UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

BIODIÉSEL A PARTIR DE PALMA DE ACEITE EN EL TRANSPORTE MEXICANO

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

PRESENTA
DIEGO ISRAEL VÁZQUEZ HERNÁNDEZ

ASESORA DE TESIS
DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

MÉXICO, D.F. 2014

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

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: Dr. Arturo G. Reinking Cejudo

VOCAL: Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez

SECRETARIO: Dra. Alejandra Castro González

1er. SUPLENTE: M. en I. Juan Carlos Cedeño Vázquez

2do. SUPLENTE: M. en I. Tanya Moreno Coronado

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Este trabajo se realizó para soporte bibliográfico bajo el marco de proyecto PAPIME 100810 "Prototipos de Sistemas de Energía y Biocombustibles". Se agradece a DGAPA por el apoyo otorgado para este proyecto.

ASESORA DEL TEMA:
Dra. Alejandra Castro González _____

SUSTENTANTE:
Diego Israel Vázquez Hernández _____

ÍNDICE

ÍNDICE I
ÍNDICE DE FIGURAS IV
ÍNDICE DE TABLAS VI
RESUMEN VIII
Introducción 1
Objetivo 2
1 Antecedentes 3
1.1 Panorama mundial de la energía 3
1.2 Consumo nacional de energía 5
1.3 Energías renovables 9
1.3.1 Las energías renovables en el mundo 10
1.3.2 Las energías renovables en México 12
1.4 Biocombustibles 14
1.4.1 Situación actual 15
1.4.2 Situación en México de los biocombustibles 17
2 Fundamentos 23
2.1 Aspectos técnicos del biodiésel 24
2.1.1 Materias primas y sus requerimientos para la producción de biodiésel 24
2.1.1.1 Propiedades y características 25
2.1.1.2 Aceites de origen vegetal convencionales 28
2.1.1.3 Aceites alternativos 32
2.1.1.4 Aceite de microalgas 34
2.1.1.5 Aceites usados de fritura 35
2.1.1.6 Aceites y grasas de origen animal 35
2.1.2 Proceso de producción de biodiésel 35
2.1.2.1 Substancias auxiliares 38
2.1.2.2 Preparación de la materia prima 39
2.1.2.3 Producción de biodiésel 42
2.1.2.3.1 Transesterificación con catalizador base 42
2.1.2.3.2 Esterificación acida seguida por transesterificación base 42
2.1.2.3.3 Producción en lote versus continua 43

2.1.3 Calidad del biodiésel 43
2.1.3.1 Estándares Internacionales del biodiésel 44
2.1.3.2 Factores que influyen en la calidad del biodiésel 46
2.1.4 Distribución y uso del biodiésel 49
2.1.4.1 Generalidades 49
2.1.4.2 Experiencias y recomendaciones 50
2.2 Impacto ambiental del biodiésel 53
2.2.1 Calentamiento global y gases de efecto invernadero 53
2.2.2 Análisis de ciclo de vida del biodiésel de aceite de palma 55
2.2.2.1 Plantaciones de palma de aceite 56
2.2.2.2 Producción de palma de aceite 58
2.2.2.3 Producción de biodiésel 61
2.2.2.4 Análisis de inventario 62
2.2.2.5 Emisiones de GEI de la producción de biodiésel y del escape 64
2.2.3 Pérdida de biodiversidad 67
2.2.4 Erosión del suelo y otras degradaciones 67
2.2.5 Uso y contaminación del agua 68
2.3 Aspectos sociales de la producción del biodiésel 68
2.3.1 Aspectos del empleo 68
2.3.2 Seguridad de los alimentos 69
2.3.3 Propiedad de la tierra 70
2.3.4 Condiciones laborales y derechos de los niños 70
2.4 Aspectos económicos de la producción de biodiésel 71
2.4.1 Mercado global y nacional de aceites minerales 71
2.4.2 Mercado global y nacional de aceites vegetales 72
2.4.2.1 Oferta y demanda 72
2.4.2.2 Comercio de semillas oleaginosas y sus productos transformados 73
2.4.3 Panorama internacional de la palma de aceite 74
2.4.3.1 Precios internacionales 77
2.4.4 Panorama nacional de la palma de aceite 79
2.4.4.1 Precios nacionales de la palma de aceite 80
2.4.5 Políticas institucionales y legales 82
3 Metodología 84

3.1 Construcción del escenario de tendencia del diésel 84
3.2 Construcción del escenario alternativo 86
3.2.1 Análisis de factibilidad técnica 86
3.2.2 Análisis de factibilidad económica de la producción de biodiésel 87
3.2.2.1 Aproximación metódica 88
3.2.2.1.1 Modelo de cálculo 88
3.2.2.1.2 Condiciones del marco del análisis 89
3.2.2.1.3 Supuestos generales 90
3.2.3 Análisis de factibilidad ambiental 90
4 Resultados 92
4.1 Resultados del escenario de tendencia 92
4.1.1 Demanda del combustible diésel 92
4.1.2 Emisiones del escenario de tendencia 94
4.2 Resultados de los escenarios alternativos 95
4.2.1 Demanda del combustible para los escenarios alternativos 95
4.2.2 Factibilidad técnica 96
4.2.3 Factibilidad ambiental 98
4.2.3.1 Emisiones de GEI de los escenarios alternativos 98
4.2.3.2 Uso de energía fósil en la producción y uso del biodiésel 99
4.2.4 Factibilidad económica 100
4.2.4.1 Gastos del capital 100
4.2.4.1.1.1 Gastos relativos al consumo 102
4.2.4.1.1.2 Gastos relacionados a la operación y otros 103
4.2.4.1.1.3 Créditos por subproductos 104
4.2.4.1.1.4 Distribución del biodiésel y uso 106
4.2.4.2 Costo de producción de biodiésel y eficiencia económica 106
5 Conclusiones 111
6 Trabajos citados 113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Producción mundial de energía primaria 2008 3
Figura 1.2 Consumo mundial de energía por energético 2008 4
Figura 1.3 Consumo total mundial de energía por sector 2008 5
Figura 1.4 Consumo final total por combustible 6
Figura 1.5 Consumo energético por sector y por energético 7
Figura 1.6 Consumo de energía del sector transporte 9
Figura 1.7 Oferta mundial total de energía 2008 11
Figura 1.8 Consumo mundial de energía por energético 2008 11
Figura 1.9 Estructura de la producción de energía primaria 2009 12
Figura 1.10 Participación de las energías renovables en la capacidad instalada de generación eléctrica 13
Figura 1.11 Producción de Etanol y Biodiésel 2000-2009 15
Figura 1.12 Áreas identificadas para la producción de biomasa para ioenergéticos 19
Figura 2.1 Ejemplo de la composición de un triglicérido 26
Figura 2.2 Perfil de ácidos grasos para diferentes materias primas 26
Figura 2.3 Rama de planta de colza 29
Figura 2.4 Vaina de una planta de frijol de soya 30
Figura 2.5 Reacción química de la producción de biodiésel 36
Figura 2.6 Esquema general de la producción de biodiésel 37
Figura 2.7 Relación entre el contenido de ácidos grasos saturados en el biodiésel (sin aditivos) y su valor de CFPP 46
Figura 2.8 Valores de yodo del biodiésel derivado de diferentes tipos de aceites y grasas 48
Figura 2.9 Distribución y uso final del biodiésel 49
Figura 2.10 Efectos a largo plazo de estabilidad de oxidación (izquierda) o depósitos jabonosos (derecha) en las bombas de inyección 52
Figura 2.11 Diagrama del ACV de la producción de biodiésel 56
Figura 2.12 Unidad de proceso de la plantación de palma de aceite 57
Figura 2.13 Árbol de palma de aceite y racimo de frutas frescas de la provincia de Krabi 59
Figura 2.14 Proceso de producción de aceite de palma 61
Figura 2.15 Transesterificación de aceite de palma para producción de biodiésel 62
Figura 2.16 Emisiones de la producción y escape de biodiésel (por MJ) de distintas mezclas de diésel ultra bajo azufre y biodiésel de palma de aceite de plantaciones existentes 66
Figura 2.17 Emisiones de la producción y escape de biodiésel de distintas mezclas de diésel ultra bajo azufre y biodiésel de palma de aceite de selvas taladas 67
Figura 2.18 Prospectiva de demanda y producción de diésel 2009-2025 71
Figura 2.19 Mercado global de las semillas oleaginosas en millones de toneladas 2009/10 72
Figura 2.20 Comercio de aceites vegetales a nivel global en millones de toneladas 2009/10 74

Figura 2.21 Suministro total en México de semillas oleaginosas año económico 2009/10 miles de millones de toneladas 75
Figura 2.22 Producción, consumo y precios internacionales de aceite de palma 76
Figura 2.23 Producción de aceite de palma 2009/10 77
Figura 2.24 Determinantes del precio del aceite de palma 78
Figura 2.25 Precios internacionales de aceites 78
Figura 2.26 Producción de palma de aceite en miles de toneladas en México 79
Figura 3.1 Modelo de cálculo para el costo de producción del biodiésel 89
Figura 4.1 Uso de energía fósil en la producción y uso de biodiésel de palma de aceite 100
Figura 4.2 Costos internacionales de la glicerina 105
Figura 4.3 Costos de la producción del biodiésel 107
Figura 4.4 Análisis de sensibilidad-biodiésel de palma de aceite en escala industrial 108
Figura 4.5 Precio de venta del biodiésel requerido para plantas económicamente ... 110
Figura 5.1 Emisiones de $CO_{2\text{-}e}$ en el caso de estudio del metrobús 112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Consumo final total de energía en petajoules 2008 6
Tabla 1.2 Consumo de energía en el sector transporte (petajoules) 8
Tabla 1.3 Capacidad y generación eléctrica en México por tipo de energía 13
Tabla 1.4 Producción de biocombustibles; Top 15 de países y Total EE.UU. en miles de millones de litros en 2009 16
Tabla 1.5 Metas de producción de etanol de PEMEX refinería 20
Tabla 1.6 Introducción de biodiésel en el diésel de ultra bajo azufre (UBA) 21
Tabla 2.1 Materias primas para la producción de biodiésel 25
Tabla 2.2 Parámetros de las materias primas y su relevancia en el uso y producción de biodiésel 27
Tabla 2.3 Producción de aceite de palma en América 2004-05 31
Tabla 2.4 Composición de la semilla de *Jatropha Curcas* 34
Tabla 2.5 Rendimiento de cultivos y aceite en extracción mecánica y con solvente en México 41
Tabla 2.6 Estándares internacionales de la calidad del biodiésel 45
Tabla 2.7 Potenciales de calentamiento global directo relativos al dióxido de carbono 55
Tabla 2.8 Caracterización de las aguas residuales del proceso de producción de aceite de palma 60
Tabla 2.9 Lista del inventario de la producción de 1 ton de biodiésel 63
Tabla 2.10 Emisiones de la producción y uso de mezclas de biodiésel a partir de aceite de palma de plantaciones existentes 65
Tabla 2.11 Emisiones de la producción y uso de mezclas de biodiésel a partir de aceite de palma de selvas taladas 66
Tabla 2.12 Consumo nacional aparente de aceite de palma 80
Tabla 2.13 Consumo nacional aparente de aceite de almendra de palma 81
Tabla 2.14 Precios nacionales de la palma de aceite 81
Tabla 3.1 Ficha técnica de las líneas actuales del Metrobús 85
Tabla 3.2 Programa de corredores metrobús a futuro 85
Tabla 3.3 Contenido energético de las mezclas de biodiésel de palma de aceite 86
Tabla 3.4 Plantas de producción de biodiésel referencia 87
Tabla 4.1 Histórico del consumo de diésel del metrobús 93
Tabla 4.2 Consumo y costo de diésel del metrobús 2010 93
Tabla 4.3 Evolución de la demanda en el escenario de tendencia 94
Tabla 4.4 Emisiones de GEI y contaminantes criterio del escenario de tendencia 94
Tabla 4.5 Demanda anual de combustible mezcla de los distintos escenarios 95
Tabla 4.6 Demanda anual de combustible diésel de los distintos escenarios 95
Tabla 4.7 Demanda anual de biodiésel (B100) de los distintos escenarios 96
Tabla 4.8 Toneladas de aceite crudo de palma (ACP) necesarias para cubrir la demanda de los escenarios alternativos 96
Tabla 4.9 Toneladas de racimos de fruta fresca (RFF) para cubrir la demanda de aceite de palma de los escenarios alternativos 97

Tabla 4.10 Hectáreas necesarias para sembrar palma de aceite y cubrir la demanda de los escenarios alternativos 97
Tabla 4.11 Emisiones de GEI de las diferentes mezclas 98
Tabla 4.12 Emisiones de contaminantes criterio (2010-2010) en de las diferentes mezclas 99
Tabla 4.13 Porcentaje de reducción o aumento de las emisiones de las mezclas con respecto al diésel UBA 99
Tabla 4.14 Inversión total de capital (promedio) de las plantas referencia (SENER, 2006) 101
Tabla 4.15 Costos de las materias primas 102
Tabla 4.16 Precios de substancias auxiliares al mayoreo 103

RESUMEN

En nuestro estudio se propone la sustitución del diésel como combustible en el metrobús de la Ciudad de México por mezclas de biodiésel-diésel al 5(B5), 10(B10) ó 20%(B20). Se obtuvo el consumo del metrobús en el escenario de tendencia (el del diésel) desde el año 2010 al 2020, el consumo promedio anual es de 18.13 millones de litros de diésel, dentro de esta ventana de tiempo se toman en cuenta las rutas actuales y las introducciones paulatinas de las nuevas líneas. Si se desea cubrir esta demanda en el escenario alternativo con B5, B10 y B20 se consumirán 18.25, 18.36 y 18.55 millones de litros respectivamente. Existe un aumento de volumen dado que el biodiésel tiene una densidad energética ligeramente menor a la del diésel. El biodiésel se produciría a partir del aceite crudo de palma, un promedio de 700, 1,398 y 2, 976 toneladas anuales de aceite crudo de palma serían necesarias para producir las mezclas. En promedio se obtiene 1 tonelada de aceite crudo de palma a partir 5.8 toneladas de racimos de fruta fresca, es decir 4,054, 8,109 y 16,218 toneladas de racimos de fruta fresca serán necesarias para los escenarios B5, B10, B20 respectivamente. Tomando en cuenta que en promedio se cosechan 17.2 toneladas de racimos de fruta fresca es necesario destinar una extensión de aproximadamente 250, 500 y 1000 hectáreas de cultivo para cubrir la demanda total de biodiésel para el metrobús, lo cual parece factible técnicamente dado que el potencial en México de palma de aceite es de 2.5 millones de hectáreas y tan sólo en 2008 se destinaron 32.5 mil hectáreas para su cultivo.

Ambientalmente es factible sustituir el diésel por el biodiésel. Al calcular las emisiones anuales de gases de efecto invernadero en el escenario de tendencia se obtuvieron 56,318.5 TCO_2-e/año. Por otro lado las emisiones del biodiésel en los escenarios alternativos fueron en promedio 51,659.42, 49,615.99 y 45,531.61 TCO_2-e/año, es decir, una reducción del 3.65, 7.46 y 15.08% para el B5, B10 y B20 respectivamente.

El estudio de factibilidad económica reveló que el biodiésel de producción tanto industrial como agrícola, a partir de palma de aceite, puede ser competitivo con el diésel PEMEX si se omiten los impuestos y deberes para los biocombustibles. Se pueden utilizar condiciones favorables de capitales como incentivo financiero para la implementación de plantas de biodiésel en México. Sin embargo, para el funcionamiento de la planta económicamente esto es sólo de relevancia marginal, para este punto el análisis de sensibilidad mostró que los factores que tienen mayor importancia son por un lado los costos de la materia prima, que contribuyen en un 59% para el biodiésel de palma de aceite y hasta un 91% para el caso del frijol del soya, y por otro lado los mercados adecuados para los subproducto derivados de la producción de biodiésel. Es por eso que el sector agrícola mexicano debe ser pieza clave para producir un biocombustible sustentable.

Introducción

En la actualidad más del 50% del consumo de energía a nivel mundial proviene de combustibles fósiles. En el año 2009 las emisiones de CO_2 por el uso de combustibles fósiles fueron de casi 30 mil millones de toneladas (AIE, 2010), entre las consecuencias principales de este consumo desmedido se encuentran el cambio climático causado por el hombre y el impacto a la salud. Es momento de buscar combustibles que ayuden a diversificar nuestras fuentes de energía, que sean renovables y que generen un menor impacto en el ambiente. El sector transporte ocupa el segundo lugar de consumo de energía en el mundo con 27.3%, muy cerca del 28% del sector industrial (AIE, 2010). En México el principal sector de consumo energético es el transporte con un 49%, seguido del industrial con un 28% siendo la gasolina y el diésel los principales combustibles utilizados (SENER, 2010).

El metrobús de la Ciudad de México cuenta con dos líneas en funcionamiento y tres por venir, comenzó operaciones en 2005 y hasta 2008 ha reducido 107,257 toneladas de dióxido de carbono equivalente ($CO_{2\text{-}e}$), esto debido principalmente al uso de diésel ultra bajo azufre, un servicio ordenado y la preferencia del 15% de los usuarios a dejar su vehículo particular por usar este transporte. Por otro lado el turibús de la Ciudad de México ha implementado el uso del biodiésel a partir de aceites usados en una mezcla del 20% con el diésel fósil en una flota de más de 20 autobuses y con adaptaciones menores a los motores para su correcto funcionamiento, lo cual se ha visto reflejado en una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del 30%.

El biodiésel es un combustible renovable que se produce a partir de aceites vegetales y grasas animales y que puede utilizarse como substituto del diésel fósil, a comparación del diésel sus emisiones de CO_2 son aproximadamente 80% menores (CISRO, 2007). Actualmente el biodiésel de palma de aceite se ha convertido en objeto de estudio porque la palma es el cultivo con mayor rendimiento por hectárea al lado de otros cultivos oleaginosos y porque representa una alternativa de producción con perspectivas favorables para las regiones tropicales húmedas que tienen un bajo déficit de agua anual. Mexico cuenta con un amplio potencial para el cultivo de palma de aceite en los estados comprendidos en el Programa del Trópico Húmedo de la SAGARPA tales como Chiapas, Campeche, Veracruz y Tabasco. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) informa que existen en el país, “alrededor” de 2.5 millones de hectáreas con buen potencial para su cultivo (SENER, 2006), de tal manera que es tiempo de tomar en cuenta a la palma de aceite como materia prima de un biocombustible que sea limpio y que aporte importancia al sector agrícola nacional.

Objetivo

Evaluar el uso del biodiésel de palma de aceite en el sector mexicano del transporte analizando su factibilidad ambiental, técnica y económica en el caso de estudio del metrobús de la Ciudad de México.

1 Antecedentes

1.1 Panorama mundial de la energía

De acuerdo con información de la Agencia Internacional de Energía (AIE, 2010), en 2008 la producción mundial de energía primaria totalizó 12,369.0 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), 3.2% mayor a lo producido en 2007. La producción mundial de carbón y sus derivados, gas natural y renovables aumentó 5.8%, 4.0% y 3.4%, respectivamente.

También hubo crecimientos, aunque menores, en la producción mundial de crudo (1.1%) y nucleoenergía (0.4%). Como se observa en la Figura 1.1, 32.7% de la producción mundial correspondió a crudo, 27.6% a carbón y sus derivados, 21.2% a gas natural, 12.9% a energías renovables y 5.8% a nucleoenergía. Destacó la pérdida de 0.7 puntos porcentuales en la participación de crudo, mientras que el carbón y sus derivados ganaron 0.7 puntos porcentuales.

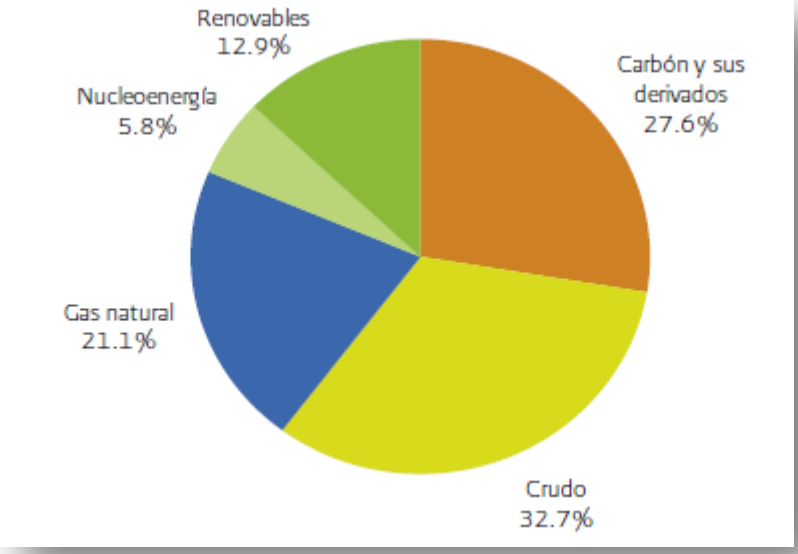

Figura 1.1 Producción mundial de energía primaria 2008 (AIE, 2010)

Al igual que en 2007, los países con mayor producción primaria fueron China, Estados Unidos, Rusia, Arabia Saudita e India, con participaciones de 16.1%, 13.8%, 10.1%, 4.7% y 3.8%, respectivamente. México se situó en el décimo lugar en ambos años. En 2008 aportó 1.9% de la energía total producida en el mundo, mientras que en 2007 su participación fue de 2.0% (AIE, 2010).

El consumo de energía a nivel mundial aumentó 1.7% durante 2008 con respecto a los niveles de consumo registrados en 2007, al totalizar 8,428.4 Mtep. En cuanto al

comportamiento por energético, los mayores crecimientos en el consumo fueron los de energía solar y eólica con 19.8% y 12.6%, respectivamente.

Estados Unidos fue el mayor consumidor de energía en 2008, con una participación de 18.3%, pese a que su población representó menos de 5.0% del total mundial. China, Rusia, India y Japón ocuparon la segunda, tercera, cuarta y quinta posición, respectivamente. Estos cinco países produjeron en conjunto 50.3% del PIB mundial en 2008 y consumieron 48.3% de la energía a nivel mundial. Por su parte, **México ocupó el décimo quinto lugar en el consumo de energía**, lo cual representó 1.4% del total de consumo mundial en 2008 (SENER, 2010).

Como se observa en la Figura 1.2, los petrolíferos fueron los que dominaron el consumo en 2008, motivado en gran medida por la demanda del sector transporte y el industrial. No obstante, el consumo de petrolíferos cayó 0.8%.

Por otro lado, destacó que el uso final de electricidad representó 20.2% del consumo total e incrementó su contribución 1.3 puntos porcentuales. El consumo de gas natural representó 15.6% y aumentó 2.3% en 2008 respecto a los niveles de consumo registrados un año antes.

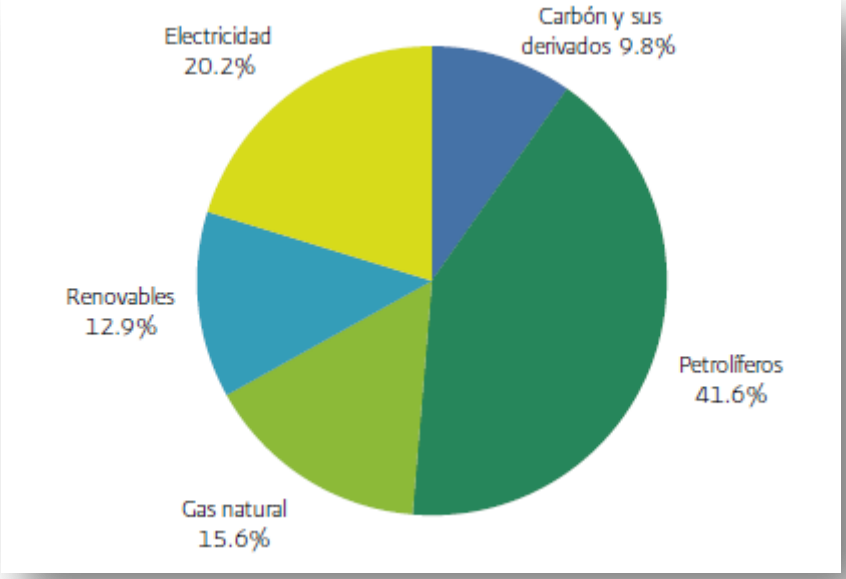

Figura 1.2 Consumo mundial de energía por energético 2008 (AIE, 2010)

En la Figura 1.3 se muestra que el sector industrial consumió la mayor parte de la energía a nivel mundial en 2008, con una participación de 28.0% del total. Este sector mostró una variación de 2.8% respecto a 2007, impulsada por el crecimiento en la demanda de carbón, el cual representó 27.5% de la energía utilizada en el sector, y de electricidad, cuya participación fue de 25.7%.

El **transporte, segundo sector en importancia**, aumentó su consumo 0.4% anual. Este crecimiento marginal se vió motivado por la caída de 0.3% en la demanda de petrolíferos, los cuales representaron 93.5% del consumo. Cabe destacar que el uso de biomasa en este sector mostró un crecimiento de 34.9%.

El consumo en el sector residencial creció 2.5% anual. El 39.8% correspondió a biomasa, 20.7% a gas natural y 19.6% a electricidad. Estos tres energéticos mostraron crecimientos de 1.6%, 2.2% y 3.2%, respectivamente. Otros, incluye los sectores comercial y público, agropecuario y pesca.

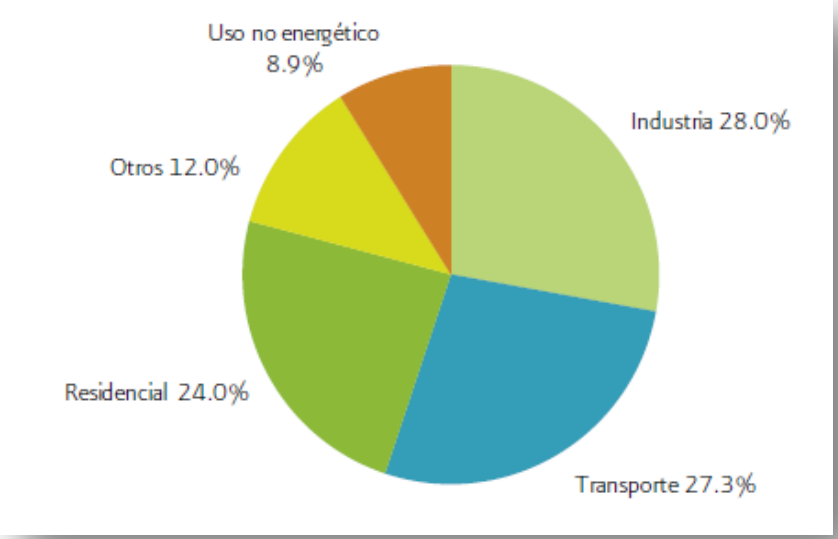

Figura 1.3 Consumo total mundial de energía por sector 2008 (AIE, 2010)

1.2 Consumo nacional de energía

En 2009, el consumo final total de energía disminuyó 6.5%, derivado a la menor demanda de combustibles del mercado nacional. La Tabla 1.1 muestra que el consumo no energético, es decir la energía primaria y secundaria que se utiliza como materia prima, representó 4.7% del consumo final, aumentó 2.6%, como resultado del crecimiento de 3.1% anual en el uso de productos no energéticos, que aportaron más del 80% de este consumo. El consumo energético, el cual se refiere a los combustibles primarios y secundarios utilizados para satisfacer las necesidades de energía de los sectores transporte, industrial, residencial, comercial, público y agropecuario, totalizó 4,568.1 PJ en 2009, lo que implicó un aporte de 95.3% del consumo final total.

Al desglosar por combustible, se puede concluir que la demanda de gasolinas y naftas influyó de forma importante en el comportamiento del consumo final energético así se observa en la Figura 1.4, al aportar 32.8% de la energía. El consumo de diésel, que representó 16.0% del consumo energético, mostró una caída de 11.1%, resultado del menor consumo en los sectores transporte, industrial, agropecuario y comercial.

