiento es el proceso de eliminación de los glicéridos y consiste en la cristalización de los sólidos en una mezcla de triglicéridos que se separa en 2 o más fracciones de diferente punto de fusión y solubilidad a la misma temperatura.

La winterización (hibernación) es una variante del método de fraccionamiento que consiste en separar del aceite las sustancias con punto de fusión elevado (estearinas, glicéridos muy saturados, ceras y esteroides) que provocarían turbidez y precipitaciones de cúmulos en el aceite líquido cuando se encuentra a baja temperatura o de refrigeración. Se realiza por enfriamiento rápido del aceite con agua o equipos frigoríficos. Típicamente, se somete a un enfriamiento rápido hasta 5°C y se mantiene durante 24 horas, con lo que se consigue la cristalización de los compuestos a eliminar. Estos sólidos (estearinas) se separan de las oleínas por filtración o centrifugación.

Hidrogenación

La hidrogenación es un proceso por el cual se añade hidrógeno directamente a los puntos de insaturación de los AG, disminuyendo el IY y aumentando su punto de fusión. La hidrogenación surgió por la necesidad de convertir aceites líquidos en aceites de consistencia semisólida, además de mantener estable el sabor de los alimentos. La reacción de saturación es exotérmica y se realiza a alta presión y temperatura en atmósfera inerte, se utilizan aproximadamente 500 g de catalizador de níquel por tonelada de aceite. En un comportamiento ideal, la hidrogenación completa se obtiene cuando el IY = 0. La hidrogenación incrementa la estabilidad térmica y evita la oxidación de una grasa retardando el deterioro del producto. La reacción de hidrogenación es selectiva y los AG más insaturados tienen tendencia a reaccionar primero. Esta selectividad se usa para hacer hidrogenaciones parciales y selectivas de aceites [Brennan, 1998].

2.2.3 Reacciones de aceites y grasas

Hidrólisis de las grasas

Como otros ésteres, los glicéridos pueden hidrolizarse fácilmente. La molécula se rompe por una reacción de esterificación, ya sea medio ácido o alcalino. Se produce con frecuencia por la fermentación de sustancias gelatinosas o albuminosas que se encuentran en las grasas y se acompaña de reacciones secundarias que originan cuerpos de olor y sabor desagradables.

La hidrólisis parcial de los triglicéridos da lugar a monoglicéridos, diglicéridos y AGL, cuando la hidrólisis es completa por catálisis ácida, los monoglicéridos y diglicéridos dan lugar a gliceroles y AG.

Oxidación de aceites

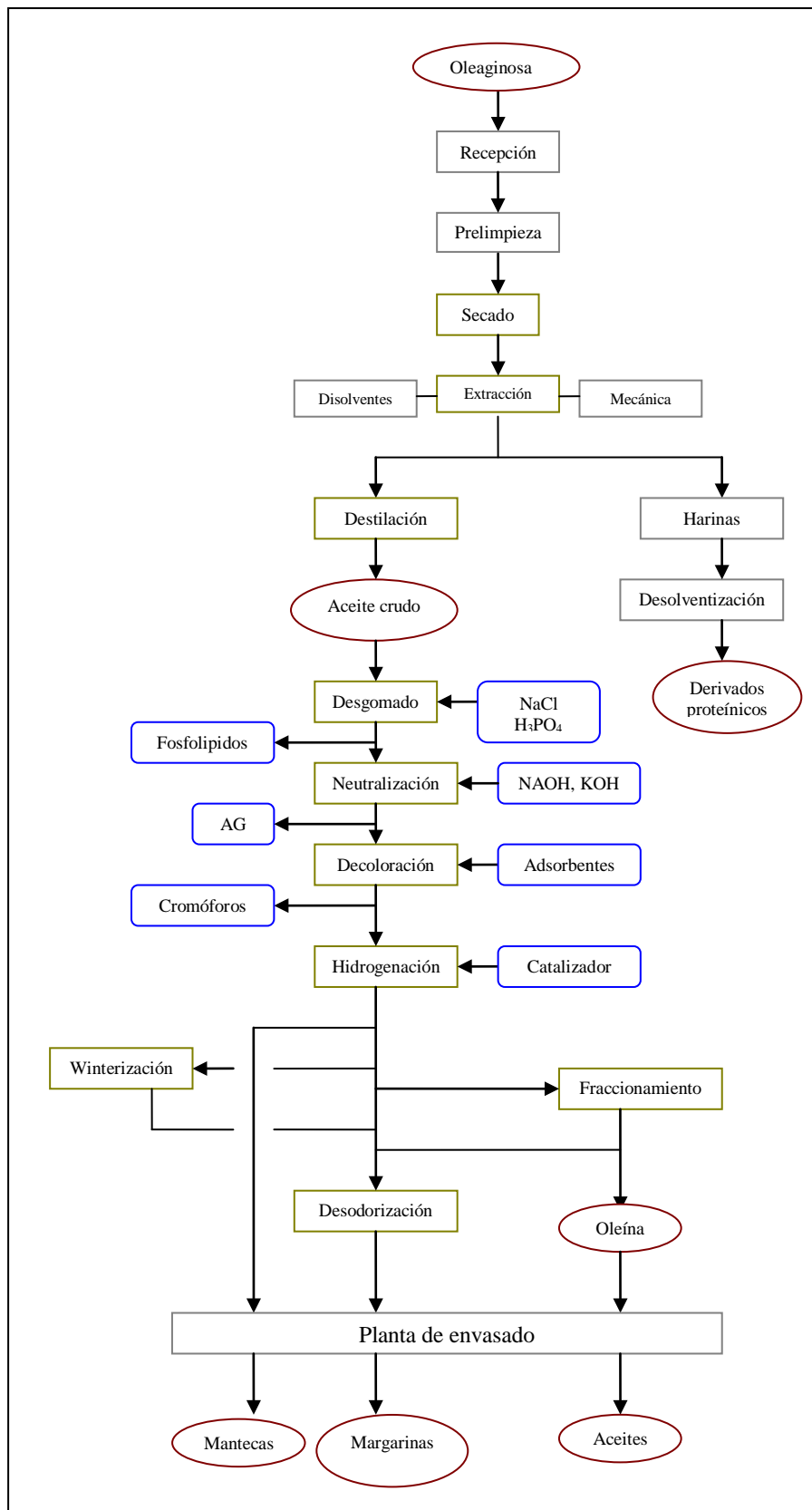
Este proceso es inducido por el aire a temperaturas ambiente. El oxígeno reacciona con los AG insaturados, inicialmente se forman peróxidos que se descomponen en hidrocarburos, aldehídos, cetonas y cantidades menores de epóxidos y alcoholes. El resultado de la autooxidación de las grasas o aceites es el desarrollo de sabores y aromas desagradables característicos. Aunque la rapidez de oxidación se acelera a altas temperaturas, los mecanismos de reacción a estas condiciones no se realizan de la misma forma que a temperatura ambiente. De este modo las diferencias de estabilidad a menudo se hacen más aparentes cuando las grasas o aceites se destinan a frituras u horneado. Cuanto más insaturada es un aceite, menor es su estabilidad oxidativa (enranciamiento). Con frecuencia, se emplea la hidrogenación parcial en el proceso de los AV comestible para aumentar su estabilidad.

Polimerización de aceites

Todas las grasas empleadas comúnmente, particularmente aquellas ricas en AG poli-insaturados, tienden a formar polímeros cuando se calientan a condiciones extremas de temperatura por largos periodos. Bajo condiciones normales de procesado y cocinado, los polímeros se forman en cantidades insignificantes [Ziller, 1996].

Se muestra en la Figura 2.5 el diagrama de flujo de proceso común de la industria aceitera, se resumen las operaciones unitarias efectuadas desde la extracción de la materia prima (oleaginosa), purificación, refinamiento y hasta su envasado como producto derivado.

Figura 2.5 Diagrama de flujo de proceso en la industria aceitera
 [A partir de Brennan, 1998]



2.3 Panorama de los aceites

2.3.1 Mercado internacional

Los mercados de semillas oleaginosas y de aceites comestibles enfrentan una situación de escasez al sufrir un déficit en su producción. Los aumentos drásticos en los últimos años del precio de AV han provocado una disminución del consumo real de aceites y grasas, tanto para alimentos como para otros usos. Los analistas del mercado de aceites y grasas señalan que la producción mundial de semillas oleaginosas es menor que la demanda, la situación actual no tiene precedentes y esto es debido a los siguientes factores:

1. El volumen del consumo mundial de oleaginosas superará a la producción, siendo un monto récord mayor a 18 millones de toneladas, de acuerdo con las proyecciones más recientes.
2. Los déficit de la producción mundial de oleaginosas y AV son consecuencia, entre otras cosas, de las poco favorables condiciones meteorológicas y de las pérdidas en las cosechas en varios países y regiones del mundo.
3. La razón principal de la escasez de productos derivados de granos y oleaginosas es el incremento de la demanda adicional proveniente de la industria energética y fabricación de biocombustibles. En poco tiempo, también la demanda de granos superará a la producción. Nunca antes se había dado la coincidencia de que tanto en oleaginosas como en granos se presentara simultáneamente una contracción en los inventarios, las reservas mundiales de granos caerán a un mínimo histórico, en relación con el volumen de consumo como consecuencia. Actualmente se tienen inventarios bajos de granos y de oleaginosas en el mundo. Es seguro que próximamente se dará una competencia por las tierras cultivables, lo destacable es que con las recientes pérdidas adicionales de las cosechas, esta competencia se volverá más agresiva [Pérez, 2008].

Los expertos de los mercados de oleaginosas y granos señalan que el mundo podría enfrentar una grave crisis alimenticia a menos que la utilización de productos agrícolas para fabricar biocombustibles disminuya o bien, que se presenten condiciones ideales de clima para la siembra y se puedan obtener cosechas con mayores rendimientos. Por lo anterior es necesaria la reevaluación en las políticas gubernamentales sobre uso de biocombustibles alrededor del mundo. [Pérez, 2008]. La Figura 2.6 describe por porcentaje la producción mundial de los principales AV.

Figura 2.6 Producción mundial de aceites vegetales [SAGPyA, 2008]



Se muestra en la Figura 2.7 el aumento gradual en la producción de aceite de soya para el periodo de 1980 a 2007. Las Figuras 2.8 y 2.9 presentan la producción por países en de aceite de soya y colza que son de los principales aceites obtenidos de productos oleaginosos, (30% y 14% respectivamente) en el año 2007. La Figura 2.10 describe el consumo mundial de plantas y semillas oleaginosas del 2007.

Figura 2.7 Producción mundial de aceite de soya, periodo 1980-2007

[FAOSTAT, 2009]

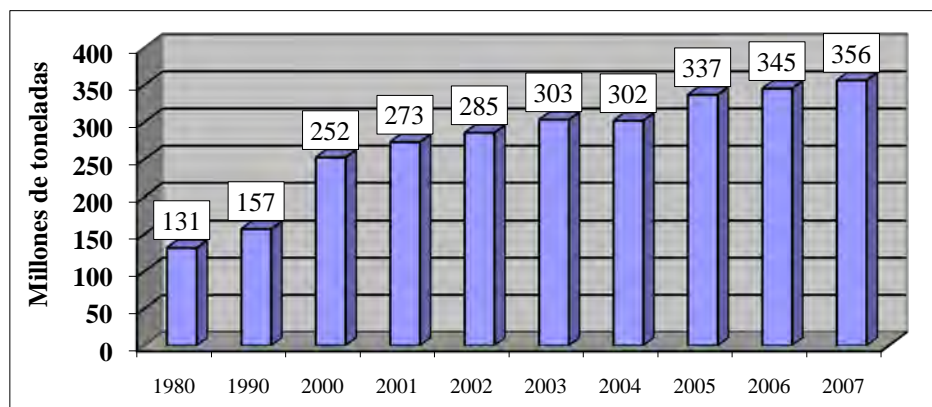


Figura 2.8 Producción mundial 2007 de aceite de soya [FAOSTAT, 2009]

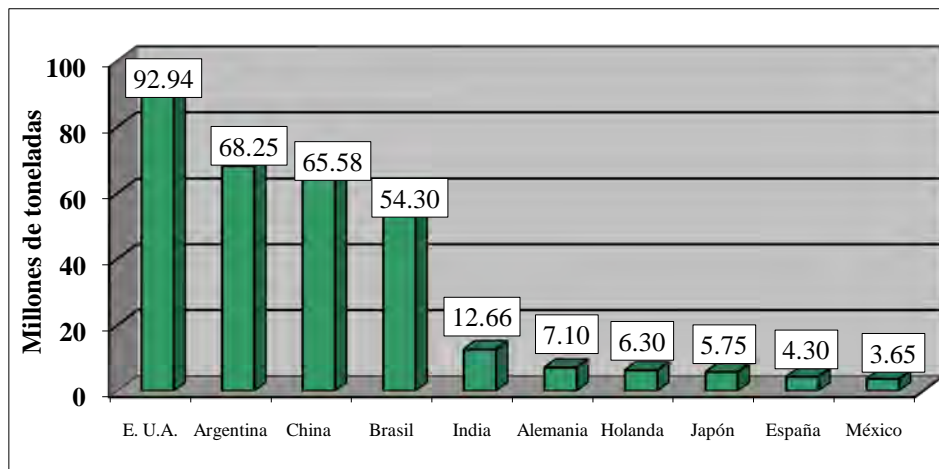


Figura 2.9 Producción mundial 2007 de aceite de colza [FAOSTAT, 2009]

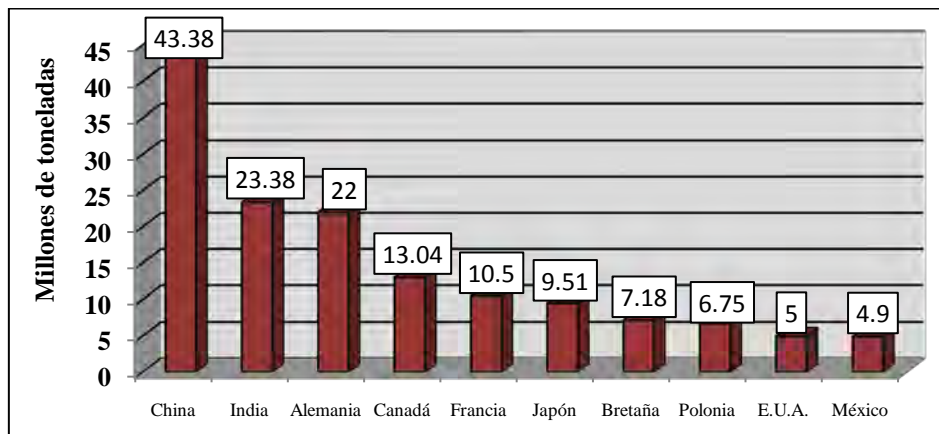
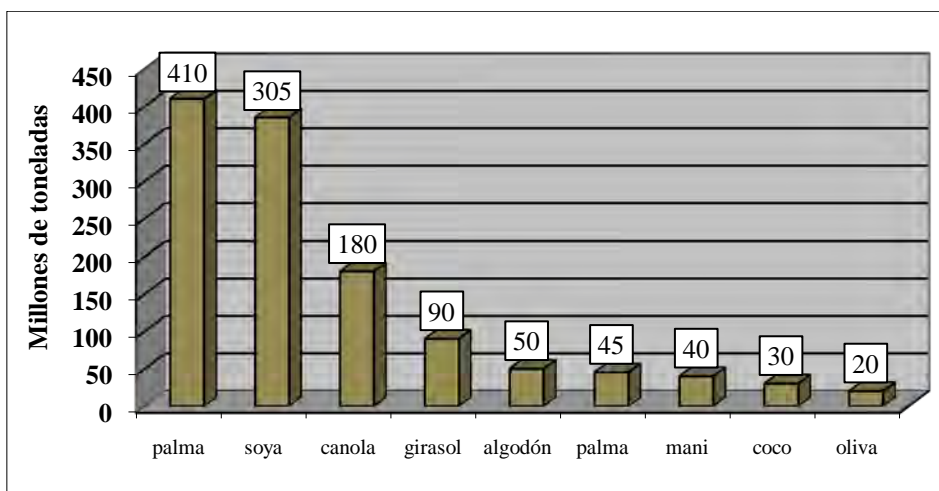


Figura 2.10 Consumo mundial de aceites vegetales [World Oil, 2008]



El importante aumento de la producción y consumo mundial de oleaginosas desde 1994, ha generado actualmente un déficit en la producción de alrededor de 18 millones de toneladas. Las perspectivas apuntan a que la situación actual del mercado mundial se mantenga en los próximos años dada la creciente producción de biodiésel y de etanol. La capacidad de producción de biocombustibles se ha incrementado demasiado rápido y alcanzó un total mundial de 33 millones de toneladas al final de 2008, pero los productores de biodiésel también están sufriendo pérdidas debido a los altos costos de los AV, existiendo el riesgo de que la capacidad promedio disminuya hasta 35% o menos en los próximos años.

El impacto de los altos precios había sido aminorado parcialmente por el fuerte crecimiento económico que se presenta especialmente en naciones como China e India, países que son además dos de los más importantes consumidores e importadores de AV. Las cotizaciones actuales de granos, oleaginosas, AV y pastas, ubicadas en niveles récord, parecen sugerir que es urgente y necesaria la intervención de los gobiernos. El riesgo latente es que la continuación de las políticas actuales provocará una mayor tendencia al alza en los precios de oleaginosas y derivados, a niveles muy superiores a las ya de por sí altas estimaciones que se tienen [Pérez, 2008].

2.3.2 Mercado Nacional

En México, el sector agroindustrial tiene déficit en la producción de semillas oleaginosas, por lo que las empresas aceiteras mexicanas deben importar alrededor del 90% de las semillas necesarias para elaborar aceites y grasas vegetales. Actualmente el precio de las importaciones de semillas, aceites y pastas para la industria mexicana sufrió un drástico incremento. La industria aceitera en México depende en gran medida de estas importaciones de oleaginosas, pero en complemento a estas importaciones se importan también AV crudos para su refinación y obtención de aceites que son utilizados en industrias de alimentos [Pérez, 2008; CNSPO, 2007].

En México no se ha aprovechado la vasta gama de semillas disponibles porque se cultiva un reducido tipo de semillas, ni tampoco las condiciones geográficas y ambientales favorables que experimenta México para la producción de otra clase de aceites, además de que se sigue teniendo un mercado local de consumo. La producción anual de oleaginosas se limita a soya, cártamo, girasol y colza, las cuáles se producen en ocho entidades del país, pero el 85% de ésta se concentra en Tamaulipas, Sonora, Chiapas, San Luís, Potosí y Jalisco (Figura 2.11). La producción de oleaginosas en México ha caído considerablemente durante el periodo 1990 - 2006. Para el año 2006, la superficie sembrada con soya en México fue de 77,636 ha, de colza 4,359 ha y de cártamo 94,954 ha.

El consumo nacional de semillas oleaginosas para el 2006 fue de 5.5 millones de toneladas, de las cuales se produjeron en el país sólo 0.5 millones, teniendo que importar cerca de 5 millones de toneladas con un valor de más de 14,000 millones de pesos, lo que representa una importante fuga de divisas para el país [SAGARPA, 2004].

Potencial productivo de las oleaginosas en México

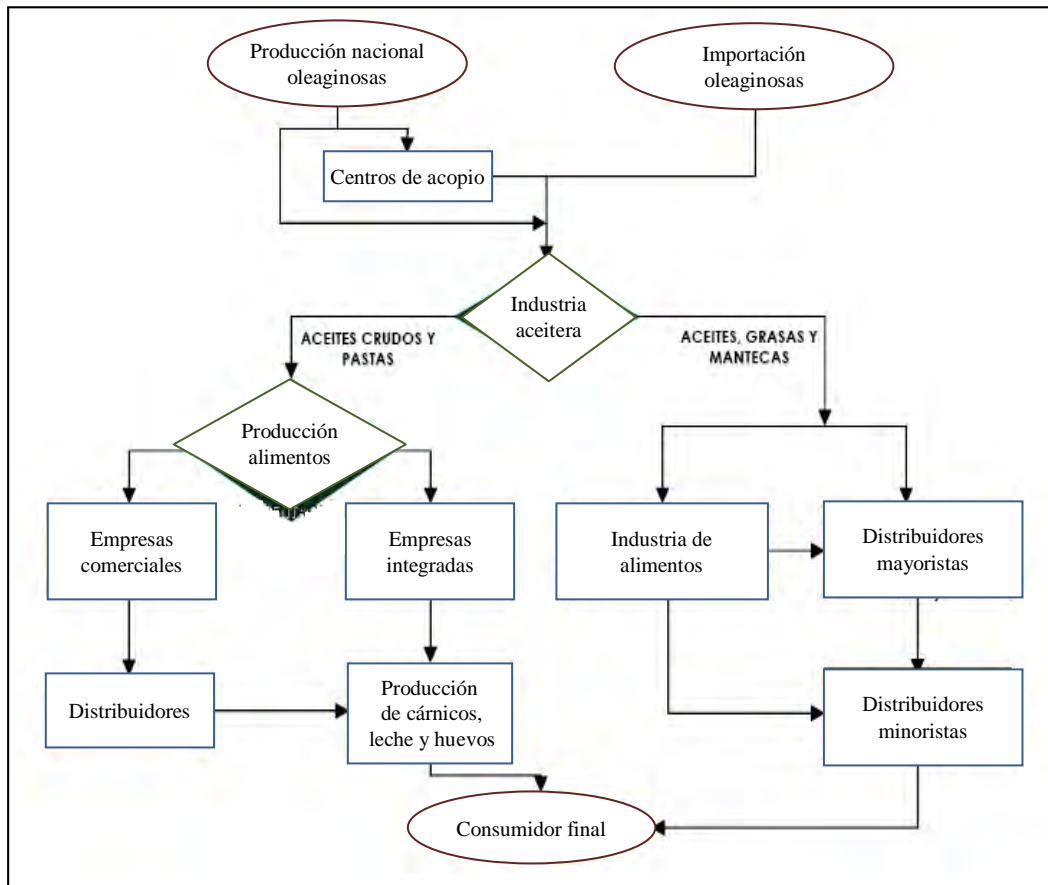
Del total de las importaciones de oleaginosas realizadas en el 2006, el 91% (5 millones de toneladas) fueron de soya y colza. Para abastecer la demanda interna de soya, cártamo y colza, sería necesario sembrar aproximadamente 600,000 ha de colza y cerca de 2 millones de hectáreas entre soya y cártamo al año (aproximadamente 2.6 millones de ha). Un potencial incremento en la producción mexicana de oleaginosas contribuiría a disminuir el grado de dependencia de las importaciones. Aunado a esto, se daría un mayor valor nacional en beneficio de toda la cadena alimentaria de la industria de oleaginosas, como la proteína para la producción de carne de cerdo, pollo, huevo, aceites comestibles para cocinar, aceites y grasas para la producción de mayonesas, margarinas, frituras, quesos, chocolates, panificación [CNSPO, 2007].

Figura 2.11 Localización de las industrias aceiteras [ANIAME, 2003]



La Figura 2.12 muestra un diagrama general de la industria aceitera en México, abarcando desde la producción de la oleaginosa hasta su llegada al consumidor final.