Tabla 1.1 Consumo final total de energía en petajoules 2008 (SENER, 2010)

	2008	2009	Variación (%) 2009/2008	Estructura porcentual 2008 %	Estructura porcentual 2009 %
Consumo final total	5,129.4	4,795.2	-6.5	100.0	100.0
Consumo no energético total	221.3	227.2	2.6	4.3	4.7
Petroquímica de Pemex	110.1	115.8	5.2	2.1	2.4
Otras ramas	111.3	111.4	0.1	2.2	2.3
Consumo energético total	4,908.1	4,568.1	-6.9	95.7	95.3
Transporte	2,433.4	2,224.5	-8.6	47.4	46.4
Industrial	1,402.9	1,283.6	-8.5	27.4	26.8
Residencial, comercial y público	922.7	913.4	-1.0	-18.0	19.0
Agropecuario	149.2	146.5	-1.8	2.9	3.1

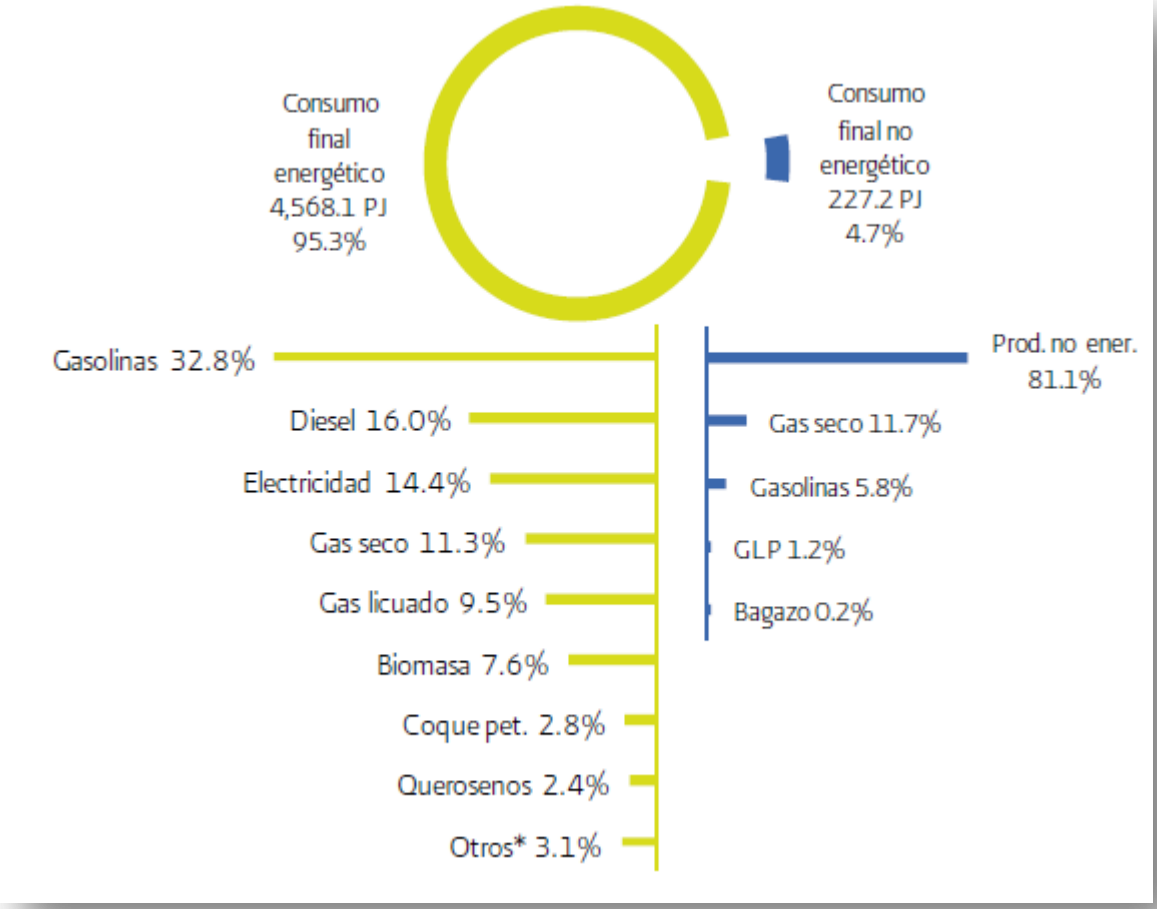

Figura 1.4 Consumo final total por combustible (SENER, 2010)

Como se muestra en la Figura 1.5 el **sector transporte** consumió 48.7% de dicha energía, por lo que se mantuvo como el **principal consumidor de energía en México**. El sector industrial le siguió en importancia, con una participación en el consumo de 28.1%. Los sectores residencial, comercial y público emplearon 16.7%, 2.7% y 0.6%, respectivamente, de la energía para consumo final. Por su parte, el sector agropecuario consumió 3.2% de la energía final.

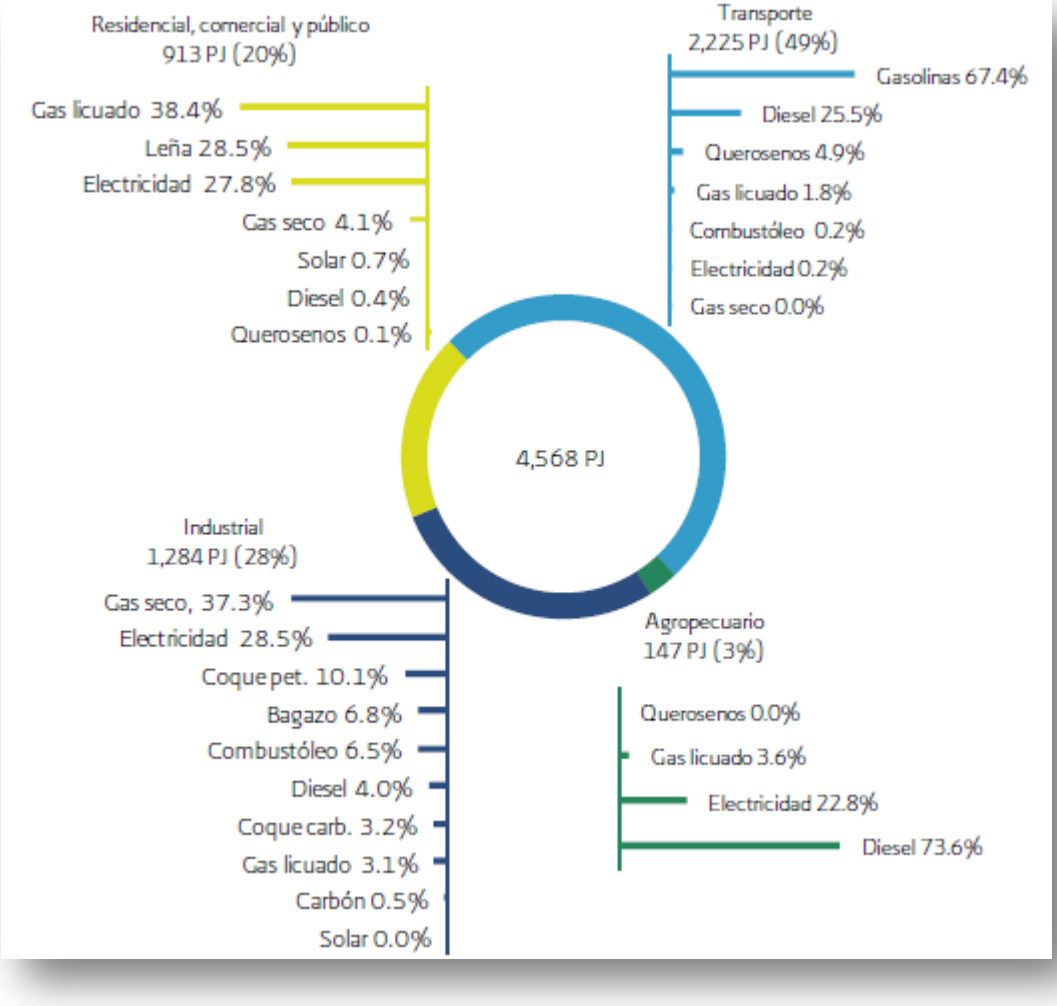

Figura 1.5 Consumo energético por sector y por energético (SENER, 2010)

En 2009, el consumo de energía en el sector transporte totalizó 2,224.5 PJ, lo que implicó una disminución de 8.6% respecto a 2008. Esta disminución fue impulsada en su mayoría por la caída de 6.8% en el consumo de gasolinas y naftas, que aportaron 67.4% de los requerimientos de energía de este sector. La demanda de diésel, segundo combustible en importancia en este sector y con una participación de 25.5%, disminuyó 11.9% respecto a 2008. Los querosenos, que tuvieron una participación de 4.9%, mostraron una caída de 15.2% en su consumo. El gas licuado de petróleo, utilizado en el autotransporte, mostró un consumo 6.6% menor al de 2008 y aportó 1.8% del consumo del sector. La demanda de

electricidad en este sector tuvo una participación de 0.2% y mostró un aumento de 0.5% respecto al año previo. El consumo en el transporte se puede ver en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Consumo de energía en el sector transporte (petajoules) (SENER, 2010)

	2008	2009	Variación porcentual (%) 2009/2008	Estructura porcentual 2008 %	Estructura porcentual 2009 %
Transporte	2,433.4	2,224.5	-8.6	100.0	100.0
Autotransporte	2,230.0	2,056.2	-7.8	91.6	92.4
Gas licuado	41.7	38.9	-6.6	1.7	1.8
Gasolinas	1,606.5	1,497.8	-6.8	66.0	67.3
Diésel	581.3	518.9	-10.7	23.9	23.3
Gas seco	0.6	0.5	-8.2	0.0	0.0
Aéreo	130.6	110.8	-15.2	5.4	5.0
Gasolinas	1.0	0.9	-9.6	0.0	0.0
Querosenos	129.6	109.9	-15.2	5.3	4.9
Marítimo	44.4	31.3	-29.5	1.8	1.4
Diésel	38.7	26.6	-31.3	1.6	1.2
Combustóleo	5.8	4.8	-17.5	0.2	0.2
Ferroviario	24.4	22.3	-8.7	1.0	1.0
Diésel	24.3	22.2	-8.7	1.0	1.0
Electricidad	0.1	0.1	1.6	0.0	0.0
Eléctrico	3.9	3.9	0.4	0.2	0.2
Electricidad	3.9	3.9	0.4	0.2	0.2

Finalmente, el consumo de gas seco, cuya aportación al consumo del sector fue marginal, disminuyó 8.2%.

Por modalidad, en 2009 el autotransporte consumió 92.4% de la energía del sector (SENER, 2010), 0.8 puntos porcentuales más que en 2008. Sin embargo, su consumo disminuyó 7.8%, derivado en parte del aumento en los precios y la caída en la actividad económica. No obstante, la cantidad de energía consumida en el autotransporte por vehículo fue 6.0 GJ por vehículo, 0.9 GJ menos que en el año previo. En la Figura 1.6 se observa la estructura porcentual por subsector y energético, las gasolinas y naftas aportaron la mayor parte de la energía requerida por el autotransporte (72.8%), seguidas por el diésel (25.2%) y el gas licuado de petróleo (1.9%). El consumo de gas seco fue 0.54 PJ, no obstante su aportación al consumo del autotransporte fue marginal.

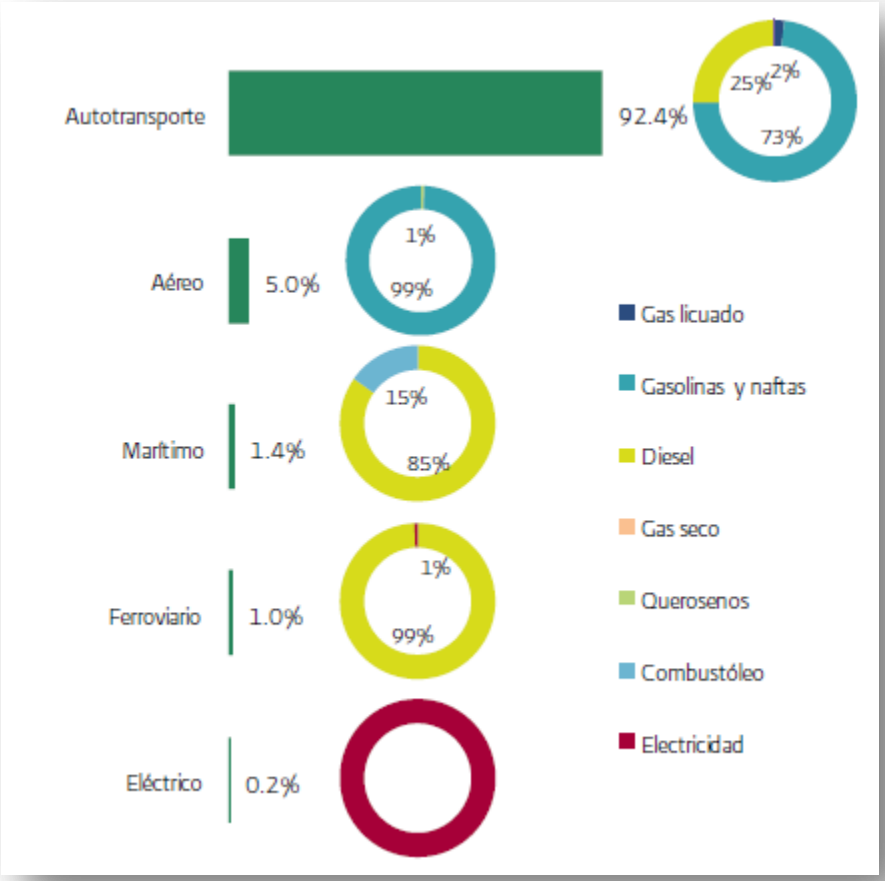

Figura 1.6 Consumo de energía del sector transporte (SENER, 2010)

1.3 Energías renovables

Las energías renovables se basan en los flujos y ciclos implícitos en la naturaleza. Son aquellas que se regeneran y se espera que perduren por cientos o miles de años. Además, se distribuyen en amplias zonas y su adecuada utilización tiene un impacto ambiental favorable en el entorno, elemento que hoy se convierte en una herramienta de gran importancia, ante la necesidad de disminuir significativamente la emisión de gases de efecto invernadero a nivel mundial.

Ciertamente los combustibles fósiles han sido una base para el desarrollo nacional en México. Los pronósticos indican que seguirán ocupando una participación destacada como fuente primaria de energía para las próximas décadas; sin embargo, hoy es necesario iniciar las acciones que nos permitan, en un futuro no muy lejano, diversificar las fuentes de energía para atender las necesidades de los consumidores.

Estas fuentes representan una respuesta importante a la demanda de la sociedad de contar con un modelo sustentable que, además de mitigar los efectos negativos de las

actividades que se tienen en el sector energético, contribuyen a reducir los riesgos asociados con la volatilidad de precios y diversificar el portafolio energético. De igual manera, es relevante la contribución de estas fuentes al desarrollo social en áreas donde la energía convencional es económicamente inviable.

Estudios previos indican que México posee un gran potencial para generar energía a través de fuentes renovables, ya que contamos con:

- Altos niveles de insolación;
- Recursos hidráulicos para la instalación de plantas minihidráulicas;
- Vapor y agua para el desarrollo de campos geotérmicos;
- Zonas con intensos y constantes vientos prevalecientes;
- Grandes volúmenes de esquilmos agrícolas, e
- Importantes cantidades de los desperdicios orgánicos en las ciudades y en el campo, cuyo destino final debe manejarse de forma sustentable (CRE, 2007) .

Por sí misma, la diversificación de las fuentes energéticas a partir del uso de energías renovables representará un mecanismo para reducir la dependencia de México en los combustibles fósiles, y así fomentar la seguridad energética. Sin embargo, el aprovechamiento de las energías renovables también representa beneficios indiscutibles en otros temas prioritarios, no sólo para nuestro país, sino para todo el mundo.

En materia de electrificación, el aprovechamiento de las energías renovables también será un motor para el desarrollo social, al permitir el acceso al servicio eléctrico a comunidades donde la energía convencional es económicamente inviable por estar apartadas de la red eléctrica.

En el rubro ambiental, la utilización de energías renovables, además de contribuir a mejorar la calidad del aire, contribuye a la conservación de los recursos naturales.

Finalmente, las energías renovables perfilan como una importante contribución en materia económica, ya que el desarrollo de éstas representa la creación de pequeñas y medianas empresas, la generación de nuevos empleos, un mayor desarrollo científico y tecnológico, y la posibilidad de generar mayor intercambio comercial con otros países que están impulsando la utilización de energías renovables (SENER, 2008).

1.3.1 Las energías renovables en el mundo

Como se observa en la Figura 1.7, las energías renovables (engloba energía hidráulica, eólica, solar, geoenergía, residuos y biomasa) representaron en el 2008, el 13% de la oferta mundial de energía con un crecimiento anual de 3.5% con respecto al año anterior (AIE, 2010).

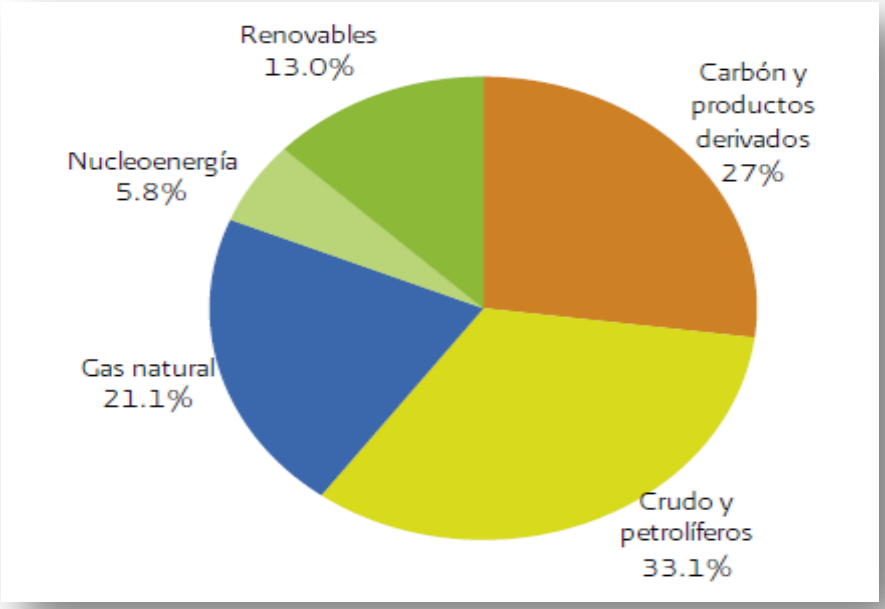

Figura 1.7 Oferta mundial total de energía 2008 (AIE, 2010)

Por su parte el consumo de energías renovables a nivel mundial se muestra en la Figura 1.8 con una participación del 12.9% del total con un aumento del 19.8% en energía solar y eólica.

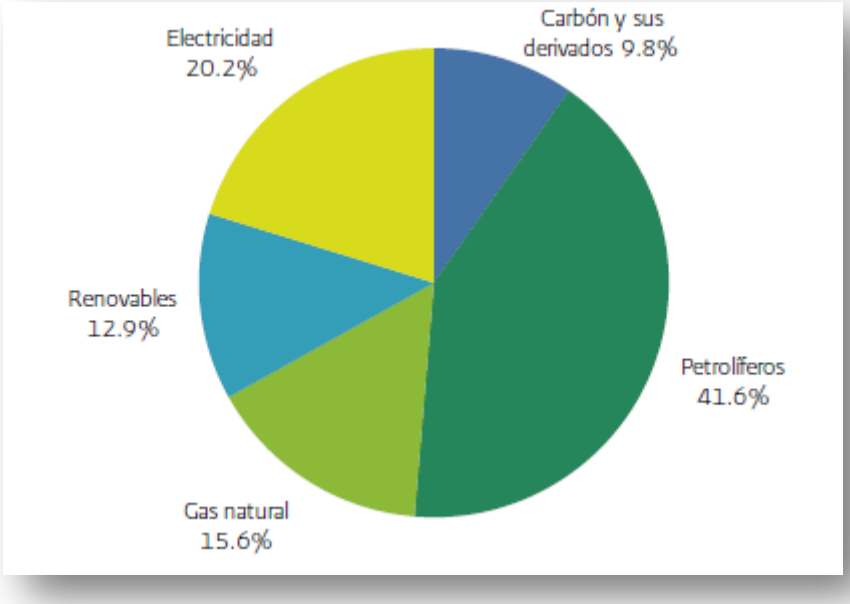

Figura 1.8 Consumo mundial de energía por energético 2008 (AIE, 2010)

1.3.2 Las energías renovables en México

En la Figura 1.9 se muestra la estructura de la producción primaria de la energía en México. A los hidrocarburos les siguió en importancia la producción de energías renovables, contribuyendo con 6.2% de la energía primaria. De estas fuentes de energía, 42.9% correspondió a leña, con un aumento en su participación de 3.8 puntos porcentuales respecto a 2008. La geoenergía, con una aportación a la producción total de renovables de 25.6%, mostró un aumento de 1.3 puntos porcentuales en dicha participación. La hidroenergía aportó 15.7% de la producción de renovables, 5.2 puntos porcentuales menor a la participación de 2008.

La producción de bagazo de caña contribuyó con 14.6%, manteniendo una participación muy similar a 2008. Las energías solar y eólica aportaron 1.3% de la producción de renovables, aumentando su participación 0.3 puntos porcentuales respecto al año anterior.

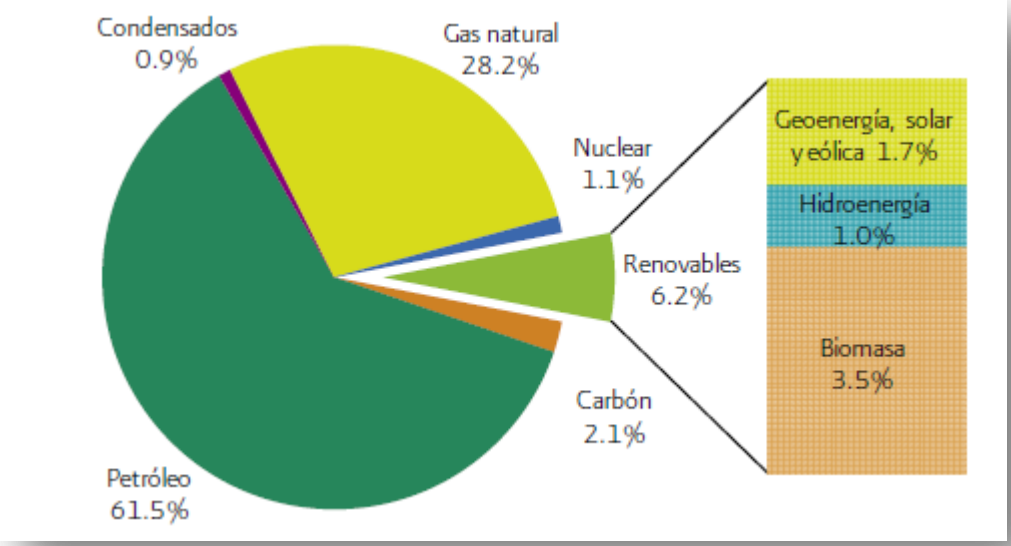

Figura 1.9 Estructura de la producción de energía primaria 2009 (SENER, 2010)

México cuenta con alrededor de 1,924.8 MW (SENER, 2008) de capacidad instalada de generación eléctrica con base en energías renovables, que incluye la capacidad destinada al servicio público, cogeneración y autoabastecimiento, representando el 3.3% (SENER, 2008) de la capacidad instalada en el servicio público del país. En la Figura 1.10 se observa la gráfica que ilustra el porcentaje de capacidad instalada referida a todos los energéticos para la producción de energía eléctrica.

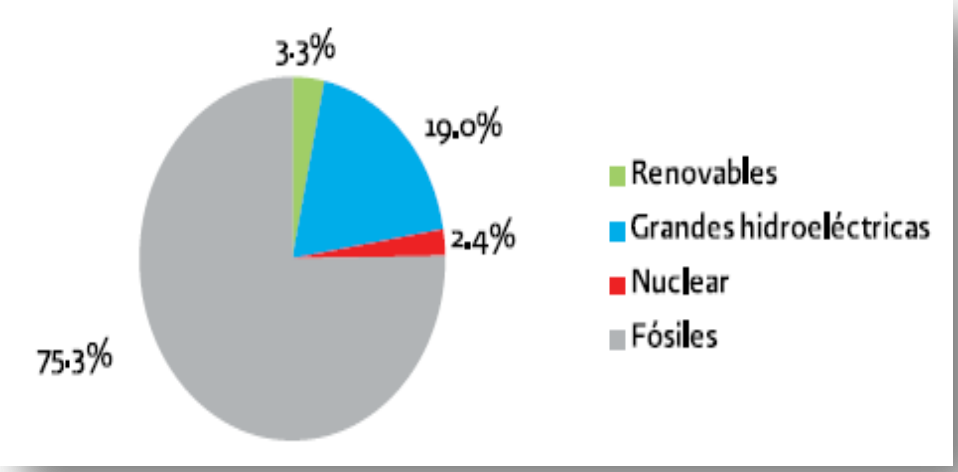

Figura 1.10 Participación de las energías renovables en la capacidad instalada de generación eléctrica (SENER, 2008)

En la Tabla 1.3 se muestra la capacidad instalada total así como la generación, a partir de fuentes renovables por tipo de tecnología utilizada que se refiere a eoloeléctrica, pequeña hidroeléctrica, geotermoeléctrica, biomasa y biogás. Las energías renovables ocupan cada vez un porcentaje más grande en la capacidad y la generación eléctrica del país con un 3.31% y 3.93%.

Tabla 1.3 Capacidad y generación eléctrica en México por tipo de energía (SENER, 2008)

		Capacidad		Generación	
Tecnología	Desarrollador	Anual (MW)	%Total	Anual (GW)	%Total
Eoloeléctrica	CFE	85.2	0.15	231.5	0.09
Eoloeléctrica	Permisionarios	0	0.00	0	0.00
Total eoloeléctrica		85.2	0.15	231.5	0.09
Pequeña hidroeléctrica	CFE	270.12	0.46	1309.5	0.53
Pequeña hidroeléctrica	LFC	23.3	0.04	52.9	0.02
Pequeña hidroeléctrica	Permisionarios	83.4	0.14	228.0	0.09
Total hidroeléctrica		376.9	0.65	1590.5	0.64
Geotermoeléctrica	CFE	964.5	1.66	7057.7	2.86
Biomasa y biogás	Permisionarios	498.1	0.86	819.3	0.33
Total		1924.8	3.31	9699.1	3.93
Total servicio público y permisionarios		58105.5	100.00	246785.0	100.00
Participación renovables		3.31%		3.93%	

1.4 Biocombustibles

La bioenergía se define como la energía que se obtiene de la biomasa, es decir que se produce a partir de materiales orgánicos, los cuales pueden tener su origen en cultivos energéticos, productos y subproductos pesqueros, acuícolas, residuos forestales, residuos orgánicos municipales (basura orgánica), excremento de animales, grasas y aceites de origen vegetal o animal (GOF, 2009).

Son entonces los biocombustibles un recurso bioenergético y en este trabajo de tesis se definirán algunos de ellos.

Desde una perspectiva etimológica los biocombustibles, serían los combustibles de origen biológico, pero esta definición incluiría el petróleo, ya que este procede de restos fósiles que existen desde hace millones de años. Una mejor definición sería que son los combustibles de origen biológico obtenidos de manera renovable a partir de restos orgánicos. Los biocombustibles constituyen la primera fuente de energía que conoció la humanidad (Crespo, 1999). No debe sorprendernos que el primer motor construido por Henry Ford no operara con gasolina, sino que utilizaba alcohol de caña, lo que llamamos etanol o bioetanol en este documento. De manera paralela, cuando Rodolfo Diesel desarrolló el primer modelo del motor que lleva su nombre, utilizó un combustible derivado del aceite vegetal parecido a lo que ahora llamamos el biodiésel. De hecho, el desarrollo de estos motores y ciclos termodinámicos fue lo que impulsó la industria de los combustibles fósiles, pero en el momento en que se dieron los primeros pasos, los combustibles derivados del petróleo no estaban disponibles (GOF, 2009).

Entre las fuentes de los biocombustibles, están la biomasa proveniente de cultivos como caña de azúcar, maíz, sorgo, yuca y otros, usada para producir etanol, y los aceites provenientes de palma africana, soya, higuerilla, jatropha curcas, colza y otras plantas, utilizadas para producir biodiésel.

En función del tipo de motor al que se aplican, los biocombustibles se clasifican en dos grandes grupos (Crespo, 1999):

- Bioalcoholes y sus derivados (motores de gasolina)
- Aceites vegetales y sus derivados (motores diésel)

Una condición para el éxito de los biocombustibles a corto y medio plazo es que puedan ser aplicados a los motores actuales sin tener que realizar en éstos demasiadas modificaciones. Por ello, los biocombustibles que presentan un mayor potencial de desarrollo son aquellos cuyas características se asemejan más al combustible que sustituyen.

1.4.1 Situación actual

Los biocombustibles para el transporte incluyen al etanol, principalmente de maíz y caña de azúcar, y el biodiésel, producido a partir de aceites vegetales o animales. El maíz representa más de la mitad de la producción mundial de etanol y la caña de azúcar más de la tercera. Casi toda la producción mundial hasta la fecha ha sido de biocombustibles de primera generación, es decir que utilizan materia prima de uso alimentario.

El biogás también se utiliza en cantidades muy limitadas para el transporte en Suecia y en otros lugares para alimentar los trenes, autobuses, y otros vehículos (NFRE, 2008). Los biocombustibles hacen pequeñas pero crecientes contribuciones al uso de combustible en algunos países y una gran contribución en Brasil, donde el etanol de caña de azúcar reemplaza el 50 por ciento de gasolina para el transporte. Estados Unidos es el mayor productor mundial de biocombustibles, seguido por Brasil y la Unión Europea (AIE, 2010B). A pesar de los continuos aumentos en la producción, las tasas de crecimiento de etanol y biodiésel han disminuido considerablemente en 2009.

Etanol

En 2009, la producción de combustible etanol alcanzó un estimado de 76,000 millones de litros, un aumento del 10 por ciento más que en 2008, tal como se observa en la Figura 1.11.

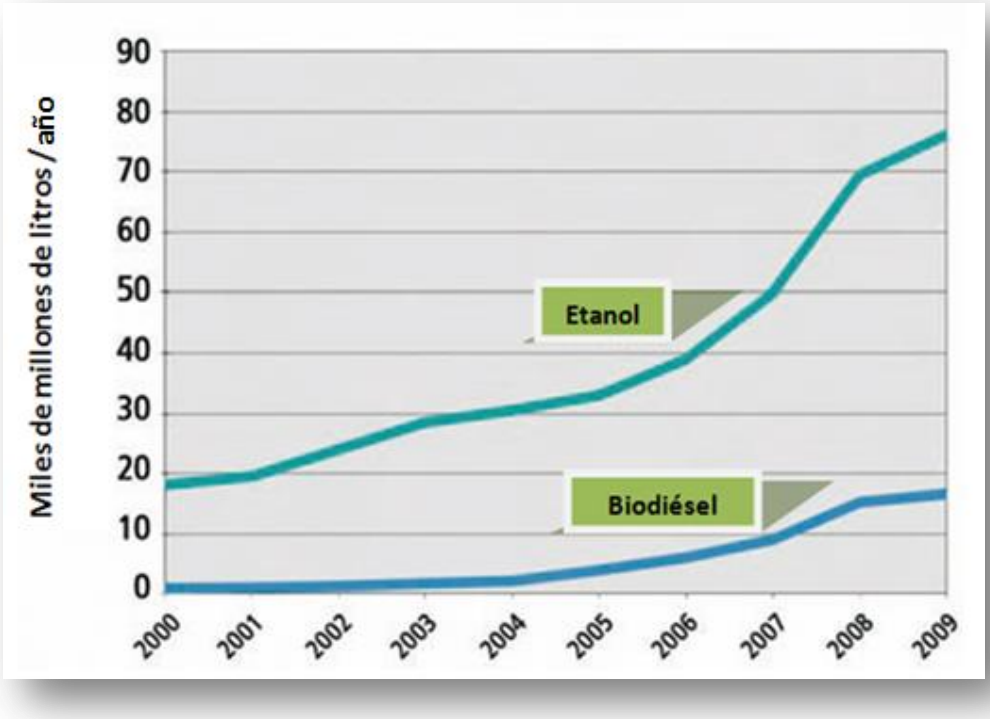

Figura 1.11 Producción de Etanol y Biodiésel 2000-2009 (REN21, 2010)

Los Estados Unidos y Brasil representaron el 88 por ciento de la producción mundial de etanol en 2009. La mayor parte de la producción ocurrió en los Estados Unidos, con aumentos significativos también en Canadá, Alemania y Francia; disminuyó la producción en Brasil. Bélgica (un 230%) y el Reino Unido (hasta 160%) vieron importantes expansiones, aunque sus total (120 millones de litros y 110 millones de litros, respectivamente) siguió siendo relativamente bajo. Otros países que producen volúmenes considerables de combustible etanol son Australia, Bélgica, China, Colombia, India, España y Tailandia (AIE, 2010C). En la Tabla 1.4 se enlistan estos datos.