Figura 2.12 Ciclo productivo de industria aceitera en México [CNSPO, 2007]



La Figura 2.13 presenta la producción de los principales aceites obtenidos en la industria aceitera mexicana en los últimos 20 años, mientras que la Figura 2.14 describe en porcentaje el consumo de semillas y frutos oleaginosos en México para el año 2006.

Figura 2.13 Producción nacional de aceite vegetal [FAOSTAT, 2009]

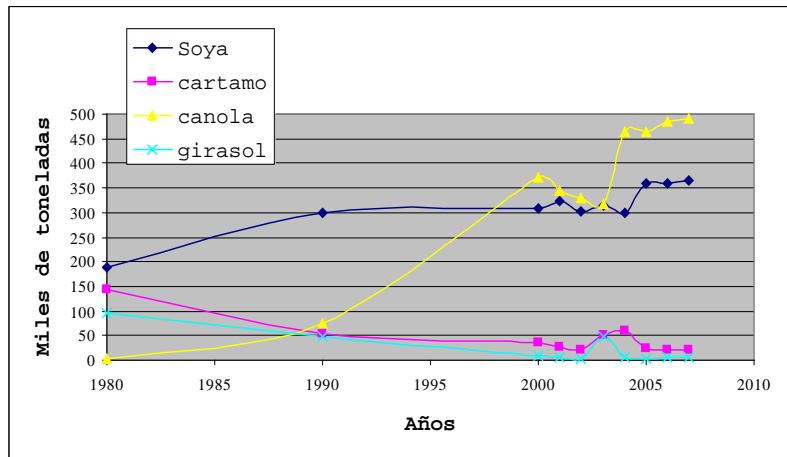
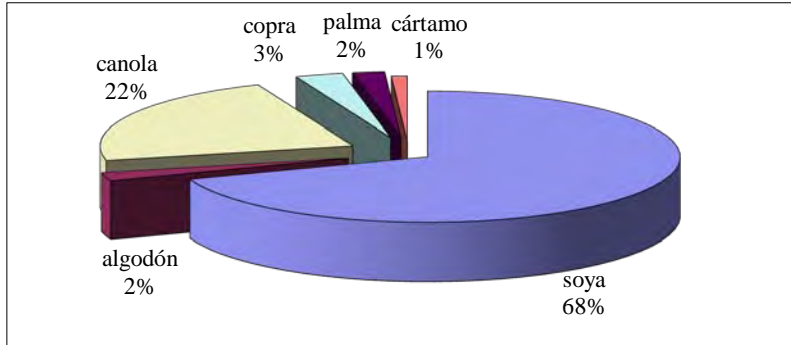


Figura 2.14 Consumo de semillas y frutos oleaginosos en México [CNSPO, 2007]



Capítulo 3. Biodiésel

3.1 Combustibles y biocombustibles

Un combustible se define como un cuerpo o sustancia líquida y gaseosa empleada para producir calor útil por medio de su combustión. De forma general, se establecen según su naturaleza dos tipos de combustibles; combustibles fósiles como: carbón, gas natural, petróleo (derivados) y los biocombustibles, provenientes del uso y transformación de la biomasa (Tabla 3.1). Los biocombustibles son una fuente de energía renovable ya que proceden de fuentes agrícolas (semillas, caña de azúcar, plantas oleaginosas), además de biomasa forestal y otras fuentes de materia orgánica. La transformación de biomasa en combustible para la generación de energía implica un acondicionamiento de la materia prima y adaptaciones en los sistemas energéticos convencionales (Tabla 3.2). Son usados en forma aislada o añadidos en mezclas con los combustibles fósiles [Herrero y col., 1997].

Tabla 3.1 Tipos de biocombustibles [A partir de Herrero y col., 1997]

Sólidos	Líquidos	Gaseosos
Paja Madera Briquetas Carbón vegetal	Alcoholes Biohidrocarburos Ácidos grasos Acilgliceroles Aceites de pirolisis	Gasógeno Biogás Hidrógeno

Tabla 3.2 Procesos, productos y aplicaciones de biocombustibles

[A partir de Herrero y col., 1997]

	Mecánicos	Termoquímicos		Biotecnológicos		Extractivos
Procesos	Astillado Trituración Compactación	Pirolisis	Gasificación	Fermentación	Digestión	Extracción físico-química
Productos	Leñas Astillas, Briquetas Aserrín	Carbón Aceites	Gas de gasógeno	Etanol Varios	Biogás CO ₂ , CH ₄	Aceites Esteres Hidrocarburos
Aplicaciones	Calefacción Electricidad	Calefacción Electricidad Transporte Industria química	Calefacción Electricidad Transporte Industria química	Transporte Industria química	Calefacción Electricidad	Transporte Industria química

3.2 Biodiésel

El concepto del uso de biocombustibles en motores de combustión interna (MCI), es tan antigua como el uso de gasolina o diésel, que son combustibles indispensables para el actual tipo de vida. En la exhibición mundial de París en 1900, el ingeniero alemán Rudolph Diésel presento su motor de ignición/compresión por tiempos, el cuál funcionaba con aceite vegetal de cacahuate como combustible, sentando las bases para el futuro uso de los biocombustibles. El empleo de aceites para accionar MCI tuvo que ser aplazado y reemplazado por uno de los derivados del petróleo, el diésel, que en el momento era un producto de menor costo, razonablemente eficiente y fácilmente disponible. Durante la segunda guerra mundial y debida la escasez de combustibles fósiles, se retomó el desarrollo de los biocombustibles, destacando la investigación realizada por Otto y Vivacqua en Brasil sobre biodiésel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970 que el biodiésel comenzó a desarrollarse de forma significativa a raíz de la crisis energética. En 1982, Austria y Alemania llevaron a cabo las primeras pruebas técnicas en motores y para el año de 1985 en la ciudad de Silberberg Austria, se construyó la primera planta piloto productora de biodiésel a partir de las semillas de colza. Actualmente Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son líderes en producción y uso de biodiésel [Pahl, 2005].

El biodiésel es un combustible alternativo renovable que se produce a partir de materia orgánica de fuentes agrícolas (aceites y grasas vegetales) y animales (sebo, manteca). Según la American Society of Testing and Materials (ASTM), el biodiésel técnicamente se define como: un combustible compuesto por mono-alquíl esterres de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites o grasas de origen vegetal y animal [NBB, 2007]. El biodiésel es un combustible con características físicas y químicas semejantes al diésel (gasóleo, petrodiesel) obtenido de la refinación del petróleo, pero presenta varias ventajas sobre este, ya que es renovable, biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y aromáticos, por lo que resulta es un combustible limpio al tener en general menores emisiones contaminantes. Por lo anterior, su principal aplicación es como biocombustible en motores para automóviles [Larosa, 2004].

3.2.1 Estado del arte y pronósticos del uso de biodiésel

Se observa a nivel mundial una tendencia al aumento en la producción de biodiésel, indicando una creciente demanda del mercado (Figura 3.1). En el período entre los años 2000-2005 se observa el mayor aumento en la producción, al pasar de 893 a 3,762 millones de litros en 5 años [EPI, 2006]. La mayor parte de la producción de biodiésel se lleva a cabo en Europa, principalmente en Alemania, Francia e Italia (Tabla 3.3). En los países europeos se produce gran cantidad de biodiésel en comparación a bioetanol, pero la producción total de ambos biocombustibles puede ser considerado inferior si se compara con la producción de bioetanol, en países como Brasil y los Estados Unidos. Según estudios realizados por IEA [2007] se espera que el uso de biocombustibles en el sector del transporte se incremente de un 1% actualmente, a valores cercanos al 7% en 2030, esto constituye un aumento equivalente de 15,5 Mtep (millones de toneladas equivalentes de petróleo) en 2004 a 146,7 Mtep en 2030 (Tabla 3.4). Se estima que el mayor incremento en consumo de biocombustibles se llevará a cabo en los Estados Unidos, Europa, Asia y Brasil, mientras que en los demás países el aumento será mínimo [Escobar y col., 2008].

Figura 3.1 Producción mundial de biodiésel del 1991 al 2006

[Earth Police Institute, 2007]

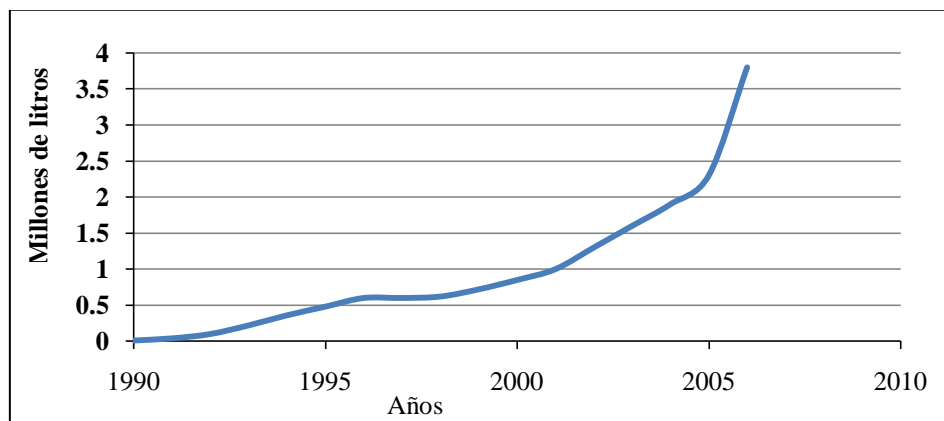


Tabla 3.3 Principales productores mundiales de biodiésel del 2005
[World Resources Institute, 2007]

País	Millones de litros	Materia prima
Alemania	1919	Colza
Francia	511	Soya
E.U.A.	291	Colza
Italia	227	Colza
Australia	83	Colza

Tabla 3.4 Pronostico de demanda y proyección para uso de biocombustibles en el transporte vehicular [IEA, 2007]

Economías	Biodiésel			
	2004		2030	
	Demanda (Mtep)	% de uso en transporte	Demanda (Mtep)	% de uso en transporte
OCDE	8.9	0.9	84.2	7.2
Norteamérica	7.0	1.1	45.7	6.4
E.U.A.	6.8	1.3	42.9	7.3
Europa	2.0	0.7	35.6	11.8
Islas del pacifico	0.0	0.0	2.9	1.9
Economías en transición	0.0	0.0	0.5	0.6
Países en desarrollo	6.5	1.5	62.0	6.9
China	0.0	0.0	13.0	4.5
India	0.0	0.0	4.5	8.0
Países asiáticos en desarrollo	0.1	0.0	21.5	4.6
Brasil	6.4	13.7	23.0	30.2
Unión europea	2.0	0.7	35.6	11.8
Mundo	15.5	1.0	146.7	6.8

3.2.2 Materia prima para producción de biodiésel

Básicamente, el biodiésel puede ser producido a partir de las siguientes fuentes:

- Semillas de plantas oleaginosas.
- ACD.
- Grasas animales.
- Alcoholes.

Los AV son las materias primas típicamente usadas en el mundo para la producción de biodiésel, los más apropiados dado sus características y disponibilidad son los aceites de colza, soya, girasol y de palma, que se constituyen principalmente de AG insaturados de cadena larga, asimismo también presentan buenas propiedades en frío. Existen otras fuentes mas para biodiésel, como aceite de almendras, cebada, camelina, copra, cumaru, la planta de piñoncillo (*Jatropha Curca*), Karanja (*pongamia glabra*), el Pongamia Pinnata que es un árbol natural de la India, de ahí que también se le llame el Haya de la India, laurel, microalgas, avena, semillas de amapola, caucho, tabaco, sésamo, sorgo, arroz y trigo [Tiwari y col., 1998]. Mundialmente el aceite de colza es muy utilizado en países europeos, mientras que los E.U.A. principalmente emplean el aceite de soya y aceite de coco, en Malasia e Indonesia se usa el aceite de palma y en la India y el sureste de Asia se usa el árbol de *Jatropha* y *Karanja* [Ghadge y Raheman, 2005].

A nivel mundial muchos países pueden producir biodiésel con el logro de varios beneficios adicionales, tales como una mayor seguridad energética, diversificación de las fuentes de energía, desarrollo acelerado de la agricultura y zonas rurales debido al consecuente aumento de las oportunidades de empleo. Los países que producen una gran cantidad de biomasa no son por lo general los principales países productores de combustibles fósiles, en consecuencia, nuevos países entraran al mercado mundial de energéticos, lo que reduciría en el mundo la dependencia de los pocos países que tienen reservas de petróleo. Es importante observar que no todos los países disponen de climas, topografías y otras condiciones necesarias para la producción a gran escala de biocombustibles, además de que la viabilidad económica depende del empleo eficiente de los cultivos y cosechas de oleaginosas [Escobar y col., 2008].

Un alto rendimiento en la producción de cultivos oleaginosos es siempre la clave para definir la viabilidad de aceites como materia prima en la producción de biodiésel, generalmente el costo de las materias primas corresponde al 70-80% del costo total de producción. Otro importante criterio es la composición misma, ya que determinara las características y propiedades del biodiésel obtenido. Las propiedades del biocombustible dependen del proceso de obtención, tipos, composición de los AG y origen del aceite utilizado como materia prima, dando cada fuente características particulares al producto [Gui y col., 2008].

3.2.3 Zonas agrícolas para producción de biodiésel

Con la creciente población humana en todo el mundo y aumento de la demanda energética, el uso eficiente de la tierra se ha convertido en una cuestión importante, particularmente en los países desarrollados y es un factor necesario para funcionar en un sistema de desarrollo sustentable. Se debe limitar su uso para fines específicos, ya que actualmente se emplea mayor cantidad de aceites como materia prima y por consecuencia más tierras deben ser convertidas en plantaciones para producir las oleaginosas [Gui y col., 2008].

Según la FAO, la cantidad de tierra que se usa en todo el mundo para la agricultura y producción de alimentos es de aproximadamente 1,500 millones de hectáreas, representando el 11% de la superficie de la tierra, además de 2,800 millones de hectáreas que también tienen el potencial de ser aprovechados. Sin embargo, una parte de dicha superficie no está disponible o se destina a otros usos. Casi 45% está cubierto de bosques, 12% corresponden a protegida zonas y 3% está ocupado por asentamientos humanos. América Latina, el Caribe y África del sur tienen las mayores superficies de tierra disponible. Hoy en día alrededor de 14 millones de hectáreas de tierras agrícolas se están utilizando para la producción de biocombustibles, que representan aproximadamente el 1% de toda la tierra cultivada en el mundo [FAO, 2003].

Otro aspecto importante del cultivo de oleaginosas y la producción de biocombustible, es el rendimiento energético por cultivo (GJ/ha), que también se expresa en términos de hectárea por tonelada equivalente de petróleo (ha/tep). Estos índices permiten la comparación entre la cantidad de energía aprovechada y la cantidad de tierra utilizada, así como también evaluar el potencial de reemplazo del combustible fósil, la posibilidad de expansión de otras materias primas y cambios en los métodos de cultivo utilizados hoy en día para elevar los rendimientos de cultivo [Escobar y col., 2008].

La Tabla 3.5 presenta los valores promedio del uso de biodiésel, en términos del rendimiento energético por hectárea (GJ/ha) y la correspondiente necesidad de la tierra (ha/tep). La Tabla 3.6 muestra los costos de plantación, cultivo y cosecha por hectárea para diferentes aceites.

Tabla 3.5 Rendimiento energético y de cultivo para la producción de biodiésel de diferentes fuentes [Girard, 2006]

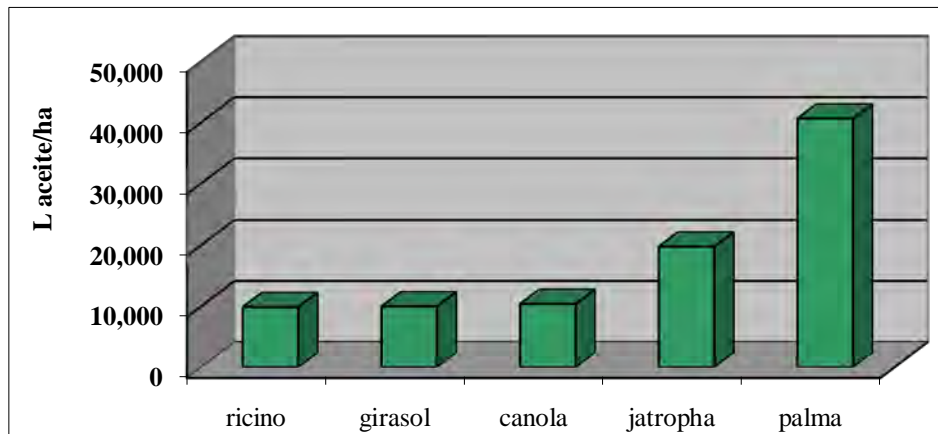
Fuente	GJ/ha	ha/tep
Girasol	36	1.17
Soya	18-25	2.35-1.67
Trigo	53-84	0.79-0.50
Maíz	63-76	0.66-0.55
Remolacha	117	0.36
Caña de azúcar	110-140	0.38-0.30
Aceite de palma	158.4	0.285

Tabla 3.6 Costos de materia prima [Girard, 2006]

Aceite no comestible	\$/ha	\$/kg aceite
Jatropha	8,060	5.07
Semillas de caucho	-	-
Ricino	1,820-2,080	1.56-1.82
Aceite comestible		
Soya	7,995	21.32
Palma	12,350	2.47
Colza	4,355	4.42

Según los escenarios de ocupación de la tierra y las proyecciones de la Agencia Internacional de Energía [IEA, 2007] se observa que al corto plazo, el objetivo de sustituir el 6% de combustibles derivados de petróleo es compatible con la disposición actual de cantidad de tierra. Con el fin de sustituir por biocombustibles el 5% de la gasolina, la Unión Europea tendría que emplear aproximadamente el 5% de las tierras agrícolas, mientras que los E.U.A. necesitarían el 8% para producir biodiésel y bioetanol. En lo que respecta a la sustitución de biodiésel, la demanda de tierra es mayor en comparación con otros biocombustibles derivados de oleaginosas, principalmente porque el rendimiento promedio de las materias primas utilizadas es menor (Figura 3.2). En este escenario, los E.U.A. necesitaría el 13% de las tierras agrícolas disponibles para reemplazar el 5% del diésel utilizado en el transporte, mientras que en Europa se necesitaría un 15%. [Escobar y col., 2008].

Figura 3.2. Rendimiento de litros de aceite por hectárea de materias primas usadas para producción de biodiésel [Escobar y col., 2008]



3.3 Métodos de obtención

El problema de usar aceites vegetales directamente en MCI, es que presentan una viscosidad alta respecto a los combustibles derivados del petróleo como el diésel, lo que resulta en una pobre atomización del aceite, combustión incompleta y depósitos en los inyectores y válvulas del motor; además de otros inconvenientes como alto punto de inflamabilidad y la tendencia a la degradación oxidativa, limitando su uso directo en los MD sin que sufran daño. Por ello es necesario acondicionar los aceites y disminuir su viscosidad para su uso en estos motores. Varios métodos han sido reportados para la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal: dilución, microemulsificación, pirolisis, y transesterificación. Entre ellos, la transesterificación es el método más estudiado y ampliamente aceptado.

Dilución de aceites vegetales

La dilución de AV con disolventes como etanol y diésel disminuye su viscosidad. Se realizaron estudios donde se concluyó que una mezcla de aceite de girasol y biodiésel comercial de 25 y 75% respectivamente presentaba un valor mayor que la viscosidad máxima especificada en la norma ASTM D 6751 (4.0 cSt a 50°C), tales mezclas no son convenientes de uso a largo plazo porque podría provocar problemas de rendimiento del motor, como en la inyección de combustible y depósitos de carbón [Demirbas, 2009].

Microemulsión de aceites vegetales

La microemulsión es un proceso que consiste en un sistema dispersado, con o sin un emulsificante, en un líquido inmiscible, generalmente en cantidades mínimas. Los alcoholes de cadena corta, como el etanol o metanol se utilizan como emulsificantes para reducir la alta viscosidad del AV. Microemulsiones con diversos líquidos inmiscibles como el metanol, etanol y moléculas anfifílicas iónicas o no iónicas han sido estudiadas, encontrando su efectividad [Billaud y Archambault, 1998]. La microemulsión muestra considerables promesas para proveer una baja viscosidad al combustible [Demirbas, 2009].

Pirólisis por craqueo catalítico

La pirólisis es la conversión de una sustancia en otra por medio de calor suministrado y con la presencia de un catalizador. Consiste en el calentamiento de material orgánico en ausencia de aire u oxígeno, provocando el rompimiento de enlaces químicos para producir pequeñas moléculas que son adsorbidas por el catalizador. La pirólisis y craqueo catalítico de aceites y grasas resulta en la producción de alcanos, alquenos, cicloalcanos, alquilbencenos, ácidos carboxílicos, compuestos aromáticos y pequeñas cantidades de productos gaseosos. El material sometido a pirólisis pueden ser AV, grasas animales, ácidos grasos naturales y ésteres metílicos [Sonntag, 1979].

Transesterificación de grasas y aceites

La transesterificación es la forma más común de producir biodiésel. Consiste es una reacción química entre los triglicéridos del aceite y alcohol, en presencia de catalizador ácido o alcalino (Figura 3.3). El metanol es el alcohol de uso común en este proceso debido en parte a su bajo costo. El producto obtenido es biodiésel, que son ésteres metílicos de ácidos grasos, llamados comúnmente por sus siglas EMAG (FAME en inglés, “fatty acid methyl ester”), además se produce glicerina como subproducto que tiene alto valor en el mercado.

La reacción de transesterificación consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles consecutivas, donde los triglicéridos son convertidos a diglicéridos, a la vez en monoglicéridos y por último a glicerol (Figura 3.4), donde en cada etapa se produce un éster. Los productos son 3 moléculas de éster producidas a partir de una molécula de triglicéridos y una molécula de glicerol. Las variables más importantes para el rendimiento de reacción son la relación molar alcohol/aceite, cantidad de AGL en el aceite, temperatura y tiempo de reacción.

A pesar de las diferencias en las propiedades químicas y físicas del ACD en comparación con los aceites comestibles frescos, ambos pueden ser convertidos a biodiésel utilizando técnicas similares, como: reacción catalítica de transesterificación (catalizadores alcalinos, ácidos y enzimáticos) o por vía no-catalítica como la reacción de transesterificación con alcohol supercrítico y por el proceso BIOX [Demirbas, 2009].

Figura 3.3 Reacción de transesterificación [West y col., 2003]

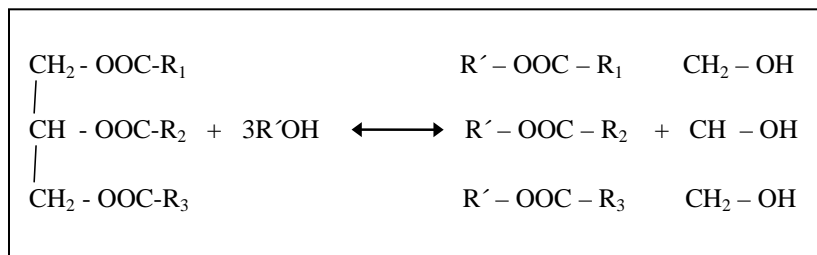
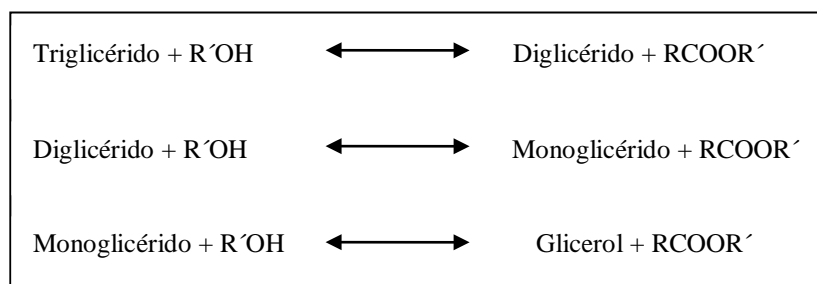


Figura 3.4 Reacciones sucesivas de transesterificación [Canan y col., 2008]



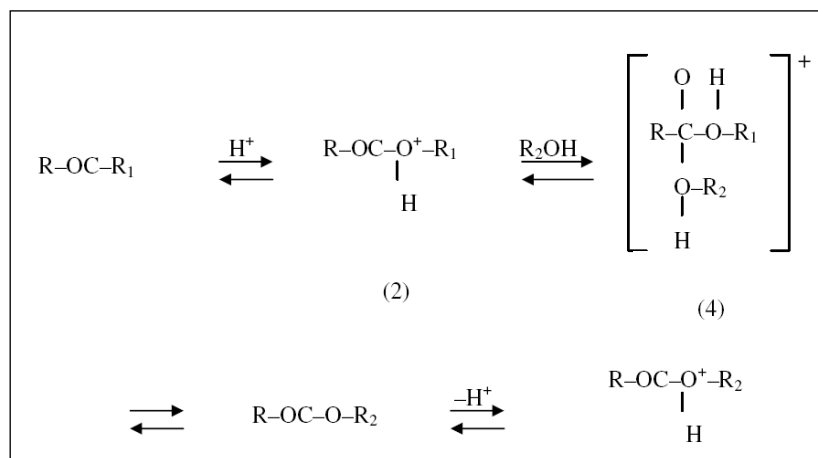
3.3.1 Métodos catalíticos de transesterificación

Son los más usados industrialmente, principalmente la catálisis alcalina, ya que permiten un alto rendimiento de reacción en un tiempo menor, en comparación de los procesos no catalíticos. En la Tabla 3.7 se resumen las técnicas de transesterificación catalítica más importantes para la obtención de biodiésel a partir de ACD.

Método de transesterificación por catálisis ácida

Primero el catalizador se disuelve en el metanol por agitación en un reactor; los principales catalizadores ácidos son el H_2SO_4 y HCl , posteriormente el aceite y la disolución alcohol/catalizador se mezclan en un reactor donde se efectúa la transesterificación (Figura 3.5). Los catalizadores ácidos generan altos rendimientos de ésteres metílicos pero la reacción es lenta. La relación molar de alcohol/aceite vegetal es el principal factor de reacción, un exceso de alcohol aumenta el rendimiento de formación de los ésteres metílicos, pero por otro lado dificulta la recuperación del glicerol, entonces la relación óptima de alcohol/aceite debe ser establecida empíricamente, considerando cada proceso individualmente [Demirbas, 2009].

Figura 3.5 Reacción de transesterificación por catálisis ácida [Demirbas, 2009]



Método de transesterificación por catálisis alcalina

Este método emplea como catalizador KOH o NaOH y es semejante a la catálisis ácida, pero se efectúa en dos etapas. Primero se realiza la esterificación de los AGL presentes en el aceite (Figura 3.6) y así evitar posteriores reacciones de saponificación en la segunda etapa. En base a las investigaciones hechas en la producción de biodiésel a partir de ACD se comprobó el uso de gel de sílice como absorbente para reducir el contenido de AGL y del índice de peróxido. En la segunda etapa ocurre la reacción de transesterificación. Inicialmente se mezcla homogéneamente el metanol y el catalizador en un reactor para posteriormente agregar el aceite y la mezcla de alcohol/catalizador en otro reactor (Figura 3.7), una reacción efectiva dará 2 fases líquidas: una con EMAG y otra con glicerol; por último estos compuestos deben ser purificados para obtener los productos deseados. La reacción se puede realizar a temperaturas cercanas al ambiente y a presión atmosférica y tiene la ventaja de que procede más rápido que la reacción en medio ácido [Demirbas, 2009].

Figura 3.6 Reacción de esterificación por catálisis ácida [Demirbas, 2009]

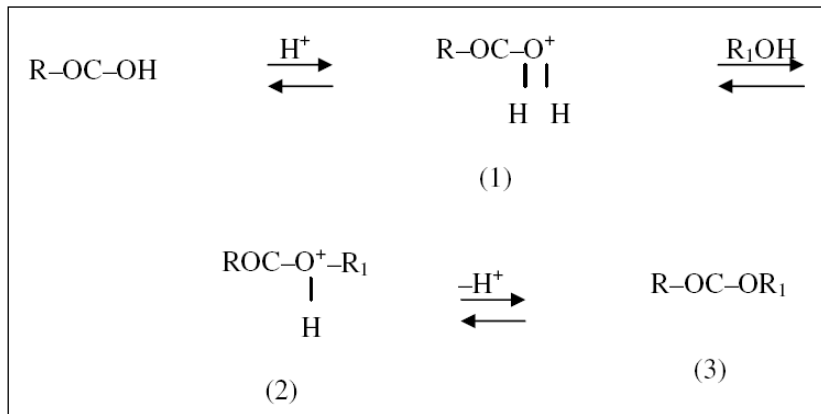
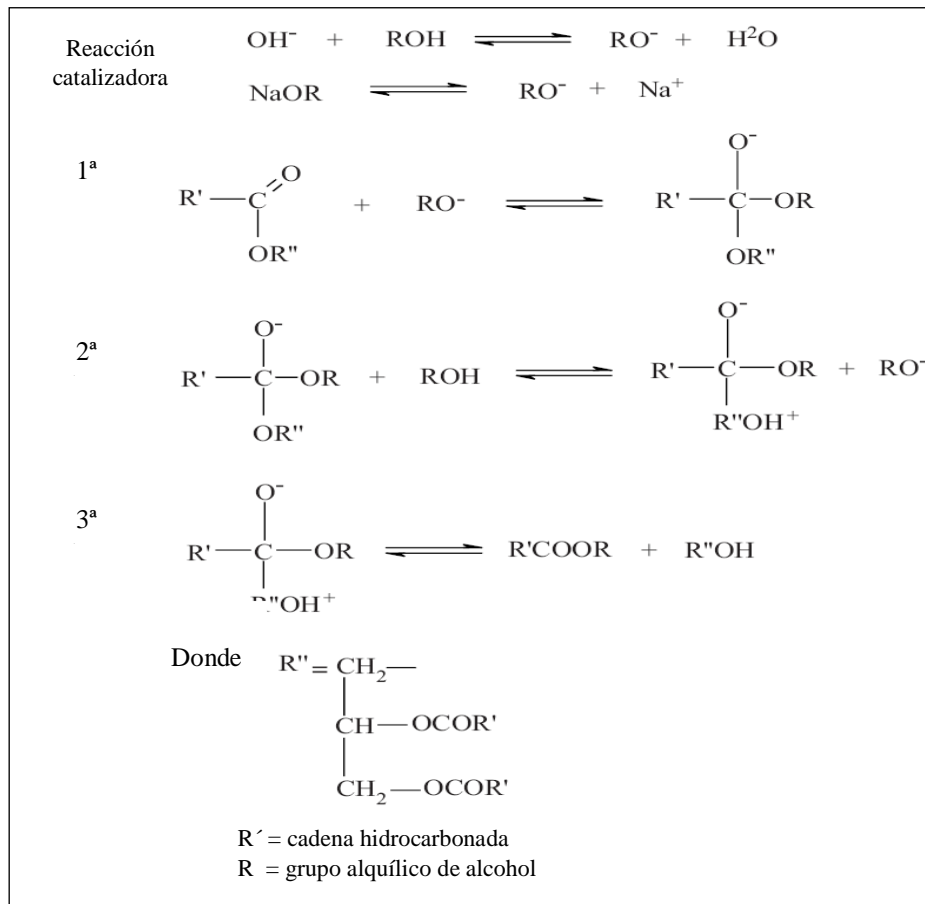


Figura 3.7 Mecanismo de reacción de transesterificación por catálisis alcalina
 [Canan y col., 2008]



Método de transesterificación por catálisis enzimática

Aunque el proceso de transesterificación por catálisis enzimática aún no se ha desarrollado comercialmente, los últimos estudios se ha dirigido a la optimización de las condiciones de reacción (disolventes, temperatura, pH, tipo de microorganismo que genera la enzima, entre otros). Sin embargo, en este momento el rendimiento y el tiempo de reacción aún son desfavorables respecto a los otros métodos de reacción catalítica.

Tabla 3.7 Técnicas de reacción para transesterificación catalítica a partir de ACD

Técnica	Descripción	Rendimiento de biodiésel (%)	Ventajas	Desventajas	Referencias bibliográficas
Transesterificación por catálisis ácida	Reacción del ACD y metanol, con H ₂ SO ₄ de catalizador	99% a 4 hrs. de reacción	Alto rendimiento de biodiésel	La catálisis ácida provoca corrosión en los equipos.	Zheng y col., 2006
Transesterificación por catálisis alcalina	1. Esterificación de AGL y metanol con Fe ₂ (SO ₄) ₃ como catalizador ácido 2. Transesterificación con metanol y KOH de catalizador	En promedio 97.02% a 5 hrs. de reacción	Alto rendimiento de biodiésel y fácil recuperación de subproductos	Involucra un proceso de 2 pasos, donde el costo de producción aumenta	Wang y col., 2007
Transesterificación por catálisis alcalina con Pretratamiento de silica gel	1. El ACD es pretratado con silica gel como absorbente para remover los AGL. 2. Transesterificación con metanol y NaOH de catalizador	99%	Alto rendimiento de biodiésel	Involucra un proceso de 2 pasos, donde el costo de producción aumenta	Loh y col., 2006
Transesterificación por catálisis enzimática de lipasa	Lipasa es soportada en hidrocalcita, la reacción se realiza a temperatura ambiente	95% a 105 hrs. de reacción	Reacción a temperatura ambiente	Alto tiempo de ración que dificulta la producción a gran escala	Yagiz y col., 2007

3.3.2 Métodos no-catalíticos de transesterificación

Proceso BIOX con cosolventes para producción de biodiésel

Este es un nuevo proceso desarrollado en la Universidad de Toronto por el profesor David Boocock y que ha llamado la atención porque ha transformado el proceso de producción de biodiésel a través de la selección de cosolventes inertes como catalizador, que generan un aceite rico en sistemas de 2 fases y con rendimiento superior al 99% en cuestión de segundos. En este proceso primero se efectúa la esterificación del total de los AGL hasta una cantidad remanente de 10% y a continuación los triglicéridos por medio de la transesterificación que reaccionan al agregar el cosolvente, esto en un proceso continuo y a presión atmosférica y temperatura ambiente. El cosolvente es reciclado y rehusado en el proceso [Komers y col., 2001].

Transesterificación con alcohol supercrítico (MSC)

En los métodos convencionales de transesterificación de grasas animales y AV para la producción de biodiésel, los AGL y el agua producen efectos negativos ya que reaccionan formando jabón en la catálisis alcalina, mientras que en la catálisis ácida el agua consume y reduce la eficiencia del catalizador, resultando en una baja conversión. La reacción de transesterificación puede llevarse a cabo mediante cualquiera de los catalizadores ácidos o básicos, pero estos procesos requieren un tiempo relativamente largo y limitaciones en la separación del producto y catalizador, lo que se traduce en elevados costos de producción y consumo energía [Kusdiana y Saka, 2001]. Para superar estos problemas se ha propuesto que el biodiésel puede ser producido mediante transesterificación no catalítica con metanol supercrítico (MSC). Se ha desarrollado un nuevo proceso que consiste en crear el metanol supercrítico para resolver los problemas relacionados con la naturaleza de las 2 fases formadas en la transesterificación típica, haciendo la mezcla de aceite y MSC para formar una sola fase como resultado de la reducción del valor de la constante dieléctrica del MSC. Facilitando la purificación de los productos por estar contenidos en una sola fase y a su vez el tiempo de producción [Demirbas, 2002].

La comparación entre la transesterificación empleando MSC y por catálisis alcalina se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Comparación entre el método catalítico alcalino y el método de metanol supercrítico [Demirbas, 2009]

Parámetro	Proceso catalítico	Método MSC
Alcohol	Metanol	Metanol
Catalizador	NaOH o KOH	Ninguno
Temperatura de reacción (°C)	30 - 65	250 - 300
Presión de reacción (MPa)	0.1	10-25
Tiempo de reacción (minutos)	60-360	7-15
Rendimiento de EMAG (% p)	96	98
Subproductos	Metanol, glicerol, jabón	Metanol
Ácidos grasos libres	Productos saponificados	Esteres metílicos, agua

3.4 Propiedades de biodiésel

Las propiedades del biodiésel tienen que ser comparable o mejor que el diésel, con el fin de asegurar el buen funcionamiento en motores, haciendo mínimas modificaciones. Las propiedades del biodiésel están definidas por las características de la materia prima (tipos y composición de AG del aceite), las más importantes para su uso en MD son el punto de inflamación, viscosidad, índice de cetanos, poder calorífico, número ácido y propiedades de flujo en frío (punto de nube y punto de gota). Las propiedades de flujo en frío se encuentran entre las más significativas y que son generalmente consideradas, básicamente se refieren a los cambios en las propiedades físicas, tales como: cristalización, gelificante y aumento de viscosidad debido a los cambios de temperatura, que podrían afectar el funcionamiento del sistema de inyección en el motor de los vehículos.

Para las propiedades de flujo en frío del biodiésel, un porcentaje superior de AG insaturados en la materia prima tendrá como resultado biodiésel con mejores características. Por ejemplo, el biodiésel proveniente de aceite de palma posee propiedades pobres de flujo en frío, ya que tiene un alto contenido de AG saturados (alrededor del 50%). Por otro lado el biodiésel de aceite de colza, que tiene un alto contenido de AG insaturados tiene las mejores propiedades. Lo anterior es un factor decisivo en el empleo del biodiésel en regiones de clima frío, porque en la actualidad la mayor demanda está en los países europeos, en estas regiones el proveedor acondiciona el biocombustible para las temperaturas de la zona donde será utilizado. [Gui y col., 2008].

Punto de inflamación

Se refiere a la cantidad de energía administrada para llevar a cabo la combustión. Además de determinar la cantidad de alcohol sin reaccionar y el tipo de motor para el cual debe ser utilizado.

Viscosidad cinemática

Debe tener una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia debido a fugas en el sistema de inyección. Provee características de lubricidad. Por otro lado se limita el valor de viscosidad máxima por consideraciones de diseño y tamaño del motor y tipo del sistema de inyección.

Densidad

Da ideal del contenido de energía del combustible con la relación directa de mayor energía térmica y eficiencia de combustión a mayor densidad.

Número de cetano

El número de cetano, contrariamente al número de octano, es un índice que se utiliza para determinar la calidad de ignición en base a la volatilidad del combustible. Para determinar el número de cetano de un combustible se compara la facilidad de inflamación del combustible en cuestión con la de un combustible de referencia como el Cetano puro, que es un hidrocarburo con baja temperatura de inflamación y se le asigna convencionalmente el número 100, mientras que el Alfa-metilnaftaleno que es otro hidrocarburo con muy alta temperatura de inflamación y se le asigna el número 0. El número de cetano del combustible a examinar será igual a la proporción de Cetano de la mezcla que funcione en el motor de pruebas de manera equivalente. El valor del número de cetano aumenta con una cadena más grande de carbonos saturados.

Poder calorífico superior

Característica de los combustibles que se refiere a la cantidad de energía obtenida de la reacción de combustible. Mientras que el poder calorífico inferior es el calor realmente aprovechable; es decir, el producido sin aprovechar la energía de la condensación del agua.

Índice de yodo

Es una escala utilizada para definir el grado de insaturación de las cadenas alifáticas de AG y esteres de un compuesto orgánico. Representa la cantidad de yodo que absorbe dicho compuesto del halógeno en presencia de catalizador que contiene triyoduro 0.1 N en medio ácido acético.

Punto de nube

El punto de nube de productos derivados del petróleo y de biocombustibles es un índice de la temperatura más baja utilidad para ciertas aplicaciones. Indica la temperatura a la que empiezan a precipitar ciertos compuestos del combustible (parafinas, sustancias insaponificables), formando cristales en el aceite cuando es enfriado. Es una propiedad muy importante cuando es usado en climas fríos.

Lubricidad

Es la cualidad de una sustancia de disminuir la fricción generada entre las partes móviles del motor. Los combustibles de baja viscosidad y de poco contenido de azufre tienen menor lubricidad.

Estabilidad oxidativa

Se determina el tiempo de almacenamiento y la degradación potencial. La oxidación del combustible se suele acompañar de formación de gomas solubles e insolubles. La estabilidad puede ser mejorada por la adición de aditivos. [Ciria, 2009]

Punto de gota

Característica de una grasa que se define como la temperatura mínima a la que una grasa calentada es suficientemente fluida para gotear.

La Tabla 3.9 presenta la comparación entre las propiedades de ACD, biodiésel proveniente de ACD y del diésel comercial reportadas en la literatura [Rintoul, 2008].

Tabla 3.9 Comparación de las propiedades de ACD, biodiésel proveniente de ACD y del diésel comercial

Propiedades de combustible	ACD	Biodiésel a partir de ACD	Diésel comercial
Viscosidad cinemática (mm ² /s, a 40 °C)	36.4	5.3	1.9 - 4.1
Densidad (g/cm ³ , a 15 °C)	0.924	0.897	0.075 - 0.840
Punto de inflamabilidad (°C)	212	196	67 - 85
Punto de gota (°C)	11	-11	-19, - 13
Número de cetanos	49	54	40 - 46
Contenido de cenizas (%)	0.005	0.004	0.008 - 0.010
Azufre (%)	0.09	0.66	0.35 - 0.55
Carbón (%)	0.45	0.33	0.35 - 0.40
Agua (%)	0.42	0.04	0.02 - 0.05
Poder calorífico superior (MJ/kg)	41.4	42.65	44.62 - 46.48
Ácidos grasos libres (mg KOH/g aceite)	1.32	0.10	-
Índice de saponificación	188.2	-	-
Índice de yodo	141.5	-	-
Referencias bibliográficas	FSA, 2007	Shay, 1993	Shay, 1993

3.5 Estandarización y normas

Para producir biodiésel y su posterior comercialización se debe obtener un producto de calidad que cumpla con la normatividad y especificaciones vigentes que establecen las organizaciones internacionales (Tabla 3.10). Una reacción completa y cuantitativa para convertir todo el aceite o grasa de cualquier fuente en EMAG es la clave para la calidad del producto. Se determina que la reacción de transesterificación se ha terminado cuando la suma de glicerina libre y combinada es inferior a 0.240 % en peso, de acuerdo al método estándar de la ASTM D 6751 prueba D 6584 [Rintoul, 2008].

Otro importante parámetro es la cantidad de AGL que contiene el aceite. Las mediciones de AGL y agua son responsabilidad del productor, donde la medición de estos ácidos se efectúa en base a la prueba D 664 de la ASTM mediante una titulación potenciométrica no acuosa ácido-base. La medición de los AGL involucra la adición de una base débil para formar una sal cuya banda de absorción del carbonilo es diferente a la del éster del biodiésel. Aún con la preparación de la muestra, cualquiera de estas mediciones toma menos de 5 minutos. Otras prácticas cuantitativas son la espectroscopia infrarrojo y la cromatografía.

Tabla 3.10 Estándares internacionales vigentes para el control de calidad de biodiésel [CEN, 2009]

Norma vigente	País de origen
IRAM 6515-1	Argentina
ASTM D 6751	E.U.A.
SS 15 54 36	Suecia
DIN V 51606	Alemania
ÖN C 1191	Australia
JORF 14.9.1997	Francia
UNI 10631	Italia
CSN 656507	República Checa
EN 14214	Unión Europea

La principal aplicación de biodiésel se da como combustible para el transporte de carga y de pasajeros, para este sector industrial, un mal producto puede causar problemas en el motor; tales como, obstrucción de filtros, carbonización y depósitos en el inyector, corrosión e incrustaciones. Estos problemas han provocado que los fabricantes de motores sean prevenidos de extender garantías de funcionamiento a altas proporciones de biodiésel en mezclas. Con el objetivo de eliminar producto por debajo de estándares y que además daña el prestigio de la industria, en E.U.A. el Consejo Nacional de Biodiésel desarrolló el “Programa de Acreditación Nacional de Biodiésel” para la acreditación de productores y comercialización del biodiésel como biocombustible (programa BQ-9000) y que es uno de los más altos programas de calidad en el mundo. El programa es una combinación única de los estándares de la ASTM para biodiésel (ASTM D 6751) y sistemas de calidad que incluyen almacenamiento, métodos de producción, muestreo, pruebas, mezclado, embarque, distribución y prácticas gerenciales para el combustible [NBB, 2007].

La calidad del producto se inicia desde la materia prima y se extiende hasta la combustión final en el motor. Algunos análisis son para control de proceso o verificación de la calidad y se pueden realizar con pruebas de verificación rápida y simple, mientras que algunas otras requieren una prueba más completa. Existen tres áreas donde los análisis de control de calidad son necesarios en la producción de biodiésel; caracterización de la materia prima, monitoreo de la reacción química en el proceso y la verificación de la calidad del producto terminado [Rintoul, 2008].

La Tabla 3.11 presenta todos los parámetros y especificaciones de calidad para biodiésel B100, su método de determinación y límites permisibles según la norma ASTM D 6751-08 y EN 14214. En la Tabla 3.12 se presenta la norma de calidad ASTM D 975 para diésel comercial.