Tabla 1.4 Producción de biocombustibles; Top 15 de países y Total EE.UU. en miles de millones de litros en 2009 (REN21, 2010)

País	Etanol	Biodiésel
Estados Unidos	41	2.1
Brasil	26	1.6
Francia	0.9	2.6
Alemania	0.8	2.6
China	2.1	0.4
Argentina	0	1.4
Canadá	1.1	0.1
España	0.4	0.6
Tailandia	0.4	0.6
Reino Unido	0.2	0.5
Colombia	0.3	0.2
Italia	0.1	0.4
Bélgica	0.2	0.3
India	0.2	0.1
Austria	0.1	0.2
Total EE.UU.	3.6	8.9
Total Mundial	76	17

Después de un descenso significativo en el mercado estadounidense de combustible etanol en 2008, la producción estadounidense aumentó 16 por ciento a cerca de 41 millones de litros en 2009, que representan aproximadamente el 54 por ciento de la producción global de etanol (AIE, 2010C). De acuerdo a un estimado, el etanol estadounidense (que es principalmente de maíz) desplazó más de 360 millones de barriles de petróleo importado para la producción de gasolina (REN21, 2010).

Los precios más altos de azúcar en años, combinados con las condiciones meteorológicas adversas en una importante región productora, resultaron en un descenso en la producción de etanol de Brasil de 27.1 millones de litros en 2008 a 26.3 millones de litros en 2009 (BMME, 2009). Todo el etanol producido en Brasil es de caña de azúcar. Todas las estaciones de combustible en Brasil venden etanol puro y gasohol, una mezcla de 25 por ciento etanol/75 por ciento de gasolina. Los vehículos de combustible flexible, que pueden utilizar cualquier combinación de los dos, gasolina o etanol puro, proporcionan la

flexibilidad de elegir según el precio en la bomba de combustible. Han sido ampliamente adoptados por controladores y representan más del 95% de todos los vehículos nuevos vendidos en Brasil (REN21, 2010).

En años recientes, ha surgido un comercio global significativo en combustible etanol, con Brasil, siendo el principal exportador. Sin embargo, la exportación de etanol brasileño disminuyó casi el 31 por ciento en 2009. La demanda internacional disminuyó en gran parte debido a la crisis económica global (REN21, 2010).

Biodiésel

La producción de biodiésel aumentó un 9 por ciento en 2009, a 16.6 mil millones de litros a nivel mundial; ésto se compara con un promedio de cinco años (finales de 2004 a 2009) de 51 por ciento. La producción de biodiésel está mucho menos concentrada que la de etanol, con 10 países representan casi el 77 por ciento de la producción total 2009 (AIE, 2010C). La Unión Europea sigue siendo el centro de producción de biodiésel en todo el mundo, que representó casi el 50 por ciento de la producción total en 2009, y el biodiésel aún representa al principal biocombustible que se consume en Europa. Pero el crecimiento en la región ha disminuido considerablemente en los últimos años. La producción aumentó menos del 6 por ciento en 2009, abajo del 65% de crecimiento en 2005 y 54% en 2006; al menos la mitad de las plantas existentes permaneció inactiva durante 2008/09 (AIE, 2010C). Francia contrarrestó esta tendencia, al aumentar su producción en un 34 por ciento durante el año 2009 para superar a Alemania como el líder europeo y mundial. Francia produjo más de 2,600 millones de litros, o 16% del biodiésel global. La producción en Alemania disminuyó en un 19 por ciento a poco menos de 2,600 millones de litros (AIE, 2010C). Entre los principales países productores de biodiésel, la producción fue también hacia abajo en los Estados Unidos, Italia y Bélgica. En contraste, una expansión significativa en términos de porcentaje se produjo en Argentina, Austria, Colombia, Indonesia, España y el Reino Unido, con tasas de crecimiento de 50 por ciento o más. India, que ocupó el lugar 16 en 2009, presentó un aumento de 100 veces la producción a más de 130 millones de litros. Otros productores de biodiésel en el top 15 son Brasil, China, Malasia y Tailandia.

1.4.2 Situación en México de los biocombustibles

En nuestro país se estima un potencial de producción de bioenergía que oscila entre los 2,635 y 3,771 PJ al año (CONAE, 2006). En el sector agroindustrial de la caña de azúcar, se ha calculado un potencial de generación de electricidad, a partir del bagazo de caña, superior a 3,000,000 MWh al año (CONUEE, 2010). El gobierno actual ha impulsado proyectos para el mejor aprovechamiento de la bioenergía, el proyecto de la empresa Sistemas de Energía Internacional S.A. de C.V., en Monterrey, N.L., es el primero en el país que aprovecha el biogás liberado por un relleno sanitario para entregar energía eléctrica a la red, con una capacidad de 7 MW. Este proyecto está registrado en la junta ejecutiva del

Mecanismo de Desarrollo Limpio de las Naciones Unidas y se estima que el proyecto reduce 1.6 millones de toneladas equivalentes de bióxido de carbono.

México cuenta con un potencial muy importante en cuestión de recursos energéticos renovables, cuyo desarrollo permitirá al país contar con una mayor diversificación de fuentes de energía, ampliar la base industrial en un área que puede tener valor estratégico en el futuro y atenuar los impactos ambientales ocasionados por la producción, distribución y uso final de las formas de energía convencionales. En este marco, el país posee vastos recursos naturales para la producción de bioenergéticos resultado de su gran diversidad agrícola y de sus condiciones climáticas y geográficas idóneas para este propósito.

Si bien existen varios cultivos potenciales para la producción de bioenergéticos, los considerados elegibles por la SAGARPA, entre otros, son la caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha para la producción de etanol; jatropha, higuerilla y palma de aceite para la producción de biodiésel. En la Figura 1.12 se observan las áreas identificadas para la producción de biomasa para bioenergéticos en México.

Los potenciales productivos son estimados por el INIFAP e incluyen las tierras agrícolas de temporal en la que es susceptible la siembra de insumos para bioenergéticos; sin embargo este potencial no significa que estén disponibles para bioenergéticos.

- La caña de azúcar actualmente se cosecha en aproximadamente 700 mil hectáreas, sin embargo su potencial productivo (alto y medio) es de más de 4 millones de hectáreas.

- La remolacha azucarera es un cultivo cuya superficie registrada en México es muy incipiente, sin embargo su potencial productivo es de más de 2 millones de hectáreas de temporal, lo que lo hace un cultivo viable para la producción de bioenergéticos.

- No se tienen registros de superficies sembradas de sorgo dulce de manera comercial, sin embargo el potencial productivo de este cultivo es de poco más de 2 millones de hectáreas.

- A pesar de que la jatropha es un cultivo nativo de México, las superficies comerciales registradas son recientes (del 2007 a la fecha, CONAFOR ha destinado apoyos para la siembra de 28 mil hectáreas), la mayoría de ellas en Chiapas. También existen proyectos importantes que se comienzan a desarrollar en la península de Yucatán. La jatropha es un cultivo cuyo potencial productivo, se ubica en zonas tropicales y subtropicales del país, con más de 2 millones de hectáreas.

- La palma de aceite registra una superficie plantada de 27,500 hectáreas sembradas, de ésta el 75% se encuentra en Chiapas. Su mayor potencial productivo

son los climas cálidos y subcálidos húmedos, en una superficie de más de 250 mil hectáreas.

Figura 1.12 Áreas identificadas para la producción de biomasa para bioenergéticos (SAGARPA, 2009)

Con el fin de promover la producción y utilización de biocombustibles en México, el Gobierno Federal trabajó en la elaboración de una Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos, que se complementará con dos programas sectoriales: el **Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico** de la SAGARPA, y el **Programa de Introducción de Bioenergéticos de la Secretaría de Energía** (SAGARPA, 2010B)**.**

Con la estrategia y los programas, "se establecerán las bases por las que la actividad agropecuaria se integrará a la actividad energética, coadyuvando a la diversificación energética y el desarrollo sustentable, sin poner en riesgo la seguridad alimentaria del país, además de contribuir a la reactivación del sector rural y la mejor calidad de vida para la población, en particular la de alta y muy alta marginalidad," buscando alcanzar una meta de 300 mil hectáreas dedicadas a cultivos que sirvan de insumos para bioenergéticos en el 2012, en particular bioetanol y biodiésel (SAGARPA, 2010B).

Introducción de etanol anhidro en los combustibles de las Zonas Metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y del Valle de México

Al respecto se han desarrollado diferentes estudios para estimar escenarios de introducción de los biocombustibles, como es el estudio SENER-BID-GTZ sobre Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiésel para el transporte en México, así como los estudios de potencial productivo por cultivo y regiones, realizados por el INIFAP. Estos estudios se tomarán como base para impulsar la producción de biomasa para bioenergéticos que permitan en el periodo de 2010-2012 la introducción del etanol como componente oxigenante al 6%, en sustitución del oxigenante tradicional MBTE. Se aplicará a las tres zonas metropolitanas: Guadalajara, Jalisco, en una primera etapa, seguida de Monterrey, Nuevo León y el Valle de México, incluido el D.F. (SAGARPA, 2009).

El Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y Desarrollo Científico y Tecnológico considera satisfacer en una primera etapa la producción de la biomasa para producir alrededor de 176 millones de litros por año, que permitan mezclarlo en las gasolinas de la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco; y en una segunda etapa alrededor de 630 millones de litros por año para abastecer las zonas de Monterrey, Nuevo León y de la Ciudad de México. En la Tabla 1.5 se especifican las metas de producción con datos proporcionados por PEMEX refinación y basado en rendimiento de 100 toneladas de caña de azúcar por hectárea y 75 litros de etanol por tonelada.

Tabla 1.5 Metas de producción de etanol de PEMEX refinería (PEMEX, 2010)

Zona Metropolitana	Demanda anual de etanol (millones de litros/año)		Superficie requerida (hectáreas)		Biomasa estimada (millones de toneladas/año)	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012
Guadalajara	176.0	184.0	23,467.0	24,533.0	2.4	2.5
Monterrey	-	133.0	-	17,733.0	-	1.8
Ciudad de México	-	493.0	-	65,733.0	-	6.6
TOTAL	176.0	810.0	23,467.0	108,000.0	2.4	10.8

El fallo que anuncia al ganador de la licitación para la compra de etanol ha sido aplazado ya que se detectaron inconformidades, de manera que el programa no comenzará en las fechas indicadas en la Tabla anterior y al 2011 aún no se tiene un proveedor para el suministro de etanol (SENER, 2011).

Introducción de biodiésel en el diésel de ultra bajo azufre (UBA)

Con base en el análisis de las características y potencial del biodiésel en México, la estrategia en el corto plazo estará basada en su uso como aditivo del diésel UBA. PEMEX

refinación ha definido una estrategia de integración del biodiésel al diésel de producción nacional en dos fases. La primera consistió en probar el uso como aditivo sobre 30 mil barriles diarios de diésel ultra bajo azufre (UBA). La segunda fase integraría el biodiésel como aditivo al total de la producción nacional de diésel UBA si el desarrollo del mercado de bioenergéticos así lo permite.

Uno de los objetivos en proceso de implementación es la producción de diésel UBA en todo el Sistema Nacional de Refinación. Para ello se invertirán más de 4 mil millones de dólares en los próximos cinco años.

La producción temprana de la refinería de Cadereyta, permitirá integrar 8.7 millones de litros de biodiésel al año (0.19 mil barriles diarios) para cumplir con la especificación de lubricidad, sustituyendo a los aditivos químicos de importación así se observa en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6 Introducción de biodiésel en el diésel de ultra bajo azufre (UBA) (SENER, 2010C)

Volumen incremental en cada fase	**87 miles de millones de litros/año 0.19 Mbd**	**105 miles de millones de litros/año 1.8 Mbd**
	Uso en Cadereyta 2009-2010	Suministro nacional 2011-2014
	Se producen 30 mil barriles diarios de diésel UBA en la refinería de Cadereyta	Con base en los resultados de la prueba y en función del volumen disponible de productos en el país, se determinará la posibilidad de cubrir los requerimientos de biodiésel para incluir como aditivo en el diésel UBA de producción nacional
	Se utiliza el biodiésel para cumplir con la especificación de la lubricidad	Dada la disponibilidad limitada de biodiésel, podría optarse por su utilización sólo en algunos centros de producción

Hasta principios del 2011, la Secretaría de Energía no ha publicado alguna determinación acerca del biodiésel para incluirlo como aditivo al diésel UBA de producción nacional.

Primera planta de producción de biodiésel en México

Uno de los proyectos de infraestructura más relevantes, apoyado por la SAGARPA y el Gobierno del Estado de Chiapas, con el soporte técnico del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y del Instituto para la Reconversión Productiva y la Agricultura Tropical (IRPAT), es la instalación del Centro de Investigación y Tecnología en Producción de Biodiésel y la primera planta de biodiésel del país 100 por ciento sustentable con capacidad de producir hasta 30 mil litros diarios de

biodiésel de la más alta calidad, para abastecer demandas del transporte público local de Tapachula, Chiapas; con 196 unidades (SAGARPA, 2010).

Este complejo, ubicado en Puerto Chiapas, tiene capacidad para producir 30 mil litros de biodiésel al día, en donde participan tres mil productores de 166 comunidades en 16 municipios, a través de 10 mil hectáreas para el cultivo de Jatropha (piñón mexicano).
En los últimos dos años la SAGARPA aportó recursos por más de 100 millones de pesos para 12 proyectos de investigación, transferencia de tecnología y desarrollo de infraestructura y equipamiento para la cadena de valor de los biocombustibles.

El INIFAP ha establecido un programa nacional de investigación para desarrollar tecnología sobre biocombustibles, en especial el bioetanol y biodiésel. El mejoramiento genético para generar variedades con características favorables como el alto rendimiento en campo y mejor calidad del aceite, son una oportunidad para darle rentabilidad y competitividad a la producción de piñón. En lo que respecta a biodiésel, ya existen avances importantes en la colecta y evaluación de genotipos, en la formación de bancos de germoplasma y en el establecimiento de ensayos nacionales de genotipos que permitirán la creación de nuevas variedades de piñón mexicano e higuerilla para diferentes regiones en el país, con potencial productivo. Considerado como de alto potencial el Sureste mexicano, el Gobierno Federal, a través de la SAGARPA, lleva a cabo proyectos para el estudio y mejoramiento de esta planta para la producción de biodiésel en esta zona del país.

La *jatropha curcas* es nativa del país con un gran potencial como biocombustible por su alto rendimiento de aceite. Es una planta rústica adaptada a las condiciones del trópico: Chiapas y otros estados del sureste. A nivel nacional se estiman alrededor de 2.6 millones de hectáreas con alto potencial para el cultivo de piñón. En México las primeras siembras comerciales de piñón iniciaron en 2007 en Chiapas y Michoacán, estados que impulsan programas de desarrollo y la participación social, privada y pública para la producción de biocombustibles; en la actualidad hay plantaciones en Sinaloa, Yucatán, Veracruz, Morelos, Oaxaca y San Luis Potosí (SAGARPA, 2010).

2 Fundamentos

El biodiésel

La idea de utilizar combustibles provenientes de la biomasa en motores diésel fue contemplada desde los mismos orígenes de la tecnología de fabricación de éstos. Es celebre la referencia histórica sobre la presentación de un motor diésel funcionando con aceite de cacahuate en la feria de París del año 1900. Tal demostración fue llevada a cabo con el patrocinio del gobierno francés, que estaba interesado en que sus colonias africanas fueran autosuficientes en el consumo de combustibles (Knothe y col., 2005).

Sin embargo, algunas propiedades inherentes a la naturaleza química de los aceites vegetales, principalmente su alta viscosidad y su baja volatilidad, conducen a una serie de inconvenientes técnicos que limitan la utilización de estos biocombustibles directamente en motores diésel, en especial aquellos de inyección directa. La elevada viscosidad de los aceites (del orden de diez o más veces, superior a la del diésel convencional) dificulta el proceso de atomización del chorro. El elevado punto final de la curva de destilación, sumado a la pobre atomización del combustible, conduce a evaporación incompleta y a procesos de mezclado y combustión deficientes (formación de partículas y depósitos carbonosos). Debido a las altas temperaturas que se alcanzan en la cámara de combustión, el aceite puede experimentar descomposición térmica, previa a la combustión, lo cual también contribuye a la formación de depósitos en inyectores, cámara, pistones y válvula. Además, al cárter del motor puede pasarle aceite sin quemar, diluyendo y deteriorando el aceite lubricante (Barsic y Humke, 1981).

Dado que con la utilización de mezclas de aceite vegetal y diésel en motores modernos se pueden presentar dificultades similares a las reportadas para los aceites puros, la opción más recomendada ha sido la transformación del aceite, de tal modo que se obtenga un combustible con propiedades similares a las del combustible diésel convencional. En este sentido se han planteado alternativas, como la descomposición térmica del aceite o pirólisis (Benjumea y col., 2009), la preparación de microemulsiones (Ziejewski, 1984) y la transformación de los triglicéridos (triésteres) en mezclas de ésteres simples o monoalquilésteres de ácidos grasos (transesterificación). La ruta oleoquímica planteada en la última alternativa es la vía más expedita para obtener el biocombustibles que hoy en día se le conoce como biodiésel (Benjumea y col., 2009).

El concepto de biodiésel hoy en día se restringe, de forma exclusiva, a mezclas de monoalquilésteres de ácidos grasos obtenidos a partir de lípidos renovables, como aceites y grasas de origen vegetal o animal (Mittelbach, 2004).

El primer reporte de uso de monoalquilésteres de ácidos grasos aparece en la patente belga 422.872, otorgada el 31 de agosto de 1937 al investigador G. Chavanne, de la universidad de Bruselas. En dicha patente se describen aspectos de la obtención y utilización de etilésteres de aceite de palma (Mittelbach, 2004). Sin embargo, el trabajo de

Chavanne y otros investigadores no condujo al desarrollo de la industria del biodiésel en el corto plazo.

En 1980 se registraron dos patentes, una brasileña y otra alemana, contemplando la utilización de metilésteres de aceites vegetales como sustituto del combustible diésel (Mittelbach, 2004). Austria fue el país pionero en la producción de biodiésel y en el desarrollo de estándares de calidad. La primera planta para la producción industrial de biodiésel fue construida en ese país en 1991, utilizando aceite de colza como materia prima; y en ese mismo año, el Instituto Austriaco de Estandarización publicó el primer estándar de calidad para metilésteres de ácidos grasos, de acuerdo con Knothe, el término biodiésel fue utilizado por primera vez en la literatura científica en un artículo chino de 1988 (Knothe y col., 2005).

2.1 Aspectos técnicos del biodiésel

Básicamente, el diésel basado en la biomasa, es decir, biodiésel puede ser producido por diferentes vías de producción:

- La conversión fisicoquímica, es decir, transesterificación, la cual es la vía más establecida para la producción de biodiésel a nivel mundial.

- La conversión termo-química, que es la gasificación de la biomasa y enseguida la síntesis del combustibles (por ejemplo, Fischer-Tropsch-Diésel) lo cual es más complejo y actualmente se encuentra en una etapa de investigación y desarrollo.

- La conversión físico-termo-química que utiliza la hidrogenación de aceites crudos (por ejemplo, aceite de palma) en el proceso de refinación del petróleo crudo en diésel, la cual es más una opción de nicho bajo ciertas condiciones utilizado por PETROBRÁS en Brasil.

Sin embargo, de acuerdo al artículo 2 de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos únicamente la producción de biodiésel por la vía más establecida que es la conversión fisicoquímica será la que se tomará en cuenta en este trabajo (SENER, 2006).

2.1.1 Materias primas y sus requerimientos para la producción de biodiésel

Los aceites y las grasas constituyen las materias primas esenciales para la producción de biodiésel, es decir cualquier fuente renovable de triglicéridos. En la Tabla 2.1 se presenta una clasificación de los aceites y las grasas, de acuerdo con su origen: Vegetal o animal.

El tipo y la calidad de la materia prima son factores decisivos, según el diseño técnico de una planta de transesterificación respectivamente en el material correspondiente y los

flujos de energía, que no son sólo los indicadores de la eficiencia técnica, sino que también afectan a la eficiencia económica de la producción de biodiésel.

Tabla 2.1 Materias primas para la producción de biodiésel (Benjumea y col., 2009)

Materia prima	Clasificación	Nombre común	Nombre científico
Origen Vegetal	Aceites convencionales	Colza	*Brassica napus*
		Soya	*Glycine max*
		Palma	*Elais guineensis*
	Aceites Alternativos	Cardo	*Cynara cardunculus*
		Piñón	*Jatropha carcus*
		Mostaza etíope	*Brassica carinata*
		Camelina	*Camelina sativa*
		Coco	*Cocos nucifera*
		Higuerilla	*Ricinus communis*
		Cártamo o alazor	*Carthamus tinctorius* *Pongamia pinnata*
		Linaza	*Linum usitatitissimum*
		Subproductos de la industria de aceites comestibles	
		Subproductos de la industria papelera	
		Aceite de microalgas	
Origen animal		Sebo de res, manteca de cerdo, aceite de pescado	

2.1.1.1 Propiedades y características

Los aceites y las grasas están formados de una categoría específica de compuestos orgánicos llamada triglicéridos. Una molécula de triglicéridos, se muestra en la Figura 2.1, se compone de tres unidades de ácidos grasos, conectadas a una red troncal de tres carbonos. Si todos los átomos de carbono del ácido libre están conectados en enlaces simples se llaman saturados; si uno está conectado en enlace doble se denominan monoinsaturados, si poseen más de un enlace doble los ácidos grasos se llaman poliinsaturados.

La cantidad de los diferentes ácidos grasos se da genéticamente y se conoce como perfil de ácidos grasos que se muestra en la Figura 2.2. El perfil de ácidos grasos puede utilizarse para predecir las propiedades físicas y rendimiento del producto biodiésel. Por ejemplo, el biodiésel producido a partir de sebo, una grasa muy saturada, tiende a tener un mayor punto de congelación que puede inhibir las propiedades de flujo frío. Además, algunas sustancias tales como el agua, conexiones de fósforo (es decir, fosfolípidos) así como restos de azufre figuran dentro de los aceites y las grasas, y también pueden tener efectos

sobre la utilidad técnica (SENER, 2006). Es recomendable aquel aceite con mayor porcentaje de ácidos grasos monoinsaturados porque reduce la demanda de catalizadores y metanol en la producción de biodiésel, también tendrá menor viscosidad y su comportamiento en flujo frío no necesitará de agentes de invernalización.

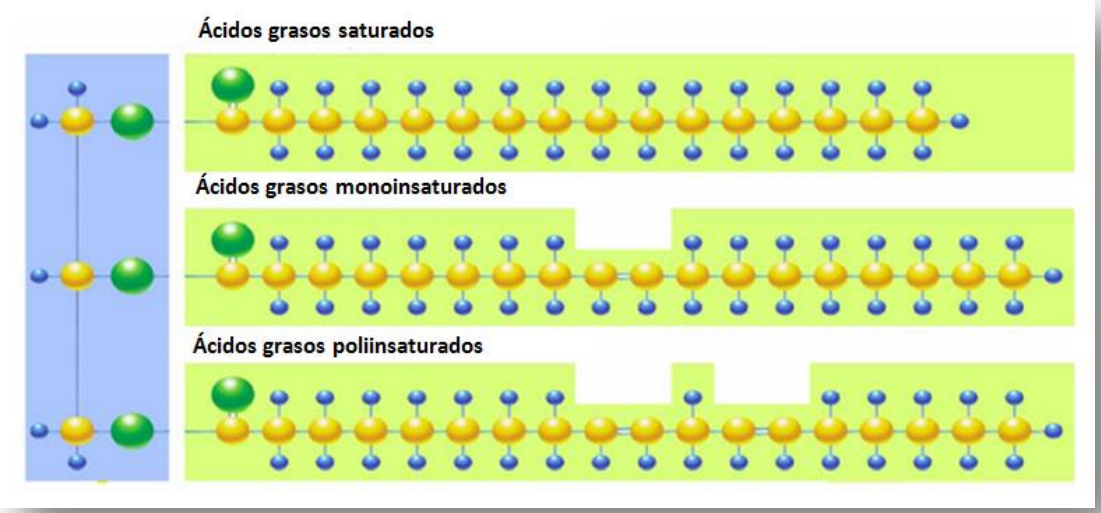

Figura 2.1 Ejemplo de la composición de un triglicérido (UFOP, 2004)

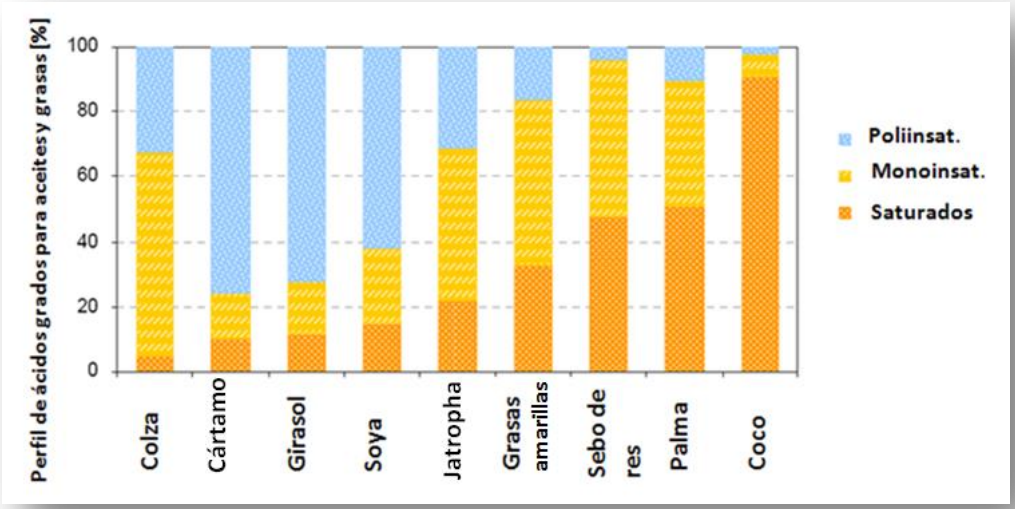

Figura 2.2 Perfil de ácidos grasos para diferentes materias primas (NREL, 2001)

Para una clasificación de las diferentes materias primas vegetales y animales son esenciales los siguientes parámetros que se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros de las materias primas y su relevancia en el uso y producción de biodiésel (SENER, 2006)

Parámetro	Caracterización	Relevancia para el uso y producción del biodiésel
Ácidos grasos libres (AGL)	Indicador del nivel de hidrólisis; el contenido de AGL de grasas y aceites sin refinar puede estar por encima de 20.0, los aceites y grasas refinadas tienen AGL menores a 1.0	Influyen en el grado de procesamiento requerido (la demanda de catalizador y metanol) y la calidad de biodiésel (principalmente propiedades de flujo frío)
Contaminación total	Proporción de impurezas sin resolver (partículas) en los aceites y grasas; afectado principalmente por la producción del aceite	Altas contaminaciones totales llevan a la obstrucción de los filtros de combustible y aumentan el peligro de daños a la bomba de inyección y toberas de inyección, así como de depósitos en la cámara de combustión.
Contenido de agua	Por la humedad de las semillas y los aceites y grasas refinadas; puede aumentar el contenido de agua en el almacenamiento y transporte	A altas temperaturas el agua puede hidrolizar los triglicéridos a diglicéridos y formar ácidos grasos libres; potenciales para perturbar la transesterificación por pérdida de catalizadores y producción de jabón no deseado
Viscosidad cinemática	Característica física-mecánica, depende del punto de fusión específico	Influenciada por la temperatura, el perfil de ácidos grasos y el grado de envejecimiento de los aceites
Numero de yodo	Indicador de dobles enlaces en la estructura molecular de aceites y grasas. Cuanto mayor sea el valor de yodo, será mayor la cantidad de ácidos insaturados presentes en los aceites y grasas	Alto número de yodo de aceites y grasas por menos años de resistencia que los aceites y grasas con alto grado de saturación; informa sobre la tendencia de los depósitos en la cámara de combustión y en toberas de inyección
Contenido de fósforo	Presentes en los aceites vegetales en forma de fosfolípidos; depende del grado de refinación de aceites y grasas en el proceso de producción de aceite	Disminución de la estabilidad de la oxidación con creciente porción de fosfolípidos; grandes cantidades de fosfolípidos que conllevan a disturbios en procesos técnicos (por ejemplo, bloqueos de filtros y toberas de inyección); evitación de compuestos de fósforo en aguas residuales
Estabilidad de oxidación	Valor que describe la condición de envejecimiento y la vida útil de aceites y grasas	Procedimientos de oxidación y polimerización durante el almacenamiento de combustible, que pueden conducir a la formación de compuestos insolubles y causar así por ejemplo, obstrucción de filtros

2.1.1.2 Aceites de origen vegetal convencionales

Los aceites vegetales adecuados para la producción de biodiésel incluyen los aceites de productos básicos como los basados en palma, soya, colza, girasol y cártamo. Algunos aceites de oliva y aceites de maní sirven también para biodiésel; sin embargo, son demasiado caros en el mercado. También pueden utilizarse otros aceites como el aceite de coco, pero las propiedades físico-químicas los hacen menos atractivos para la producción de biodiésel. Los cultivos de aceite (es decir, semillas y frutos) se caracterizan por sus diferentes contenidos totales de aceite que está en el rango de, por ejemplo, el 17% para la soya a aproximadamente el 38% para la colza.