Tabla 3.11 Parámetros y especificaciones de calidad para biodiésel B100, según la ASTM D 6751-08 y EN 14214 [NBB, 2007]

Parámetro	Método	Límites	Unidades
Densidad	ASTM D 4052	0.86-0.9	g/cm ³
Viscosidad cinemática a 40 °C	ASTM D 445	1.9 – 6.0	mm ² /s (cSt)
Punto de inflamabilidad	ASTM D 93	120 mín.	°C
Poder calorífico superior	ASTM D 240	39.5	MJ/kg
Punto de nube	ASTM D 2500	49 máx.	°C
Azufre	ASTM D 5453	0.05 máx.	% masa
Carbón residual	ASTM D 4530	0.05 máx.	% masa
Agua y sedimentos	ASTM D 2709	0.05 máx.	% volumen
Corrosión en lamina de cobre	ASTM D 130	No. 3 máx.	
Cenizas sulfatadas	ASTM D 874	0.02 máx.	% masa
Número de cetanos	ASTM D 613	47 mín.	Índice de cetano
Número ácido	ASTM D 664	0.5 máx.	mg KOH/g
Glicerina libre	ASTM D 6584	0.02	% masa
Glicerina total	ASTM D 6584	0.240	% masa
Metanol residual	ASTM D 93	0.2 máx.	% masa
Fósforo	ASTM D 4951	0.10 máx.	ppm
Contaminación total	EN 12662	24 máx.	ppm
Destilación de vacío final con 90% de destilado	ASTM D 1160	360 °C máx.	°C
Sodio y Potasio	EN 14108	5 máx.	ppm
Calcio y Magnesio	EN 14538	5 máx.	ppm
Estabilidad oxidativa	EN 14112	6 mín.	horas
Estabilidad térmica	ASTM D 6468	70% mín.	% reflectancia

Tabla 3.12 Norma de calidad ASTM D 975 para diésel comercial [EI, 2009]

Parámetro	Límites
Densidad (g/cm ³) a 15°C	0.82 – 0.845
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	2 – 4.5
Punto de inflamación (°C)	55 mín.
Poder calorífico superior (MJ/kg)	46 mín.
Azufre (mg/kg)	350 máx.
Carbón residual (% masa)	0.3 máx.
Agua (mg/kg)	200 máx.
Corrosión en lamina de cobre	No. 1 máx.
Ceniza sulfatada	0.01 máx.
Número de cetanos	51 mín.
Contaminación total (mg/kg)	24 máx.
Estabilidad oxidativa (hrs.) a 110°C	25 g/cm ³

La Tabla 3.13 presenta algunos de los parámetros de calidad del biodiésel y su efecto en el funcionamiento en MD.

Tabla 3.13 Parámetros de calidad del biodiésel y su posterior efecto en el funcionamiento del motor [Rintoul, 2008]

Parámetro de calidad	Efecto	Modo de fallo
EMAG	Ablandamiento y rompimiento de las juntas de nitrilo	Fugas de combustible
Metanol	Corroe el aluminio y zinc, disminuye punto de inflamación	Corrosión del sistema de inyección
Catalizador	Forma compuestos sólidos	Bloqueo de boquillas
Agua libre	Corrosión, incremento de la conductividad eléctrica del combustible, crecimiento bacteriológico	Obstrucción de los filtros del combustible y disminución de las propiedades de lubricidad
Glicerina residual	Corroe metales no férricos, formación de sedimentos en las partes móviles	Obstrucción de filtros del combustible y depósitos de carbón
Número ácido	Formación de jabones	Sedimentación y obstrucción
Impurezas sólidas	Problemas de lubricación	Menor tiempo de vida
Punto de nube	Problemas de arranque del motor	Flujo de combustible reducido en climas fríos
Ceniza sulfatada	forman cenizas sólidas, abrasivos, tensoactivos, catalizador de reacción	Desgaste del inyector y su bomba, filtros del combustible pistones y depósitos de carbón en el motor.
Corrosión a la lámina de cobre	Ácidos contenidos	Corrosión al sistema del combustible

3.5.1 Tipos de biodiésel

El biodiésel ofrece diversas posibilidades de ser mezclado con combustibles convencionales, principalmente con diésel. En los años recientes la ASTM adoptó una nomenclatura para identificar la concentración de biodiésel en una mezcla, conocida como la nomenclatura BXX, donde el XX es el porcentaje en volumen de biodiésel en el total de la mezcla. La ASTM publicó en 2008 las siguientes normas vigentes para uso en mezclas de biodiésel:

ASTM D 396-08. Especificación para gasóleo y combustóleo en mezclas máximas de 5% de biodiésel para empleado en MD.

ASTM D 7467-08. Especificación para gasóleo y combustóleo en mezclas con biodiésel de B6 a B20 para ser empleado en MD.

El combustible B2 se usa como aditivo lubricante, mientras que el B5 es semejante al diésel comercial, las mezclas en volúmetricas entre 5% y 20% son las más comunes y usadas en transporte. El B100 es biodiésel puro y es el más limpio por ser un producto de bajas emisiones contaminantes a la atmósfera, pero también no se recomienda su uso en MD para vehículos porque ataca los conductos de goma del circuito del combustible. El B20 es la mezcla de biodiésel más utilizada en E.U.A. mientras que en otros países se comercializa con amplia aceptación tanto el B20 como el B100. En la actualidad hay diversas marcas y distribuidores que ofrecen mezclas de biodiésel en los estándares internacionales.

3.6 Costos de producción de biodiésel

La capacidad de la planta, el costo de las materias primas y el precio del biodiésel en el mercado resultan los factores más importantes para la evaluación de la factibilidad económica en la producción industrial de biodiésel.

El costo de las materias primas representa la parte más importante del total de los costos, por lo tanto, la reducción de éstos deberá ser el primer paso en la optimización del proceso. Otro factor en el estudio económico es la recuperación de la glicerina generada durante la producción de biodiésel y su venta en el mercado comercial, lo que puede reducir los costos de producción hasta en un 6%. De forma general se encontró que la dependencia de los costos de producción y el costo de la materia prima presentan una relación directamente proporcional, mientras que el costo de producción del biodiésel es inversamente proporcional a las variaciones en el valor de mercado del glicerol [Haas y col, 2006].

De los estudios reportados en la literatura, se presenta el estudio de factibilidad económica y de estimación tecnológica para la producción de biodiésel realizado por Zhang y col. [2003] donde se desarrolló la simulación de 4 diferentes procesos por reacción de transesterificación. Las técnicas empleadas fueron: proceso catalítico alcalino con AV (aceite de oliva puro) (I), proceso de catálisis alcalina de dos pasos con ACD (II), proceso de un paso de catálisis ácida con ACD (III) y proceso de catálisis ácida con ACD (IV) usando hexano como disolvente de extracción en lugar del lavado con agua para evitar la formación de emulsiones. La evaluación económica y el análisis de sensibilidad de los 4 procesos se realizó en base a los siguientes factores económicos: costo de capital fijo, costo total de producción, tasa de rendimiento después de impuestos y el precio del biodiésel en el punto de equilibrio. Las evaluaciones económicas se realizaron a partir de las siguientes consideraciones: cada proceso se basó en una capacidad de planta de 8,000 t/año de biodiésel; el proceso se asume como continuo, operando a 8,000 h/año; tanto el ACD como el aceite vegetal virgen usado como materia prima están libres de agua y de cualquier impureza sólida; en el simulador la eficiencia de la bomba fue considerada del 70% y para calcular su consumo eléctrico se usó una eficiencia del motor de 90%; se empleó vapor sobrecalentado de alta y baja presión, mientras que el agua fue el medio de enfriamiento; el caso considerado fue para obtener 1,500 T/año de glicerina como subproducto al 85% peso de pureza; el estudio se realizó en marzo del 2002, donde se usó una tasa de cambio dólar-peso de 1/9.2 [Zhang y col., 2003].

El costo del reactor para la transesterificación es el equipo más significativo del total de los costos fijos. Para el proceso III y IV se requiere un reactor de mayor capacidad debido a la mayor cantidad de metanol usado, por consecuencia, el costo del reactor para estos procesos es mayor que los demás. En el proceso IV aumentan debido a la unidad de separación, mientras que en el II la presencia del H₂SO₄ requiere un reactor de acero inoxidable. Los costos directos consisten principalmente en la materia prima y representan del 63 -75% del total de los costos de producción para cada proceso. En los procesos III y IV la materia prima representa el 50% del total de los costos directos, en el I usando AV es del 80% y en el II con ACD es del 35%. Para el proceso II el ACD es aproximadamente de 2 a 3 veces menor que el aceite de oliva virgen, indicando que el uso de ACD conduce a una alta disminución en el costo total de producción. La Tabla 3.14 presenta las condiciones básicas para la evaluación económica de todos los procesos. En base a las características de cada proceso se presenta en la Tabla 3.15 los resultados obtenidos para el tamaño y equipo requerido, mientras que la Tabla 3.16 refiere los costos fijos asociados.

Tabla 3.14 Condiciones básicas de proceso [Zhang y col., 2003]

Especies químicas	Especificación	Precio (\$/t)
Biodiésel	Comercial	5,520
CaO	Comercial	524
Glicerol	85% peso	11,040
Hexano	Puro	3,772
Metanol	99.85%	1,656
H ₃ PO ₄	98%	3,128
NaOH	Comercial	36,800
H ₂ SO ₄	98%	552
Aceite virgen de colza	-	4,600
ACD	-	1,840
Servicios	Especificación	Precio
Agua de enfriamiento	400 kPa, a 6°C	0.064 \$/m ³
Energía eléctrica	Servicio industrial	0.57 \$/kW-h
Vapor de baja presión (sobrecalentado)	450 kPa, a 210°C	6,2.56
Vapor de alta presión (sobrecalentado)	2,700 kPa, a 500°C	92
Tratamiento de residuos	Especificación	Precio
Líquido	Riesgoso	1,380
Sólido	Riesgoso	340
Procesos	Especificación	
Capacidad de la planta	8000 t/año de biodiésel	
Modelo termodinámico en el proceso de simulación	NRTL	
Recuperación de metanol	94%	
Pureza de EMAG	99.65% peso	
Metanol recuperado en la unidad de pretratamiento	94%	

Tabla 3.15 Tamaños y costo del equipo para cada proceso [Zhang y col., 2003]

Equipo	Descripción	Proceso I	Proceso II	Proceso III	Proceso IV
Reactor	Esterificación Tamaño (D x L, m) Costo (\$x103)	-	0.8 x 2.4 763	-	-
	Transesterificación Tamaño (D x L, m) Costo (\$x103)	1.8 x 5.4 2,668	1.8 x 5.4 2,668	2.1 x 6.3a 6,192a	2.1 x 6.3a 6,192a
	Neutralización Tamaño (D x L, m) Costo (\$x103)	0.3 x 1 193.2	0.3 x 1 193.2	0.5 x 1.5 349.6	0.4 x 1.2 266.8
Columnas	Destilación de metanol Tamaño (D x H, m) Costo b (\$x103)	0.6 x 10 1,288	1 x 12 3,284	1 x 10 2,981	1 x 10 2,981
	Columnas de lavado Tamaño (D x H, m) Costo (\$x103)	0.8 x 10 920	1 x 10 2,208	1x 10 1,003	1 x10 2,208
	Destilación EMAG Tamaño (D x H, m) Costo (\$x103)	1.2 x 12 1,444	1.2 x 12 1,444	1 x 12 1,546	1.5 x 16c 2,355
	Purificación glicerina Tamaño (D x H, m) Costo (\$x103)	N/A	0.5 x 10 975.2	0.6 x 10 1,242	0.8 x 10 1,344
Equipos adicionales	Intercambiadores de calor (\$x10 ³)	533.6	2,134	1,601	1,601
	Bombas (\$x10 ³)	6,003	9,605	5,336	6,537
	Separadores y Eyectores (\$x10 ³)	6,136.4	7,604	9,738	5,603

Tabla 3.16 Costos de capital fijo [Zhang y col., 2003]

Tipos de costos fijos	Proceso I	Proceso II	Proceso III	Proceso IV
Costo del equipo básico (\$x10 ⁶) C_{EB}	5.61	10.12	9.3	10.95
Costo del equipo completo (\$x10 ⁶) C_{EC}	7.45	15.08	14.44	18.31
Costo por contingencia (\$x10 ⁶) $C_{CC} = 0.18 C_{EC}$	1.29	2.76	2.58	3.31
Costo total del equipo completo (\$x10 ⁶) $C_{ET} = C_{EC} + C_{CC}$	8.74	17.85	17.02	21.62
Costo de instalación de servicios auxiliares (\$x10 ⁶) $C_{SA} = 0.18 C_{EB}$	2.02	3.59	3.31	3.86
Capital fijo (\$x10 ⁶) $C_{CF} = C_{ET} + C_{SA}$	10.76	21.44	20.33	25.48
Capital de trabajo (\$x10 ⁶) $C_{CT} = 0.15 C_{CF}$	1.56	3.22	3.05	3.86
Inversión total de capital (\$x10 ⁶) $C_{INV} = C_{CF} + C_{CT}$	12.32	24.66	23.46	29.35

La Tabla 3.17 presenta el resumen económico obtenido para todos los procesos, así como los resultados del análisis de factibilidad en base a los factores económicos establecidos.

Tabla 3.17 Resumen económico [Zhang y col., 2003]

Costos de capital fijo		Proceso I	Proceso II	Proceso III	Proceso IV
Unidad de pretratamiento	(\$x10 ⁶)	0	6.99	0	0
	Porcentaje	0	46	0	0
Unidad de transesterificación	(\$x10 ⁶)	3.04	2.85	6.62	6.62
	Porcentaje	41	19	46	36
Unidad de separación	(\$x10 ⁶)	4.41	5.24	7.82	11.68
	Porcentaje	59	35	54	64
Equipo completo	(\$x10 ⁶)	7.45	15.08	14.44	18.31
	Porcentaje	100	100	100	100
Costo total de producción					
		Proceso I	Proceso II	Proceso III	Proceso IV
Costos directos	(\$x10 ⁶)	47.29	43.7	30.18	32.38
	Porcentaje	75	67	64	63
Costos indirectos	(\$x10 ⁶)	4.23	9.34	6.53	7.27
	Porcentaje	7	12	14	14
Gastos generales	(\$x10 ⁶)	10.49	11.6	8.65	9.47
	Porcentaje	17	18	18	18
Depreciación (C _D)	(\$x10 ⁶)	1.104	2.12	2.02	2.58
	Porcentaje	2	3	4	5
Subtotal (C _T)	(\$x10 ⁶)	63.11	65.14	47.38	51.7
	Porcentaje	100	100	100	100
Ingresos por biodiésel (I_T)	(\$x10 ⁶)	44.16	44.16	44.16	44.16
Rentabilidad					
		Proceso I	Proceso II	Proceso III	Proceso IV
BNA (\$x10 ⁶) = I _T - C _T		-18.95	-20.98	-3.22	-7.54
BNA _I después impuestos (\$x10 ⁶)		-9.475	-10.49	-1.61	-3.77
TIR (%) = (BNA _I - C _D) / C _{INV} * 100		-85.87	-51.13	-15.47	-21.63
Precio del biodiésel en el punto de equilibrio (\$/t)		7,884.4	8,133	6,109	6,458

Se concluye que el proceso I por catálisis alcalina utilizando aceite de oliva virgen tuvo el menor gasto de capital fijo, debido a las menores operaciones unitarias asociadas y el menor tamaño del equipo de proceso. Para una planta con capacidad de 8,000 t/año de biodiésel, el capital total de inversión en el proceso I es aproximadamente la mitad que la invertida en los demás procesos. Sin embargo, también presenta el mayor costo directo de producción, esto indica que aunque el proceso haya requerido menor costo de instalación y arranque de la planta, presenta un alto costo de producción operativa.

Para el proceso II se requiere una unidad de pretratamiento para esterificar los AGL contenidos en los ACD, el costo asociado con esta unidad, incluyendo el costo adicional en reactivos, conduce en general a mayores costos de producción. Por otro lado el uso de ACD con baja cantidad de AGL y hace innecesario la unidad de esterificación, disminuyendo en este caso un 46% los costos fijos y favoreciendo la factibilidad económica respecto a los demás procesos. El proceso de catálisis ácida no es afectado por los ácidos grasos libres y no requiere ninguna unidad de pretratamiento. En consecuencia, los procesos de catálisis ácida para producir biodiésel a partir de ACD (procesos III y IV), tienen menor costo total de producción que los procesos de catálisis alcalina. Aunque el proceso por catálisis alcalina usando aceite vegetal virgen tiene el menor costo de capital fijo, el proceso III por catálisis ácida en general es económicamente más viable, porque proporciona un menor costo total de producción, mayor tasa de rendimiento y un mayor margen de precio para el biodiésel producido. En base a la tasa de rendimiento esperada y el precio del biodiésel, los procesos III y IV de catálisis ácida son alternativas más económicamente competitivas que los procesos con catálisis alcalina I y II. Aunque el proceso por catálisis alcalina usando aceite vegetal virgen tenía el menor costo de capital fijo, el proceso III por catálisis ácida usando ACD en general es económicamente más viable porque proporciona un menor costo total de producción, mayor tasa de rendimiento y un menor precio en el punto de equilibrio del biodiésel producido [Zhang y col., 2003].

3.7 Evaluación del biodiésel respecto al diésel

El biodiésel es el único biocombustible que puede ser mezclado con diésel comercial para funcionar en los motores convencionales de combustión interna (MCI) sin ninguna modificación. El biodiésel es seguro de manejar y transportar porque es biodegradable y tiene un mayor punto de inflamabilidad que el diésel y puede ser almacenado en cualquier lugar donde se almacena diésel. Las ventajas del biodiésel frente al diésel son: disponibilidad, combustible renovable, biodegradabilidad, mayor eficiencia de combustión, menores emisiones de gases tóxicos, mayor índice de cetanos, propiedades lubricantes y sobre todo la reducción en la dependencia de los combustibles derivados del petróleo [Demirbas, 2007].

3.7.1 Análisis de ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (ACV) de un producto es una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes potenciales impactos ambientales, asociados a cada una de las etapas durante el ciclo de vida de un producto. El análisis abarca desde la generación del producto y hasta su regreso a la naturaleza como desecho. De los estudios reportados en la literatura, se presenta el ACV comparativo del diésel y biodiésel realizado por el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas [CIEMAT 2008], donde se comparan todas las actividades asociadas a la producción, uso y descarte, respecto a la cantidad de combustible fósil consumido durante todo su ciclo de vida para 3 diferentes productos. Los sistemas a analizar son los siguientes:

- Producción y uso de diésel obtenido a partir de la refinación del petróleo bajo la norma EN-590.
- Producción y uso de biodiésel B100 obtenido de AV bajo la norma ASTM D 6751.
- Producción y uso de biodiésel B100 obtenido de ACD vegetales bajo la norma ASTM D 6751.

La Figura 3.8 es la recopilación general de un inventario de entradas y salidas durante el ACV para obtención de biodiésel a partir de ACD y AV.

Figura 3.8 Entradas y salidas durante el ciclo de vida del biodiésel [CIEMAT, 2008]

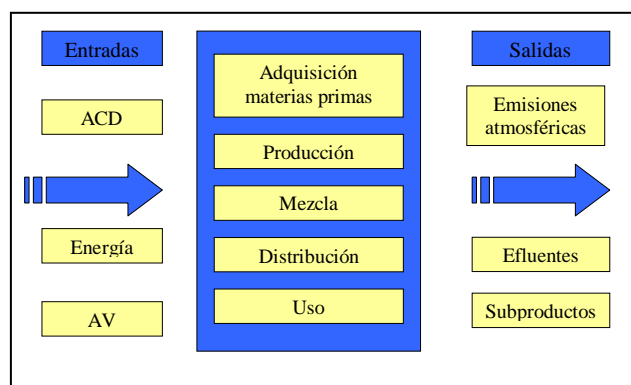
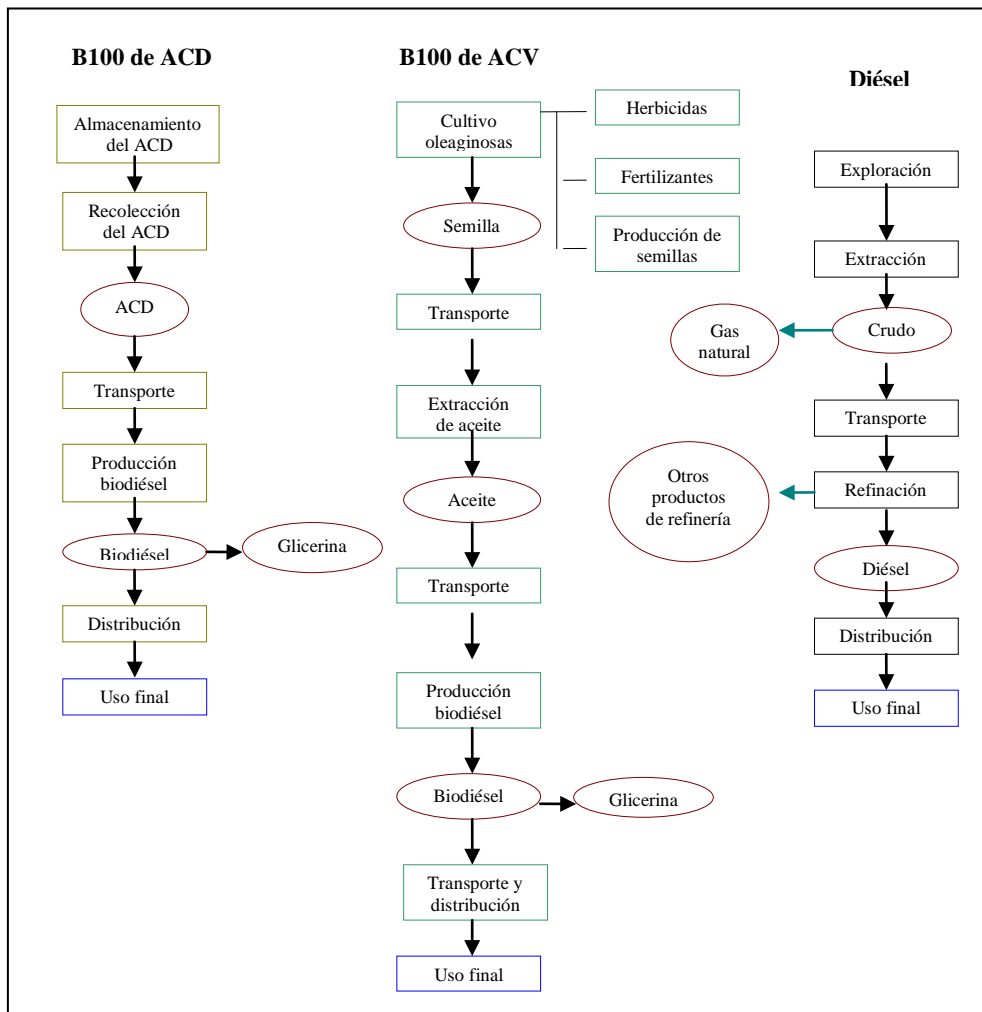


Figura 3.9 Diagrama de actividades durante el ciclo de vida para cada sistema de estudio [CIEMAT 2008]



Para tener una base de comparación en el ACV se tomo como referencia la unidad funcional de 1.89 MJ/km que representa la cantidad de combustible expresada en MJ de cada tipo de combustible que es necesaria para recorrer un km en un vehículo con motor diésel (Ford Focus 1.8Tddi 90CV) en un ciclo de conducción determinado [CIEMAT, 2008].

La Figura 3.10 muestra la cantidad de combustible fósil consumida en cada actividad y en términos de la unidad funcional definida y la Figura 5.11 la relación de energía producida respecto a la consumida de combustibles fósiles.

Figura 3.10 Consumo de energía fósil durante el ciclo de vida [CIEMAT, 2008]

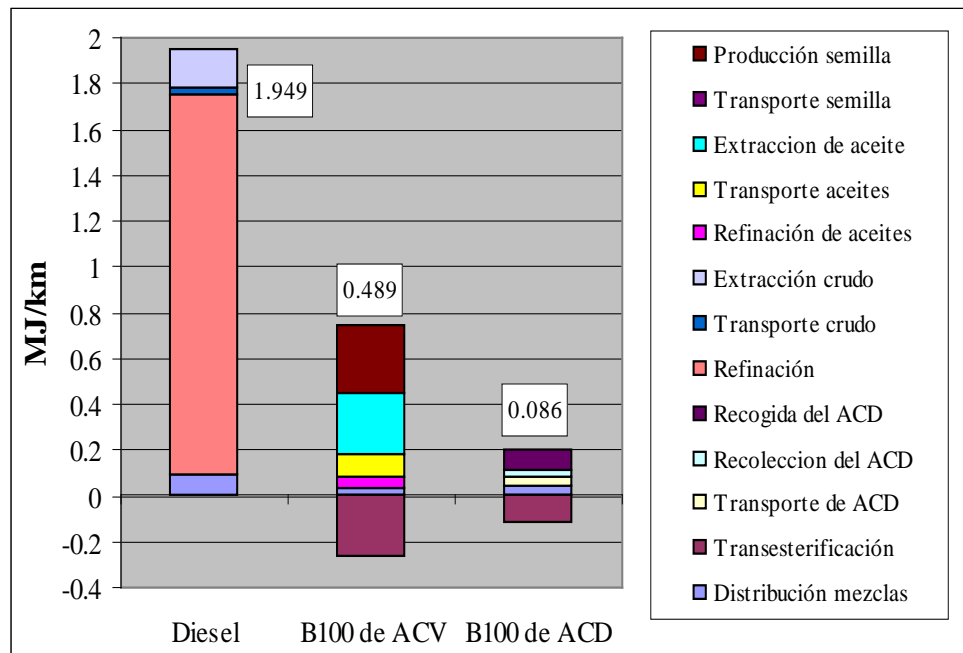
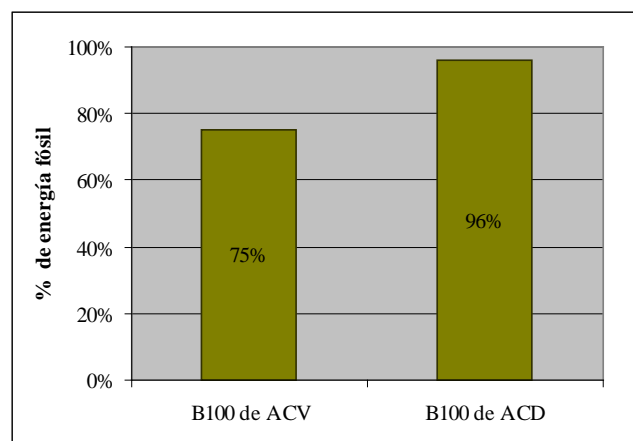


Figura 3.11 Ahorro de energía fósil durante el ciclo de vida [CIEMAT, 2008]



Para establecer una comparación general entre los sistemas de estudio se calculó el factor energético a partir de la siguiente ecuación, los resultados obtenidos se dan en la Tabla 3.19.

$$\text{Factor Energético} = \frac{\text{Energía contenida en el combustible (PCI)}}{\text{Energía consumida para ser producido y usado}}$$

Tabla 3.19 Factor energético para los sistemas de estudio [CIEMAT, 2008]

Combustible	Factor energético
Diésel EN 590	0.968
B100 de AV	3.856
B100 de ACD	21.861

La Figura 3.12 representa la cantidad de emisiones contaminantes para cada actividad realizada durante el ciclo de vida del producto y en términos de CO₂ equivalente como medida de comparación. La Tabla 3.13 da la cantidad de emisiones contaminantes totales por cada sistema de estudio.

Figura 3.12 Emisiones de gases contaminantes durante el ciclo de vida [CIEMAT, 2008]

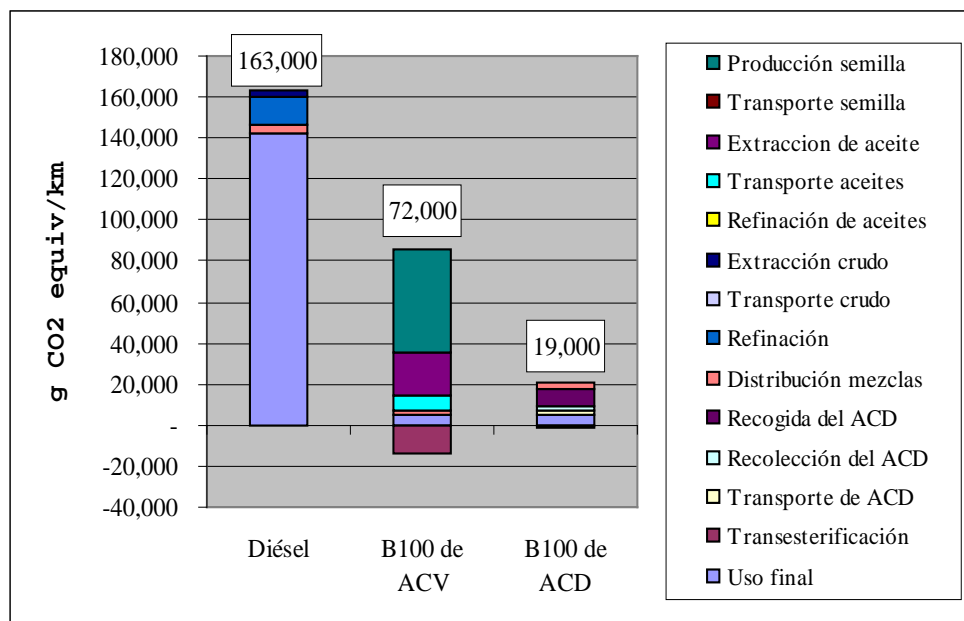
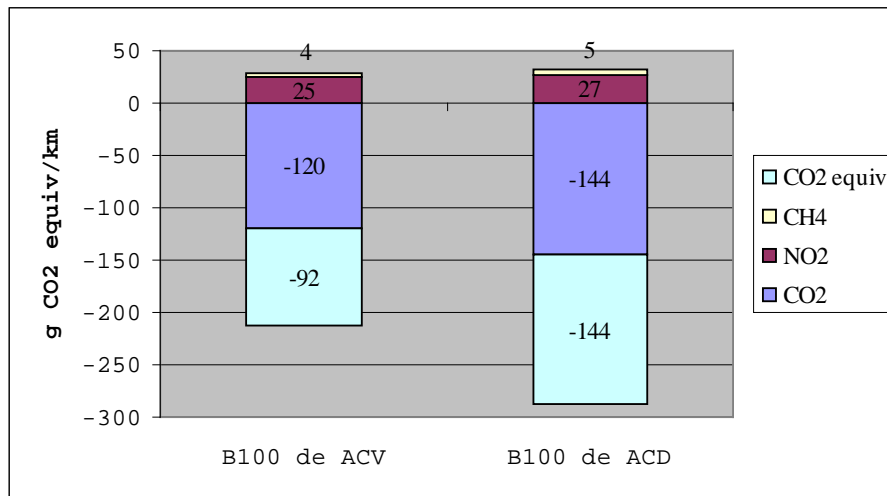


Figura 3.13 Emisiones de gases contaminantes evitadas durante el ciclo de vida [CIEMAT, 2008]



Conclusiones del análisis del ciclo de vida realizado en CIEMAT [2008]

Consumo energético

El balance energético en el ACV de las mezclas estudiadas aumenta cuanto mayor es el contenido de biodiésel en la mezcla. La producción y uso de biodiésel B100 a partir de aceite comestible vegetal permite ahorrar un 75 % de energía fósil en comparación con la producción y uso de diésel. La producción y uso de biodiésel B100 de ACD permite ahorrar un 96 % de energía fósil en comparación con la producción y uso de diésel comercial. La producción y uso de la mezcla de este biodiésel al 5 % con diésel permite ahorrar un 4 % de energía fósil en comparación con la producción y uso de diésel.

Impacto ambiental

Los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos en la producción y uso de las mezclas estudiadas, disminuyen cuanto mayor es el contenido de biodiésel en la mezcla. En el caso del biodiésel B100 a partir de ACV, permite ahorrar 212 g de GEI por km recorrido en comparación con la producción y uso de diésel. Para el biodiésel B100 a partir de ACD, permite evitar 288 g de GEI por km recorrido, para el B10 el ahorro es de 30 g y para B5 es de 16 g en comparación con la producción y uso de diésel comercial.

3.7.2 Ventajas del uso de biodiésel

Mayor índice de cetanos

Por lo general los esteres derivados de AG presentan número de cetanos mayor que el diésel. Se ha encontrado que los compuestos aromáticos poseen menor número de cetanos. Por ello el biodiésel, donde su contenido es mínimo presenta mayor calidad de ignición. Durante el proceso de precombustión los esteres forman diferentes compuestos como alquenos, bencenos, furenos que también aumentan el número de cetanos. El biodiésel contiene hasta 11% de oxígeno en peso que mejora la eficiencia de la combustión al estar en exceso con el combustible, debido a esto la eficiencia en la combustión del biodiésel es superior al diésel, pero la cantidad de energía obtenida es menor debido al menor poder calorífico superior [Demirbas, 2007].

Disminución de la emisión de gases contaminantes

Para efecto de comparación entre las emisiones de contaminantes se definió el Potencial de Calentamiento Global (PCT) que se refiere al efecto de calentamiento atmosférico integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de 1 kg de un gas de efecto invernadero, en comparación al causado por la emisión de CO₂ (Tabla 3.20). En base a lo anterior se emplea el término dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) que es la unidad de medición usada para indicar el potencial de calentamiento global de cada uno de los gases de efecto invernadero, en comparación al CO₂. Los GEI distintos al CO₂ son convertidos a su valor de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) multiplicando la masa del gas en cuestión por su potencial de calentamiento global [IPCC, 2007].

Tabla 3.20 Potencial de Calentamiento Global de Gases de Efecto Invernadero [IPCC, 2007]

GEI	PCG Después de 20 Años	PCG Después de 100 años
CO ₂	1	1
Metano	62	23
NO _x	296	296
Hidrofluorocarbonos	9400	12000
Clorofluorocarbonos	3900	5700
Hexafluoruro de azufre	15100	22200

En los MD que usan Diesel como combustible, el principal componente nocivo derivado de la combustión es el CO₂, con una proporción superior entre el 60% al 80% y en menor medida, el resto de contaminantes. Los valores de los gases tóxicos contenidos en los gases de escape producidos por los motores Diesel son aproximadamente los referidos en la Tabla 3.21.

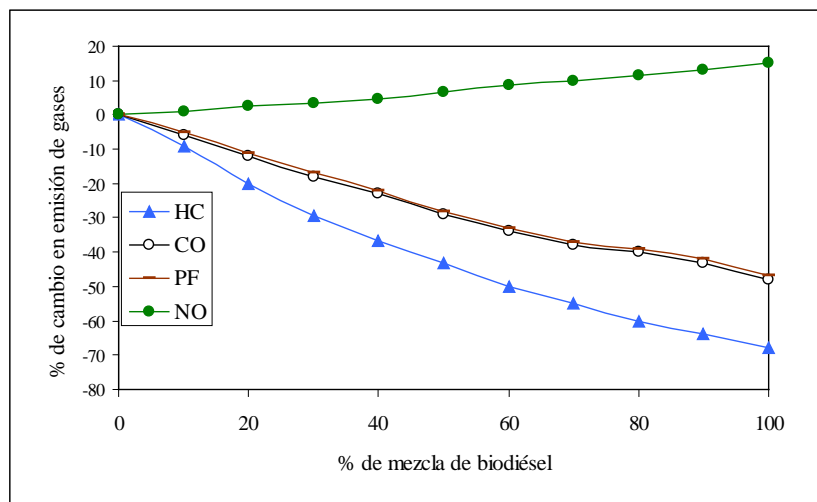
Tabla 3.21 Emisiones contaminantes de gases de escape en MD [IPCC, 2007]

CO ₂ (ppm)	HC (ppm)	CO (ppm)	NO _x (ppm)	SO _x (ppm)
5-500	20-400	0.1-0.25	50-500	10-150

En este contexto, la combustión de biodiésel provee reducciones significativas en emisión de partículas de CO, CO₂ y SO_x en comparación al diésel comercial. Ofrece una reducción de emisiones contaminantes del 90% del total de hidrocarburos de combustión incompleta (HC), del 75-al 90% de hidrocarburos aromáticos policíclicos (benceno, pireno, tolueno, entre otros) [Cardone y col., 1998] y del 75 al 83% de emisiones de partículas finas (PF) [Knothe y col., 2006], en comparación al diésel comercial empleado. Las emisiones de CO₂ durante la combustión del biodiésel en MD son del orden del 50% inferior respecto a la combustión del diésel en el mismo tipo de motor. La contribución neta de CO₂ a partir de la combustión de biomasa es pequeña, por lo que las reducciones de emisiones netas se estiman en 77 – 104 g/MJ de diésel por biodiésel desplazado [Tan y col., 2004].

El contenido de azufre contenido en el biodiésel es 20 a 50 veces inferior que en el diésel, conteniendo solo trazas e implicando emisiones mínimas de SO_x [Shay, 1993]. Por otro lado la combustión de biodiésel también presenta un incremento en las emisiones de NO_x , como se observa en la Figura 3.14. Por naturaleza el biodiésel contiene menor nitrógeno en comparación al diésel, pero las emisiones de NO_x del biodiésel son fuertemente dependientes de la concentración inicial y sólo ligeramente dependiente de la temperatura, las emisiones aumentan con una mayor concentración de biodiésel y disminuyen a una menor temperatura de combustión. En general, la longitud de la cadena alifática tiene un efecto directo en las emisiones contaminantes de NO_x y PF, mientras que la influencia aumenta en HC y CO. El biodiésel con AG insaturados en la cadena de los ésteres metílicos causa un incremento mayor en la emisión de NO_x [Cardone y col., 1998].

Figura 3.14 Porcentaje de cambio en curvas promedio de emisión para mezclas de biodiésel usado en MD a partir de ACD [EPA, 2002]



La Tabla 3.22 muestra el porcentaje de la relación de cambio másico en MD de las emisiones contaminantes de biodiésel B100 y B20 bajo la norma de calidad ASTM D 6751 en comparación del diésel comercial.

Tabla 3.22 Cambio de emisiones contaminantes de biodiésel en comparación al diésel comercial [Morris y col., 2003]

Mezcla	CO	NOx	SOx	PF	CVO
B20	-13.1	+2.4	-20	-8.9	-19.9
B100	-42.7	+13.2	-100	-55.3	-63.2

Biodegradabilidad

El biodiésel no es tóxico y se degrada 4 veces más rápido que el diésel (Tabla 3.24). El mayor contenido de oxígeno permite un rápido proceso de degradación en comparación con el diésel, por lo que todos los tipos de biodiésel son fácilmente biodegradables. Los microorganismos responsables de las reacciones de deshidrogenación y oxidación que se producen en el proceso de degradación reaccionan fácilmente con los átomos de oxígeno. Con el creciente interés en el biodiésel, la salud y la seguridad son aspectos de suma importancia, incluida la determinación del impacto en el medio ambiente, el transporte, almacenamiento o la transformación. Se encontró que después de 28 días todos los combustibles de biodiésel fueron biodegradados entre un 77% y 89%, mientras que el diésel fue sólo biodegradado en un 18% [Zhang y col., 1998]. Los AV y sus ésteres metílicos derivados fueron rápida y altamente biodegradados al tener de 76 a 90%. Los combustibles pesados derivados del petróleo presentan una menor biodegradación de 11% debido al alto peso molecular de sus compuestos aromáticos [Mulkins y col., 1974], mientras que la gasolina se degradó en un 28%, considerándose relativamente biodegradable [Zhang y col., 1998]. Todos los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23 Biodegradabilidad temporal de biocombustibles y combustibles derivados del petróleo

Combustible	Degradación en 28 días (%)	Referencias bibliográficas
Gasolina (91 octanos)	28	Speidel y col., 2000
Pesado de petróleo	11	Mulkins y col., 1974
Biodiésel a partir de colza	78	Zhang y col., 1998
Biodiésel a partir de soya	76	Zhang y col., 1998
EMAG a partir de colza	88	Zhang y col., 1998
EMAG a partir de girasol	90	Zhang y col., 1998

Almacenamiento

Generalmente el biodiesel tiene estabilidad de sus propiedades bajo condiciones normales de almacenamiento, el producto de buena calidad presenta estabilidad oxidativa por hasta 6 meses. Los contaminantes del biodiesel incluyen productos insolubles derivados de su degradación, además de otros solubles (ácidos y gomas) y contaminación microbiológica. Existen aditivos para mejorar la estabilidad durante el almacenamiento del biodiesel como los biocidas, que destruyen o inhiben el crecimiento de hongos y bacterias que crecen en la interface agua – biodiesel.

La formación de productos de degradación es catalizada en gran medida por el contenido de agua, la exposición al oxígeno, luz, humedad, alta temperatura y el contacto con metales, especialmente con cobre y en menor grado en los que contengan hierro, cobre, plomo y zinc. De forma general, los procedimientos y prácticas para el almacenamiento y la manipulación del diésel de petróleo se pueden utilizar para el biodiésel.

La estabilidad del biodiesel depende en gran medida de la fuente del AV, del tipo de proceso, tratamientos adicionales y de la mezcla con aditivos para mejorar la estabilidad final. El valor del número ácido del biodiesel es la propiedad que más rápido alcanza los valores máximos antes de que se presenten cambios en las otras propiedades. Para asegurar la calidad y estabilidad del producto durante el almacenamiento se debe establecer un programa de monitoreo, principalmente midiendo el valor de AGL del biodiesel.

Los niveles de contaminación del combustible se pueden reducir en tanques de almacenamiento mediante el drenado regular del agua libre, (el agua promueve la corrosión y crecimiento microbiológico que ocurre generalmente en la interfase agua-combustible). Se prefiere el almacenamiento isotérmico o bajo tierra para evitar extremos en la temperatura. Los tanques de almacenamiento sobre superficie deben ser pintados con pinturas reflectivas y deberán ser de materiales como aluminio, acero, polietileno fluorado, polipropileno fluorado y teflón, además de usar contenedores sellados para mantener un límite de oxígeno y así aumentar el tiempo de almacenamiento del biodiesel [NBB, 2007].

Mayor rentabilidad económica por la generación de subproductos

La producción de biodiésel genera una gran cantidad de glicerina como subproducto, del orden de 10 a 20 kg por cada 100 kg de EMAG, lo que supone del 10 al 20% del biodiésel producido. Una vez refinada, el principal consumidor de la glicerina es la industria farmacéutica y cosmética. En la actualidad, la glicerina se produce principalmente como producto en la industria oleoquímica (65%). De hecho, la glicerina constituye el subproducto más importante de esta industria, (aproximadamente el 10% de su producción total), lo que aumenta la rentabilidad de los procesos oleoquímicos. Aunque la glicerina puede aprovecharse como energético, resulta más ventajoso transformarla en productos de alto valor agregado, al producir derivados con aplicaciones en detergentes, aditivos alimenticios, cosméticos, lubricantes etc.

[Haas y col., 2006].

La producción de hidrógeno por reformado de la glicerina en fase acuosa, también se está investigando en la actualidad. Sin embargo, una de las alternativas más recientes, es la transformación de la glicerina en productos que puedan también sustituir parcialmente al diésel. En este contexto, la glicerina puede transformarse en dos tipos de productos diferentes: éteres de glicerina, a partir de su esterificación con olefinas ligeras; o ésteres de glicerina, a partir de su esterificación con ácidos carboxílicos y su transesterificación con ésteres [Demirbas, 2007].

3.7.3 Desventajas del uso de biodiésel

La principal desventaja plantea la situación de la seguridad alimenticia. A pesar de ser un combustible renovable representa también una cantidad alta de aceites comestibles vegetales destinados para su producción, en el caso de los ACD se deberá asumir como la principal alternativa en minimizar previamente la generación de estos desechos y que los remanentes sean destinados para la producción de biodiésel. De forma general sus desventajas técnicas son: menor potencia, poca estabilidad a la oxidación, genera problemas de corrosión al sistema de inyección, obstrucción de filtros del combustible, dilución del lubricante, depósitos y sedimentos en el motor.

Uno de los principales problemas para el uso del biodiésel son sus malas propiedades en frío, debido a su mayor punto de nube en comparación del diésel. El mayor punto de nube provoca problemas de arranque del motor en climas fríos, dificultando el bombeo del combustible y generando depósitos de carbón en el sistema de inyección y desgaste general del motor. El poder calorífico superior y la temperatura de inflamación también son menores, generando menor eficiencia energética durante su uso. Su poder calorífico superior es relativamente alto (39-41 MJ/kg), siendo superior al carbón (32-37 MJ/kg) pero ligeramente inferior a la gasolina base (46 MJ/kg) diésel (43 MJ/kg) y petróleo (42 MJ/kg), por lo tanto se necesitan motores de mayor presión en el pistón para que exploten con la chispa de la bujía, Por lo anterior, se emplean mezclas de biodiésel y diésel en los motores con el fin de evitar los problemas de disminución de potencia. En promedio la potencia del motor con biodiésel es menor en un 5% respecto al diésel a carga plena.

Su mayor viscosidad puede provocar pérdidas de flujo a través de los filtros e inyectores, si la atomización del combustible es alterado por el flujo provocara depósitos y dilución del lubricante. El mayor punto de nube provoca problemas de arranque del motor en climas fríos, dificultando el bombeo del combustible y generando depósitos de carbón en el sistema de inyección y desgaste general del motor.

Ambientalmente el biodiésel puro y sus mezclas aumentan las emisiones de NO_x en comparación con las emisiones de diésel utilizado en motores sin modificar. Presenta regular estabilidad oxidativa y su almacenamiento no es aconsejable por períodos superiores a 6 meses. Presenta características ligeramente solventes en plásticos, derivados del caucho natural y algunos metales, como el cobre, por lo que se debe sustituir las mangueras y algunas juntas del motor, además de limpieza periódica en los filtros de combustible. Teniendo en cuenta principalmente la seguridad alimenticia, mayor costo de producción y venta, en comparación al diésel comercial, se plantea aún como mejor alternativa y al corto plazo el uso del diésel [Demirbas, 2009].

Capítulo 4. Metodología

Este trabajo tiene como objetivo proponer una alternativa práctica para la disposición final del ACD proveniente de los establecimientos de comida dentro de CU mediante su uso como combustible en el transporte interno de la red escolar universitaria. Para llevarlo a cabo se hizo un estudio de disponibilidad y caracterización de la materia prima, obtención del producto en laboratorio y su posterior uso en el transporte. En el caso de la glicerina obtenida, será purificada y destinada a los laboratorios escolares.

4.1 Antecedentes para la obtención de biodiésel

Se sugiere que la producción del biodiésel en el laboratorio de Ingeniería Química sea parte de una práctica académica integrada al plan de estudio. De esta forma la recolección del ACD, la producción del biodiésel y la distribución al transporte se podrán realizar dentro de CU por parte de estudiantes de servicio social y de colaboración al proyecto. De tal forma se promueve la participación de la comunidad y dará mayor rentabilidad al proyecto por disminuir los costos operativos.