La mayoría de los aceites vegetales tienen la ventaja de tener bajo contenido de ácidos grasos libres (AGL) y por lo general muy bajas concentraciones de otros contaminantes (por ejemplo, agua). Aún así, algunos de los aceites crudos deben ser parcial o totalmente refinados para reducir el contenido de AGL y la cantidad de fosfolípidos. El perfil de ácidos grasos de aceites de vegetales de climas más templados permiten a los ésteres satisfacer los requerimientos de flujo frío sin la necesidad de agentes de acondicionamiento para el invierno (invernalización o del inglés "winterization" el cual es un proceso para reducir la temperatura de cristalización del biodiésel). El contenido poliinsaturado deseable para la mayoría de los aceites vegetales puede disminuir el índice de cetano del biodiésel (el índice de cetano es el indicador de calidad de ignición. Un alto número de cetano contribuye a un fácil arranque en frio y bajo ruido inactivo) de almacenamiento del producto (SENER, 2006).

Colza. El aceite de colza (también denominado aceite de canola) es la principal materia prima utilizada en Europa para la producción de biodiésel. Las semillas de colza industrial se utilizan en una variedad de lubricantes de alto rendimiento, inhibidores de corrosión y otros productos, así como en biodiésel. A través de su alto contenido de monoinsaturados y bajo contenido de ácidos grasos saturados el aceite de semilla de colza es una de las materias primas más adecuadas para la producción de biodiésel en relación con las características de quemado, la estabilidad de oxidación y la propiedad de flujo frío (es decir, se mantiene en estado líquido durante el invierno). Un subproducto acumulado durante el procesamiento de aceite (por ejemplo, por pasos mecánicos o extracción) de semillas de colza es una comida rica en proteínas, que puede ser un sustituto de la harina de frijol de soya para la intensiva industria de la ganadería (Mittelbach, 2004).

El aceite de canola es una variedad del aceite de colza, desarrollada inicialmente en Canadá, que además de poseer un bajo contenido de acido erúcico (menos del 2%), contiene menos de 30 µmol/g de glucosinolatos. El aceite de canola conserva la distribución de ácidos grasos saturados, insaturados y poliinsaturados del aceite de colza, compensando la disminución en su contenido de acido erúcico con aumento en el de oleico (Benjumea y col., 2009).

En los dos ciclos del año 2004, se cosecharon en México 1,228 hectáreas, de las cuales 837 fueron de temporal (secano) y 371 de riego.

Su rendimiento medio fue de: en riego 2,126 kilos por hectárea; en temporal 1,537 kilos por hectárea. Los estados productores fueron: Tamaulipas, Jalisco, Tlaxcala y México. En el año del 2005 se incorporó Guanajuato a la producción bajo riego, en el ciclo otoño invierno 2005-06.

La semilla de Colza contiene entre 380 y 400 kilos de aceite y entre 180 y 200 kilos de proteína por tonelada y al procesarla por el método de Presión, no de Solventes, se obtienen 369 kilos de aceite crudo y aproximadamente 500 kilos de pastel o pasta con 200 kilos de proteína. Los 369 kilos de aceite al esterificarse con metanol, producirán 387 kilos de Biodiésel, es decir aproximadamente 460 litros. Así, los productos principales de la transformación de una tonelada de semilla, serían: 460 litros de Biodiésel 500 kilos de pastel o pasta con 40% de proteína (SENER, 2006). En la Figura 2.3 se observa la planta de colza.

Figura 2.3 Rama de planta de colza

Soya. El aceite de soya se recupera como un subproducto de la producción de harina de frijol de soya, un material de proteína de alimentos y forraje. Este aceite templado ha recibido la mayor atención como fuente de biodiésel en Estados Unidos debido a la amplia infraestructura para la recuperación y refinación de aceites de frijol de soya. Los principales ácidos grasos en triglicéridos de aceite de frijol de soya son poliinsaturado (57 a 61%) y ácidos monoinsaturados (22 a 26%). El perfil de ácidos grasos de aceite de soya proporciona un producto éster que requiere mínima invernalización. En cuanto al aceite de soya en su mayoría supera un número de yodo mayor a 120, no es adecuado como biodiésel según el estándar europeo de biodiésel EN 14214 (Mittelbach, 2004).

Planta anual de origen oriental, que prefiere para su buen desarrollo, veranos cálidos y húmedos. En México, se emplea como aceite para cocinar y la pasta, co-producto del proceso de extracción, como fuente de proteína en los alimentos balanceados para el ganado. Producto muy apreciado.

Su cultivo ha disminuido significativamente en nuestro país, casi ha desaparecido en la tecnología de riego y se produce de temporal, principalmente en el sur de Tamaulipas zona en la que en el año de 2004 se cultivaron 54,000 hectáreas. La producción nacional alcanzó en ese año, 133 mil toneladas en 89 mil hectáreas cosechadas, 80 mil de temporal y sólo 9 mil 600 de riego, éstas también en Tamaulipas. En Chiapas (Soconusco) y en San Luis Potosí hubo siembras de temporal en 12 mil y 11 mil hectáreas respectivamente en el año del 2004.

El rendimiento medio nacional, fue de 1,500 kilos por hectárea. Así, resulta obligado para nuestro país comprar en el exterior, grandes cantidades de frijol de soya y de pasta: Del grano importamos en el ciclo 2004-05 tres y medio millones de toneladas y se proyecta importar seis millones para el ciclo 2015-2016 (SENER, 2006). En la Figura 2.4 se observa una vaina de frijol de soya.

Figura 2.4 Vaina de una planta de frijol de soya

Una tonelada de granos de soya con 6 – 8 % de humedad, al procesarse, produce aproximadamente 200 litros de aceite y 800 kilos de pastel o pasta, la cual contiene del 44 al 47% de proteína, o sea alrededor de 360 kilos. Los 200 litros de aceite al esterificarse con metanol y sosa potásica como catalizador, producirán 220 litros de biodiésel (SENER, 2006).

Palma africana. El aceite de palma africana o palma de aceite es el mayor recurso en volumen de triglicéridos en el mundo. Como su nombre indica, el aceite de palma es aceite derivado del árbol de palma de aceite. El aceite de palma es el material de interés para la producción de biodiésel. El aceite de palma se caracteriza por altos contenidos de ácidos saturados (38 a 52%) y monoinsaturados (32 a 40%). El aceite es semisólido a

temperatura ambiente. El perfil de ácidos grasos del aceite de palma no le permite a los ésteres satisfacer los requerimientos de flujo frío sin invernalización en las regiones templadas (NREL, 2003).

Es una planta del trópico húmedo, que es la mejor opción para las tierras bajas de las regiones tropicales y ayuda a prevenir la erosión.

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, (INIFAP) informa que existen en el país, "alrededor" de 2.5 millones de hectáreas con buen potencial para su cultivo, localizadas en los estados de Chiapas, Campeche, Guerrero, Michoacán, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco y Veracruz.

En el año 2004, se encontraban bajo cultivo en nuestro país, 36,374 has, en Chiapas, Veracruz, Campeche y Tabasco, de las cuales 30,603 son de temporal, destacando los rendimientos de Chiapas con un poco más de 18 toneladas de racimos frescos por hectárea y un precio medio rural de $ 628 por tonelada de fruta fresca.

Es oportuno mencionar que en otros países de América como en Costa Rica, con nuevas variedades y desde luego mejor tecnología de producción que la nuestra, se cosechan de 38 a 40 toneladas por hectárea por año, de racimos de fruta fresca, que se traducen en 9.8 toneladas de aceite con los que se pueden producir 12,302 litros de Biodiésel por hectárea.

La producción mundial de aceite de palma en el ciclo 2003-04, se pronosticó en 28.77 millones de toneladas métricas. Este pronóstico para 2004-05 fue de 30.4 millones de toneladas, siendo los principales productores Malasia e Indonesia. En la Tabla 2.4 se enlistan los países de América productores de aceite de palma.

Tabla 2.3 Producción de aceite de palma en América 2004-05 (SENER, 2006)

País	Toneladas aceite
Ecuador	262,000
Costa Rica	189,000
Brasil	149,000
Honduras	144,000
Guatemala	92,000
Venezuela	85,000

En México en el año de 2003, la superficie sembrada era de 29,167 hectáreas y la superficie cosechada produjo 217 mil toneladas de racimos frescos.

Una tonelada de aceite más 150 kilos de etanol, producen 1,050 kilos de biodiésel más 100 kilos de glicerina. Considerando solo los productos principales, tenemos que, en virtud

del peso volumétrico del éster (0.9) con una tonelada de aceite se producen 1,167 litros de biodiésel (SENER, 2006).

Girasol. El aceite de girasol es comparable con las características físicas del aceite de soya. En la actualidad, sólo se utiliza marginalmente para la producción de biodiésel; pero está en discusión como materia prima en el sur de Europa.

En México, en el año de 2004 se cosecharon 90 hectáreas de girasol, con un rendimiento en semilla, de 2.58 toneladas por hectárea. De esta superficie, 70 hectáreas se cultivaron de riego, principalmente en Chihuahua. El precio medio rural fue de $ 3,129.00 por tonelada. La semilla de girasol, en base seca, en peso, se compone de 42% de aceite; 16% de proteína y 40% de fibra. Así, de una tonelada de semilla se obtienen extrayendo por Presión: 387 kilos de aceite y 613 kilos de pasta, ésta con 160 kilos de proteína, es decir, el 26%. Los 387 kilos de aceite al esterificarse con metanol, producirán aproximadamente 405 kilos de biodiésel, es decir, 482 litros (SENER, 2006).

Cártamo. El aceite de cártamo se cree que es uno de los aceites vegetales de más alta calidad. Hay dos tipos de cártamo: (i) Un con alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados (ácido oleico) y (ii) El otro alto en ácidos grasos poliinsaturados (ácido linoleico). Actualmente, en el mercado de aceites predomina el ácido oleico, que por ejemplo es menor en saturados y superior en monoinsaturados que el de aceite de oliva. El aceite de girasol es comparable con las características físicas de frijol de soya.

En el año de 2004, se cosecharon en México 212,000 hectáreas, de las cuales 122,686 fueron de riego, de alcance relevante en Sonora (105,000 has) con un rendimiento de 1,400 kilos por ha. En la tecnología de temporal, Tamaulipas cosechó 56,000 has con un rendimiento de 420 kilos por ha. El precio medio rural fue de $ 2,354 por tonelada. La semilla contiene por kilo, 280 gramos de aceite y 126 gramos de proteína (además 500 gramos de carbohidratos totales, 43 gramos de cenizas y 48 gramos de agua). Así, de una tonelada de semilla de cártamo se producen aproximadamente: 272 kilos de aceite 728 kilos de pasta que contienen 126 kilos de proteína, es decir el 17.3% Los 272 kilos de aceite al esterificarse con metanol producirán aproximadamente 285 kilos de biodiésel, es decir 339 litros (SENER, 2006).

2.1.1.3 Aceites alternativos

Paralelo a la utilización de los aceite vegetales convencionales, en diferentes países se vienen desarrollando investigaciones de laboratorio y planta piloto, con el objetivo de evaluar la factibilidad de producir biodiésel a partir de aceites vegetales alternativos preferiblemente no comestibles. Entre tales trabajos es de resaltar el exhaustivo estudio desarrollado por el Instituto de la Zona Árida Central de la India, en el cual se evaluó el potencial para producir biodiésel de 74 especies de plantas no comestibles caracterizadas

por poseer semillas o frutos con un rendimiento de aceite por encima del 30% en peso (Benjumea y col., 2009).

En particular los aceites de higuerilla o ricino y de piñón revisten gran interés para países del suroriente asiático y de Centro y Sur América.

En Perú, Ecuador y Colombia, se ha contemplado la posibilidad de producir biodiésel con especies amazónicas, como el inchi o maní de árbol (*Caryodendon orinosense*) y el sacha inchi (*Plukenetia volúbilis* Linneo).

La mayor dificultad con esos aceites alternativos es la poca experiencia que se tiene con su cultivo, pues en la mayoría de los casos corresponden a cultivos silvestres.

Jatropha. Las semillas del piñón o tempate, lo mismo que su aceite, no pueden usarse con fines alimenticios, debido a que contienen diversos compuestos tóxicos, entre ellos la toxalbumina llamada *curcina*, la cual puede producir alteraciones en los tejidos y en el sistema nervioso.

El aceite de Jatropha o piñón puede caracterizarse por su parte alta de ácidos monoinsaturados y poliinsaturados. Se ha encontrado que el aceite de Jatropha tiene propiedades que permiten la conversión en biodiésel que se ajusta a la mayoría de las normas internacionales y su uso tiene todas las ventajas de utilizar biodiésel de colza.

México, en su biodiversidad, también alberga a esta noble planta nativa del país, conocida como Piñón o Piñoncillo.

Se le localiza en climas tropicales y semi-tropicales, es un arbusto-árbol que llega a medir de 1 a 8 metros y se desarrolla en altitudes que van de 5 a 1,500 msnm. Crece en suelos pobres y arenosos, es resistente a la sequía y la semilla posee un importante contenido de proteína y de grasa. Se cultiva en India, África y Centroamérica para obtener Biodiésel. No se cultiva en México.

La Jatropha se conoce en la Península de Yucatán como “Sikil-Te” y se distribuye en Chiapas, Oaxaca, Quintana Roo, Guerrero, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Tamaulipas, Sinaloa y Sonora.

La planta empieza a producir desde el primer año, aunque con rendimientos moderados y éstos se incrementan durante los primeros cinco años y luego se estabilizan, con vida útil que puede alcanzar hasta 50 años. El rendimiento por hectárea es de 5 toneladas de semilla seca por hectárea, de los cuales de 1.8 a 2 toneladas son de aceite y 3.255 toneladas de pastel ricas en proteína (57%). En la Tabla 2.4 se muestra su composición a detalle (SENER, 2006).

Tabla 2.4 Composición de la semilla de *Jatropha Curcas* (SENER, 2006)

	% peso
Agua	6.6
Grasa	38.0
Carbohidratos	32.5
Proteína	18.2
Cenizas	4.0

Higuerilla. En forma similar al aceite de piñón, el aceite de higuerilla no es comestible, debido a la presencia de la toxalbumina denominada *ricina*, proteína toxica presente en las semillas de la planta que puede producir irritación en el tracto gastrointestinal, dolor y náuseas. No obstante uno de los usos tradicionales ha sido como laxante.

El aceite de higuerilla es el único aceite comercial que contiene hidroxiácidos grasos. Por su alto contenido de acido ricinoleico (cercano al 90%), el cual se encuentra fundamentalmente haciendo parte del triglicérido simple trirricinoleina, el aceite de higuerilla es más viscoso, menos soluble en hexano y más soluble en etanol que los aceites compuestos exclusivamente por ácidos carboxílicos. A partir del aceite de higuerilla se obtienen productos como adhesivos, tintas, plásticos, lubricantes entre otros.

Los aceites de inchi y sacha inchi son altamente valorados para el consumo humano, debido a sus altos contenidos de ácidos grasos carboxílicos poliinsaturados. En particular, el aceite de sacha inchi contiene cerca de 49% por peso de acido linolénico. Dicho compuesto, escaso en la naturaleza y muy importante para la vida y la salud, pertenece a la categoría de los denominados *ácidos grasos esenciales,* llamados así porque el organismo no es capaz de sintetizarlos a partir de los alimentos que ingiere.

2.1.1.4 Aceite de microalgas

El crecimiento de la industria del biodiésel en el mundo está limitado por la disponibilidad de tierras aptas para la agricultura y los rendimientos de aceite por hectárea. En ese sentido, la obtención de biodiésel a partir de algas aparece como alternativa prometedora a largo plazo.

Las algas pueden crecer prácticamente en cualquier lugar donde se garantice suficiente luz solar. Algunas especies de microalgas pueden crecer en medios acuosos salinos. De acuerdo con varios estimativos, el aceite por hectárea obtenido con microalgas puede ser 200 veces mayor al obtenido con aceites convencionales como la soya y la colza. Estos microorganismos pueden completar un ciclo completo de crecimiento en pocos días (Xu y col., 2006).

Gran parte de los esfuerzos investigativos en microalgas están siendo focalizados a la búsqueda de tecnologías que permitan su producción a gran escala en fotobioreactores y

a la aplicación de la ingeniería genética para desarrollar especies que produzcan altos niveles de aceite (Chisti, 2007).

2.1.1.5 Aceites usados de fritura

Una opción llamativa es la producción de biodiésel a partir de aceites usados de fritura. Dicha alternativa permite utilizar materia prima de más bajo costo que los aceites refinados y, a la vez, facilita la disposición final de un residuo con alto potencial contaminante. Este esquema de producción de biodiésel ha llegado a desarrollarse industrialmente en países que cuentan con legislaciones adecuadas sobre la disposición final de los aceites fritos y en los que existen empresas con experiencia en la gestión de su recolección.

Se debe tomar en cuenta que la fritura es un proceso físico-químico complejo que puede afectar significativamente la estructura química del aceite original. Las condiciones en las que se desarrolle el proceso pueden promover reacciones de diverso tipo, como: hidrólisis (formación de ácidos grasos libre, glicerol libre y mono y diglicéridos), oxidación (formación inicial de hidroperóxidos y posterior de aldehídos, cetonas, hidrocarburos, alcoholes, entre otros) y polimerización (formación de dímeros o polímeros a partir de radicales libres provenientes de los enlaces dobles de los ácidos grasos). La mayoría de los componentes formados por las reacciones mencionadas son de naturaleza polar y se pueden retirar del aceite frito mediante adsorción con sólidos porosos naturales o sintéticos (Benjumea y col., 2009).

2.1.1.6 Aceites y grasas de origen animal

En comparación con los aceites vegetales, los aceites y grasas animales tienen costos más bajos, pero su disponibilidad en el mercado es más limitada, por tratarse de subproductos de la industria cárnica, vendidos principalmente para producir jabones y ceras (Benjumea y col., 2009). De cada animal adulto faenado se obtiene alrededor de 15 Kg de sebo.

Uno de los limitantes del biodiésel a partir de esta grasa animal es que en zonas con bajas temperaturas (inferiores a los 5^{o}C), el combustible comienza a solidificarse, evitando su eficaz comportamiento. Otro factor limitante es su alto número de cetano. Estos obstáculos pueden y deben ser solucionados a través del agregado de aditivos o del filtraje del exceso de grasa.

2.1.2 Proceso de producción de biodiésel

Químicamente, la transesterificación (también llamada alcohólisis) significa tomar una molécula de triglicéridos o un ácido graso complejo, neutralizar los ácidos grasos libres, quitando la glicerina y creando un éster de alcohol. Este proceso ha sido ampliamente utilizado para reducir la alta viscosidad de triglicéridos. La reacción de transesterificación es representada por la ecuación general de la Figura 2.5.

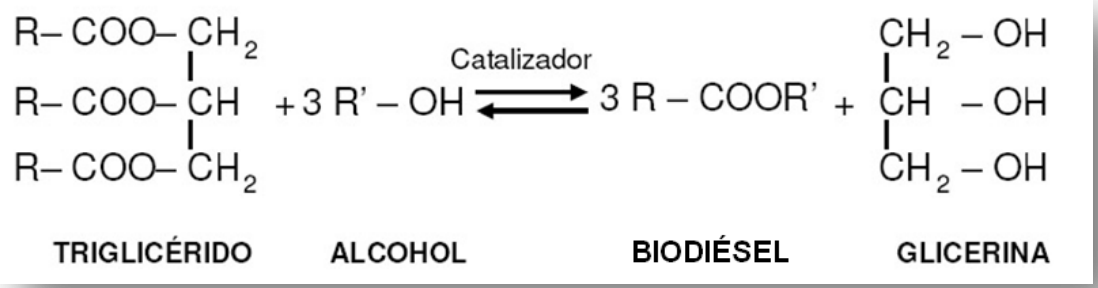

Figura 2.5 Reacción química de la producción de biodiésel (SENER, 2006)

Hay tres pasos básicos en la producción de biodiésel de aceites y grasas: (trans)-esterificación, procesamiento de éster de alcohol y la purificación de la glicerina que se ilustran en la Figura 2.6.

En el primer paso del proceso el aceite es depositado en el reactor y mezclado con el alcohol (por ejemplo, metanol) y el catalizador. La reacción del aceite y el alcohol dando como producto biodiésel y glicerina, es una reacción de equilibrio, que se detiene, si alrededor de dos terceras partes de los materiales básicos reaccionaron. Para aumentar el rendimiento durante la producción industrial, un producto de la reacción (normalmente glicerina) puede ser separado o se utiliza un excedente de algún compañero de reacción. En la mayoría de los casos se trabaja con un excedente de alcohol para afectar el equilibrio en la dirección deseada. Una reacción de transesterificación exitosa produce dos fases liquidas: Fase de (i) Alcohol éster y (ii) La glicerina. Al final de la reacción de la fase de la glicerina, la cual se sedimenta debido a la diferencia de densidades, debe separarse. Esta separación debe realizarse rápida y completamente, a fin de evitar reacciones reversibles. Se utiliza una centrifuga en estos casos para acelerar la separación (SENER, 2006).

Una vez separado de la glicerina éster de alcohol se lava para quitar cualquier jabón formado durante la reacción, así como el glicerol libre residual y el alcohol. El éster de alcohol se seca, a continuación, para quitar todas las aguas. En algunos casos, los ésteres son destilados al vacío para lograr mayor pureza a cuerpos de color en el combustible y tratando de reducir y eliminar azufre o fósforo del combustible.

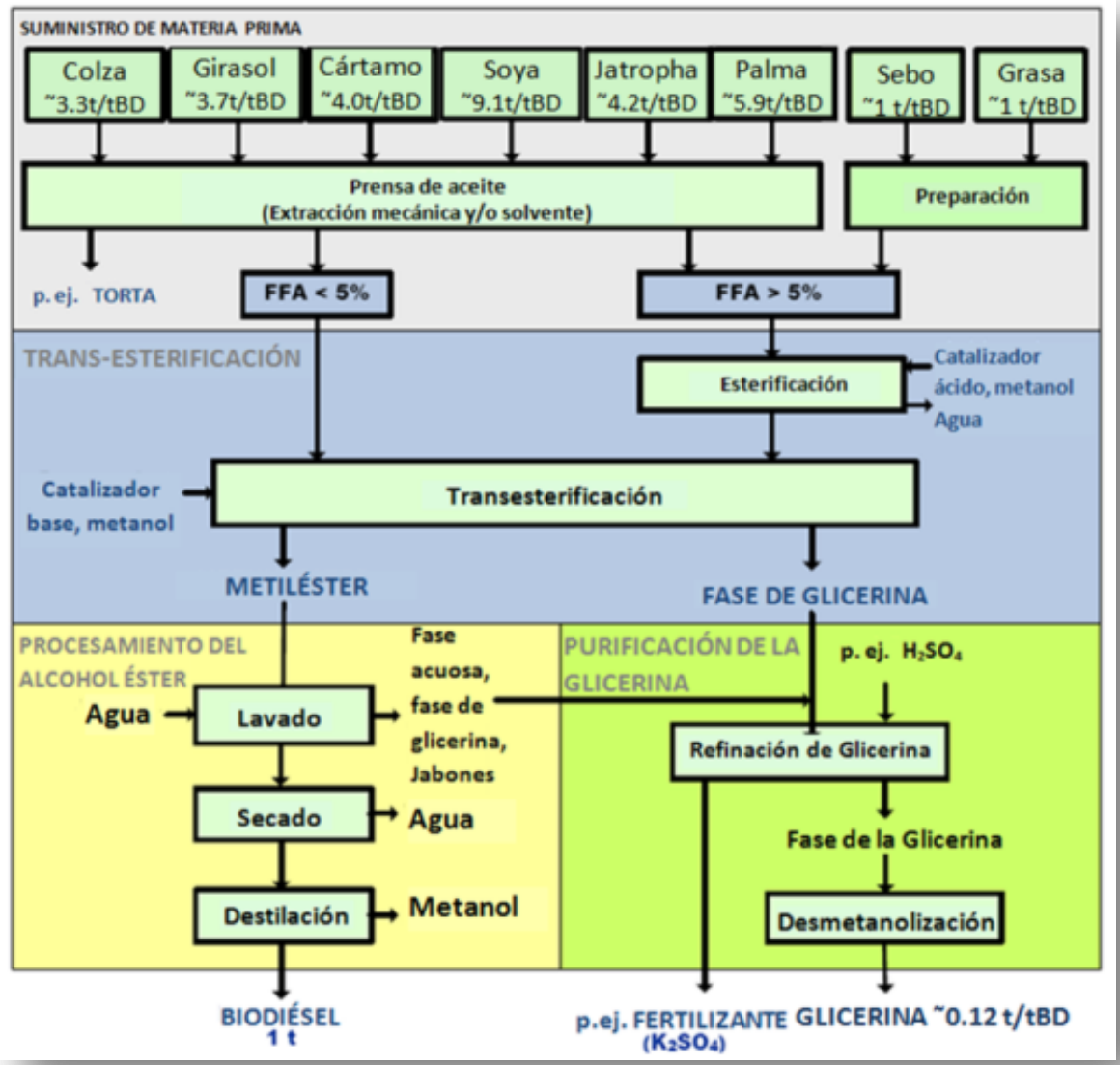

Figura 2.6 Esquema general de la producción de biodiésel (SENER, 2006)

El paso de lavado puede verse afectado enormemente por el nivel de AGL (ácidos grasos libres) de la materia prima, dado que forma jabones en la reacción. Para perfeccionar la glicerina, se neutraliza con un ácido (normalmente clorhídrico o fosfórico) en forma de sales y se envía al almacenamiento como glicerina cruda. Después de la fase acuosa la glicerina ha sido neutralizada. La glicerina es normalmente 80 a 88% de su peso pura y está lista para ser vendida como glicerina cruda. La glicerina puede estar más refinada por secado en una unidad de destilación al vacío y, a continuación, limpiarla en una unidad de adsorción continua para recibir un grado técnico o farmacéutico con un contenido de glicerina de casi 100% de peso puro (AIE, 2004).

El exceso de metanol puede eliminarse en diferentes etapas de la reacción, antes o después de la separación de fases. En ambos casos, el metanol se recupera y reutiliza utilizando equipos convencionales. Debe tenerse cuidado para que no se acumule agua en la secuencia de recuperación de metanol.

2.1.2.1 Substancias auxiliares

Para que se lleve a cabo la reacción de transesterificación es necesario el uso de substancias auxiliares: Alcohol para neutralizar los ácidos grasos libres (AGL) y crear un éster de alcohol, y un catalizador para mejorar la velocidad de reacción y el rendimiento de la conversión a biodiésel.

Alcohol. Entre los alcoholes que se pueden utilizar en la reacción de transesterificación el metanol y etanol son los alcoholes más comúnmente utilizados. Una diferencia importante es la cantidad de cada alcohol para una transesterificación eficaz. El proceso de éster metílico utiliza 100% exceso molar de alcohol, mientras que el proceso de éster etílico utiliza 70% exceso estequiométrico de etanol (ambos 100% puro). En términos de volumen, más etanol que metanol es requerido por litro de aceite causando un importante aumento en el costo de producción. Además, el metanol tiene varias ventajas; las más importantes son su bajo precio y la elevada reactividad. El metanol se encuentra fácilmente disponible en forma pura absoluta, para que la formación de hidrólisis y jabón debido al agua contenida en el alcohol pueda reducirse. La etanólisis en cambio consume más energía que la metanólisis, también presenta mayores problemas en cuanto a la separación de la fase de ésteres y la fase de glicerol dependen más del agua que interfiere (NREL, 2004).

Catalizador. Normalmente se utiliza un catalizador para mejorar la velocidad de reacción y rendimiento. Los catalizadores pueden ser materiales de base, ácidos o enzimáticos. La elección del catalizador es determinada principalmente por el contenido de los AGL. Para la transesterificación de aceites y grasas con bajo contenido de AGL se utilizan principalmente catalizadores base, para las grasas y aceites con alto contenido de AGL se convierte en un proceso de dos etapas: esterificación ácido seguido de transesterificación base. Ambos procesos pueden funcionar en lote o en modo continuo. La mayoría de los biocombustibles producidos en el mundo utiliza el proceso catalizador base. Los procesos de catalizadores base tienen la ventaja de tasas de conversión alta en un corto tiempo de reacción. En función de la temperatura, concentración, mezcla y la proporción alcohol-triglicéridos, los tiempos de residencia de los catalizadores base están en un rango de unos 5 minutos a 1 hora. Por lo tanto, el reactor puede ser dimensionado más pequeño, lo cual conduce a costos de baja inversión. La desventaja de los catalizadores básicos es su sensibilidad a los AGL de la materia prima que reaccionan con el catalizador base a formar jabones. Los jabones pueden ser un gel a temperatura ambiente, causando al biodiésel formar una masa semisólida. Por lo tanto, la mayoría de los sistemas de catalizador base utilizan aceites vegetales, refinados o crudos, como materia prima (NREL, 2004).

Los catalizadores base son altamente higroscópicos y forman agua química cuando se disuelven en el reactivo de alcohol. También absorben agua del aire durante el almacenamiento. Si ha sido adsorbida demasiada agua, el catalizador reaccionará pobremente y el biodiésel no podrá satisfacer la cantidad de glicerina total estándar.

Los catalizadores de importancia en la industria para la transesterificación base son, ante todo, hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH) y alcóxidos. El hidróxido de sodio para la transesterificación tiene la sólida ventaja que es barato, mientras que el hidróxido de potasio se observa generalmente para ser más eficiente. Además, cuando se quita el catalizador de la glicerina al final del proceso el uso de KOH genera el subproducto potasa, que puede ser posteriormente utilizado como fertilizante. El hidróxido de potasio es un producto ampliamente disponible, pero para obtener el mismo tipo de conversión se necesita más catalizador en comparación con los productos de hidróxido de sodio. Alcóxidos (por ejemplo, metóxido de sodio o potasio metóxido) son, en términos químicos, compuestos en los que el hidrógeno de hidroxilo de alcohol es sustituido por un metal. Si los alcóxidos se utilizan para la producción de biodiésel, una solución de metóxido de sodio en metanol ($NaOCH_3$ en CH_3OH) es preferida por razones comerciales y de proceso mientras que una solución de potasio metóxido en metanol (KOCH3 en CH_3OH) se utiliza principalmente con aceites reciclados o residuos. Estos catalizadores pueden considerarse los más eficaces a precios razonables (SENER, 2006).