4.1.1 Recolección del ACD

Inicialmente se proveerá a cada establecimiento alimenticio donde se generen ACD mayor a 20 L/sem, 2 recipientes recolectores de plástico con capacidad de 15 L, mientras que para cada grupo de barras (escolar, exterior, cultural) se le proveerá de 2 contenedores compartidos, que serán ubicados en un área común para facilitar su acopio. Estos recipientes se recolectarán cada semana por estudiantes de servicio social y/o voluntarios, en el caso donde el ACD generado es menor a 20 L/sem la recolección se hará cada 15 días. Teniendo un total de 30 recipientes contenedores con capacidad de conjunta de 450 L. El ACD recolectado se llevará a la Facultad de Química donde será depositado en tanques cerrados para su posterior almacenamiento a condiciones ambientales y deberá ser procesado con máximo a 2 meses para evitar la descomposición del aceite.

Se muestra en la Tabla 4.1 los establecimientos alimenticios generadores del ACD que fueron considerados para la realización de este trabajo. En el caso de las barras fueron agrupadas en base a su ubicación dentro de CU para facilitar su análisis. Cabe mencionar que el único establecimiento alimenticio que no se considerado en este estudio fue la cafetería de la dirección General de Divulgación de la Ciencia que se encontraba en remodelación, por lo que la información fue indefinida.

Tabla 4.1 Cafeterías y barras alimenticias de Ciudad Universitaria.

Establecimiento alimenticio
Facultad de Medicina
Facultad de Química
Facultad de Arquitectura
Facultad de Filosofía y Letras
Facultad de Odontología
Coordinación de Difusión Cultural
Facultad de Economía
Facultad de Ingeniería
Torre de Ingeniería
Facultad de Diseño
Barras del circuito escolar
Barras del circuito exterior
Barras del circuito de investigación y cultural

4.1.2 Lugar de obtención de biodiésel

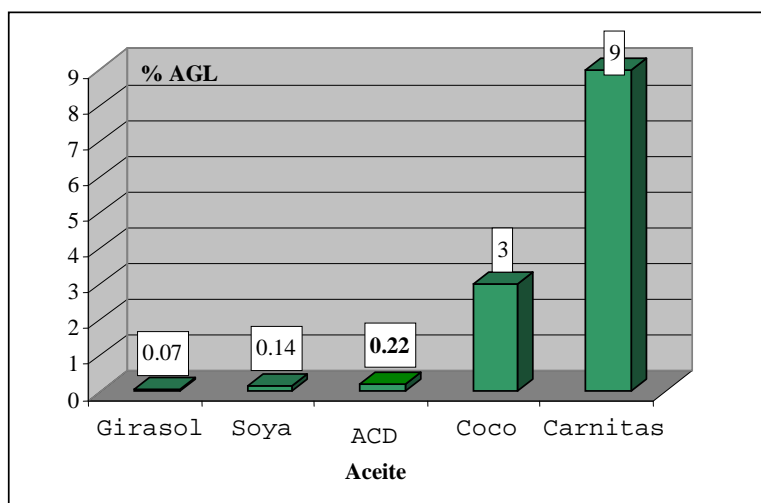
Se propone que el almacenamiento del ACD recolectado y del biodiésel obtenido, se haga en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química, ya que cuenta con las instalaciones y el soporte técnico requerido (equipo de laboratorio, servicios auxiliares, personal) mientras que los equipos de proceso serán adquiridos como plantas paquete.

4.1.3 Caracterización de la materia prima

La metodología y desarrollo experimental referida en este trabajo fue realizada en el laboratorio 222-D del anexo de la Facultad de Química con asesoría técnica de la Dra. Tatiana Klimova Berestneva, profesora del Departamento de Ingeniería Química en Facultad de Química. Para la información técnica, como la caracterización de la materia prima y del biodiésel se consultaron los estudios realizados previamente y reportados en la literatura [Aguirre y Rodríguez, 2009], a cargo de la Dra. Tatiana Klimova Berestneva.

El contenido de AGL en una muestra de aceite es un factor fundamental en la selección de la metodología para obtención de biodiésel. Aguirre y Rodríguez (2009) reportaron la caracterización de los ácidos grasos del ACD proveniente de Facultad de química que se describe en la Figura 4.1.

Figura 4.1 Porcentaje de ácidos grasos en diferentes tipos de aceites [A partir de Aguirre y Rodríguez, 2009]



Con una muestra representativa del ACD proveniente de la cafetería de Facultad de Química se realizó en el laboratorio la caracterización física del aceite mediante la medición de sus propiedades físicas

Se determinó la densidad mediante un picnómetro con aforo de 25 ml y una balanza analítica para pesar la muestra (ecuación 4-1). Asimismo la viscosidad del aceite con un viscosímetro Saybolt, obteniendo las mediciones en unidades SUS (segundos universales Saybolt) las cuáles fueron transformadas a unidades Stokes de viscosidad cinemática con ayuda de las tablas de conversión del estándar de ASTM D 2161-93. Por último se calculó la viscosidad absoluta en unidades de Poise (ecuación 4-2). Los resultados obtenidos de la caracterización de la muestra problema y su comparación con otros aceites reportados de la literatura se presentan en la Tabla 4.2.

Ecuaciones

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4-1)$$

$$\mu = \nu * \rho \quad (4-2)$$

Donde:

ν : viscosidad cinemática (mm²/s) ó cSt

ρ : densidad (g/cm³)

μ : viscosidad absoluta (g/cm s)

Tabla 4.2 Caracterización de la muestra problema y su comparación con otros aceites reportados en la literatura

Aceite	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)	Viscosidad absoluta (g/cm s)	% Ácidos grasos libres	Referencias bibliográficas
ACD común	0.924	36.4	0.336	1.32	Demirbas, 2009
Soya	1.13	40.8	0.461	-	Ramadhass y col., 2005
Semillas de caucho	1.14	58.1	0.6623	0.19	Ramadhass y col., 2005
Palma	0.88	44.2	0.389	0.08	Cheng y col., 2005
Muestra problema de ACD	0.9073	39.11	0.3548	0.22	Este trabajo

4.2 Metodología experimental

Se observa de la Tabla 4.2, que la cantidad de ácidos grasos de la muestra problema no es significativa, este parámetro es importante ya que el porcentaje de ácidos grasos en un aceite define la técnica a seguir para la producción de biodiésel. Se reporta en la literatura que la producción en 1 etapa se sugiere cuando la acidez es baja (transesterificación) y en 2 etapas cuando la acidez es mayor a 5% de AGL (esterificación – transesterificación) [Aguirre y Rodríguez, 2009].

A partir del estudio de los métodos para la obtención de biodiésel (Apartado 3.3), así como la caracterización de la materia prima (Apartado 4.1.3) y con apoyo de la literatura consultada [Aguirre y col., 2009], se selecciono la técnica de reacción por transesterificación directa vía catálisis alcalina en una etapa, para el desarrollo de este trabajo. Las condiciones de reacción resultantes del estudio de la literatura para el desarrollo experimental se muestran en la Tabla 4.3 [Aguirre y Rodríguez, 2009].

Tabla 4.3 Condiciones de reacción por transesterificación en laboratorio

Alcohol	Relación molar alcohol/aceite	Catalizador	% peso del catalizador	Temperatura	Tiempo	Presión
25 ml Metanol	1 : 6	KOH	1 aprox.	21°C	150 min.	Atmosférica

4.2.1 Logística de conversión

La cantidad de materia prima disponible (10,720 L/año) se trabajará en lotes de 44 L/día de ACD, obteniendo 37.5 L/día de biodiésel. El producto obtenido será almacenado para su posterior distribución

Los materiales y reactivos requeridos para la producción de biodiésel a escala de laboratorio se presentan a continuación.

Tabla 4.4 Materiales de laboratorio

1 vaso de precipitados de 500ml	1 soporte universal
4 vaso de precipitados de 100ml	1 anillo metálico
1 pipeta volumetrica de 1ml	2 pinzas de tres dedos
1 vidrio de reloj	2 agitadores magnéticos
2 probetas de 100 ml	1 termómetros
1 embudos de separación 200 ml	1 propipeta
1 embudo büchner	Papel ph
1 matraz kitazato de 100 ml	Papel filtro
1 parrilla de calentamiento y agitación	1 espátula

Reactivos

- a) ACD proporcionado por la cafetería de Facultad de Química
- b) Metanol con pureza del 99%, densidad de 0.7915 g/ml a 20 °C
- c) Hidróxido de potasio sólido (KOH) con pureza del 95%
- d) Metilato de potasio (disolución catalizadora)
- e) Agua destilada

4.3 Antecedentes para el uso de biodiésel

A nivel nacional, petróleos mexicanos (PEMEX) cuenta con amplia cobertura de instalaciones petroleras que operan en todo el país (6 refinерías, 38 plantas petroquímicas, 10 fraccionadoras, 12 procesadoras de gas, etc.). Entre varias de sus actividades se encuentra la producción de petrolíferos por refinación a partir del petróleo crudo, empleando para ellos diversos métodos como: destilación atmosférica, destilación al vacío, hidrodesulfuración, desintegración catalítica, reformación de naftas, entre otros. Pemex reporta que en el año 2008 se obtuvieron 2,792 Mbd de petróleo crudo, donde 1,307 Mbd se destinaron para petrolíferos provenientes de la refinación del petróleo (Tabla 4.5), mientras que el restante fue principalmente al sector petroquímico. Se reporta que al 1 de enero del 2009 PEMEX cuenta con 43,562.6 MMbpce de reservas totales de crudo, de las cuales 14,717.2 son probadas [PEMEX, 2009].

En la Figura 4.2 se presenta la distribución por refinería para el proceso del crudo y en la Tabla 4.5 se describe la producción de petrolíferos para el año 2008.

Figura 4.2 Proceso del crudo por refinería [PEMEX, 2009]

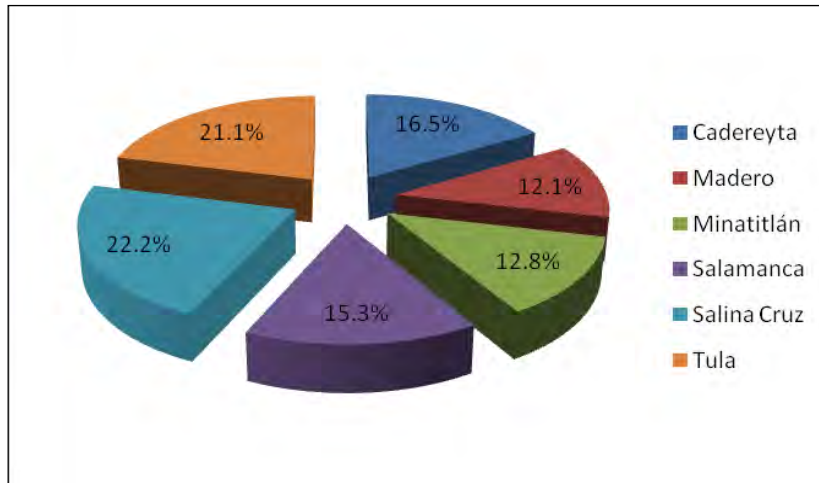


Tabla 4.5 Producción de petrolíferos a partir de la refinación del petróleo crudo [PEMEX, 2009]

Petrolífero	Mbd
Gas licuado	25.9
Gasolinas	
Nova/base	6.5
Pemex Magna	418.7
Pemex Premium	25.4
Otras	0.1
Turbosina	64
Diésel	
Pemex Diesel	336.1
Otros	7.4
Combustóleo	288.7
Asfaltos	34.3
Lubricantes	5.1
Parafinas	1
Gas Secos	54.9
Otros petrolíferos	38.8
Total de petrolíferos producidos	1307

Durante el año 2009 el diésel fue utilizado por el 80% del autotransporte público de carga y pasajeros en el país. A partir del mes de abril del 2009 el precio de este combustible aumentó y superó por primera vez a la gasolina Magna, la de mayor consumo por parte del parque vehicular y la cual tuvo solo un incremento de 16 centavos el 1 de enero de 2010, vendiéndose actualmente a 7.88 \$/L (con diferencial de precios de 36 centavos respecto al diésel), mientras que la gasolina Premium se vende a 9.57 \$/L [CANACAR, 2009]. Durante el presente año y en el transcurso del anterior, el precio del diésel comercial aumento 86 centavos, siendo un incremento de 11.65% durante ese periodo (Tabla 4.6). Con este aumento gradual los sectores más afectados son el transporte de carga y pasajeros, donde el 20% del total de sus costos operativos es por la compra del combustible, esta situación dificultará el mantenimiento del precio en sus tarifas y servicios. Además afectará las flotas pesqueras y agricultores, quienes utilizaban este combustible en sus motores por su competitividad de precio frente a otros combustibles, situación que actualmente se ha revertido.

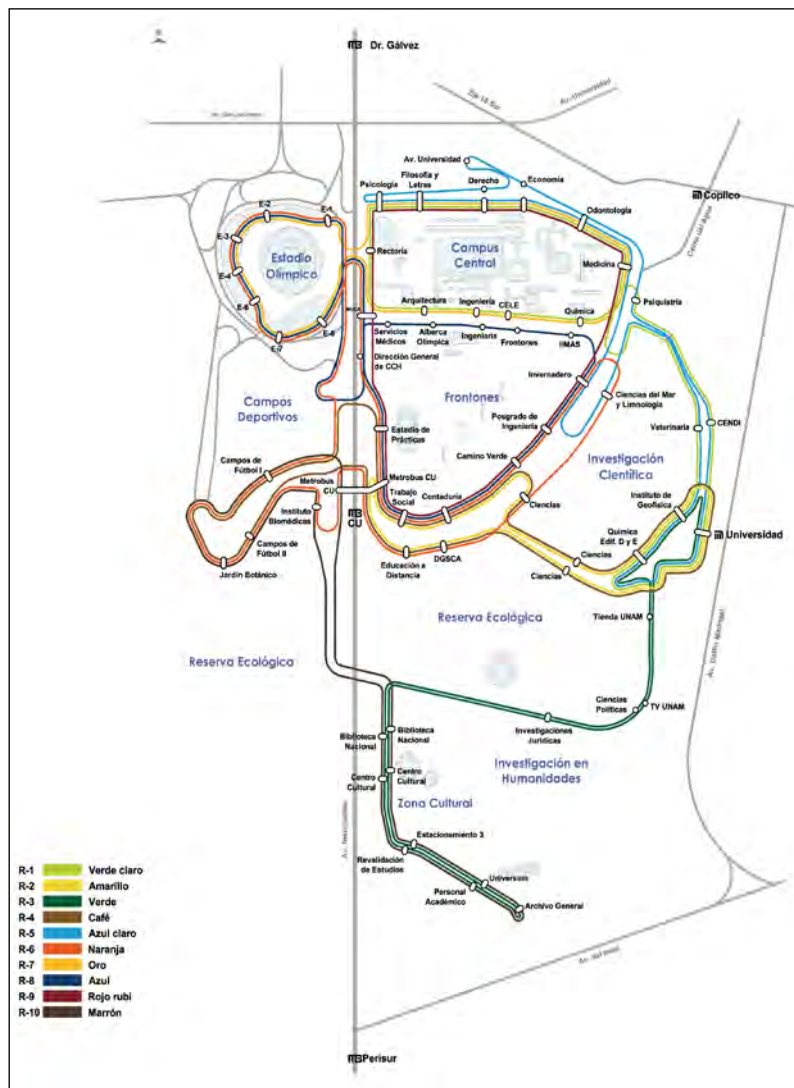
Tabla 4.6 Comportamiento del precio de diésel [CANACAR, 2009]

Periodo	Precio comercial (\$/L)	Periodo	Precio comercial (\$/L)
Diciembre 27 - 08	7.33	Abril 04 - 09	7.73
Enero 03 - 09	7.38	Mayo 01 - 09	7.78
Enero 09 - 09	7.43	Junio 06 - 09	7.83
Enero 17 - 09	7.48	Julio 04 - 09	7.88
Enero 24 - 09	7.53	Agosto 01 - 09	7.95
Febrero 01 - 09	7.58	Septiembre 04 - 09	8.03
Febrero 01 - 09	7.63	Octubre 04 - 09	8.10
Marzo 01 - 09	7.63	Noviembre 01 - 09	8.13
Marzo 07 - 09	7.68	Diciembre 19 - 09	8.16
Abril 01 - 09	7.68	Enero 01 - 10	8.24

La información de la red interna del transporte universitario empleada para el desarrollo de este trabajo fue proporcionada por la Secretaría General de Servicios Generales, área de transporte interno universitario a cargo de Agustín Valdez y Heberto Olivos. La red de transporte interno universitario “PUMABUS”, es un sistema que cuenta con autobuses urbanos marca Mercedes Benz modelo Torino tipo 1423, usan MD y con potencia de hasta 230 HP, son de servicio medio-pesado y se caracterizan por realizar recorridos cortos, paradas frecuentes y la ausencia de equipo e instalaciones para viajes a larga distancia.

Son autobuses con años de modelo desde 1995 a 2005 y operan bajo la normatividad americana EPA 04 para la regulación de emisiones contaminantes. En 2008 el PUMABUS aumento la flota vehicular a 61 unidades, manteniendo de 50 – 55 unidades circulando continuamente de lunes a viernes, según sea la demanda del servicio, fallas en transportes, mantenimiento, entre otras. Cubre 10 rutas establecidas con 2 paraderos principales (Figura 4.2), el paradero oriente, situado en la estación del metro Ciudad Universitaria, donde parten las rutas 1, 2, 3, 4 y 5, el paradero poniente, ubicado en el estacionamiento 1 del Estadio Olímpico Universitario para las rutas 6, 7 y 8, y un tercer punto con dos paraderos ubicados en ambas salidas de la nueva estación del MetroBús para las rutas 9 y 10.

Figura 4.2 Mapa de la red de transporte interno universitario



Desde el aumento de la flota vehicular, la universidad consume al año un estimado de 1,395,000 L/año de diésel por todas las unidades del transporte PUMABUS, siendo un gasto económico total por la compra del combustible durante el año anterior de 11.38 millones, en base al precio de cierre del año 2009 (8.16 \$/L de diésel).

4.4 Formulación de factibilidad económica

Para evaluar si un proyecto es aceptable o no, debe existir siempre una serie de criterios que ponderen su necesidad y su utilidad, esto debe producir una justificación de su pertinencia estratégica para la organización. De tal manera que la última prueba a la que se somete un proyecto de inversión dentro de una organización es la prueba económica, a este respecto y una vez aprobados los criterios de otros órdenes, deberá evaluarse el proyecto desde un punto de vista cuantitativo y en términos de dinero.

Existen varios principios de jerarquización que deben regir la decisión ante un proyecto de inversión cuando esta decisión solo descansa en los flujos, tanto de inversión como de ganancia:

- a) Preferir los proyectos con beneficios más elevados sobre los proyectos con beneficios más bajos.
- b) Preferir los proyectos con beneficios más rápidos sobre los proyectos con beneficios más lentos.
- c) Preferir los proyectos con beneficios más certeros sobre los proyectos con beneficios más inciertos.

Para la evaluación entre los distintos proyectos que se encuentren en competencia ante un inversionista o prestamista, existen los siguientes conceptos que son útiles para determinar los parámetros de comparación:

Punto de equilibrio (Pe)

Es el que se logra cuando los ingresos son iguales a los costos, es decir el inversionista no gana ni pierde. El margen de contribución representa la diferencia entre el precio y el costo variable.

$$Pe (\$/unidad) = \text{Costos fijos totales} / (\text{precio} - \text{Costos variables}) \quad (4-3)$$

Valor de rescate

Es el valor a la que se podría vender un bien (una máquina, un terreno o una marca), que fue parte de la inversión, que requirió un desembolso y que una vez que ha pasado determinado tiempo en la que el proyecto ha terminado, se puede recuperar alguna cantidad por ese bien, pero que ya no es necesario para el proyecto, a pesar de tener aún un valor de mercado.

Costo de oportunidad

Es el rendimiento a que se renuncia por poseerlo, en lugar de ahorrarlo o invertirlo. Si tenemos un millón de pesos y los bancos ofrecen 10 % de interés anual, el costo de oportunidad de mantener efectivo es de 100 pesos por año. Se sabe que cada inversionista tiene un costo de oportunidad diferente, así que para un inversionista puede significar 10 % para otro 15 % pues ha renunciado a un negocio que no necesariamente daba el mismo rendimiento.

Inflación (P_i)

Es un aumento generalizado de los precios, y se mide por la tasa de aumento del Índice Nacional de Precios (INP), en México el INP es medido por el Banco de México y se presenta básicamente de dos formas: al consumidor y al productor. El INPC (índice nacional de precios al consumidor) es un indicador de los precios de la canasta básica de bienes que compra un consumidor típico y se publica quincenalmente en el Diario Oficial de la Federación. Se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Inflación} = (\text{Índice final} / \text{índice Inicial}) * 100 \quad (4-4)$$

Hay que reconocer que la misma cantidad de dinero en tiempos distintos tiene valores distintos. Una de las formas de estimar el nuevo valor de un peso en el futuro, será a través de la comparación del interés que dará ese peso. El interés significa la renta que se paga por usar el dinero ajeno o bien la renta que se recibe por invertir el dinero propio.

Tasa de interés nominal (T_i)

El interés significa la renta que se paga por usar el dinero ajeno o bien la renta que se recibe por invertir el dinero propio. La tasa de interés nominal es fijada por el banco central del Estado en cada país y corresponde a la política macroeconómica del país (T_i) en términos de las cotizaciones presentadas por las instituciones de crédito. Existen varias formas de reconocer el interés en una inversión. La más sencilla es el interés simple, y es aquel que se paga sobre un préstamo o se gana sobre una inversión y que no se acumula sobre el principal (capital inicial). El cálculo es como sigue:

$$\text{Saldo final} = \text{Inversión inicial (capital)} + \text{Intereses Totales} \quad (4-5)$$

$$\text{Intereses totales} = (\text{Inversión inicial}) (\text{tasa de interés}) (\text{periodo de inversión}) \quad (4-6)$$

Una opción diferente el interés compuesto, en el cual el interés que es pagado sobre un préstamo o ganado sobre una inversión, se suma al capital en un primer periodo y consecuentemente, se gana intereses sobre intereses en los periodos subsecuentes (tasa real y efectiva). Las tasas efectivas referidas a mismos periodos de tiempo son las que nos permiten tomar una decisión final. Con el objetivo de conocer con precisión el valor del dinero en el tiempo es necesario que las tasas de interés nominal sean evaluadas como tasas reales y efectivas.

Tasa real (Tr)

Es la que se aplica a cada periodo de capitalización (t) y se obtiene dividiendo la tasa nominal entre el número de capitalizaciones que habrá durante la operación de un año, tal como se muestra.

$$T_r = \frac{T_i}{t} \tag{4-7}$$

Tasa efectiva (T_{ef})

Es la que realmente actúa sobre el capital de la operación financiera y que produciría el mismo interés que la tasa real, pero aplicándola una sola vez al inicio del período, cuando el tiempo de la operación es de un año. La capitalización del interés en determinado número de veces por año, da lugar a tasa efectiva mayor que la nominal y es el porcentaje que se aplica por un año al capital. Se calcula con la siguiente ecuación.

$$T_{ef} = \left(1 + \frac{T_i}{t}\right)^t - 1 \tag{4-8}$$

Flujo neto de efectivo (FNE)

Es la diferencia entre los ingresos y egresos netos, estudiado por cada periodo de pago de toda la operación financiera empezando en la fecha de aceptación de un proyecto y evaluando en términos de valor presente, esto significa tomar en cuenta el valor del dinero en función del tiempo.

$$\text{FNE} = \text{Ingresos totales} - \text{costos totales} \tag{4-9}$$

Valor presente neto (VPN).