Los catalizadores ácidos se utilizan para esterificación para convertir materias primas con un alto contenido de AGL a ésteres, seguidos por un transesterificación catalizador base para convertir los triglicéridos restantes a los ésteres de metilo. Contrariamente a los catalizadores base, la conversión ácido-catalizada funciona más lentamente, bajo temperaturas más altas y bajo porciones sobre-estequimétricas mas altas de alcohol. El tan usado ácido sulfúrico (H_2SO_4) tiene dos ventajas: su bajo precio y su higroscopicidad, mediante la cual el agua, que se produce durante la esterificación, es limitada. La corrosividad del ácido sulfúrico es desfavorable; así materiales resistentes al ácido han de aplicarse, lo que aumenta el costo de inversión.

2.1.2.2 Preparación de la materia prima

Aceites vegetales

Los dos principales procesos de extracción de la materia prima de semillas son extracción con prensa mecánica y/o extracción con disolvente.

En la **extracción de prensa mecánica** en pequeña escala, las semillas oleaginosas son opcionalmente climatizadas primeramente y, a continuación, aplastadas en una prensa. Las prensas van desde modelos pequeños, prensas manuales a prensas comerciales motorizadas. Recién extraído el aceite vegetal puede incluir contaminantes, tales como pasta fina, que se elimina mediante un decantador o filtro. La presencia de materia sólida en aceites invariablemente lleva al deterioro. Después de extraer la mayor parte del

aceite, la harina de las semillas restantes (con un contenido de aceite residual de 20 a 33% en función de la eficiencia de aceite de extracción y el contenido de aceite en la semilla) puede utilizarse como un alimento animal o un energético, por ejemplo, como sustrato para la producción de biogás. El procesamiento de semillas oleaginosas en pequeña escala es de interés como una potencial empresa en la granja o comunidad que puede aumentar ingresos y empleo en las zonas rurales.

Extracción con disolvente es la alternativa de extracción de aceite preferida para la operación a gran escala. El proceso de disolvente extrae más del aceite dentro de la materia prima de semillas de aceite, pero requiere equipo más costoso. El hexano es actualmente el disolvente más utilizado de extracción para las semillas oleaginosas porque es relativamente barato y abundante. Después de la extracción, un proceso de destilación separa el aceite del disolvente. El disolvente se condensa y se puede reciclar y reutilizar en el proceso. La extracción con disolventes produce aceite vegetal con un grado de pureza más alto que el proceso de prensa mecánica. En contraste a la extracción mecánica, la extracción con disolventes deja en las harinas de las semillas restantes de 1 a 4% de aceite residual.

Una vez que se extrae el aceite, se refina para producir aceite con las propiedades físicas y químicas que se desee. Los aceites pueden tratarse, a continuación, para quitar componentes como fosfolípidos (desgomado) y ácidos grasos libres (neutralización de ácidos) así como para reducir el color y olor (blanqueo). El grado de refinación empleado se determina por el uso final para el aceite. En primer lugar, el aceite crudo de la unidad de extracción es desgomado para quitar lecitina o fosfolípidos. Se eliminan los fosfolípidos ya que son emulsionantes fuertes que pueden disminuir el rendimiento a través de la neutralización del ácido y también pueden tener parcialmente efectos sobre la utilidad técnica de aceites y grasas. La segunda fase de refinación es la neutralización donde se reduce el contenido de los AGL en el aceite crudo. Se agrega una solución alcalina (generalmente de hidróxido de sodio) que reacciona con los AGL para producir jabones. Los jabones son insolubles en el aceite y fácilmente separados por lavado de agua. Los pigmentos y el resto de las gomas, los AGL y los minerales se eliminan por blanqueo, que se realiza agregando arcillas minadas especialmente para el aceite. Un paso de desodorización se lleva a cabo en la industria de alimentos previo al envío del aceite para eliminar compuestos volátiles que pueden afectar negativamente al olor y sabor. La mayoría de los aceites vegetales son parcialmente refinados (neutralizado) porque el refinado completo económicamente nunca se compensa con el consumo ligeramente menor de catalizador y ácido (NREL, 2004).

Todos los aceites vegetales nombrados anteriormente se caracterizan por muy diferentes cosechas, promedio por hectárea cultivada, tierra y contenido de aceite total por tonelada de semillas o frutos respectivamente y por lo tanto producción de aceite promedio; además, la eficacia de los procesos específicos de extracción, así como la producción de aceite resultante se detallan en la Tabla 2.5.

Basado en esta información aunque la colza dispone de semillas con los más altos contenidos de aceite, en términos de producción de aceite por hectárea cultivada la extracción de aceite de palma africana tiene la cantidad más alta de unos 3,400 l/ha debido al rendimiento de los cultivos.

Tabla 2.5 Rendimiento de cultivos y aceite en extracción mecánica y con solvente en México (SENER, 2006)

Materia Prima	Palma Africana	Jatropha	Girasol	Colza	Cártamo	Soya
Rendimiento de los cultivos [t/ha]	14.8	2.0	1.7	1.5	1.1	1.6
Contenido total de aceite [%]	22.0	35.0	37.5	38.0	35.0	17.0
Eficiencia de extracción de aceite						
extracción mecánica [%]	80.0	70.0	74.0	80.0	67.0	67.0
extracción con solventes [%]	96.0	96.0	96.0	98.0	96.0	96.0
Rendimiento del aceite						
[kg_{Input}/l]	5.2	4.1	3.0	3.0	3.6	8.1
extracción mecánica						
[l/ha]	2,825.0	533.0	513.0	506.0	315.0	202.0
[kg_{Input}/l]	4.4	2.7	2.6	2.5	2.7	5.6
extracción con solventes						
[l/ha]	3,390.0	730.0	665.0	619.0	409.0	289.0

A pesar de esto, el aceite de soya es menos atractivo en términos de productividad de aceite ya que sus cultivos y producción de aceite son muy bajos. Sin embargo, como se mencionó el aceite de soya se produce como subproducto de forraje de frijol de soya.

Grasas animales o aceite de pescado y aceites usados de fritura

Las grasas y aceites son reciclados en productos utilizables a través de un proceso llamado *rendering* o de conversión. El proceso de conversión puede clasificarse como proceso de comestibles o no comestibles. Aunque los procesos de conversión de comestibles y no comestibles son generalmente similares, difieren en sus materias primas, productos finales y el equipo aplicado. En los procesos de conversión de "comestibles", los subproductos del cadáver del animal, tales como recortes de grasa se trituran en pedazos pequeños, se funden y se desintegran por procesos de cocción para liberar la humedad y sebo "comestible" o grasa. Las plantas que utilizan procesos de conversión de "no comestibles" convierten las proteínas, grasas y materiales de queratina (es decir, pezuña y cuerno) encontrados en los cadáveres en sebo y harina de cadáver (utilizado, por ejemplo en, alimentación del ganado, jabón, producción de ácidos grasos y fertilizantes). Los principales procesos de conversión incluyen la reducción de tamaño seguida de cocción y separación de grasa, agua y proteína utilizando técnicas tales como la proyección, prensado, centrifugación secuencial, extracción por solventes y secado (NREL, 2004).

2.1.2.3 Producción de biodiésel

Las plantas comerciales de biodiésel pueden agruparse dependiendo el nivel máximo de AGL que pueden manejar. Los dos principales modelos de tecnología de biodiésel son (i) Transesterificación con catalizador base y (ii) Ácido esterificación seguido de transesterificación base. Ambos son explicados como sigue.

2.1.2.3.1 Transesterificación con catalizador base

El proceso de transesterificación con catalizador base domina la producción comercial actual de biodiésel y sirve para la materia prima que contiene niveles bajos de AGL. Ésto incluye el aceite de soya, aceite de semilla de colza y aceites y grasas de animales tratados y aceites usados. A menudo, la reacción se lleva a cabo en dos pasos para proporcionar una reacción muy completa con la posibilidad de utilizar menos alcohol que los sistemas de un solo paso.

Las principales ventajas son las altas tasas de conversión en condiciones leves, bajas temperatura y presión cerca de la atmosférica con reacciones secundarias mínimas y corto tiempo de reacción con ningún paso intermedio durante la conversión. Los procesos catalizador base son menos corrosivos para los equipos industriales y necesitan de una pequeña cantidad de alcohol, lo que resultan en un reactor de menor tamaño en comparación con los procesos de catalizadores ácidos (NREL, 2004).

Los catalizadores base son sensibles al agua así como al alto contenido de AGL. La materia prima con altos AGL reacciona con los catalizadores base y forma jabones. Por lo tanto, la cantidad máxima de AGL aceptable en un sistema catalizador base es inferior al 5% (preferiblemente menos de 1%) (NREL, 2003).

2.1.2.3.2 Esterificación acida seguida por transesterificación base

El proceso combinado de esterificación ácida seguido de transesterificación base se utiliza para producir biodiésel de materia prima que contiene altos AGL, tales como aceite de palma o grasas animales. Además, permite la producción de ésteres de cadena larga ramificada muy difíciles de manejar en una transesterificación base. Los AGL se eliminan en el primer paso del proceso, la esterificación ácida, al reaccionar con el alcohol en forma de jabones hasta que el contenido de AGL se reduce al menos hasta el 0.5%. Se eliminan los jabones y, a continuación, el proceso de transesterificación base se lleva a cabo (NREL, 2004).

Cuando se utiliza un proceso de dos pasos, la gestión del agua se convierte en el desafío tecnológico. La esterificación ácida tiene dos efectos negativos al crear el agua como subproducto. En primer lugar, reduce el rendimiento de los ácidos grasos a biodiésel y deja muchos ácidos grasos detrás en la materia prima, así que el agua también reducirá los rendimientos en el paso de transesterificación. Por lo tanto, el equipo necesita ser construido de manera que elimine el agua de reacción durante el paso de esterificación

ácida. Finalmente, el líquido que continúa en el paso de transesterificación tiene un bajo contenido de agua (MBC, 2003).

2.1.2.3.3 Producción en lote versus continua

La producción de biodiésel se puede realizar ya sea en un proceso por lotes o en operación continua. Como regla simplificada, procesar biodiésel en lotes es más adecuado para pequeñas plantas dado que se necesitan unidades más simples (500 a 10,000 ton/año). En los procesos por lotes es relativamente fácil compensar las diferencias en las características de la materia prima y tiende a ser menos costoso, ya que todas las operaciones se pueden realizar a presión atmosférica en tanques. La desventaja del procesamiento por lotes es que el tamaño físico de la planta tiende a escalar directamente con la capacidad de la planta; es decir duplicar la capacidad de la planta requiere tanques que son dos veces más grandes. Los procesos por lotes ofrecen excelentes oportunidades para el control de calidad si las variaciones en la calidad de la materia prima son comunes, como con grasa amarilla y grasas animales (Mittelbach, 2004).

Para plantas más grandes el procesamiento de flujo continuo es favorable (por encima de 30,000 ton/año). Utiliza herramientas y otros recursos en forma continua en una tasa pico más baja, que generalmente es menos costosa. Las plantas de flujo continuo suelen operar a altas temperaturas (por lo menos 65°C) para acortar el tiempo de procesamiento y se caracterizan por una eficiencia de fabricación con calidad constante del producto, así como un alto grado de automatización con pequeña flexibilidad de las cualidades de la materia prima. Una planta continua conduce a una mejor economización de calor, mejor pureza de producto en fases de separación eliminando sólo la parte de la capa más lejos de la interfaz, mejor recuperación de exceso de alcohol para ahorrar en costos de alcohol y cuestiones reglamentarias, interferencia mínima de un operador en ajustar los parámetros de la planta, y costos menores de capitales por unidad de producción de biodiésel. Los separadores centrífugos a menudo se utilizan para hacer separaciones muy rápidamente ocupando muy poco espacio de la planta. Sin embargo, el costo de los separadores es muy alto. El equipo para el procesamiento de flujo continuo no suele necesitar mucho espacio, y puede ampliarse para proporcionar mayor capacidad sin tener un aumento correspondiente en el espacio (MBC, 2003).

Por último, se puede afirmar que los lotes y el procesamiento de flujo continuo pueden proporcionar un producto de alta calidad y exitosas plantas se han desarrollado utilizando ambos enfoques.

2.1.3 Calidad del biodiésel

En la presente sección se examinarán los efectos de características importantes del biodiésel en operabilidad del motor y las emisiones. Aparte de eso, se enumerarán los límites dentro de los estándares actuales de biodiésel y se examinarán los factores de influencia en la calidad del biodiésel según la materia prima y la tecnología.

2.1.3.1 Estándares internacionales del biodiésel

Las normas son de gran importancia para los productores, proveedores y usuarios de biodiésel. Las autoridades necesitan normas aprobadas para la evaluación de riesgos para la seguridad y la contaminación ambiental. Las normas son necesarias para las homologaciones de vehículos operados con biodiésel y por lo tanto, son un requisito para la introducción en el mercado y la comercialización de biodiésel. Si aparecen nuevos combustibles en el mercado de los motores, los fabricantes del sistema de inyección tienen que investigar la idoneidad. También necesitan productos estandarizados con una calidad homogénea. A diferencia del proceso de establecimiento de normas de calidad de combustible de gasolina o diésel, actualmente no existen en la industria estándares de calidad uniforme aceptados para el biodiésel en México. Hay sin embargo ejemplos de normas de calidad para el biodiésel internacionalmente y éstas se compararán y discutirán.

Existen dos estándares de biodiésel principales que son los más mencionados, es decir, la norma Europea para biodiésel llamada EN 14214 y el estándar de Estados Unidos para el combustible biodiésel llamado ASTM 6751. La norma Europea para biodiésel como combustible diésel automotriz define biodiésel como éster metílico de ácidos grasos (EMAG) que se utiliza puro como combustible para motores diésel en un 100% de concentración o como un combustible extensor para automoción para motores diésel de conformidad con los requisitos de EN 590 (diésel CEN estándar), una mezcla de 5%. Hasta el momento, la norma EN 14214 define al biodiésel como EMAG, por lo tanto, la norma restringe al biodiésel a ser producido con metanol. En Europa, el biodiésel predominantemente se produce a partir de aceite de colza, y la mayoría de la información y los datos disponibles provienen de la experiencia práctica adquirida en la utilización del metiléster de aceite de colza. Por lo tanto, el estándar de biodiésel en la UE fue desarrollado en función de la colza. El estándar de EE.UU. para el biodiésel lo define como monoalquilésteres de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales. En los Estados Unidos, la soya es la principal materia prima para la producción de biodiésel, por lo tanto, los parámetros para el estándar de biodiésel se fijaron en aceite de soya (Zhang, 2003).

Otra norma internacional es el estándar brasileño de biodiésel ANP 255 y fue lanzado en 2003 por la Agencia Nacional de petróleo (Agência Nacional do Petróleo, ANP). Los estándares de combustible biodiésel brasileño se basan en la norma ASTM D6751 y CEN EN 14212 que garantiza la buena calidad del combustible biodiésel que se utiliza como combustible combinado (FBDS, 2005).

Los parámetros especificados en estas normas son prácticamente los mismos y casi en los mismos límites. Las principales diferencias entre las normas son los campos de aplicación y los métodos de prueba aplicados. En comparación con la norma Europea el menor número de parámetros (14 contra 22 en Europa) en la estadounidense es notable, lo cual permite una mayor flexibilidad en las materias primas que se utilizan para la producción.

En la Tabla 2.6 se enlistan los límites de la norma europea, brasileña y el estándar de EE.UU. de ácidos grasos de metilésteres. Comparando los límites, debe ser afirmativo que la norma Europea tiende a ser más estricta que la norma estadounidense, o bien muestra límites más estrictos por ejemplo, viscosidad, índice de cetano; o proporciona límites sobre los parámetros que no están regulados en absoluto por la norma ASTM, por ejemplo, el contenido de cenizas, estabilidad de oxidación. ANP 255 contiene la mayoría de los parámetros enumerados en ASTM D6751 junto con cinco otros parámetros de CEN EN 14212. Los parámetros de CEN EN 14212 son: Viscosidad cinética, número de ácido, punto de enturbamiento, corrosión al cobre y gravedad específica. El estándar brasileño ANP 255 también es más flexible en la variedad de términos de fuentes de lípidos vegetales (FBDS, 2005).

Tabla 2.6 Estándares internacionales de la calidad del biodiésel (FBDS, 2005)

PROPIEDADES	UNIDAD	ANP 255 Brasil	ASTM D-6751 EE.UU	EN 14214 Europa
Punto de inflamación	(^oC) min.	100.0	130.0	101.0
Agua y sedimentos	(%-vol.) máx.	0.1	0.1	-
Viscosidad cinemática 40^oC	(mm^2/s)	2.5-5.5	1.9-6.0	3.5-5
Cenizas sulfatadas	(%m/m) max	0.0	0.0	0.0
Azufre	(%m/m)	0.0	0.1	0.0
Corrosividad cobre 3h – 50^oC	máx.	1.0	3.0	1.0
Número de cetano	min.	45.0	47.0	51.0
Residuos de carbono	(%m/m) máx.	0.1	0.1	0.0
Acidez	(mg KOH/g)máx	0.8	0.8	0.5
Glicerina libre	(%m/m) máx.	0.0	0.0	0.0
Glicerina total	(%m/m) máx.	0.4	0.2	0.3
Destilación 95% recuperados	(^oC) máx.	360.0	360.0	-
Masa específica a 20^oC	(kg/m^3)	850 – 900	0.0	860 - 900 a
Contenido de metanol o etanol	(%m/m) máx.	0.5	-	0.2
Valor de yodo	máx.	-	-	120.0
Monoglicéridos	(%m/m) máx.	1.0	-	0.8
Diglicérido	(%m/m) máx.	0.3	-	0.2
Triglicéridos	(%m/m) máx.	0.3	-	0.2
Contenido de metal alcalino	(mg/kg) máx.	10.0	-	5.0
Ca + Mg	(mg/kg)	-	-	5.0
Contenido de fósforo	(mg/kg) máx.	10.0	-	10.0
Estabilidad de oxidación a 110^oC	(h) min.	6.0	-	6.0
Contaminantes	(mg/kg) máx.	-	-	24.0
Contenido de éster	(%m/m) min.	-	-	97.0
Metilésteres de ácido linoleico	(%m/m) máx.	-	-	12.0
Poliinsaturación (>4 enlaces dobles)	máx.	-	-	1.0

2.1.3.2 *Factores que influyen en la calidad del biodiésel*

Como se mencionó anteriormente la calidad del biodiésel depende por un lado de las propiedades de la materia prima y por el otro de la tecnología de producción. Las principales características del biodiésel que son determinadas por la estructura de su composición de ésteres grasos incluyen propiedades de flujo frío, índice de cetano, estabilidad de oxidación, yodo y viscosidad.

Uno de los principales parámetros de calidad son las propiedades de flujo frío. La operatividad a baja temperatura del combustible diésel comúnmente se caracteriza por tres pruebas para medir las propiedades de flujo frío - el punto de enturbamiento (del inglés CP Cloud Point), punto de obstrucción del filtro en frío (del inglés CFPP **Cold Filter Plugging Point**) y el punto de escurrimiento (del inglés PP **Pour Point**). El valor que se alcance depende de la región de uso, pero el resultado está directamente relacionado con el tipo de aceite que fue utilizado para la producción de biodiésel. Los valores altos podrían limitar el uso de biodiésel en regiones de clima frío. Los compuestos grasos saturados tienen puntos de fusión significativamente mayores que los compuestos grasos insaturados y en una mezcla se cristalizan a una temperatura superior a los aceites y grasas no saturadas. Así, los combustibles biodiésel que derivan de grasas o aceites con cantidades significativas de compuestos grasos saturados como grasas animales o aceite de palma mostrarán puntos de fusión más altos en comparación con, por ejemplo, el aceite de colza como se muestra en la Figura 2.7.

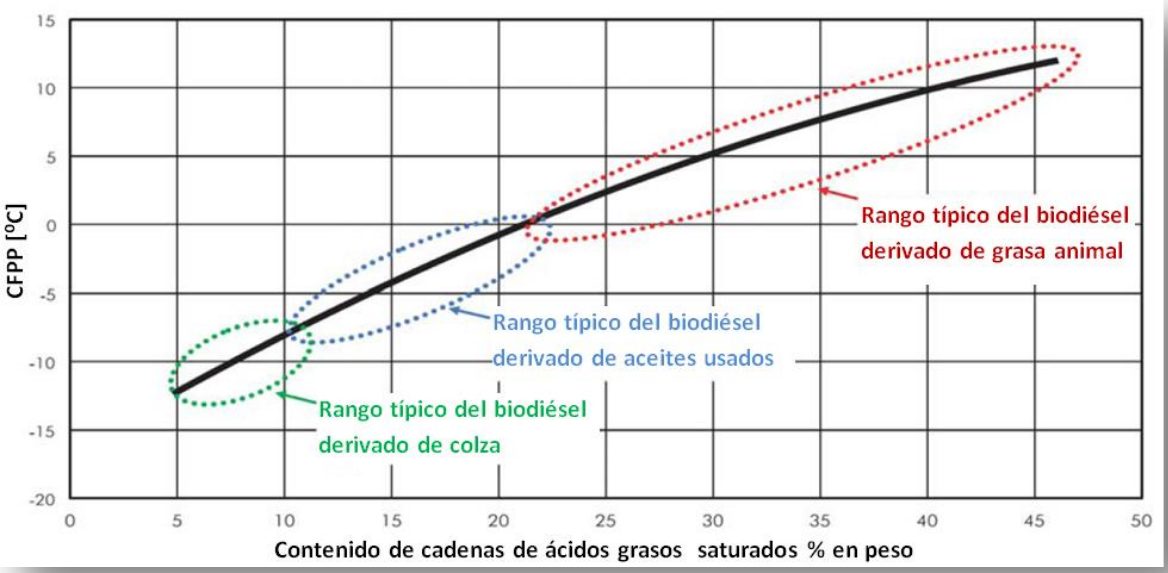

Figura 2.7 Relación entre el contenido de ácidos grasos saturados en el biodiésel (sin aditivos) y su valor de CFPP (SENER, 2006)

Se han investigado diversos enfoques a los problemas de baja temperatura de ésteres incluyendo la fusión con el gasóleo convencional, invernalización, aditivos, ésteres de cadena ramificada, añadir sustitutos pesados en la cadena (NREL, 2001).

Una propiedad química que también está relacionada con la composición de ácidos grasos de la materia prima es el **índice de cetano**. El índice de cetano es el indicador de calidad de ignición. Un alto número de cetano contribuye al fácil arranque en frío y bajo ruido inactivo. También están correlacionados con bajas emisiones de escape de óxidos de nitrógeno (NOx). En general el numero de cetano de aceites y grasas disminuye con una saturación creciente e incrementa con el aumento de la longitud de la cadena, es decir, ininterrumpidas entidades de CH_2 (EnAu, 2003) .

Incluso si la estabilidad oxidativa es la influencia de parámetros como la presencia de aire, calor y luz; la influencia de la estructura de los compuestos de ésteres grasos es aún mayor. Más en detalle la **estabilidad oxidativa** depende fuertemente de la tasa de saturación de la materia prima utilizada. El **valor de yodo** es un indicador de la saturación del combustible, que se ha relacionado con la formación de depósitos en el motor y problemas en el almacenamiento de combustible. El biodiésel con números altos de yodo también tiende a polimerizar, forma depósitos en los inyectores y ranuras en los pistones. Se ha encontrado que el número de yodo se correlaciona con la viscosidad y el índice de cetano, ambos disminuyen con mayor grado de saturación. Los metilésteres de palma y girasol tienen valores relativamente bajos de yodo, los metilésteres de aceite de colza tienen valores de yodo de hasta 120 lo que representa el límite según la norma Europea, los metilésteres de soya, así como los ésteres de metilo de aceite de girasol tienen ambos valores de yodo alrededor de 130. Por lo tanto, la norma EN 14214 excluye los ésteres puros de metilo de aceite de soya, girasol y cártamo de servir como combustible (Zhang, 2003). La Figura 2.8 muestra esta exclusión.

La **viscosidad** de biodiésel está relacionada con la cantidad de yodo del biodiésel. Una de las razones principales para el procesamiento de aceites y grasas para su uso en motores es reducir la viscosidad mejorando las características de flujo de combustible. La viscosidad de los aceites vegetales puros es de 10 a 15 veces mayor que la viscosidad del diésel. La transesterificación de aceites vegetales produce ésteres con una viscosidad de aproximadamente el doble que la del gasóleo. La viscosidad también es un indicador de polimerización de biodiésel y aumenta en función de la degradación oxidativa y térmica.

El **contenido de fósforo** en el biodiésel se deriva de la materia prima también. El fósforo principalmente proviene de fosfolípidos que contiene la materia prima. El tipo de recuperación de aceite influye fuertemente en el contenido final de fósforo. Los aceites prensados fríos generalmente contienen menos cantidad de fósforo que los prensados en caliente. El biodiésel con alto contenido de fósforo suele disminuir la eficiencia de los convertidores de oxidación y causa mayores emisiones de partículas de materia (SENER, 2006).

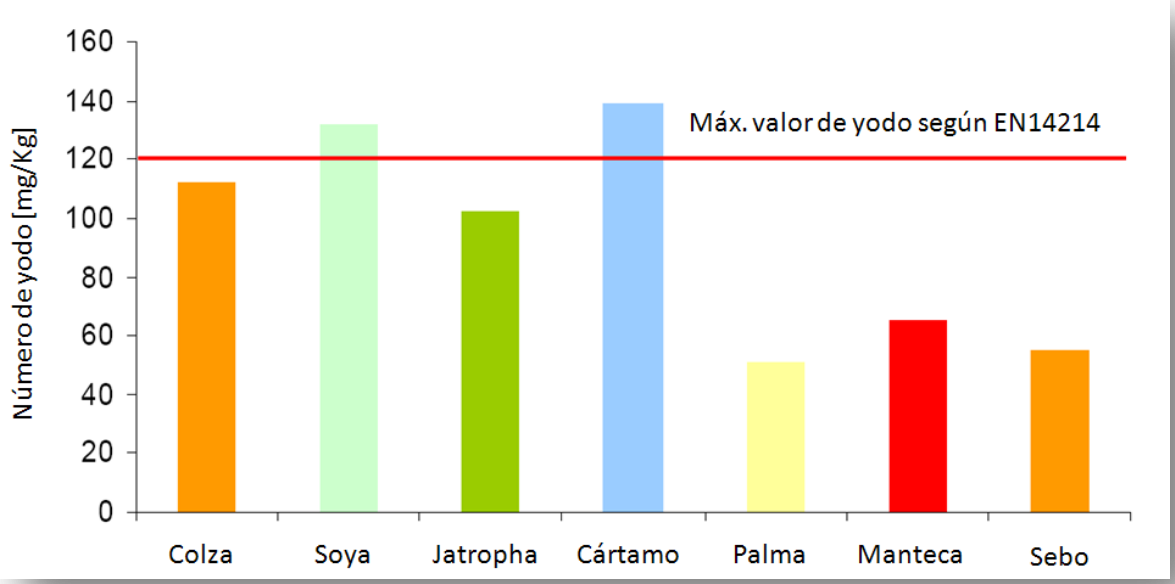

Figura 2.8 Valores de yodo del biodiésel derivado de diferentes tipos de aceites y grasas (EnAu, 2003)

El impacto de los **ácidos grasos libres** (AGL) en el proceso de producción de biodiésel se ha debatido ampliamente en todos los estudios. Mientras que el contenido de AGL puede afectar el proceso de producción por desactivar el catalizador, crear jabón, y por la liberación de agua cuando se convierten en ésteres, no parecen afectar el valor final de ácido del biodiésel.

En resumen las propiedades de combustible de biodiésel están fuertemente influenciadas por las propiedades de la materia prima que significa el perfil individual de ésteres grasos. En general, el índice de cetano, el punto de fusión y la viscosidad de ésteres grasos aumentan con el aumento de la longitud de la cadena. Además, la materia prima ideal en cuanto a las características de combustión, estabilidad oxidativa y comportamiento de flujo frío consiste sólo de ácidos grasos monoinsaturados.

Las principales propiedades importantes relacionadas con la tecnología de producción de biodiésel son: El contenido de la glicerina libre y total, el contenido residual de metanol, la cantidad de fósforo, cenizas sulfatadas, agua, punto de inflamación y la acidez.

El contenido de **glicerina libre** y **total** en el biodiésel depende del proceso de producción y por lo tanto, es un criterio importante de la calidad del combustible. Por un lado, la glicerina se forma debido a la hidrólisis de mono, di y tri-glicéridos en el combustible almacenado. Por otro lado, los valores altos pueden provenir del lavado insuficiente del producto éster. La glicerina libre se separa dentro del tanque de combustible y puede provocar daños en el sistema de inyección. Un mayor contenido de glicerina libre puede

causar problemas durante el almacenamiento o en el sistema de combustible debido a la separación de glicerina, o puede llevar al inyector incrustaciones o la formación de mayores emisiones de aldehído.

El **metanol residual** en el producto de biodiésel es eliminado por destilación o por pasos de lavado después de la transesterficación. El metanol residual es una cuestión de seguridad, ya que incluso una muy pequeña cantidad reducirá enormemente el punto de inflamación. Además, el metanol también puede afectar, elastómeros, sellos y bombas de combustible.

El **azufre** en el biodiésel procede de los cultivos y las grasas animales utilizadas como materia prima. En su mayoría, el biodiésel producido de aceites vegetales o animales vírgenes o de primer uso tiene menos de 15 ppm de azufre, sin embargo se ha encontrado que el aceite de cocina reciclado puede contener hasta 40 ppm de azufre. También se recomienda tener precaución con la materia prima de grasas de desechos de matadero como pelos que contienen azufre y conducirán a valores superiores a 10 ppm. La combustión de un combustible que contiene azufre provoca emisiones de dióxido de azufre y partículas. Las emisiones de azufre también pueden conducir a la intoxicación de dispositivos después del tratamiento; sin embargo, esto depende en gran medida de las condiciones de funcionamiento.

2.1.4 Distribución y uso del biodiésel

En la siguiente sección se considerarán los aspectos relacionados a la distribución del biodiésel al usuario final y su aplicación en flotas de vehículos. En la Figura 2.9 se ilustra esta cadena.

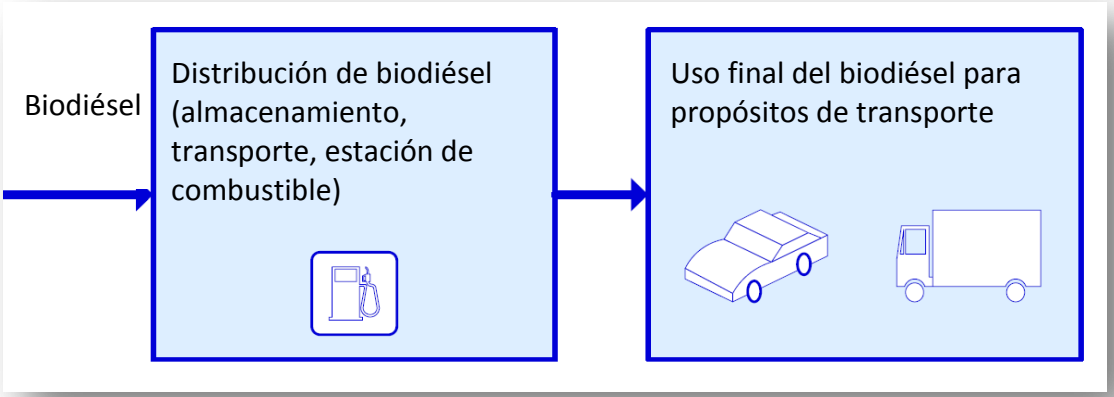

Figura 2.9 Distribución y uso final del biodiésel (SENER, 2006)

2.1.4.1 Generalidades

Generalmente, el biodiésel (B-100) o las mezclas de biodiésel (por ejemplo, B-20) pueden ser distribuidas y utilizadas como sustitutos del diésel de petróleo. Sin embargo, las

propiedades (particularmente estabilidad de oxidación y viscosidad) que son diferentes en función de la materia prima para la producción de biodiésel son de importancia. Por lo tanto, mantener la calidad de los combustibles es un tema clave. Otras cuestiones importantes de la mezcla y manejo son la estabilidad y las propiedades de flujo frío del biodiésel puro y sus mezclas.

Como con el diésel de petróleo, el biodiésel tiene que ser transportado de manera que no conlleve a contaminaciones. Básicamente, esto se realiza con vehículos cisterna convencionales. El primer gasoducto de biodiésel (longitud aproximadamente 2.7 km, capacidad 95,000 ton/a) en Europa fue encargado recientemente (junio de 2006) cerca del puerto petrolero Lobau (Austria). Sin embargo, mucha atención tiene que ponerse en lo que respecta a la mezcla de biodiésel con otros combustibles, así como la inyección de agua. Además el biodiésel debe ser almacenado y manejado mediante procedimientos que no permitan caer la temperatura por debajo de su punto de enturbamiento. Además de esa temperatura del biodiésel, debe tomarse en cuenta la temperatura ambiente y el tiempo que toma transportar el combustible (NREL, 2001). Las estaciones de servicio de biodiésel deben cumplir en gran parte los mismos requisitos que las estaciones de servicio de petrodiésel. Generalmente, algunos requerimientos individuales en cada estado sobre instalaciones de llenado y la transferencia de sustancias perjudiciales en el agua que necesitan cumplirse.

El biodiésel con la calidad óptima puede usarse en motores de combustión diésel existentes. Dado que el biodiésel es una de las alternativas de combustibles no fósiles al petrodiésel, puede utilizarse en forma pura (B-100) o puede ser mezclado con diésel de petróleo en cualquier concentración en la mayoría de los motores diésel modernos (es decir, encendido directo e indirecto así como motores de ferrocarril común).

2.1.4.2 Experiencias y recomendaciones

Distribución

Generalmente deben ser aplicados materiales resistentes al biodiésel (caucho sintético por ejemplo, aluminio, acero); componentes de aleaciones de zinc y cobre deben evitarse, ya que el biodiésel puede descomponer algunas capas de zinc y dar lugar a una formación de jabón y el cobre actúa como un catalizador de oxidación y acelera las caídas en la estabilidad de la oxidación. En cuanto a las estaciones de llenado la cubierta exterior estándar de la manguera a menudo no es resistente por mucho tiempo al biodiésel (AGQM, 2006).

La presencia de agua en el sistema del combustible causa corrosión y degradación de éste; el agua entra en el tanque en su mayoría por vía aérea. Se recomienda por lo tanto a todas las partes de la cadena de transporte de biodiésel observar que la inyección de agua para el biodiésel se elimine durante el transporte y manejo de éste. Debe evitarse la

manipulación innecesaria del biodiésel para no afectar la calidad del combustible (AGQM, 2006). Además, (NREL, 2001) ha hecho las sugerencias siguientes:

- Inspeccionar adecuadamente el lavado, así como el secado de tanque, mangueras y sellos,

- Verificar que la carga anterior no llevó a residuos (por ejemplo, aceites, gasolina, lubricantes, agua); sólo el combustible diésel es aceptable como residuo,

- Determinar la necesidad de aislamiento o método para calentar el contenido del camión o carros de ferrocarril si el biodiésel se transporta en clima frío.

En el invierno, la mayoría del biodiésel se envía: (i) Al menos tibio en camiones para entrega inmediata, (ii) Caliente en vagones para entrega dentro de una semana o (iii) En una mezcla con diésel de invierno, queroseno u otro combustible de bajo punto de enturbamiento en vagones o camiones (NREL, 2001).

Uso

Aunque el biodiésel tiene propiedades de combustión muy similares al petrodiésel, incluyendo la energía de combustión y valores de cetano, el proceso de combustión es diferente en comparación con el diésel de petróleo. Idealmente, el motor y el sistema de re-tratamiento de gases de escape tiene que complementarse con los parámetros del combustible (como en el caso de diésel de petróleo) a fin de garantizar el respeto de los límites de emisión (AGQM, 2006). Sin embargo, debido al valor calorífico ligeramente inferior en comparación con las pérdidas de eficiencia del petrodiésel puede ocurrir una mayor demanda de biodiésel por km. Esto último varía considerablemente dependiendo de la zona de operación de los vehículos (por ejemplo, automóvil, vehículos industriales y tractor); valores probados están en el rango de hasta 5%, rara vez incluso hasta un 10%.

El biodiésel es un mejor disolvente que el petrodiésel y se sabe que rompe los depósitos acumulados de residuos en las líneas de combustible de los vehículos que se han ejecutado anteriormente en petrodiésel. Por lo tanto, los filtros de combustible pueden ser obstruidos con partículas en caso de un cambio repentino a biodiésel puro. Por lo tanto, se recomienda cambiar el filtro de combustible dentro de, por ejemplo, 1,000 a 1,200 km después de cambiar por primera vez a una mezcla de biodiésel.

Cuando se aplica en vehículos sin liberación del fabricante de automóviles de biodiésel, las juntas y mangueras pueden llegar a hacerse frágiles y presentar fugas debido a la degradación del plastificante de caucho natural (por el efecto disolvente de biodiésel). Por lo tanto, un coche usando biodiésel debe estar equipado con materiales no reactivos (por ejemplo, caucho sintético) al biodiésel. Sin embargo, la mayoría de los elastómeros

utilizados después de 1993 son compatibles con B100, el efecto de las mezclas (B-20) es menor o inexistente (SENER, 2006).

Las múltiples experiencias en el sector de los automóviles y vehículos comerciales muestran que el uso a largo plazo de biodiésel puede causar un deterioro en las bombas de combustible del vehículo. Ésto es particularmente cierto para motores de inyección directa de combustible. Además, el biodiésel aumenta lubricidad al combustible incluso a niveles muy bajos de fusión (SENER, 2006). Puede acumular en el motor aceite lubricante especialmente durante la operación a baja carga por vehículos comerciales (por ejemplo, resultando en abrasiones mayores de los motores diésel). Por lo tanto, se requieren intervalos más cortos para cambiar el aceite lubricante del motor cuando se aplica el biodiésel (AGQM, 2006). Los efectos a largo plazo de utilizar biodiésel con una estabilidad de oxidación insuficiente o tendencia a formar jabones (sin cumplir con proporciones de tierras alcalinas y alcalina) en bombas de inyección se muestran en la Figura 2.10.

La favorable biodegradabilidad puede tornarse perjudicial cuando se utiliza el biodiésel. La biodegradabilidad está asociada a una estabilidad de deterioro adversa y a la decadencia de bacterias; la oxidación y la inyección de agua también deterioran las propiedades del biodiésel en caso de almacenamiento durante mucho tiempo. En consecuencia, se puede producir corrosión o abrasión (especialmente en la bomba de inyección) y por lo tanto mal funcionamiento.

Las primeras experiencias con biodiésel en autobuses públicos mexicanos por todos los medios han dado resultados positivos con respecto a las emisiones de gases de escape (principalmente de partículas (PM), hollín y el olor característico de combustible diésel) (SENER, 2006).

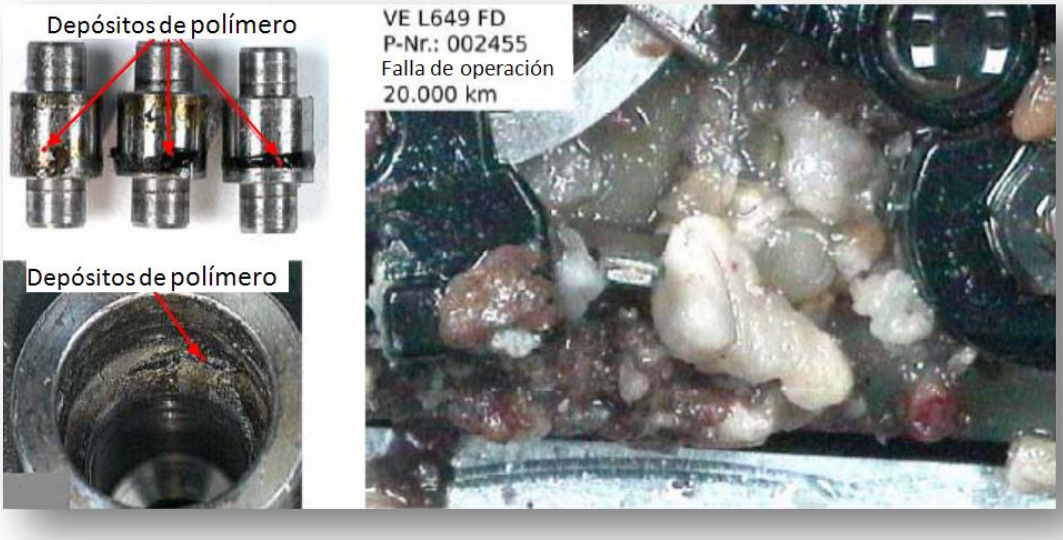

Figura 2.10 Efectos a largo plazo de estabilidad de oxidación (izquierda) o depósitos jabonosos (derecha) en las bombas de inyección (AGQM, 2006)

2.2 Impacto ambiental del biodiésel

Un creciente uso de la biomasa también debe seguir criterios ambientales. Junto a los impactos relacionados con el medio ambiente mediante el uso de biodiésel propia preservación de la diversidad, la conservación de los ecosistemas, evitar impactos negativos de fertilizantes, evitar la contaminación del agua y evitar la erosión del suelo son criterios de sostenibilidad básica. Los impactos ambientales de cualquier producto o sistema son evaluados mediante Análisis de Ciclo de vida (ACV).

2.2.1 Calentamiento global y gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero que se producen en la naturaleza incluyen el vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3). Varias clases de halogenados sustancias que contienen flúor, cloro y bromo también son gases de efecto invernadero, pero son, en su mayor parte, únicamente un producto de las actividades industriales. Los clorofluorocarbonos (CFC) e hidroclorofluorocarbonos (HCFC) son los halocarbonos que contienen cloro, mientras que los halocarbonos que contienen bromo se denominan bromofluorocarbonos (es decir, halones). Como sustancias que agotan el ozono estratosférico, los CFC, HCFC y halones están considerados por el Protocolo de Montreal en Sustancias. La Convención Marco sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) difiere de este tratado internacional. En consecuencia, los partidarios de la UNFCCC no están obligados a incluir estos gases en sus inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero nacional. Algunos otros que contengan sustancias flúor halogenados: los hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y azufre (SF_6) de hexafluoruro — no agotan el ozono estratosférico, pero son gases de potente efecto invernadero. Estas últimas sustancias son consideradas por la UNFCCC y contabilizadas en inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero nacional (EPA, 2011).

También hay varios gases que no tienen un efecto directo de calentamiento global pero indirectamente afectan la absorción de la radiación solar o terrestre por influir en la formación o la destrucción de gases de efecto invernadero, incluyendo el ozono troposférico y estratosférico. Estos gases son monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), y compuestos orgánicos volátiles excluyendo el metano conocidos como NMVOCs (del inglés, non-methane volatile organic compounds). Los aerosoles, que son partículas extremadamente pequeñas o gotas de líquido, como los producidos de dióxido de azufre (SO_2) o las emisiones de carbono elemental, también pueden afectar a las características de absorción de la atmósfera (EPA, 2011).

Aunque los gases de efecto invernadero directo CO_2, CH_4 y N_2O ocurren naturalmente en la atmósfera, las actividades humanas han cambiado sus concentraciones en la atmósfera. Desde la era preindustrial (es decir, terminando los 1750) para 2005, las concentraciones de estos gases de efecto invernadero han aumentado globalmente por 36, 148 y 18 por ciento, respectivamente (IPCC, 2007).

A partir de la década de 1950, el uso de los CFC y otro sustancias que agotan la capa de ozono (ODS) (del inglés, other depleting substances) aumentaron en casi 10 por ciento cada año hasta mediados de la década de 1980, cuando la preocupación internacional por el agotamiento del ozono condujo a la entrada en vigor del Protocolo de Montreal. Desde entonces, se está eliminando la producción de ODSs. En los últimos años, el uso de ODS como los HFC y los PFC ha crecido al empezar a usarse gradualmente como sustitutos de los CFC y HCFC, en consecuencia, las concentraciones atmosféricas de estos sustitutos han estado creciendo (IPCC, 2007).

Potenciales del calentamiento global (PCG)

Los gases en la atmósfera pueden contribuir al efecto invernadero, tanto directa como indirectamente. Los efectos directos se producen cuando el gas absorbe radiación. Los forzamientos de radiación indirectos se producen cuando transformaciones químicas de la sustancia producen otros gases de efecto invernadero, cuando un gas influye en la duración de la atmósfera de otros gases, o cuando un gas afecta los procesos atmosféricos que alteran el balance radiativo de la tierra, por ejemplo afectan a la formación de nubes o albedo (albedo es una medida de reflectividad de la tierra y se define como la fracción de la radiación total del sol que incide en un cuerpo y que se refleja por él mismo). El IPCC desarrolló el concepto potenciales de calentamiento global (PCG) para comparar la capacidad de cada gas de efecto invernadero de atrapar el calor en la atmósfera relativa a otro gas.

El PCG define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de 1kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por la de 1 kg de un gas de referencia (IPCC, 2001). El gas de referencia utilizado es el CO_2, y por lo tanto, se miden las emisiones PCG pesadas en teragramos (o millones de toneladas métricas) de CO_2 equivalente (Tg CO_2-e).

El PCG posibilita comparar los impactos de las emisiones y reducciones de diferentes gases de efecto invernadero. De acuerdo con el IPCC, los PCG tienen típicamente una incertidumbre en su determinación de un 35%. El PCG es realmente calculado en términos del potencial de calentamiento de 100 años de 1 kg del gas relativo al que produce un kilogramo de CO_2. Por ejemplo el PCG de 100 años del metano es 21, lo que significa que si la misma cantidad en peso de metano y dióxido de carbono fuera introducida a la atmosfera, el metano atraparía 21 veces más calor que el dióxido de carbono en los siguientes 100 años. En la Tabla 2.7 se enlistan los PCG de los gases de efecto invernadero en un horizonte temporal de 100 años y su tiempo de vida en la atmósfera.

Tabla 2.7 Potenciales de calentamiento global directo relativos al dióxido de carbono (IPCC, 2001)

Gas		Tiempo de vida años	PCG 20 años	PCG 100 años	PCG 500 años
Dióxido de Carbono	CO_2		1	1	1
Metano	CH_4	12	62	21	7
Oxido nitroso	N_2O	114	275	310	156

Los gases de efecto invernadero con vidas relativamente largas en la atmosfera (por ejemplo, CO_2, CH_4, N_2O, HFC, PFC y SF_6) tienden a estar distribuidos uniformemente a lo largo de la atmósfera, y por consiguiente pueden determinarse sus concentraciones promedio globales.

Los gases de corta duración, como el vapor de agua, monóxido de carbono, ozono troposférico, precursores de ozono (por ejemplo, NOx y NMVOCs) y aerosoles troposférico (por ejemplo, productos de SO_2 y partículas carbonosas), sin embargo, varían regionalmente, y, en consecuencia, resulta difícil cuantificar sus impactos globales de fuerza radiativa. No se atribuyen valores numéricos a estos gases que son de corta duración y espacialmente no homogéneos en la atmósfera (EPA, 2011).

2.2.2 Análisis de ciclo de vida del biodiésel de aceite de palma

Es necesario contabilizar las emisiones de producción y uso del biodiésel para poder realizar un completo análisis de ciclo de vida. La metodología de ACV utilizado en este estudio se basó en el marco ISO 14040, que consta de cuatro pasos; definición de objetivo y ámbito de aplicación, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación (Papong, 2009). La evaluación del impacto de las emisiones que se incluye en este estudio es únicamente referente a los gases de efecto invernadero GEI y los contaminantes criterio. La producción de biodiésel necesita de aceite de palma, que proviene de racimos de frutas frescas (RFF) de plantación de palma de aceite. Se produce a partir del aceite de palma por transesterificación. El ciclo de vida de la producción de biodiésel se divide en 3 fases: plantaciones de palma de aceite, producción de aceite de palma y transesterificación en biodiésel. Los datos pertinentes para el consumo de recursos y las emisiones al aire, agua y suelo deben recopilarse para todas las etapas. El diagrama de ciclo de vida de la producción de biodiésel se muestra en la Figura 2.11. Los sitios para los datos de este estudio son los siguientes:

• La plantación de palma de aceite. Materiales y energía: Datos de entrada son semillas, fertilizantes, herbicidas y agua. Los datos de salida son las emisiones al aire, el suelo y las aguas residuales y racimos de fruta fresca (RFF).

• La planta de producción de aceite de palma se encuentra cerca de la plantación. Materiales y energía: Datos de entrada son RFF, agua, vapor, diésel y electricidad. Los

datos de salida son fibra, cáscara, pastel decantado, racimos vacios de fruta (RFV), ceniza, aguas residuales, las emisiones de aire, aceite crudo de palma (ACP) y kernel.

• Las instalaciones de producción (transesterificación) de biodiésel están situadas en el sur de Tailandia. Materiales y energía: Datos de entrada son aceite de palma, agua, electricidad, metanol e hidróxido de sodio. Los datos de salida son metiléster (biodiésel), glicerina y aguas residuales.

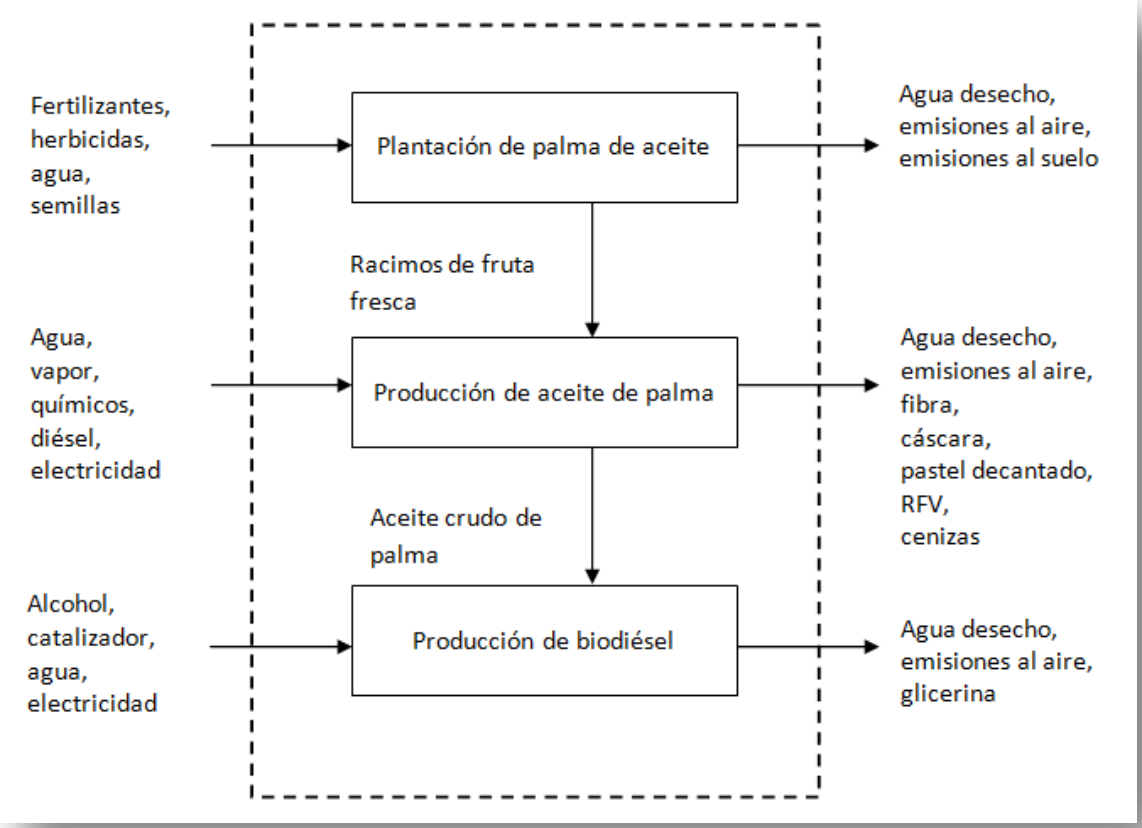

Figura 2.11 Diagrama del ACV de la producción de biodiésel (Plenjai, 2004)

2.2.2.1 Plantaciones de palma de aceite

En la Figura 2.12 se presentan los resultados de esta etapa. Los requisitos de agua para la plantación de palma de aceite son principalmente del agua de lluvia en la vida de los 25 años de la planta. La plantación tiene 21-22 árboles/rai (1 rai = 1600 m^2). Los abonos utilizados son N de sulfato de amonio (21-0-0), P de fosfato (0-3-0), K de cloruro de potasio (0-0-60) y Mg de kieserita (26% MgO). Se utilizan cada año, pero las tasas de aplicación son diferentes dependiendo de la edad de las plantas. El paraquat y el glifosato se utilizan como herbicidas entre 1 - 3 veces por año en 0.1 0.2 Kg/rai y 0.3-0.5 Kg/rai. El furadan se utiliza como insecticida en el vivero sólo en caso de que las plantas de

semillero sean atacados por insectos. Sin embargo, los insectos no son un problema después de que las palmeras maduran y están plantadas en el campo.

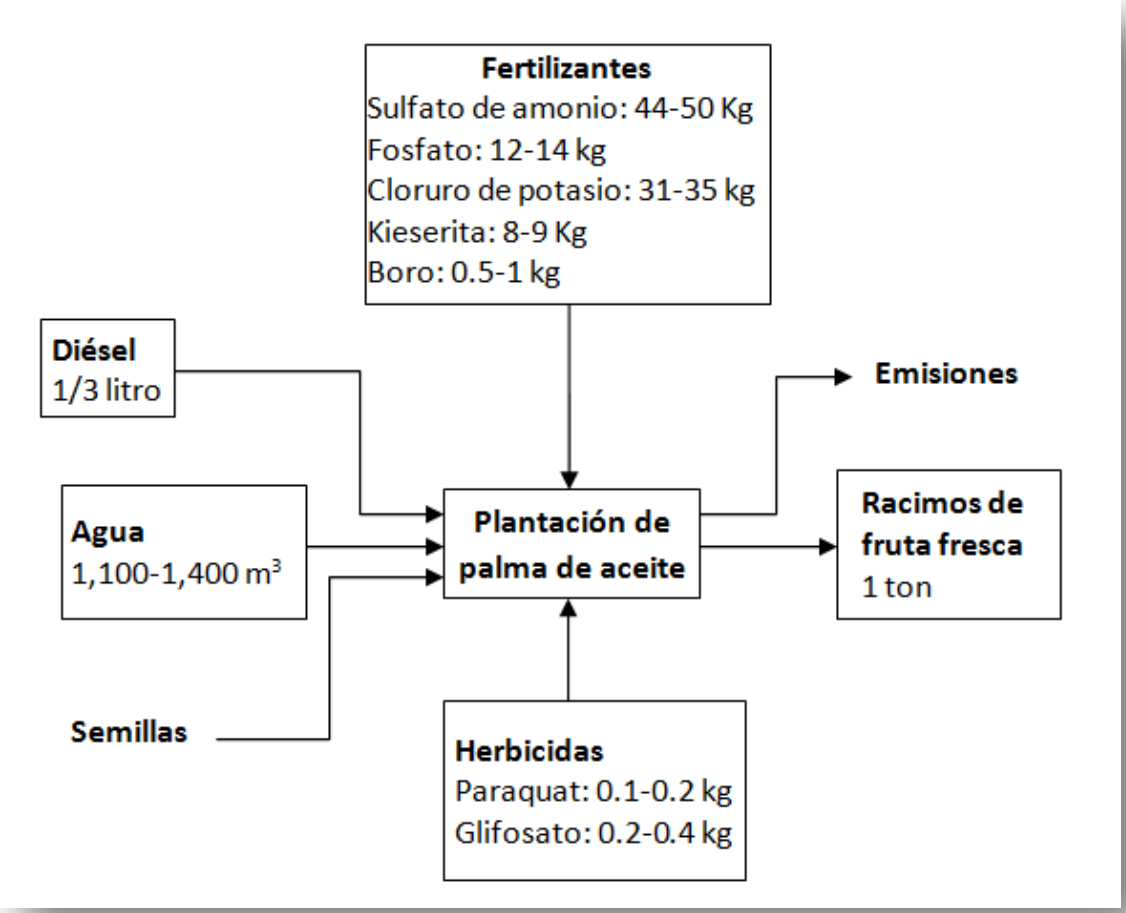

Figura 2.12 Unidad de proceso de la plantación de palma de aceite (Plenjai, 2004)

Las palmas de aceite comienzan a producir racimos 2 ½ - 3 años después de ser plantadas. La frecuencia habitual de una ronda de cosecha es de 10-15 días ó 2 - 3 veces al mes. Las palmas jóvenes se cosechan con un cincel mientras que las Palmas viejas y altas son cosechadas con una hoz de largo alcance. Como se cosechan sólo por mano de obra, no hay ninguna entrada de energía fósil a la cosecha. Los racimos de fruta generalmente son transportados a la fábrica de aceite de palma en el día de la cosecha. El vivero y la rampa de carga se encuentran a 1.5 km. de los campos de palma de aceite. Un camión de 3 toneladas es utilizado para la colecta de RFF. Las emisiones al aire de combustión de diésel no han sido incluidas en el estudio. Los RFF como recursos son enviados a la fábrica de aceite de palma para la extracción de aceite de palma.

El rendimiento de RFF es 2.7-2.8 ton/rai•año, en promedio. Si hay algún exceso de nutrientes aplicados a la palma de aceite, pueden permanecer en el suelo o se pierden por erosión o lixiviación, diluidos en agua de escorrentía o dispersos en otras formas. La

erosión es un tipo de degradación importante del suelo, ya que es irreversible. Por ejemplo, en Malasia hay aproximadamente 0.1 kg de erosión por metro cuadrado al año. Un exceso de nitrógeno puede causar fugas de nitrato. Las fugas de nitrato y las pérdidas de fósforo durante el período de cultivo contribuyen al enriquecimiento de nutrientes. Sin embargo, el fósforo y el potasio son importantes para la fertilidad del suelo a largo plazo. Los fertilizantes de nitrógeno para suelos pueden perderse por volatilización tras la incorporación como NH_3 y NO_x y luego transformarse a N_2O (óxido nitroso). Los valores predeterminados de volatilización de NH_3 y NO_x de los fertilizantes de nitrógeno es 0.1 kg N por kg de fertilizante.

El paraquat (gramoxone) se rocía en la palma de aceite como un herbicida. Una hora después de pulverizar el paraquat, unos 11 mg / kg de peso corporal puede conservarse en la piel del obrero. Ésto puede ser descargado en 14 días más tarde en 10.21 mg por litro en la orina de la persona. El paraquat no es persistente y se descompone en el suelo en unas semanas debido a la actividad de los microorganismos del suelo y por fotodescomposición. El glifosato es un plaguicida de contacto o no sistémico que puede ser utilizado para controlar la maleza también. El carbofurano (furadan) es un pesticida sistémico. La toxicidad de furadan es relativamente inferior al fosfato orgánico en los mamíferos. No se acumula en el suelo y se descompone por foto-descomposición durante 2 semanas a 1 año.

2.2.2.2 Producción de palma de aceite

La capacidad de producción del molino de aceite de palma es alrededor de 45 toneladas de RFF por hora o alrededor de 1000 toneladas de RFF por día. La fábrica opera aproximadamente 16-24 horas por día. El árbol de aceite de palma y el racimo de fruta fresca se muestran en la Figura 2.13.

Las operaciones involucradas en el proceso de molino de aceite de palma consisten en:

- **Rampa de carga**: Después de pasar por la báscula, la fruta tiene que reposar durante un tiempo hasta que puedan entrar en la primera etapa del procesamiento. Para la carga, la rampa es el lugar donde los RFF son transportados y descargados en el molino.

- **La esterilización** de RFF se hace por lote en una autoclave por 1 hora 40 minutos para quedar completamente cocidos. La temperatura interior es de 120-130 ° C. El condensado de vapor es la salida de aguas residuales generadas en este paso.

- **Extracción (trilla)**: Para separar los frutos esterilizados del manojo de tallos. Este paso de procesamiento genera los racimos vacíos de fruta (RFV).