Es la manera ordinaria en cómo se calcula el valor del dinero en el tiempo (surge de la manera de calcular el interés compuesto), esta ecuación si reconoce los intereses que se cobran sobre los intereses y trae al periodo cero los flujos netos de efectivo de la operación (FNE) para cada periodo de pago (n).

Permite determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero de maximizar la inversión. Buscando siempre que el VPN estimado sea positivo, lo que significará que el valor del proyecto tendrá un incremento durante toda la operación financiera. Si el resultado del VPN es cero no modificará el monto de su valor. El cálculo se hace de la siguiente manera.

$$VPN = \frac{FNE}{(1+T_i)^n} \quad (4-10)$$

Tasa interna de retorno (TIR).

La tasa interna de retorno es otra técnica para evaluar flujos netos de efectivo. Es la tasa que hace que el valor presente neto de un proyecto sea igual a cero. Supone, sin embargo, que todos los flujos del proyecto son reinvertidos a la misma tasa. Cuando el FNE no convencional, se obtendrán varias tasas de retorno El cálculo se hace de la siguiente manera.

$$TIR = \left[\left(\frac{FNE}{VP} \right) - 1 \right] * 100 \quad (4-11)$$

La heurística indica aceptar una inversión cuando la TIR es mayor que la tasa de interés ($TIR > T_i$), el rendimiento que obtendría el inversionista realizando la inversión es mayor que el que obtendría en la inversión alternativa, por lo tanto, conviene realizar la operación; si la TIR es menor que la tasa de interés ($TIR < T_i$), el proyecto debe rechazarse; cuando la TIR es igual a la tasa de interés ($TIR = T_i$), el inversionista es indiferente entre realizar la inversión o no.

Tiempo de recuperación de la inversión (TRI).

Se emplea en la metodología para comparar alternativas de inversión. Permite medir el plazo de tiempo requerido para que los flujos netos de efectivo acumulados en cada periodo de pago sean igual a la inversión inicial. Los FNE acumulados son empleados en términos de valor presente [Goviden, 2009]

$$TRI = (\text{Costos de inversión}) / (\text{Periodos de pago}) / \text{FNE acumulados} \quad (4-12)$$

Capítulo 5. Resultados

5.1 Cantidad de aceite comestible de desecho

Se realizó un estudio estadístico dentro de CU para determinar la cantidad de aceite de desecho generado en los diferentes establecimientos alimenticios (cafeterías y barras) durante el periodo escolar y vacacional semestre II-2009. Para tal efecto se cuantificó la cantidad de ACD mediante un muestreo probabilístico al 95 % de confianza para las cafeterías y barras estadísticamente más representativas y autorizadas por la Dirección General de Servicios Generales, área de servicios a cargo de Rubén C. Medrano. Las Tablas 5.1, 5.2, 5.3 muestran los resultados resumidos y clasificados de la marca comercial del aceite, la cantidad de aceite usado y de ACD generado.

Tabla 5.1 Aceites en cafeterías y barras durante el periodo escolar (32 semanas)

Establecimiento	Marca de aceite	Cantidad de aceite usado (L/sem)	Cantidad de ACD (L/sem)
Facultad de Medicina	Cristal, Member	16	11
Facultad de Química	Cristal	126	24
Facultad de Arquitectura	1-2-3	87	62
Facultad de Filosofía y Letras	Maravilla	76	16
Facultad de Odontología	Bidón	22	11
Coordinación de Difusión Cultural	Capullo	36	16
Facultad de Economía	1-2-3	48	22
Facultad de Ingeniería	1-2-3	56	31
Torre de Ingeniería	Capullo	14	7
Facultad de Diseño	Maravilla	46	21
Barras del circuito escolar	Aceites varios	25	17
Barras del circuito exterior	Aceites varios	33	26
Barras del circuito de investigación y cultural	Aceites varios	19	13
Total	Varios	522	277

Tabla 5.2 Aceites en cafeterías y barras durante periodo vacacional (16 semanas)

Establecimiento	Marca de aceite	Cantidad de aceite usado (L/sem)	Cantidad de ACD (L/sem)
Facultad de Medicina	Cristal, Member	10	7
Facultad de Química	Cristal	58	16
Facultad de Arquitectura	1-2-3	59	24
Facultad de Filosofía y Letras	Maravilla	39	17
Facultad de Odontología	Bidón	12	6
Coordinación de Difusión Cultural	Capullo	0	0
Facultad de Economía	Maravilla	0	0
Facultad de Ingeniería	1-2-3	0	0
Torre de Ingeniería	Capullo	10	4
Facultad de Diseño	Maravilla	28	14
Barras del circuito escolar	Aceites varios	17	13
Barras del circuito exterior	Aceites varios	20	5
Barras del circuito de investigación y cultural	Aceites varios	0	0
Total	Varios	253	116

Tabla 5.3. Total de aceites en cafeterías y barras durante el periodo II-2009

Establecimiento	Marca de aceite	Cantidad de aceite usado (L/año)	Cantidad de ACD (L/año)	Porcentaje de desecho
Facultad de Medicina	Cristal, Member	672	464	70
Facultad de Química	Cristal	4,960	1,024	20.6
Facultad de Arquitectura	1-2-3	3,728	2,368	63.5
Facultad de Filosofía y Letras	Maravilla	3,056	784	25.6
Facultad de Odontología	Bidón	896	448	50
Coordinación de Difusión Cultural	Capullo	1,152	512	44.4
Facultad de Economía	Maravilla	1,536	704	45.8
Facultad de Ingeniería	1-2-3	1,792	992	55.4
Torre de Ingeniería	Capullo	608	288	47.4
Facultad de Diseño	Maravilla	1,920	896	46.7
Barras del circuito escolar	Aceites varios	1,072	752	70.1
Barras del circuito exterior	Aceites varios	1,376	1,072	77.9
Barras del circuito de investigación y cultural	Aceites varios	608	416	68.4

De los datos anteriores se puede concluir que anualmente las cafeterías son quienes usan más aceite a diferencia de las barras, 88% y 12% respectivamente. De la misma forma ocurre para los ACD, donde las cafeterías aportan un 79% y 21% de las barras.

La Tabla 5.4 indica el total de aceite usado y generado por los establecimientos alimenticios universitarios.

Tabla 5.4 Total anual de aceites

Aceite usado L/año	ACD L/año	Porcentaje de desecho
23,336	10,720	45.9

Se debe considerar que la cantidad del aceite de desecho que resulta en la mayoría de las barras como establecimiento individual es baja (poco mayor a 2 L/semana), resultando poco práctico hacer su recolección, además de que en algunos establecimientos no se cuenta con total colaboración por parte de los trabajadores para llevarlo a cabo. Por tal motivo los datos estadísticos finales se emplearon con un estimado de disponibilidad del total del 95%, obteniendo la cantidad real de materia prima disponible proveniente de las cafeterías y barras alimenticias que se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Materia prima disponible

ACD L/año	Aceite de desecho kg/año
10,720	9,726.3

5.2 Obtención de biodiésel en laboratorio a partir de ACD

Con el objetivo de evaluar la conversión de la reacción mediante la técnica propuesta, se procesó en el laboratorio un lote de 100 ml de ACD proveniente de la cafetería de Facultad de Química en base a las condiciones mostradas en la Tabla 4.3.

5.2.1 Desarrollo experimental

Se describe a continuación el desarrollo experimental empleado:

1. Pretratamiento

Se acondicionó el ACD por filtración al vacío para la remoción de sólidos suspendidos y partículas de mayor tamaño, mediante un matraz Kitazato y embudo Büchner.

2. Preparación de la disolución catalizadora

Se preparó una disolución con 25 ml de metanol y 1.2761 g de KOH. La reacción de metanol con KOH es tóxica y exotérmica. Se mezcló por 1 hora y se dejó reaccionar totalmente antes de emplearse como catalizador para la reacción de transesterificación.

3. Reacción de transesterificación por catálisis alcalina

Se agregó la disolución catalizadora a 100 ml del ACD en un reactor con agitación constante y se dejó reaccionar de acuerdo a las condiciones de la Tabla 4.3. Transcurrido ese tiempo la reacción se dejó reposar en un embudo de separación por 24 horas.

4. Separación de productos

Transcurrido este tiempo se observó la formación de 2 fases, la superior tuvo un color amarillo pajizo que corresponde a la fase orgánica donde se encuentra principalmente el biodiésel y otras sustancias, mientras que la fase acuosa con glicerina de color marrón y mayor viscosidad se ubicó al fondo del recipiente. Se procedió a separar las fases por decantación y así obtener los productos para ser purificados.

5. Lavado por agitación del biodiésel

El biodiésel producido debe ser lavado porque después de la separación aún quedan algunos subproductos en la fase orgánica (jabón, KOH, glicerina y metanol) que son contaminantes para motores, más otros productos intermedios como mono y diglicéridos que actúan como emulsionantes. El biodiésel de buena calidad se separa del agua de lavado rápidamente, siendo la separación es en sí, una prueba de calidad.

Experimentalmente se empleó 1/3 de agua por el total de biodiésel para cada lavado, mezclando todo y agitando hasta que presentó un aspecto homogéneo, se dejó reposar para la separación de fases y se retiró el agua por decantación, se repitió el procedimiento 3 veces que fue cuando el agua de lavado resultó con pH de 7.

6. Purificación de biodiésel

Después del lavado el biodiésel aun tiene un aspecto turbio ya que contiene algunas burbujas en suspensión, para secar el biodiésel se empleó malla molecular A3 como absorbente y obtener el producto final (Figura 5.1).

7. Purificación de la glicerina

La glicerina obtenida en la fase acuosa (Figura 5.2) proveniente de la separación de productos, se colocó en un recipiente con carbón activado para ser purificada, eliminando colores y olores indeseables en el subproducto final.

Un inconveniente en el proceso de obtención de biodiésel es la cantidad de efluente de desecho generada (5,000 L/año de agua), esta cantidad de agua gastada es excesiva. Por tal motivo, resulta una buena alternativa reemplazarla por resinas poliméricas para remover mediante adsorción todos los contaminantes durante la purificación de los productos. De la literatura reportada se encontró que la resina Amberlite BD 10 dry [Rohm y Haas, 2007] purifica de 900 a 1,600 kg de biodiésel con un flujo de contacto de 3 L/h de biodiésel por kg de resina, en un tiempo de recambio fijado típicamente de hasta 1 año, estas resinas no contaminan el combustible ni tampoco consumen agua por ser un lavado en seco. Siendo así, un proceso de purificación sin residuos tóxicos.

Figura 5.1 Biodiésel puro



Figura 5.2 Glicerina impura



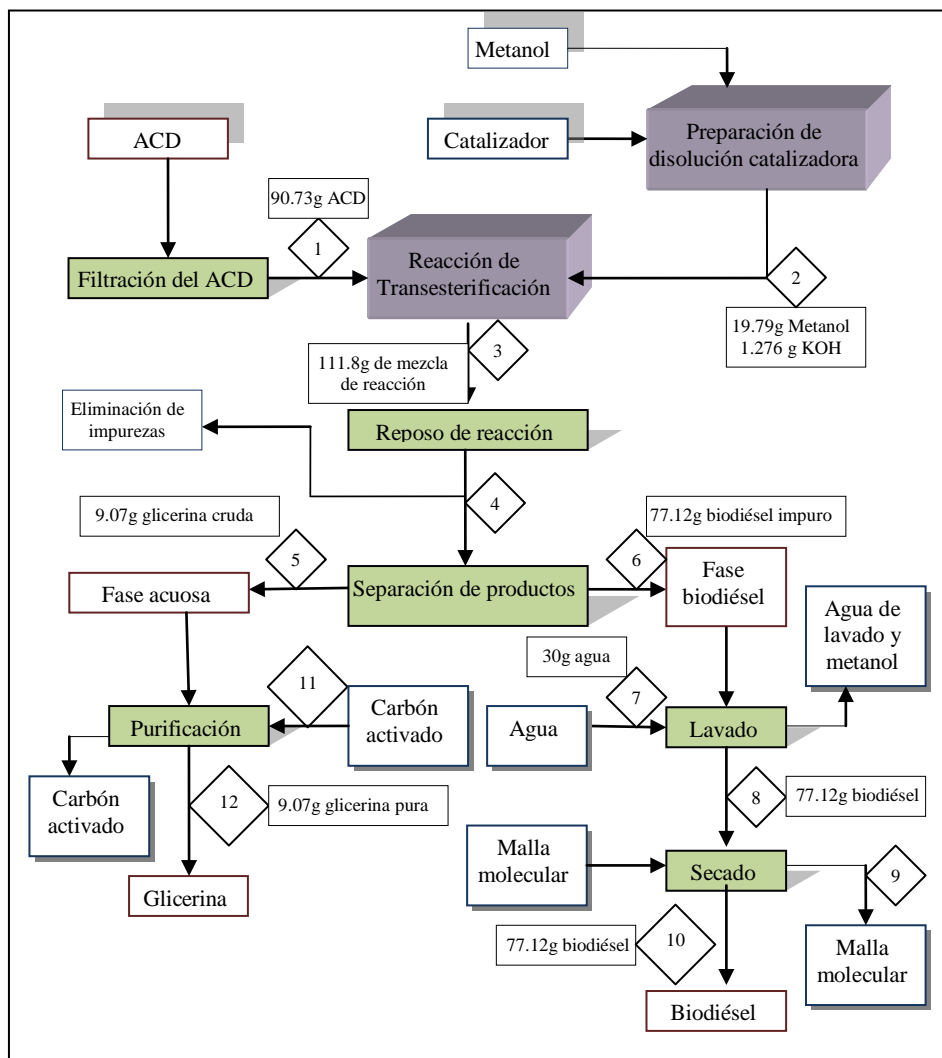
En la Tabla 5.6 se muestra el balance de materia obtenido del desarrollo experimental en el laboratorio, especificando la sustancia y su respectiva corriente de proceso. La Figura 5.3 describe el balance de materia y el diagrama de flujo de proceso seguido durante el proceso.

Tabla 5.6 Balance de materia para producción de biodiésel a partir de 100 ml de ACD

Sustancia	Corriente de proceso					
	1	2	3	4	5	6
ACD	90.73	0	90.73	0	0	0
Metanol	0	19.79	19.79	0	0	0
Biodiésel	0	0	0	0	0	77.12
Glicerina	0	0	0	0	9.07	0
Agua	0	0	0	0	0	0
Otros			1.276	25.61		
Total	90.73	19.79	111.8	25.61	9.07	77.12

Corriente de proceso					
7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	77.12	0	77.12	0	0
0	0	0	0	0	9.07
30	0	0	9	0	0
30	0	0	9	0	0
30	77.12	0	77.12	0	9.07

Figura 5.3 Diagrama de flujo de proceso y balance de materia



5.2.2 Caracterización del producto

De igual forma que se hizo con la muestra problema de ACD, se consultó de la literatura [Aguirre y Rodríguez, 2009] la caracterización de los EMAG del biodiésel producido a partir del ACD de la cafetería de Facultad de Química (Figura 5.4). La fuente se compone principalmente de AG insaturados (16 – 18 C) como metil linoleato, metil oleato, metil palmitato con 49%, 20% 7% respectivamente, siendo un producto con pureza del 98 % que cumple con la norma de calidad ASTM D 6751. Se determinó la caracterización física del producto, además de medir el poder calorífico superior mediante un calorímetro. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.7, mientras que en la Tabla 5.8 se muestra la comparación de otros tipos de biodiésel reportados en la literatura.

Figura 5.4 Caracterización de los ésteres metílicos del biodiésel

[A partir de Aguirre y Rodríguez., 2009]

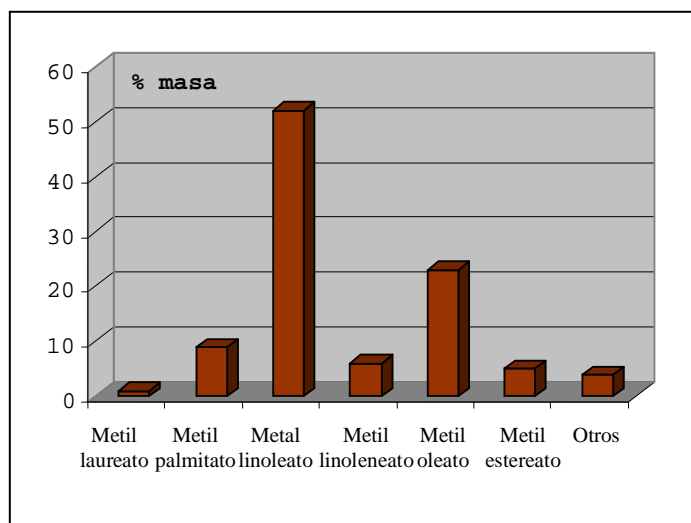


Tabla 5.7 Caracterización del producto obtenido

Producto	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)	Viscosidad absoluta (g/m s)	% Ácidos grasos libres	PC (MJ/kg)
Biodiésel	0.8677	3.65	3.17	0.2	40.08

Tabla 5.8 Comparación con tipos de biodiésel [Shay y col., 1993]

Combustible	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)	Viscosidad absoluta (g/m s)	% Ácidos grasos	PC (MJ/kg)
Biodiésel de ACD	0.897	5..3	0.047	0.1	42.65
Diésel comercial	0.075 – 0.84	1.9 – 4.1	1.4x10 ⁻⁴ – 0.034	-	44.62 - 46.48

Se obtuvo un producto de buena calidad por estar dentro de los parámetros que establece la norma ASTM D 6751 y EN 14214 para producción de biodiésel B100 y que puede ser usado en mezclas con diésel comercial en base a la norma ASTM D 7467-08. Se muestran a continuación los mismos parámetros de calidad para biodiésel de la norma ASTM D 6751.

- Viscosidad cinemática a 40°C: 1.9 – 6.0 mm²/s (ASTM D 445)
- Ácido grasos libres: 0.5 mg KOH/g (ASTM D 664)
- Densidad: 0.86 a 0.9 g/cm³ (ASTM D 405214214)
- Poder calorífico superior 45.62 – 46.48 (ASTM D 240)

5.3 Uso del biodiésel en el transporte para el caso de estudio

Para propósito de este trabajo se identifico a la ruta 2 de la red de transporte universitario como una alternativa para uso del biodiésel producido. Consta de 5 unidades de servicio y es una ruta de bajo consumo de combustible con el 8.4% del total de diésel consumido por toda la red de transporte. Cada unidad circula un aproximado de 45 vueltas por día y cubre una distancia de 4.2 km, resultando en 189 km de distancia recorrida diariamente y de 46,872 km durante todo el periodo laboral de la ruta que es de 248 días al año. Según datos técnicos y de funcionamiento en los camiones, el rendimiento del combustible en el motor a carga plena es de 0.5 L/km. De lo anterior se calcula un total de 117,180 L/año de diésel consumido (97,552.5 kg/año), representando un gasto económico de 191,238 \$/año en combustible por todas las unidad de transporte en el transcurso del año anterior. Los resultados resumidos se muestran en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Características de la ruta 2 del PUMABUS

Ruta 2	Por unidad de transporte	Por todas las unidades
Distancia recorrida (km/año)	46,872	234,360
Diésel consumido (L/año)	23,436	117,180
Costo por diésel (\$/año)	191,238	956,189

En base a los resultados obtenidos para el caso de estudio, se diseñó la estrategia y logística para las actividades asociadas al uso del biodiésel a partir de ACD que se presentan a continuación.

5.3.1 Almacenamiento

El almacenamiento será en tanques contenedores de polietileno de pintura reflejante, capacidad de 50 L y con válvula de muestreo. Necesitando un total de 20 tanques con capacidad conjunta de 1000 L, en estos también será almacenado el ACD. El biodiésel será acondicionado mediante la adición de biocidas para evitar la contaminación microbiológica y aumentar su estabilidad oxidativa.

Posteriormente serán trasladados al almacén de la Facultad de Química y puestos en condiciones de temperatura controlada, sin exposición a la luz y humedad ambiental durante un periodo no mayor a 2 meses, además el inventario no deberá sobrepasar los 600 L de biodiésel por cuestiones de seguridad). Para la disminución de los contaminantes y el mejoramiento de la calidad, se establecerá un programa de monitoreo durante el almacenamiento donde el biodiesel (B100) será muestreado periódicamente para determinar su calidad mediante el estudio en la variación de sus propiedades (principalmente número ácido). En la evaluación se debe incluir una muestra del fondo de los tanques de almacenamiento, así como muestras de todos los niveles, tal como se define en la práctica ASTM D 4057.

Como se sabe, los contaminantes y productos derivados de la degradación oxidativa se depositarán al fondo de los tanques, aumentando el detrimento del biodiesel (aumento del valor ácido), por tal motivo y para disminuir los niveles de contaminación del combustible se drenarán los tanques de forma regular.

5.3.2 Distribución

Trascurrido 1 mes de almacenamiento en Facultad de Química, el biodiésel será trasladado por camiones de servicio a la central del transporte PUMABUS, donde se procederá a realizar la mezcla B10 para usarse como producto final. El B10 será usado o reemplazando por lotes nuevos en intervalos de 2 meses para asegurar el buen funcionamiento en los motores.

5.4 Resultados de factibilidad para el caso de estudio

5.4.1 Factibilidad técnica

Del balance de materia para la obtención del biodiésel en el laboratorio mediante la técnica propuesta, se observa que empleando inicialmente 90.73 g de ACD (100 ml) como materia prima se obtuvieron 77.12 g de biodiésel como producto, con rendimiento de reacción aproximado al 85%, además de 9.73 g de glicerina como subproducto con rendimiento del 10% (Apartado 5.2). Tales resultados representan para ambos productos una buena conversión a nivel de laboratorio y que pueden ser todavía optimizados para producción a mayor escala. En este contexto y aplicado al caso de estudio para la materia prima disponible en CU donde se cuenta con 9,726.3 kg/año (10,720 /año) de ACD se estimó la cantidad de biodiésel y glicerina a producir por la técnica de reacción propuesta que se muestra en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10 Conversión de la materia prima a productos.

Materia prima (kg/año)	Reactivos (kg/año)	Conversión de reacción	Productos (kg/año)
ACD 9,726.3	Metanol	85%	Biodiésel
	2236		8,267
	KOH	10%	Glicerina
	144.2		973

Para el biodiésel obtenido se identifico a la ruta 2 de la red de transporte interno como la mejor alternativa para el uso del biocombustible, empleándose en mezcla del tipo B10 y bajo las especificaciones que establece la norma ASTM D 7467-08 para transportes de MD. La cantidad de biodiésel a obtener, así como el tipo de mezcla, permitirá cubrir la demanda a 4 unidades de la ruta 2 y teniendo un excedente de producción de 133 kg/año que permitirá la flexibilidad de todo el ciclo productivo. La baja concentración de la mezcla de biodiésel disminuye el riesgo a problemas posteriores en el funcionamiento del motor.