- **Digestión**: Se ponen las frutas frescas separadas en donde son trituradas en condiciones de vapor calentado. Ningún residuo se produce en este paso.

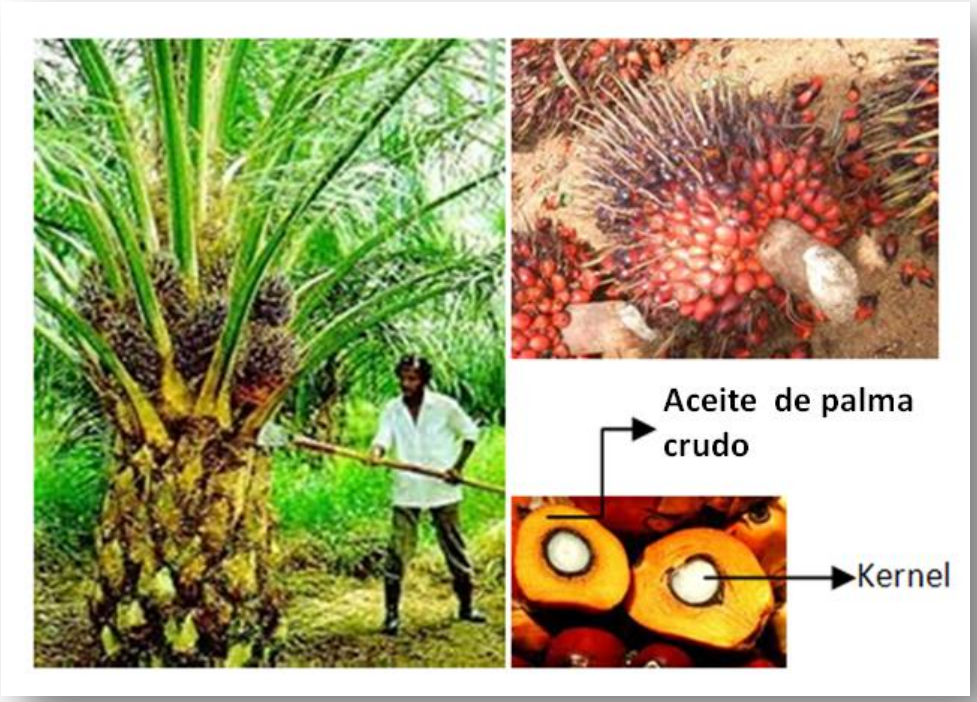

Figura 2.13 Árbol de palma de aceite y racimo de frutas frescas de la provincia de Krabi (Plenjai, 2004)

• **Extracción de aceite crudo de palma (ACP)**: La masa homogénea de aceite del digestor es empujada a través de una prensa de tornillo y posteriormente pasa a través de una pantalla de vibración, un hidrociclon y decantadores para eliminar agua y sólidos finos. Las aguas residuales del decantador y el pastel decantado son los principales desechos en este paso. Las secadoras centrífugas y al vacío sirven para purificar más el aceite antes de enviarlo a un tanque de almacenamiento. La temperatura del aceite (60 ° C) en el almacenamiento se mantiene con vapor de calentamiento antes de que se venda el ACP.

• **Separación de nuez / fibra**: La fibra y nueces de la prensa de tornillo se separan en el ciclón. La fibra que pasa a la parte inferior del ciclón se utiliza como combustible de calderas que después produce ceniza en la combustión.

• **Rompe nueces**: Las nueces se parten en rotor centrífugo. Después del proceso de craqueo, los núcleos o kernel y las cáscaras se separan por suspensión de arcilla (caolín). Las cáscaras separadas de los núcleos se venden a otras fábricas como combustible. Los kernels son enviados para el proceso de secado en un silo secador para vender a otra fábrica.

La caracterización de las aguas residuales en los molinos de aceite de palma se muestra en la Tabla 2.8 y los materiales y el flujo de energía para la producción de aceite de palma se muestran en la Figura 2.14.

De la Tabla 2.8, puede verse que las aguas residuales de los molinos de palma de aceite (ARMPA) no están dentro del estándar de una fábrica industrial de palma de aceite en Tailandia. Sin embargo, estas aguas residuales no se descargan directamente en cualquier cuerpo de agua, sino que son tratadas en un estanque o mediante la aplicación a la tierra.

De la Figura 2.14 se puede ver que en promedio se produce una tonelada de aceite crudo de palma (ACP) de 5.8 toneladas de RFF. La fibra, cáscara, pastel decantado y RFV corresponden al 30, 6, 3, 28.5% de los RFF respectivamente. El RVF es un residuo sólido grueso y su uso como combustible para calderas está limitado por su alta humedad contenido y bajo valor calorífico (<10 MJ/kg RFV seco). La utilización del RFV como sustrato para hongo y el cultivo es preferible. El RFV también podría utilizarse como abono orgánico y mantillo. Las fibras de palma se usan principalmente como combustible para calderas (calefacción valor de fibras secas < 5 MJ/kg).

Aunque las cáscaras pueden utilizarse como combustible de calderas con valor de 17 MJ/kg de calefacción, causan el humo negro. La cáscara se utilizaría mejor para carbón activado en lugar de combustible debido a esas emisiones indeseables. El pastel decantado puede utilizarse como un fertilizante. Las aguas residuales del molino de palma aceite (ARMPA) son la mezcla de efluentes contaminados, que deben ser tratados antes de desecharlos. En la fábrica de aceite de palma seleccionada para este estudio, las ARMPA se degradan de forma anaerobia para producir biogás que se utiliza en un motor diésel modificado con un motor de inducción de 90 kW. Ésto contribuye al tratamiento de efluentes, así como ayuda a reducir la cantidad de electricidad necesaria de producción fuera del sitio. Esta electricidad es utilizada en la oficina, casa de mano de obra y molino de aceite de palma y en el digestor de la planta.

Tabla 2.8 Caracterización de las aguas residuales del proceso de producción de aceite de palma (Plenjai, 2004)

Parámetro	Unidad	ARMAP	Estándar
pH		7.45-9.24	5.0-9.0
BOD_5	mg/l	195	<100
COD	mg/l	1200	<1000
Sólidos Suspendidos	mg/l	890	<150
Aceite y grasas	mg/l	90	<25
Temperatura	ºC	36-40	<40

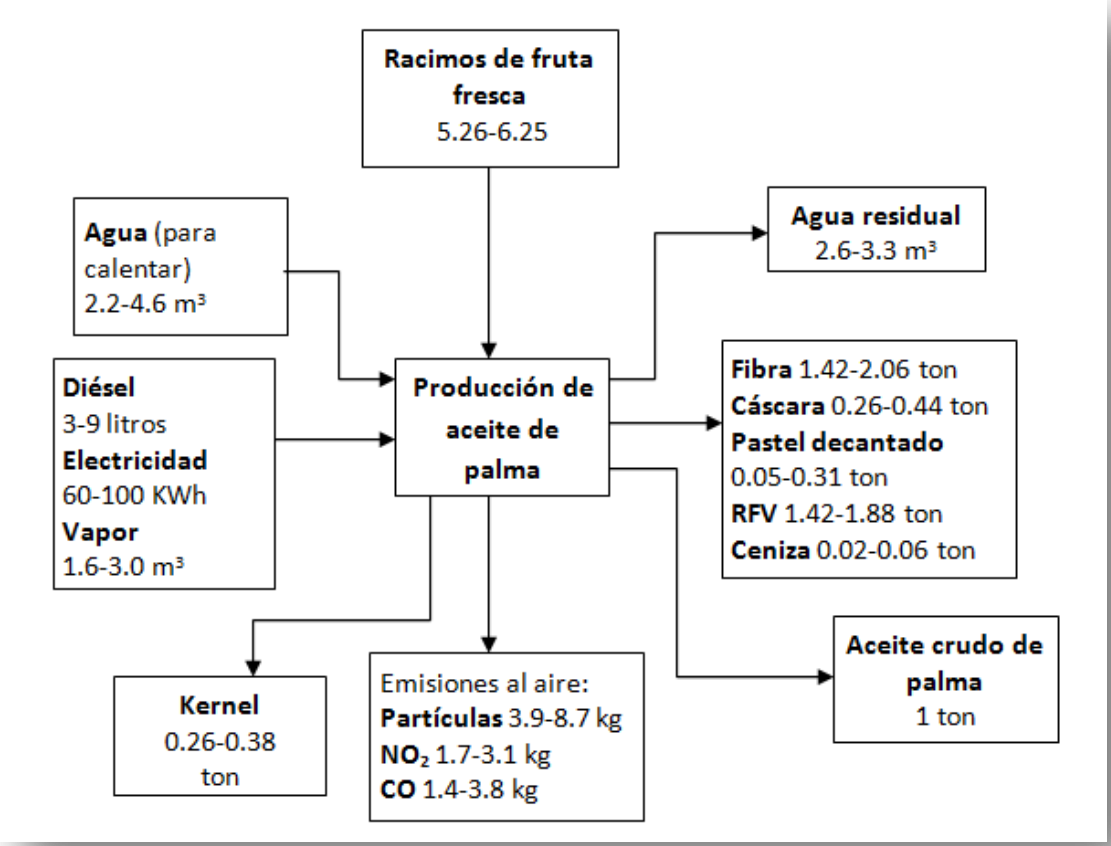

Figura 2.14 Proceso de producción de aceite de palma (Plenjai, 2004)

2.2.2.3 Producción de biodiésel

El reactor para producir biodiésel de aceite de palma es un reactor de tipo lote de 20,000 l operando a un máximo de 3 lotes/día con un tiempo reaccion de 8hrs/lote. La temperatura es de 50-60°C. La productividad de biodiésel es unas 16 toneladas / lote. El aceite de palma es precalentado a 55°C. Alternativamente, se utiliza aceite usado (que utilizan principalmente aceite de palma) es precalentado a 100°C para eliminar la humedad. La transesterificación del aceite produce ésteres de metilo (biodiésel) y glicerina. La capa de éster de metilo es un líquido amarillo claro que está por encima de la capa de glicerina, que es de color marrón oscuro. Las mezclas pueden mantenerse durante la noche y separarse por gravedad. De lo contrario, el éster metílico es separado del glicerol y lavado con agua y ácido acético hasta que el agua de lavado sea neutral. Luego se seca el éster metílico por calentamiento.

En la Figura 2.15 se muestra que el rendimiento de la producción de biodiésel es del 87%. El porcentaje de rendimiento para producción de biodiésel puede ser calculado basado en un balance de materiales estequiométrico por la ecuación simplificada siguiente:

$$aceite\ \ (1\ mol) + metanol\ (3\ moles) \rightarrow metiléster\ de\ aceite\ (3\ moles) + glicerina(1\ mol)$$

Masas correspondientes (cálculo basado en la cadena de C-18 del aceite de palma):

$$884\ g + 96\ g\ \rightarrow 888\ + 92\ g$$

La glicerina es el subproducto que puede utilizarse para producir jabón u otros materiales. Las aguas residuales del proceso deben ser tratadas antes de eliminación o de liberación en el medio ambiente. Las aguas residuales generadas son cerca de 0.2 m^3 del agua de entrada.

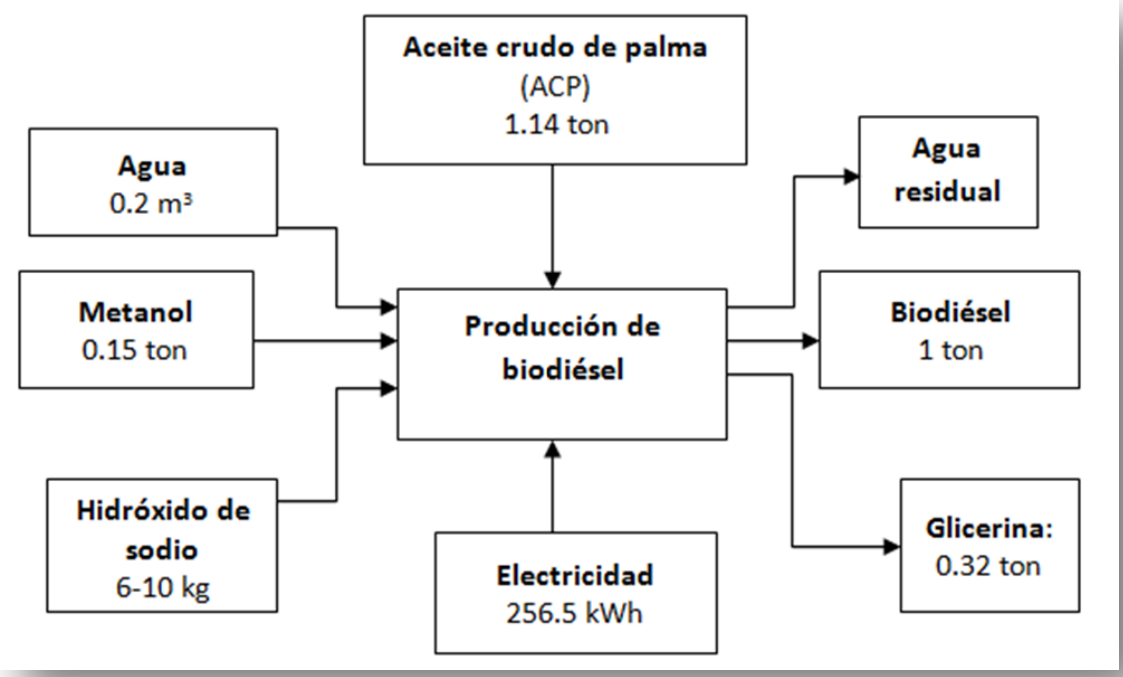

Figura 2.15 Transesterificación de aceite de palma para producción de biodiésel (Plenjai, 2004)

2.2.2.4 Análisis de inventario

El flujo total de materiales, energía y las emisiones del ciclo de vida de producción de biodiésel de aceite de palma se resumen en la Tabla 2.9. 1 tonelada de biodiésel es producida por unas 1.14 toneladas de aceite crudo de palma (ACP) o racimos de alrededor de 6-7 toneladas de fruta fresca (RFF). El requisito principal de agua para la producción de biodiésel proviene de la agricultura de aceite de palma. El nitrógeno es el mayor aporte de fertilizante aunque potasio y fósforo también son importantes contribuyentes. Los requerimientos de diésel provienen principalmente de la producción agrícola y de aceite de palma. El proceso de transesterificación tiene la mayor demanda de electricidad (kWh).

Otros insumos materiales y energía se muestran en la Tabla 2.9. Se debe tener en cuenta que insumos adicionales producirán a cada paso más residuos.

Tabla 2.9 Lista del inventario de la producción de 1 ton de biodiésel (Plenjai, 2004)

Parámetro	Cantidad	Parámetro	Cantidad
Materia prima		Energía	
Fertilizante (kg)		Vapor (m^3)	1.8-3.5
Sulfato de amonio	265-340	Electricidad (kWh)	360-380
Fosfato	74-95	Emisiones al aire	
Cloruro de Potasio	190-240	Partículas (kg)	4.2-9.4
Kieserita	48-61	NO_2 (kg)	1.8-3.3
Boro	4-5	CO (kg)	1.5-4.1
Paraquat (kg)	0.5-0.9	Agua residual (m^3)	3-4
Glifosato (kg)	1.4-2.2	Desechos sólidos	
RFF (t)	6-7	Fibra (t)	1.6-2.4
NaOH (kg)	6-10	Cáscaras (t)	0.3-0.5
Metanol (t)	0.15	Pastel decantado (t)	0.06-0.14
Diésel (L)	5-13	RVF (t)	1.6-2.1
Agua (m^3)	6,500-10,000	Ceniza (t)	0.02-0.07
		Salida	
		Biodiésel (t)	1.0
		Glicerina (t)	0.32

Para las emisiones al aire, suelo y aguas residuales:

- Las emisiones asociadas con la plantación incluyen fertilizantes N, que se aplican a las plantas de aceite de palma en el vivero y el campo. Ésto emite N_2O al aire que contribuye al calentamiento global. Este fertilizante también puede contribuir a fugas de nitratos y fosfatos en las aguas subterráneas, sin embargo, el exceso no se conoce. Los herbicidas paraquat y glifosato también se extienden sobre el suelo en la finca y el insecticida furadan se aplica para controlar plagas, pero estos productos químicos son menos tóxicos por su foto y bio-degradabilidad.

- En el paso de generación de vapor de la producción de aceite de palma las emisiones están compuestas de partículas NO_2, y CO (en gases de combustión), los cuales contribuyen a la formación fotoquímica de ozono. Además las aguas residuales del proceso de molino de aceite de palma se envían a un reactor para producir biogás que se utiliza para la producción de electricidad. Los residuos sólidos como fibra, cáscara, pastel decantado, los racimos de fruta vacía y ceniza se utilizan en la agricultura y la industria.

- En la transesterificación del aceite de palma a biodiésel se producen aguas residuales por el lavado de ésteres de metilo. Aunque el agua está poco

contaminada, los contaminantes pueden incluir catalizador de hidróxido de sodio, metanol, glicerol, aceite de palma, etc. Además están las emisiones al aire cuando el biodiésel es quemado en motores diésel para el transporte que se examinará más adelante.

2.2.2.5 Emisiones de GEI de la producción de biodiésel y del escape

Los resultados del ciclo de vida, combinando las emisiones de la producción del biodiésel y las emisiones del escape se calculan en esta sección para un MJ de consumo de energía del combustible. El estudio de la EPA (2002) no incluye aceite de palma en sus análisis. No se han podido encontrar estudios específicos sobre las emisiones de biodiésel hecho de aceite de palma, por lo que se supone en este estudio que las emisiones de escape son las mismas que las de biodiésel de aceite de canola.

El estudio de la EPA (2002) observa que cuando se utiliza BD100 en los motores de los vehículos pesados, hay una disminución global de las emisiones de partículas (PM) y un aumento en las emisiones de NOx. El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos, nota que el efecto de NOx es real y es debido a un avance involuntario de temporización de inyección de combustible como resultado de la mayor elasticidad de compresibilidad de mezclas de biodiésel (NREL, 2001). Es posible retardar el momento y así reducir los NOx, pero luego suben las PM. Esto puede explicar por qué hay estudios ocasionales que encuentran que las emisiones de PM aumentan cuando se utiliza biodiésel.

El laboratorio atribuye el aumento de NO_x al biodiésel de soya – y argumenta que mediante el uso de oleato de metilo (es decir, el biodiésel de sebo o colza) podría eliminarse el aumento de NO_x. El mismo laboratorio en 2003, estudió los efectos de las mezclas de biodiésel en las emisiones de vehículos y encontró las emisiones de NOx de una variedad de diferentes motores extremadamente variables. Se concluye que aunque algunos modelos producen un ligero aumento, otros producen una ligera disminución, y sus resultados tuvieron una reducción promedio de 0.6% (+/-2.0% para un intervalo de confianza del 95%) a BD20. Ésto resultaría en una reducción media de alrededor del 3% para BD100 (NREL, 2003).

Como resultado de estas incertidumbres, una vez más se ha utilizado el aumento de emisiones NOx en el estudio de la EPA (2002).

Los resultados de las emisiones se muestran bajo dos diferentes escenarios de producción de aceite de palma:

- De tierras de plantación existentes
- De áreas de selva taladas

La principal diferencia entre los escenarios es la emisión de CO_2 por el cambio de uso de tierra. La extracción de aceite de frutos de palma es común a los dos escenarios. En la Tabla 2.10 se muestran las emisiones totales del escenario de tierras de plantación y su gráfica de emisiones de CO_2-e en la Figura 2.16. La Tabla 2.11 muestra las emisiones totales para el escenario de áreas de selva taladas y su gráfica en la Figura 2.17. En todas las Tablas y Figuras se presentan las emisiones totales del Diésel Ultra Bajo Azufre (DUBA) para que sirvan como comparativo entre las diferentes mezclas de biodiésel. Además se incluye el total de gases de efecto invernadero totales, donde se observa para las plantaciones existentes una disminución en todas las mezclas de biodiésel, pero todo lo contrario en el caso de plantaciones en selvas taladas, donde las mezclas aportan más emisiones que el DUBA en todos los casos.

Tabla 2.10 Emisiones de la producción y uso de mezclas de biodiésel a partir de aceite de palma de plantaciones existentes (CISRO, 2007)

	UNIDAD	DUBA	BD5	BD10	BD20	BD100
CO_2(producción)	gCO_2	13.2000	13.0000	12.7000	12.2000	8.1000
Metano(producción)	gCH_4	0.0190	0.0180	0.0180	0.0180	0.0150
N_2O(producción)	gN_2O	0.0001	0.0015	0.0028	0.0055	0.0275
Secuestro	g CO_2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Otros	g CO2-e	0.0000	0.0001	0.0003	0.0005	0.0027
CO_2 (escape)	g CO_2	69.2000	65.9000	62.6000	56.0000	0.0000
Metano (escape)	g CH_4	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
N_2O (escape)	g N_2O	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0015
CO (producción)	g CO	0.2980	0.2960	0.2940	0.2900	0.2750
CO (escape)	gCO	0.2810	0.2750	0.2690	0.2570	0.1790
NOx (producción)	g NOx	0.8680	0.8760	0.8840	0.8990	1.0330
NOx (escape)	g NOx	0.8400	0.8470	0.8530	0.8670	0.9840
NMVOC (producción)	g NMVOC	0.1640	0.1600	0.1550	0.1460	0.0740
NMVOC (escape)	g NMVOC	0.0720	0.0710	0.0710	0.0710	0.0690
Partículas (producción)	mg PM10	29.0000	28.2000	27.5000	26.1000	20.8000
Partículas (no-urbano)	mg PM10	0.0000	0.1000	0.1000	0.2000	0.7000
Partículas (escape)	mg PM10	28.3000	27.1000	26.0000	23.8000	11.9000
GEI equivalentes totales	**g CO2-e**	**83.4000**	**80.3000**	**77.1000**	**70.8000**	**17.5000**

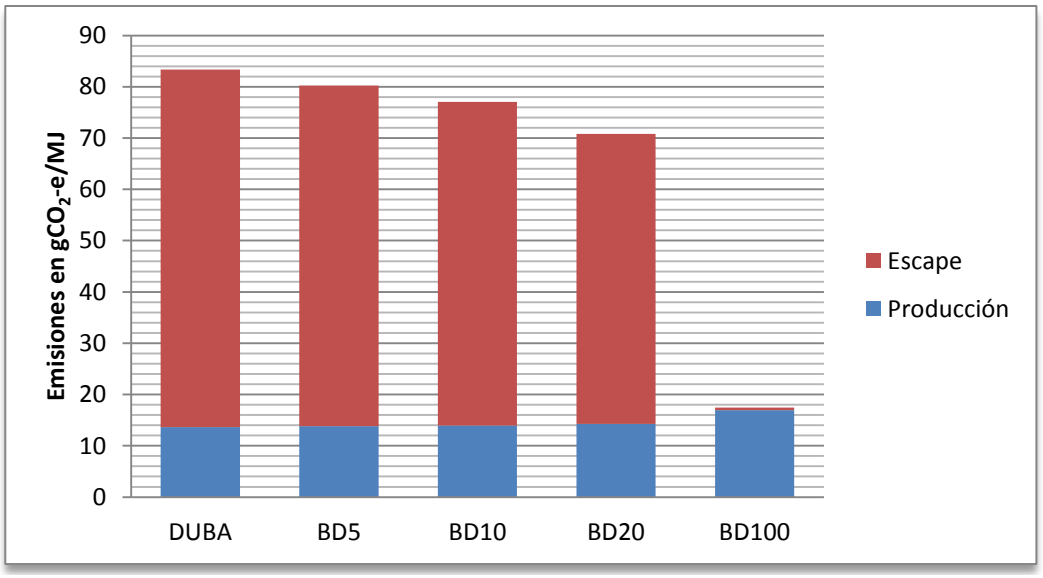

Figura 2.16 Emisiones de la producción y escape de biodiésel (por MJ) de distintas mezclas de diésel ultra bajo azufre y biodiésel de palma de aceite de plantaciones existentes (CISRO, 2007)

Tabla 2.11 Emisiones de la producción y uso de mezclas de biodiésel a partir de aceite de palma de selvas taladas (CISRO, 2007)

	UNIDAD	DUBA	BD5	BD10	BD20	BD100
CO_2(producción)	gCO_2	13.2000	51.6000	90.1000	167.3000	798.1000
Metano(producción)	gCH_4	0.0190	0.0180	0.0180	0.0180	0.0150
N_2O(producción)	gN_2O	0.0001	0.0015	0.0028	0.0055	0.0275
Secuestro	g CO_2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Otros	g CO_2-e	0.0000	0.0001	0.0003	0.0005	0.0027
CO_2 (escape)	g CO_2	69.2000	65.9000	62.6000	56.0000	0.0000
Metano (escape)	g CH_4	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
N_2O (escape)	g N_2O	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0015
CO (producción)	g CO	0.2980	0.2960	0.2940	0.2900	0.2750
CO(escape)	g CO	0.2810	0.2750	0.2690	0.2570	0.1790
NOx (producción)	g NOx	0.8680	0.8760	0.8840	0.8990	1.0330
NOx (escape)	g NOx	0.8400	0.8470	0.8530	0.8670	0.9840
NMVOC (producción)	g NMVOC	0.1640	0.1600	0.1550	0.1460	0.0740
NMVOC (escape)	g NMVOC	0.0720	0.0710	0.0710	0.0710	0.0690
Partículas (producción)	mg PM10	29.0000	28.2000	27.5000	26.1000	20.8000
Partículas (no-urbano)	mg PM10	0.0000	0.1000	0.1000	0.2000	0.7000
Partículas (escape)	mg PM10	28.3000	27.1000	26.0000	23.8000	11.9000
GEI equivalentes totales	**g CO_2-e**	**83.4000**	**118.9000**	**154.5000**	**225.9000**	**807.5000**

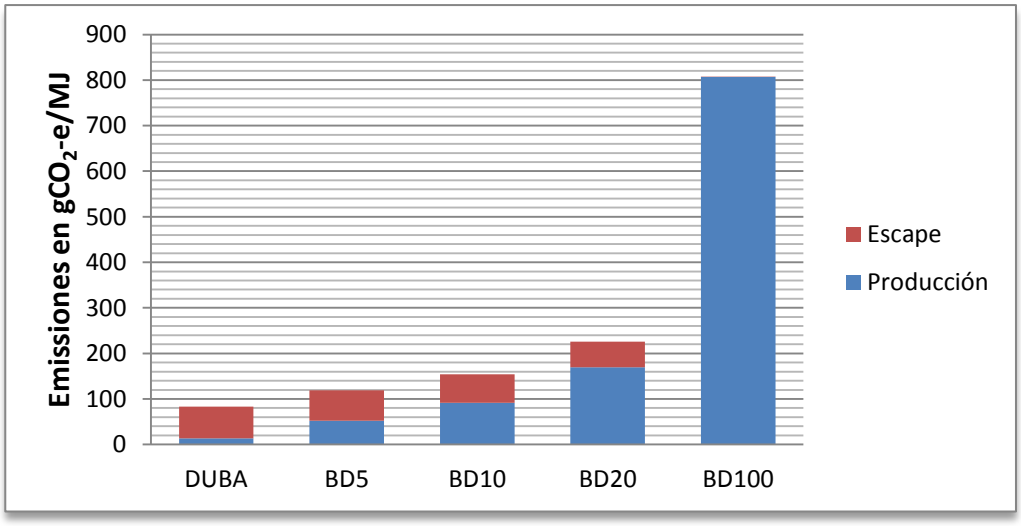

Figura 2.17 Emisiones de la producción y escape de biodiésel de distintas mezclas de diésel ultra bajo azufre y biodiésel de palma de aceite de selvas taladas (CISRO, 2007)

2.2.3 Pérdida de biodiversidad

La introducción de biodiésel en el mercado mexicano basado en materia prima nacional resultará en la expansión del área agrícola para la producción de cultivos de energía lo cual puede provocar la pérdida de diversidad biológica debido a los cambios de uso de tierra. La biodiversidad se vería principalmente afectada por la pérdida de los corredores de migración, hábitats y zonas de protección que dependen de las variedades de cultivo, planes de rotación, las plagas, uso de fertilizantes, riego, procedimiento de tamaño y cosecha de campo. Principalmente la transformación de extensas áreas utilizadas para el cultivo intensivo se caracteriza por la pérdida de la biodiversidad. La conversión de un bosque primario, es decir, un bosque que nunca se ha utilizado para cultivo, a una plantación de palma de aceite conducirá a efectos similares (WWF, 2006).

Para minimizar la pérdida de biodiversidad deberían ser establecidas amplias formas de cultivo, incluso si ésto resultara en un mayor requerimiento de tierra. La mezcla de las variedades de cultivos y planes de rotación y estructuración en pequeña escala del cultivo podría evitar la pérdida de la biodiversidad en el futuro.

2.2.4 Erosión del suelo y otras degradaciones

La erosión del suelo es un proceso natural, pero en muchos lugares se incrementa por el uso humano de la tierra. Los cambios en el tipo de vegetación son una de las causas principales de la erosión del suelo, ya sea por rotación de cultivos con fines agrícolas hasta el extremo de la deforestación de los bosques. Además la erosión del suelo es un

problema enorme en las regiones áridas con cubierta de suelo limitada e inestable pues mermará debido a fuertes lluvias (EEA, 2006).

Para reducir los efectos de la erosión del suelo, los estándares de cultivo de energía deben dirigirse a por ejemplo, exclusión o restricción de la producción de aceite vegetal intensiva, aplicación de cultivo y cosecha con prácticas que reduzcan los riesgos de erosión.

2.2.5 Uso y contaminación del agua

En regiones áridas y semiáridas en México el aumento de regadío podría conducir a la escasez de agua y además podría causar la reducción de las reservas de agua así como los niveles en ríos y lagos. El riego compite con todos los demás usos del agua. Varios estudios (Lazcano, 2006) (USDA, 2006) indican que es necesario hacer importantes inversiones en los sistemas de riego mexicano. El riego corresponde al 84% del consumo total de agua (la agricultura, sectores domésticos e industriales). Debido a los problemas de disponibilidad de agua se esperan regulaciones para el uso controlado de agua, por lo tanto las áreas de regado deben estar principalmente destinadas para la producción de alimentos. Por lo tanto, la escasez de agua en varias regiones de México llevará a limitaciones en el área potencial de los cultivos energéticos. Entre los cultivos de aceite seleccionados especialmente girasol, colza y granos de soya tienen altas necesidades de agua. En este contexto la jatropha con rendimientos de aceite competitivamente altos, puede cultivarse con éxito sin riego en muchas regiones húmedas semiáridas (300 a 700 mm/año). La palma de aceite como otro cultivo de rendimiento alto, sólo puede ser cultivada en las regiones húmedas del sur de México, de manera que no existe ningún conflicto relacionado con el uso del agua.