Se muestra en las Tablas 5.11 y 5.12 los resultados obtenidos para el uso del biodiésel en el caso de estudio por unidad de transporte y por el total de unidades a

Tabla 5.11 Uso de biodiésel B10 por unidad de transporte de la ruta 2

Diésel empleado actualmente (L/año)	B10 a emplear (L/año)	B10 a emplear (kg/año)
23,436	2,343.6	2,033.5

Tabla 5.12 Uso total del biodiésel para 4 unidades de transporte de la ruta 2

Diésel empleado actualmente (L/año)	B10 total a emplear (L/año)	B10 total a emplear (kg/año)	B10 excedente (kg/año)
93,744	9,374.4	8,134	133 kg/año

De los datos mostrados en el apartado 4.3, se observa que la producción nacional en el 2008 de petrolíferos fue de 1,307 Mbd, de los cuales 343.5 Mbd (1.993×10^{10} L/año) fueron de diésel. Al realizar la comparación a nivel nacional de los resultados obtenidos para la factibilidad técnica, se encuentra que de emplearse mezclas B10 en el transporte público de carga y pasajeros de MD, la cantidad de biodiésel de reemplazo sería de 34.35 Mbd (1.993×10^9 L/año) y que para una conversión del 85% por reacción de transesterificación serian requeridos 2.345×10^9 L/año de ACD a recolectar para poder cumplir con la demanda actual de combustible de los transportes en el país.

5.4.2 Factibilidad ambiental

El efecto de un combustible en la salud humana es un criterio determinante para su empleo comercial. Se mide en términos de toxicidad del producto para el cuerpo humano y el impacto en la salud a causa de las emisiones contaminantes. En México la norma NOM-050—SEMARNAT-1993 establece los niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación.

Durante la combustión del biodiésel en MD, las emisiones de varios contaminantes como: COV, PF, CO, CO₂, SO_x disminuyen tanto como aumenta la concentración del biodiésel en la mezcla, excepto para el NO_x donde aumentan sus emisiones. Tal como reporto CIEMAT (2008), la producción y uso de la mezcla de biodiésel al 10 % con diésel permite ahorrar 14.4 g de emisiones de GEI por km recorrido en un vehículo con motor diésel, o lo que es lo mismo 1.89 MJ/km de energía provista por el combustible, en comparación con la producción y uso de diésel.

Aplicado al caso de estudio donde se espera reemplazar 9,374.4 L/año de diésel, se determino una disminución neta de emisiones contaminantes de 269,982.72 g/año de GEI totales evitados, resultando en un ahorro aproximado de 10% de emisiones contaminantes por unidad. Las emisiones contaminantes evitadas en términos de CO₂ eq de los principales GEI generados se muestran en la Tabla 5.13.

El uso de biodiésel en el transporte como mezcla B10, aporta una alternativa de biocombustible limpio al disminuir en general las emisiones de contaminantes a la atmósfera, mejorando la calidad de aire dentro de CU y brindando bienestar general a la comunidad.

Tabla 5.13 Emisiones contaminantes evitadas en términos de CO₂eq

CO ₂	NO _x	CH ₄	Otros
168,469.2	9,749,616	170,737	13,290,349.4

5.4.3 Factibilidad económica

Partiendo de los estudios realizados y reportados en la literatura [Zhang y col., 2003] presentados en el Apartado 3.5 se realizó el estudio de factibilidad económica para todo el ciclo de vida del producto, que abarca desde la recolección de la materia prima, producción de biodiésel en laboratorio mediante la técnica propuesta, almacenamiento y distribución.

Los costos directos (recolección de la materia prima, costos por laboratorio, costos operativos y de supervisión, patentes y regalías) correspondieron al 69.8% de los costos totales de producción. Los costos indirectos (impuestos, seguros) y los gastos generales (administrativos, investigación y desarrollo) serán disminuidos y para algunas actividades prescindidos por ser un proyecto académico que sugiere el desarrollo del proyecto a cargo de profesores y estudiantes de la Facultad de Química y de la universidad en general.

Para la evaluación económica se utilizó el precio a la venta de biodiésel de 8.24 \$/L y que es igual al precio del diésel empleado actualmente en los transportes, además de 19.8 \$/L para la glicerina. Se consideró un periodo de operación financiera de 5 años a periodo contable anual y con tasa de capitalizaciones semestrales. El uso del biodiésel B10 en 4 unidades de la ruta 2 del PUMABUS en reemplazo del diésel consumido actualmente (9,374.4 L/año) corresponde a 77,245 \$/año que es el capital ganado del proyecto. La inversión del proyecto (Tabla 5.14) se hará únicamente en el periodo cero de la operación financiera y consiste principalmente en la compra del equipo de proceso (94% del total), 30 recipientes de recolección del ACD y de 20 tanques de almacenamiento para el biodiésel.

Tabla 5.14 Inversión

Inversión (C_{INV})	(\$x10 ³ /año)
Equipo de proceso (C_{EP})	95
Contenedores de recolección del ACD	5
Tanques de almacenamiento del biodiésel	7
Total	107

Para el equipo de proceso se tiene como proveedor a ASIA, S.L (Figura 5.5) que cuentan con una pequeña planta paquete construida en acero inoxidable AISI 316, compuesta de lo siguiente: reactor principal para transesterificación con capacidad de 100 litros, paredes de 5 mm de espesor, agitador con motor regulador mediante variador de frecuencia, cono inferior para decantar y un visor de fases, tobera para conectar los vapores de destilación entre reactor y condensador de tubos refrigerado por agua, depósito de recogida de líquidos destilados, sonda pT 100 con pantalla de LCD para regular y controlar el proceso, tablero y resto de equipos eléctricos ATEX 100, pHmetro Mettler Toledo para regular pH durante la transesterificación y neutralización. Separa por decantación la glicerina, fosfato potásico resultante de la neutralización, destilación del metanol excedente, lavado del biodiesel y desecación al vacío. El biodiesel obtenido con ésta tecnología, contendrá un mínimo del 95% de ésteres metílicos.

Figura 5.5 Equipo de proceso sugerido [ASIA, S.L., 2009]



Los costos directos de producción (C_T) consistieron en la recolección del ACD, los reactivos para el proceso químico (2.36 \$/kg para metanol y 52.4 \$/kg para KOH) y el costo de mantenimiento y reparación que se obtuvo con el 5% del costo del equipo de proceso ($0.05 * C_{EP}$).

Para los costos indirectos como el almacenamiento y distribución el cálculo fue con el 60% de la suma de los costos operativos, mantenimiento, supervisión y trabajo de oficina. Por último la depreciación fue del 4% del equipo de proceso, resultante de una baja tasa de interés ($0.04 * C_{EP}$). La Tabla 5.15 presenta los resultados obtenidos para los costos de producción y la Tabla 5.16 los ingresos totales, que consisten en la venta del biodiésel y glicerina al precio del cierre del 2009.

Tabla 5.15 Costos totales de producción

Costo directos	(\$x10³/año)
Recolección de materia prima	20
Metanol	5.27
KOH	7.56
Mantenimiento y reparación	10
Servicios auxiliares	8
Total	50.83
Costos indirectos	
Almacenamiento y distribución	6
Gastos generales	
Administrativos	8
Depreciación	
	8
Total	72.83

Tabla 5.16 Ingresos totales por venta de los productos

Ingresos totales (I_T)	(\$x10³/año)
Biodiésel	77.245
Glicerina	15.29
Total	92.535

Banxico (2010) reporta una inflación de 3.56% y tasa de interés nominal del 4.3% durante el inicio del año. Para el cálculo de todos los resultados económicos se empleó una tasa efectiva del 4.37 % que se muestra a continuación.

$$T_i = 4.3 \%$$

$$T_r = (0.043/6) * 100 = 0.726 \% \quad (4-7)$$

$$T_{ef} = \{[1 + (0.043/6)]^6 - 1\} * 100 = 4.37 \% \quad (4-8)$$

A partir de los ingresos provenientes por la venta del biodiésel y glicerina, se calculó el FNE, VPN y la TIR para el periodo contable del año 1 que se muestran en la Tabla 5.17. La Tabla 5.18 muestra los resultados económicos para los 5 periodos contables de la operación financiera y considerando un aumento gradual del 5 % en los próximos años en el precio del diésel.

$$FNE = (I_T - C_T) = 92.535 - 72.83 = 19.705 \text{ \$/año} \quad (4-9)$$

$$VP = FNE / (1 + T_{ef})^1 = 19.705/(1+0.0437)^1 = 18.88 \text{ \$/año} \quad (4-10)$$

$$TIR = [(FNE/VP) - 1] * 100 = [(19.705/18.88) - 1] * 100 = 4.37 \% \quad (4-11)$$

Tabla 5.17 Resumen económico para el periodo del año 1.

	(\$x10 ³ /año)
Ingresos totales (I_T)	92.535
Costos totales (C_T)	72.83
FNE	19.705
VP	18.88
TIR	4.37 %

Tabla 5.18 Resultados económicos para 5 periodos de pago

(\$x10 ³ /año)	Periodo de pago					
	0	1	2	3	4	5
Gastos	212	72.83	72.83	72.83	72.83	72.83
Ingresos	0	92.535	96.4	100.45	104.71	109.18
FNE	-107	19.705	23.57	27.62	31.88	36.352
VP	-107	18.88	21.64	24.29	27.81	29.35
TIR (%)	-	4.37 %	8.92 %	13.71 %	14.635 %	23.86 %

Cálculo realizado para obtener los parámetros económicos finales del proyecto para un periodo de operación financiera de 5 años. En la Tabla 5.19 se da el resumen económico final.

$$VPN = -107 + 18.88 + 21.64 + 24.29 + 27.81 + 29.35 = 14.97 \text{ \$/año}$$

$$TIR = 29.35 \%$$

$$TRI = (107) (5 \text{ años}) / 121.97 = 4.4 \text{ años} \tag{4-12}$$

Tabla 5.19 Resumen económico final.

Inversión (C_{INV})	107 (\$x10 ³ /año)
VPN	14.97 (\$x10 ³ /año)
TIR	29.35 %
TRI	4.4 años

Capítulo 6. Conclusiones

Del estudio de factibilidad técnica se concluye que la cantidad de ACD generado en los establecimientos alimenticios de CU y su conversión a biodiésel mediante la técnica de reacción propuesta, se obtendrían 8,267 kg/año de biodiésel, permitiendo reemplazar la demanda actual de 8,134 kg/año de diésel de 4 unidades de transporte de la ruta 2 del PUMABUS, al ser utilizado en mezclas del tipo B10.

Ambientalmente representa un ahorro de emisiones totales de GEI de 269,982.72 g/año por las 4 unidades de transporte donde será implementado, resultando en un ahorro aproximado de 10% de emisiones contaminantes por cada unidad en comparación al diésel.

Económicamente y para un periodo a 5 años, generará utilidades de 36,352 \$/año, tasa de retorno del 23.86 % y con un tiempo de recuperación de la inversión de 4.4 años para una inversión de 107,000 \$. Se concluye que el proyecto es viable porque que el valor de la tasa interna de retorno para el año 1 es mayor que la tasa efectiva, ($TIR = 13.1 \% > (T_{ef} = 4.37 \%)$) además de un confiable beneficio al corto plazo para el desarrollo del proyecto. Por último, la conversión del 10% de glicerina como el principal subproducto de la reacción de transesterificación ofrece un doble beneficio, primero al dar una mayor rentabilidad económica al proceso por su comercialización y segundo si así se desea, por ser una alternativa para cerrar el ciclo de producción y convertir la glicerina cruda también en biocombustible.

El presente trabajo se efectuó con el objetivo de establecer los antecedentes en la implementación de nuevas tecnologías limpias y sustentables en CU a partir de la solución práctica de problemas ambientales comunes dentro de la universidad. Siendo para este caso, el aprovechamiento de los desechos alimenticios generados y su utilización final como combustible en el transporte. Con esto se buscará fomentar la participación estudiantil y académica para la generación y aplicación de conocimientos en beneficio a la comunidad. Será responsabilidad de la Universidad evaluar y disponer de la mejor manera la información aquí presentada para su posible ejecución del proyecto al corto o largo plazo.

Referencias bibliográficas

Aguirre, O. y Rodríguez, O. 2009. Estudio de reacciones catalíticas importantes en la producción de biodiésel. Tesis de licenciatura de Ingeniería Química. Facultad de Química, Ciudad Universitaria, UNAM. D.F., México.

AHA, 2009. Diccionario de nutrición. Publicación de la American Heart Association. Texas, EEUUA.

ANIAME, 2003. Globalización del mercado de aceites, grasas y proteínas, caso México. Publicado por la Asociación Nacional de la Industria de Aceites y Mantecas Comestibles. D.F. México.

ASTM, 2009. Anual book of standards. Publicado por la American Society for Testing Materials. EEUUA.

Banxico, 2010. Información estadística de indicadores económicos. Publicado por el Banco de México. D.F., México

Billaud, F. y Archambault, D. 1998. Non alimentary rapeseed oil upgrading: a parametric study of methyl oleate pyrolysis. *Industrial Crops and Products*. 7(2-3):329-334.

Brennan, J. 1998. Las operaciones de la ingeniería de los alimentos. Editado por Acibia, 3ª Edición. Pág. 257-258. España.

CANACAR, 2009. Variación del precio de biodiésel. Publicado por la Cámara Nacional de Autotransportes de Carga. D.F., México.

Canan, K., Candan, H., Akin, B. y Sait, E. 2008. Methyl Ester peanut seed oil as a potencial feedstock for biodiésel production. *Renewable Energy*. 34(5):1257–1260.

Cardone M., Prati M., Rocco V. y Senatore A. 1998. Experimental analysis of performances and emissions of a diesel engines fuelled with biodiesel and diesel oil blends. *Energy Sources*. 18(5):25-211.

CastorOil, 2007. Castor oil as biodiesel and biofuel. Publicado por la Castor Crop Overview. EEUUA.

CEN, 2009. Comité Europeo de Estandarización y Especificaciones Técnicas. Europa.

Chapman, D. 1993. Lípidos. Editado por Alhambra y traducido por García, R. Pág. 1-7. Madrid, España.

Cheng, S., Choo., Y., Yung C. y Basiron, Y. 2005. Key fuel properties of palm oil alkyl esters. *Fuel*. 84(12-13):1717-1720.

CIEMAT, 2008. Análisis de ciclo de vida comparativo del biodiésel y del diesel. Publicado por el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas. Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos. España.

Ciria, J. 2009. Propiedades y características de combustibles diésel y biodiésel. Publicado por Wearcheck Ibérica. Documentación del área técnica. España

CNSPO, 2007. Panorama actual de la producción de oleaginosas en México. Programa Nacional de Producción de Oleaginosas 2007-2012. Publicado por el Comité Nacional Sistema Producto Oleaginosas. D.F., México.

Demirbas, A. 2002. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol. *Energy Conversion and Management*. 43(17):2349-2356.

Demirbas, A. 2007. Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy*. 35(9):4661-4670

- Demirbas, A. 2009. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*. 50(1):14-34.
- EI, 2009. Norma de calidad de diésel comercial. Publicado por Grupo Energéticos Internacionales S.A. de C.V. Monterrey, N.L., México.
- EPA, 2002. A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions. Draft Technical Report, EPA420. Pp. 2-50. Publicado por Environmental Protection Agency. EEUUA.
- EPI, 2006. World biodiesel production 1991–2005. Publicado por Earth Policy Institute. Washington, DC, EEUUA.
- Escobar, J., Lora, E., Venturini, O., Yáñez, E., Castillo E. y Almazán O. 2008. Biofuels: Environment, technology and food security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13(6-7): 1275-1287.
- FAO, 2003. World agriculture and FAO perspective. Publicado por la Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.
- FAOSTAT, 2009. Statistical Databases. Publicado por la Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.
- FSA, 2007. Waste cooking oil from catering premises. Publicado por la Food Standards Agency. Inglaterra.
- Ghadge, S. y Raheman, H. 2005. Production from mahua (*Madhuca indica*) oil having high free fatty acids. *Biomass and Bioenergy*. 28(6):601–605.
- Girard, P. y Fallot, A. 2006. Review of existing and emerging technologies for the production of biofuels in developing countries. *Energy for Sustainable Development*. 10(2):98-108.

Govinden, L. 2009. Análisis de Matemáticas financieras. Editado por McGrawHill, 2^a Edición. Monterrey, Nuevo León, México.

Gui, M., Lee K. y Bhatia S. 2008. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy*. 33(11):1646-1653.

Haas, M., McAloon, A., Yee, W. y Foglia, T. 2006. A process model to estimate biodiesel production costs. *Bioresource Technology*. 97(4):671–678.

Herrero, M., Juana, J., Santos, F., Macías, M. y Hernández, J. 1997. Energías Renovables para el desarrollo. Biocombustibles. Argentina.

Ibarra E. 2008. Producción de biodiésel a partir de aceites gastados. Tesis de licenciatura de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, UNAM. D.F., México.

IEA, 2004. Biofuels for transport, an international Perspective. Publicado por la International Energy Agency. París, Francia.

IEA, 2006. Key world energy statistics. Publicado por la International Energy Agency. París, Francia.

IEA, 2007. Renewables in global energy supply-An IEA Fact Sheet. Publicado por la International Energy Agency. París, Francia.

IESN, 2001. Propiedades biológicas, químicas y energéticas de los alimentos. Vitaminas, Minerales, Aminoácidos, Carbohidratos, Lípidos y Otros Principios Activos Botánicos. Publicado por el Instituto de Estudios de Salud Natural. Chile

IPCC, 2007. Climate Change, the fourth assessment report (AR4). Publicado por el grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.

Knothe, G., Munack, A., Krahl, F. 2006. Comparison of exhaust emissions and their mutagenicity from the combustion of biodiesel, vegetable oil, gas-to-liquid and petrodiesel fuels. *Fuel*. 88(6):1064-1069.

Komers, K., Machek, J. y Stloukal R. 2001. Biodiesel from rapeseed oil and KOH. Composition of solution of KOH in methanol as reaction partner of oil. *Europa Journal Lipid Science Technology*. 103:359–62.

Kusdiana, D. y Saka, S. 2001. Kinetics of transesterification in rapeseed oil to biodiesel fuels as treated in supercritical methanol. *Fuel*. 80(5):693–698.

Larosa, J. 2004. Proceso para la producción de biodiesel, metilester o ésteres metílicos de ácidos grasos. Refinación de glicerina. Editado por Ediciones Técnicas. Pág. 1-8. D.F., México.

Lawson, H. 1999. Aceites y grasas alimentarias. Tecnologías, utilización y nutrición. Editado por Acribia S.A. Pág. 3, 6-13, 42, 44-46, 50. Zaragoza, España.

Loh, S., Choo, Y., Cheng, S. y Ma, A. 2006. Recovery and conversion of palm oleinderived used frying oil to methyl esters for biodiesel. *Journal Oil Palm Research*. 8:247-252.

Lubrizol, 2007. Biodiesel challenges: cold flow. Publicado por Lubrizol Adittives. EEUUA.

Mataix, J. y Gil, A. 2003. Libro Blanco de los omega-3. Editado Puleva Food. Pág. 15-29 Granada, España.

Morris, R., Pollack, A., Mansell, G., Lindhjem, C., Jia, Y. y Wilson, G. 2003. Impact of biodiesel fuels on air quality and human health. Laboratory, Golden, CO. National *Renewable Energy*. 6:20-29.

Mulkins-Phillips, G. y Stewart, J. 1974. Effect of environmental parameters on bacterial degradation of bunker C oil, crude oils, and hydrocarbons. *Applied Microbiology*. 28:915–922.

NBB, 2007. Specification for biodiesel B(100) ASTM D6751-08. Fuel fact sheets. Publicado por la National Biodiesel Board. Washington, DC, EEUUA.

Pahl, G. 2005. Biodiesel Growing a New Economy. Editado por Chelsea Green Publish Company. Pág. 21-23. EEUUA.

PEMEX, 2009. Anuario estadístico. Publicado por petróleos mexicanos. México.

Pérez, E. 2008. Análisis y perspectivas del mercado mundial de aceites, grasas y proteínas. Comité Nacional Sistema Producto Oleaginosas. D.F., México.

Ramadhas A., Jayaraj, S. y Muraleedharam, C. 2005. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. *Fuel*. 84(4):335–340.

Rhom Haas, 2007. En: Foro Internacional de Biocombustibles. Rosario, Argentina.

Rintoul, S. 2008. Análisis de biodiésel: de la materia prima al combustible. Publicado por la ANIAME. D.F., México.

SAGARPA, 2004. Consumo nacional de semillas oleaginosas. Publicado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México. D.F., México.

SAGPyA, 2008. Perfil del mercado mundial de aceite de palma. Publicado por la Coordinación de Secretaria de agricultura Ganadería Pesca y Alimentos. Información de la Dirección de Mercados Agroalimentarios. Argentina.

Saka, S. 2005. Production of biodiesel: current and future technology. En: Core University program seminar. University Sains Malaysia. Malasia.

Shay, E. 1993. Diésel and biodiesel fuel from vegetable oils: status and opportunities. *Biomass and Bioenergy*. 4(4):227-242.

Sonntag N. 1979. Reactions of fats and fatty acids. Editado por Swern D. Vol. 1, Pág. 99. Bailey's industrial oil and fat products. New York.

Speidel, H., Lightner, R. y Ahmed, I. 2000. Biodegradability of new engineered fuels compared to conventional petroleum fuels and alternative fuels in current use. *Fuel and Energy Abstracts*. 43(1):1-16.

Tan, R., Culaba, A. y Purvis, M. 2004. Carbon balance implications of coconut biodiesel utilization in the Philippine automotive transport sector. *Biomass and Bioenergy*. 26(6):579-585.

Tiwari, A., Kumar, A. y Raheman, H. 1998. Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high fatty acids. *Biomass and Bioenergy*. 31(8):569–575.

Vicente, A. 1988. Producción, análisis y control de calidad de aceites y grasas comestibles. Manual de calidad. Editado por Ediciones Madrid. Pág. 19, 21, 23-25. España Madrid.

Wang, Y., Ou, S., Liu, P. y Zhang, Z. 2007. Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process. *Energy Conversion and Management*. 48(1):184–188.

West, A., Posarac, D. y Ellis, N. 2003. Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant. *Bioresource Technology*. 99(14):6587– 6601.

World Oil, 2008. Global oilseed production and consumption. Publicado por The Oil Weekly. Houston, Texas, EEUUA.

World Resources Institute, 2007. Global biofuel trends. Publicado por Earth Trends: Environmental Information. Washington, D.C., EEUUA.

Yagiz, F., Kazan, D. y Akin, A. 2007. Biodiesel production from waste oils by using lipase immobilized on hydrotalcite and zeolites. *Chemical Engineering Journal*. 134(1-3):262–267.

Zhang, Y., Dubé, M., McLean, D. y Kates, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. *Bioresource Technology*. 90(3):229–240.

Zhang, X., Peterson, C., Reece, D., Haws, R. y Moller, G. 1998. Biodegradability of biodiesel in the aquatic environment. *Transactions of the ASAE*. 41:1423–1430.

Zheng, S., Kates, M., Dube, M. y McLean, D. 2006. Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil. *Biomass and Bioenergy*. 30(3):267–272.

Ziller, S. 1996. Aceites y grasas alimentarias. Editado por Acribia S.A. Traducido por De la Fuente, J. Pág. 1, 12, 31, 35-39, 46, 47, 53. Zaragoza, España.