Junto a la escasez de agua el uso de agroquímicos (fertilizantes, plaguicidas) puede contaminarla. Por otra parte las instalaciones de procesamiento de la biomasa, por ejemplo molinos de Palma de aceite podrían provocar importantes vertidos de aguas residuales contaminadas orgánicamente. Por lo tanto, el cultivo energético siempre debe combinarse con métodos que eviten necesidades críticas de riego en regiones secas y semisecas y que minimicen los impactos de los agroquímicos por tiempo y cantidad de aplicación. Además, Las unidades de procesamiento de la biomasa deberían estar controladas por un estricto cuerpo de la legislación para disponer su flujo de aguas residuales de una manera ecológicamente aceptable (por ejemplo, posterior conversión en plantas de biogás) (SENER, 2006).

2.3 Aspectos sociales de la producción del biodiésel

2.3.1 Aspectos del empleo

El efecto estimado de la generación de empleo a través del biodiésel es variable de acuerdo con el negocio de la agricultura estudiado y la tecnología seleccionada. En consecuencia, la siguiente descripción de los efectos sobre el empleo puede ser vista

como una estimación aproximada. El cultivo de soya es altamente mecanizado y la necesidad de grandes áreas, lo que se traduce en la baja generación de empleos (0.07 empleos por hectárea) (FBDS, 2005). El cultivo de palma africana se lleva a cabo en pequeña escala y en las plantaciones, de entre 3,000 y 5,000 hectáreas. Los pequeños sistemas rurales requieren de un trabajador para 0.4 hectáreas, mientras que en las plantaciones un empleado es responsable de 0.2 hectáreas (SENER, 2006). Para efectos sobre el empleo del cultivo de jatropha sólo existe poca experiencia en el pasado. Se estima que el cultivo de jatropha genera 0.8 empleos por hectárea durante el primer año y alrededor de 0.20 empleos por hectárea en los años siguientes (Becker y Francis, 2005). Si la generación de empleo debe ser una meta principal para la introducción en el mercado de biodiésel se deben implementar mecanismos de apoyo a las formas extensivas de cosecha de cultivos oleosos. En este contexto, podemos poner como ejemplo el esquema de apoyo al biodiésel brasileño, donde las explotaciones agrícolas familiares gozan de incentivos fiscales especiales de hasta 100% del impuesto mineral.

Pero sólo la evaluación de los efectos sobre el empleo no refleja la calidad del empleo. Por lo tanto, es necesario que los esfuerzos de producción en pequeñas propiedades estén acompañados por programas para la calificación de los trabajadores. Además, es necesario introducir técnicas modernas de manejo y mecanización lo que de hecho está vinculado con la reducción del número de empleos creados, pero con la calidad de las ganancias para el resto. Además, se debe aspirar a abarcar completamente a la población local en la distribución de los ingresos económicos de la producción del biodiésel.

2.3.2 Seguridad de los alimentos

Uno de los principales conflictos para la producción de biocombustibles es la competencia entre el uso de la tierra para comer, y para fines energéticos. El uso de aceite vegetal en la industria alimentaria en México, así como en todo el mundo, ha aumentado de forma constante durante un largo período de tiempo debido principalmente al crecimiento demográfico y de ingresos. Como los ingresos han aumentado la demanda de productos de origen animal y aceite vegetal ha superado a los granos básicos de alimentos. Junto con el rápido crecimiento del consumo mundial de aceite vegetal en el sector de la alimentación la demanda de aceites y grasas para el consumo de combustible tendrá un crecimiento considerable. Parte del crecimiento en la producción anual de oleaginosas provendrá de la tendencia al alza en los rendimientos de aceite de los cultivos, pero para abastecer el rápido crecimiento la superficie sembrada tendrá que ir para arriba. Ésto dará como resultado la propuesta de otros cultivos y la búsqueda de nuevas tierras para la producción.

El apoyo institucional agrícola en México se redujo en gran medida, junto con la estructura de propiedad de la tierra. En los últimos 10 años las importaciones de granos básicos principales y las semillas oleaginosas se han duplicado. El balance de los productos alimenticios de exportación/importación muestra un déficit de 2,440 millones de dólares (Macedo, 2006). Para la auto-suficiencia en la producción alimenticia sería

necesario dedicar más de 5 millones de hectáreas al cultivo. En este sentido se deberían llevar a cabo grandes cambios institucionales para tratar de lograr un cambio importante en la estructura agrícola de México hacia la extensión de cultivos oleaginosos. Para reducir al mínimo la competencia directa de los cultivos energéticos y los alimenticios la producción de jatropha parece ser prometedora, al menos sí, la forma no comestible que se cultiva, que además es adaptable a una gran variedad de suelos, la altitud y el clima (incluso semi-áridas). Pero tiene que estar en la mente que, debido a las experiencias relativamente limitadas en el cultivo de Jatropha, los logros de México en el cultivo tomarán por lo menos 5 años. Y a pesar que la Jatropha tiene una demanda de agua relativamente baja un sistema sofisticado de gestión del agua tiene que ser introducido en algunas regiones.

2.3.3 Propiedad de la tierra

Junto a las preguntas de uso de la tierra, la cuestión de las estructuras de propiedad de la tierra tiene que ser considerada en el lanzamiento de un programa nacional de biodiésel. La forma industrializada de la producción de aceites vegetales como el cultivo de soya es a menudo bajo el control de los grandes terratenientes, o de empresas trasnacionales. En este sentido, esto podría entrar en conflicto con el derecho de regular democráticamente el acceso a la tierra, lo que a su vez puede resultar en pérdida de la base alimentaria de la población de las zonas rurales. También la pérdida de la diversidad está relacionada con la tierra a través de procesos de expropiación con propósitos de cultivo industrial. Para evitar los conflictos de propiedad de tierras, debe documentarse claramente una ley que defina los derechos de uso de la tierra. Nuevamente, se puede mencionar como ejemplo el esquema de biodiésel brasileño, con un fuerte enfoque en la producción de los pequeños agricultores de cultivos de aceite. Si es necesario un plan de promoción del biodiésel debe ser complementario al programa de reforma agraria nacional, para que los terrenos destinados a esta práctica tengan un uso racional.

2.3.4 Condiciones laborales y derechos de los niños

Las condiciones de trabajo comprenden aspectos como salarios, horas extras ilegales, trabajo infantil o la esclavitud. En el siguiente, algunos aspectos problemáticos de la agricultura de la biomasa se describen. Los trabajadores de las plantaciones han aumentado en relación con el número de trabajadores permanentes, que están expuestos a mayores riesgos. Las mujeres suelen ayudar a sus maridos, no lo hacen bajo un contrato con la empresa ni reciben remuneración. Las empresas nacionales de bienes no proporcionan herramientas de trabajo y equipos de seguridad para los trabajadores. Algunos trabajadores migrantes tienen que pagar a las agencias de contratación y firmar los contratos que están a menudo en un idioma extranjero. En muchos casos los inmigrantes firman cualquier cosa que las empresas ofrezcan.

Con respecto a las condiciones laborales, es importante proteger a los trabajadores contra el trabajo forzoso, las horas extraordinarias, el pago desigual e ilegal. El salario mínimo, los derechos de la mujer embarazada, la eliminación del trabajo infantil debería incluirse en

una visión social de la producción de biomasa. A menudo los niños y las mujeres trabajan en el campo. Especialmente para ellos, es necesario reformular las normas para el cultivo sostenible de la biomasa.

2.4 Aspectos económicos de la producción de biodiésel

La preocupación en todo el mundo sobre el costo de la energía especialmente del petróleo, ha llevado a una continua búsqueda de combustibles alternativos. Por lo tanto, un punto de referencia para el análisis macroeconómico de la aplicación de biodiésel en México es el mercado del petróleo mundial. Además, hay un conflicto en el uso de aceites vegetales para la producción de biocombustibles, el uso en la industria alimentaria, así como en el uso industrial. Estas interacciones entre los mercados son muy complejas; como una primera estimación los diferentes mercados pueden ser brevemente descritos como sigue.

2.4.1 Mercado global y nacional de aceites minerales

El biodiésel tiene que competir con los combustibles fósiles. Se pueda o no desarrollar el biodiésel en México y en qué ritmo, depende en gran medida del desarrollo del mercado mundial de hidrocarburos. Por un lado, el rápido crecimiento en la demanda, especialmente de los nuevos países emergentes como India y China y en el otro lado el conflicto no resuelto en el Medio Oriente, donde se encuentran casi el 70% de los recursos de petróleo en todo el mundo. México es el 7 º productor de petróleo crudo en el mundo al 2009, que es una fortaleza de la economía política mexicana. Se produjeron unos 147 millones de toneladas de crudo, 6.2 por ciento menos que en 2008 y un consumo de 85.6 millones. La demanda de diésel aumentará de 383.7 miles de barriles diarios [mbd] en 2009 a 586.8 [mbd] para el año 2025 con una tasa media de crecimiento anual tmca = 2.7. Tal como se muestra en la Figura 2.18.

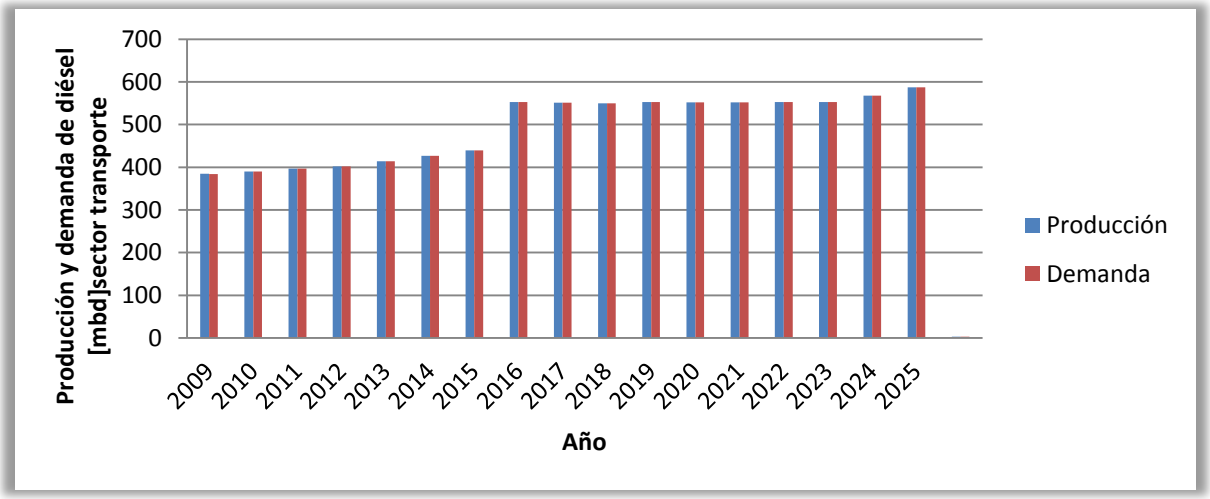

Figura 2.18 Prospectiva de demanda y producción de diésel 2009-2025 (SENER, 2010B)

2.4.2 Mercado global y nacional de aceites vegetales

En el área de la agricultura, las industrias de aceite y grasa están entre los sectores de más rápido crecimiento. En los últimos 20 años, el consumo mundial de aceites y grasas ha aumentado en un promedio del 4% por año. El aumento de la demanda de aceites y grasas es en gran parte debido al crecimiento de consumidores en el sector de alimentos en los países recientemente industrializados, como China e India. Por el contrario, hay una creciente demanda de utilizar aceites vegetales como materia prima para la producción de biodiésel en los países industrializados.

2.4.2.1 Oferta y demanda

En el año económico 2009/10 se produjeron unos 442.31 millones de toneladas de semillas oleaginosas. Aproximadamente el 59% de estas semillas oleaginosas fueron cubiertas por la producción de soya, que se cultiva principalmente en el norte y sur de América. Con cierta distancia detrás le sigue la producción de semillas de colza con 14% del volumen global de producción. Las semillas de maní suministraron (34 millones de t) 7% al igual que las semillas de girasol de la demanda mundial de semillas oleaginosas (Figura 2.19).

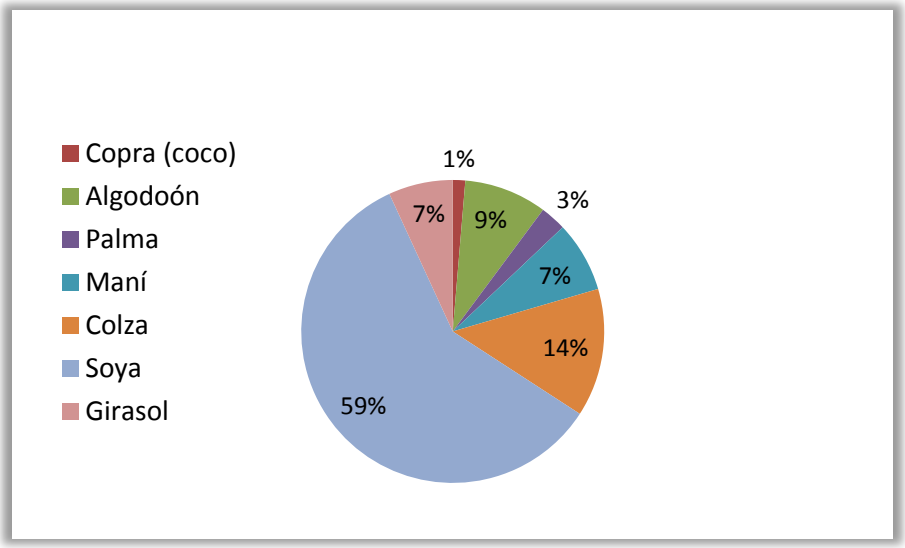

Figura 2.19 Mercado global de las semillas oleaginosas en millones de toneladas 2009/10 (USDA, 2010B)

Casi toda la cosecha de semillas oleaginosas se usa para producir aceites y grasas. De acuerdo a la estimación del USDA, la producción mundial de los nueve más importantes aceites vegetales y grasas alcanzó 140.21 millones de toneladas en 2009. El consumo total de materias grasas vegetales en los últimos cinco años ha aumentado en aproximadamente el 26%, según lo cual China ha experimentado el mayor crecimiento en el consumo de más del 40%, lo que se basa principalmente en el crecimiento de la

demanda en el sector de alimentos. En el ejercicio 2009 nuevamente la producción de aceite de palma con 45.6 millones de toneladas (4.07% más en relación con el año anterior) superó la producción de aceite de soya con 38.89 millones de toneladas (7.7% más).

Para el futuro se prevé que debido al desarrollo de una política de combustibles renovables, el nivel de la demanda de aceite vegetal del mundo aumentará más rápidamente incluso que en el pasado.

2.4.2.2 Comercio de semillas oleaginosas y sus productos transformados

El comercio mundial de semillas oleaginosas y sus productos transformados se limita a unos pocos productos y países de exportación e importación. Como con la mayoría de los productos agrícolas, los flujos de comercio mundial de semillas oleaginosas y sus derivados se determinan en gran medida por la política nacional de comercio exterior (derechos de aduana) y el mecanismo de mercado para la oferta y la demanda.

Cerca de 101.65 millones de toneladas de semillas oleaginosas y 60.27 millones de toneladas de aceites vegetales se comercializaron en el año económico 2009/10. La soya es el producto más importante de comercio y constituye alrededor del 85% de todas las semillas oleaginosas negociadas. Los países principales de exportación son Estados Unidos, Brasil y Argentina, que vende la mayor parte de sus semillas producidas en China y la Unión Europea. Por un lado, la China tiene una gran capacidad de procesamiento; sin embargo, la tierra disponible para la mayor expansión de áreas de cultivo es limitada. En particular, el continuo aumento en el número de ganado da como resultado un aumento de la demanda de harina de soya; inevitablemente, esto crea una dependencia en las importaciones.

El aceite de palma representa aproximadamente la mitad del comercio de aceites vegetales (34.75millones de toneladas) casi el doble que el comercializado en 2005. Le sigue el aceite de soya y aceite de girasol con volúmenes comerciales de 8.7 millones de toneladas y 3.84 millones de toneladas, respectivamente, como se observa en la Figura 2.20. El volumen comercial de aceite de semilla de colza es de sólo 2.93 millones de toneladas, de los cuales aproximadamente el 70% se exporta desde Canadá a principalmente Estados Unidos (70%) y China (USDA, 2010B).

Actualmente México depende de hasta 95% de las importaciones de oleaginosas de vegetales y productos y se pronostica que la demanda de productos de semillas oleaginosas va a aumentar en los próximos años (Lazcano, 2006). También las importaciones de aceite y harina se espera que incrementen en el corto y mediano plazo, a medida que aumente la demanda interna que supere la producción nacional.

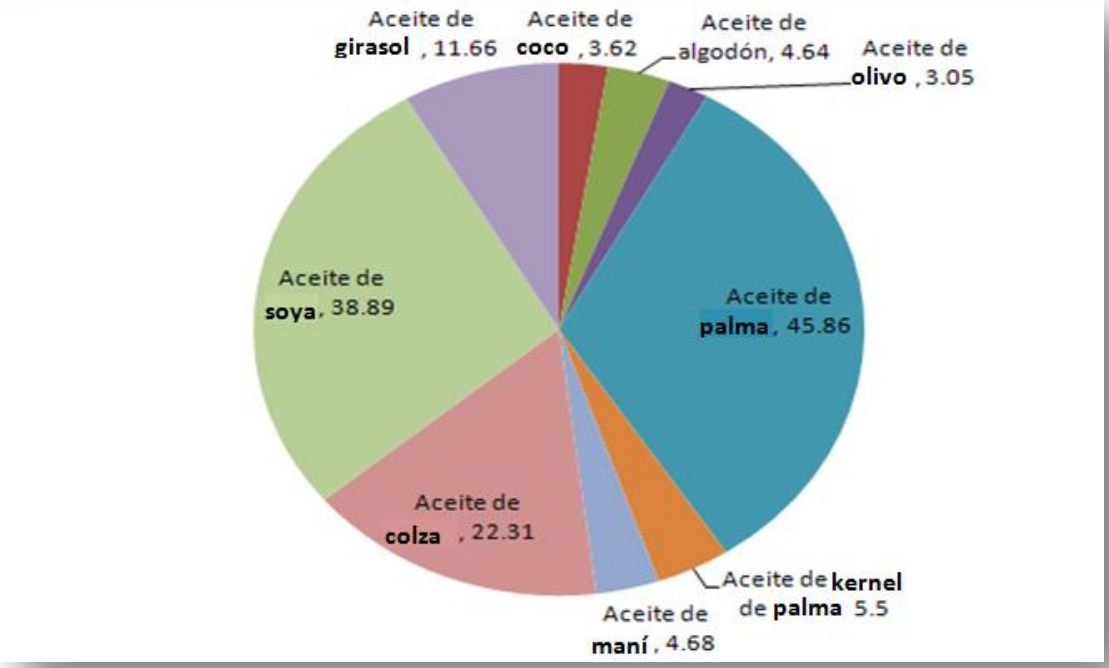

Figura 2.20 Comercio de aceites vegetales a nivel global en millones de toneladas 2009/10 (USDA, 2010B)

En la actualidad, la semilla de soya es la principal oleaginosa importada que representa el 70% de las importaciones de oleaginosas totales de México tal como se muestra la Figura 2.21. Casi el 50% de las importaciones de aceite son de aceite de palma, seguido de un 23% de aceite de soya. Estados Unidos es y seguirá siendo el proveedor de semillas oleaginosas más importante de México. Aunque el gobierno de México desea lograr una mayor autosuficiencia en la producción de semillas oleaginosas, esto puede ser difícil ya que la gran mayoría de la producción de México se realiza en tierras no irrigadas. Por ello, sería necesario hacer inversiones considerables en sistemas de irrigación (USDA, 2010).

2.4.3 Panorama internacional de la palma de aceite

La producción de aceite de palma ha superado al de soya, en conjunto los aceites de palma y de palmiste, representan más de la tercera parte de la producción de los 17 aceites y grasas vegetales que se comercializan en el mundo.

El crecimiento de la oferta mundial de aceite de palma ha ido aparejado a un crecimiento similar en demanda mundial en los últimos años, con una ¡ tendencia sostenida. Este incremento se explica principalmente por:

- El crecimiento de las economías del sudeste asiático, China e India, que presentan una creciente demanda de aceite de palma.

- El auge de la industria de los biocombustibles, especialmente en Europa y Estados Unidos; que genera una creciente demanda de aceites vegetales para producir biodiésel.

- El desarrollo general de la industria oleoquímica la cual presenta una gran oportunidad para la utilización de los aceites de palma y de palmiste, como materia prima para la producción de productos tales como jabones, champús, cremas y cosméticos, detergentes, ceras, plásticos, cauchos, textiles, lubricantes, aditivos para grasas y agroquímicos, resinas y pinturas de superficie, entre otros.

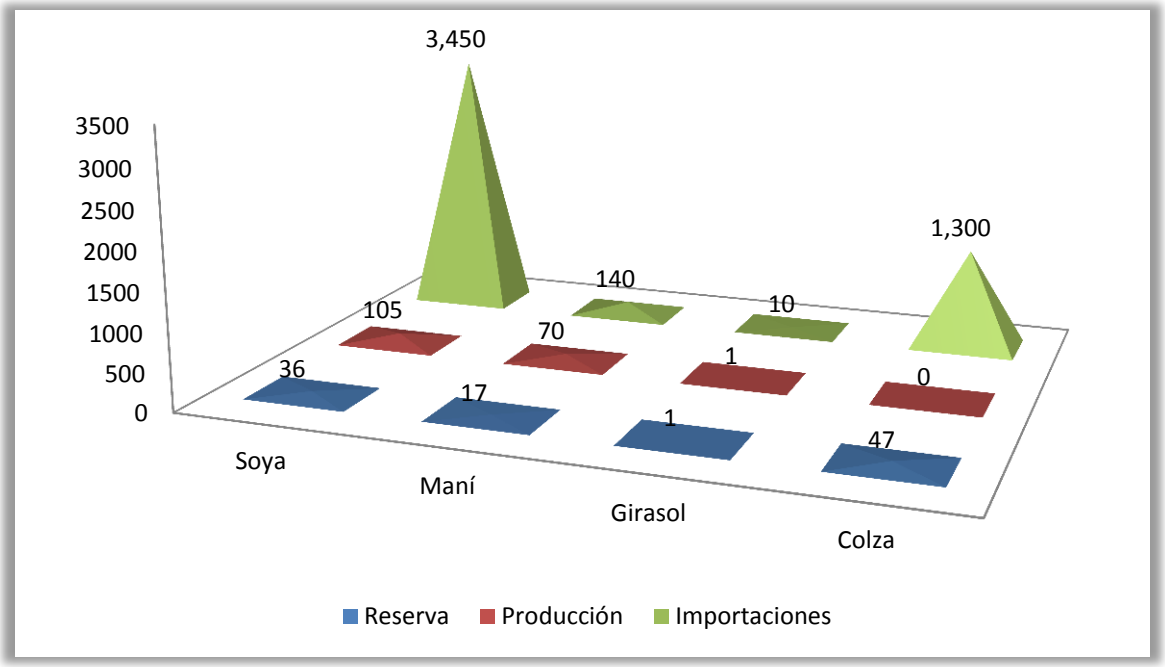

Figura 2.21 Suministro total en México de semillas oleaginosas año económico 2009/10 miles de millones de toneladas (USDA, 2010)

Así en la Figura 2.22 se observa que la producción de aceite de palma aumentó 64% entre los ciclos 20002/03 a 2009/10 (TMCA de 7.4%) mientras que el consumo doméstico fue 62% mayor en el mismo periodo (TMCA 7.1%) En ese lapso los precios se incrementaron 82% (TMCA de 8.9% esto último sin considerar del precio máximo registrado en el ciclo 2007/08 cuando diversas materias primas tuvieron niveles record de precios).

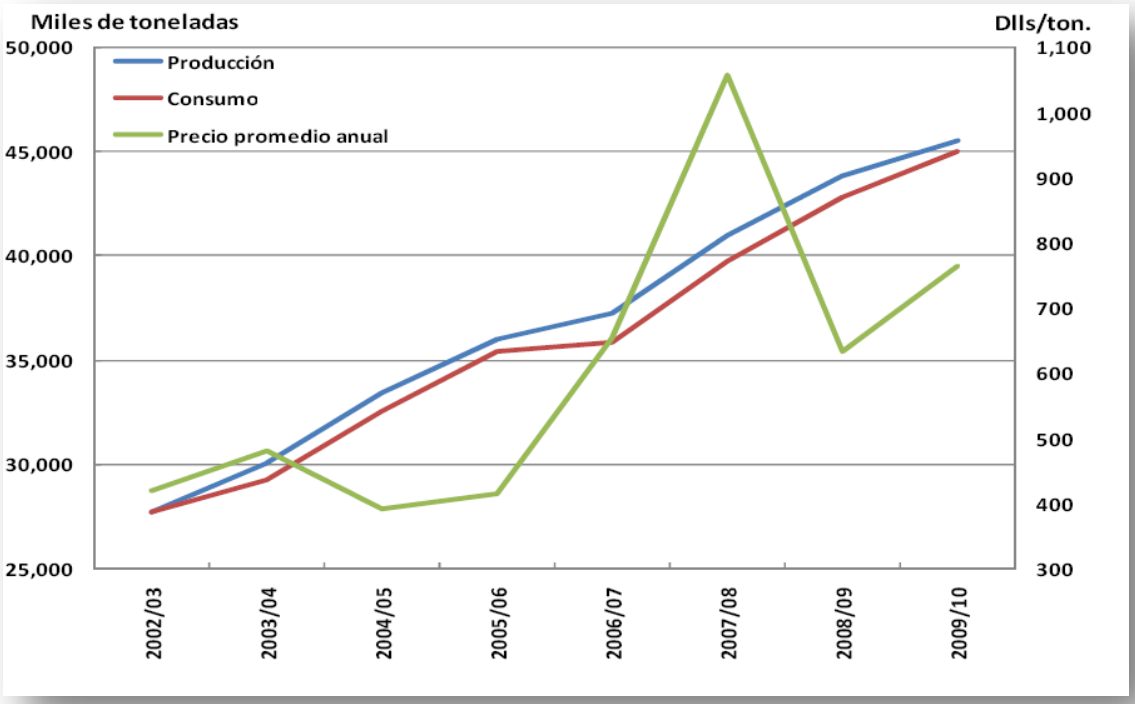

Figura 2.22 Producción, consumo y precios internacionales de aceite de palma (USDA, 2010B)

Se estima que en 1997 en el mundo, las plantaciones de palma de aceite abarcaban 6.5 millones de hectáreas produciendo 17 millones de toneladas de aceite de palma y 2.1 de aceite de almendra de palma. Para 20005 se calcularon 12 millones de hectáreas utilizadas y más de 30 millones de toneladas producidas. Malasia e Indonesia son los lideres de este cultivo con aproximadamente 85% de la producción mundial, en Tailandia, Nigeria y Colombia (este último es el principal productor en América) también se cultiva aunque en menor medida. La Figura 2.23 muestra en millones de toneladas los principales productores de aceite de palma del mundo. Por el lado de la demanda según Food and Agricultural Policy Research Institute (FAPIRI) está previsto que aumente 30% en los próximos años, ello como consecuencia de que la palma de aceite es la planta oleaginosa más productiva, lo que la convierte en la más viable económicamente para la producción de biodiésel, ya que su rendimiento es 10 veces mayor al de la soya.

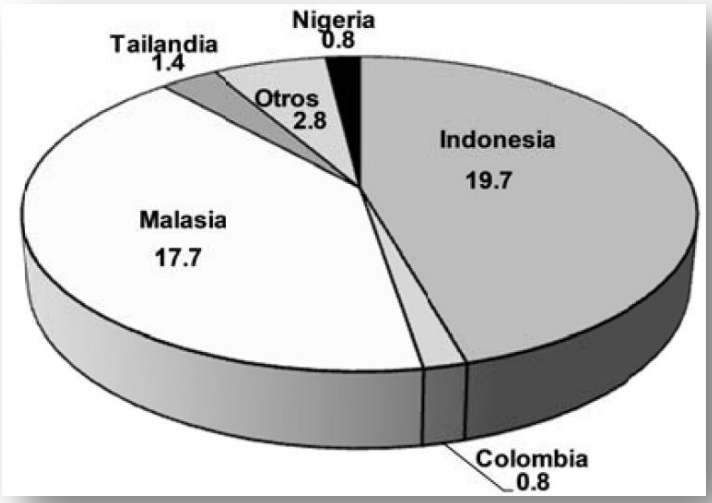

Figura 2.23 Producción de aceite de palma 2009/10 (SAGARPA, 2010C)

La producción de aceite de almendra de palma, está concentrada, como es obvio, en los mismos países que el aceite de palma: Indonesia y Malasia. Dado que la composición química del aceite de almendra de palma es similar a la del aceite de coco, se utiliza al igual que este en la elaboración de jabones y cosméticos; adicionalmente su uso tiene ciertas ventajas en la industria alimentaria actuando como conservador y con ciertas propiedades microbianas.

2.4.3.1 Precios internacionales

Los precios de los aceites al igual que los de otros commodities, han registrado una elevada volatilidad en los últimos años. Dada la potencial sustitución entre los aceites, los precios de estos productos, en términos generales, siguen la misma tendencia.

Otros factores que influyen en su cotización son el precio de energéticos y la situación económica y financiera mundial. En la Figura 2.24 se observa un diagrama que describe los diversos factores que hacen variar el precio del aceite de palma.

El aceite de soya continúa siendo la referencia de precios para los otros aceites tal como se observa en la Figura 2.25 donde los precios están dados en dólares por tonelada en Rotterdam, dada la utilización de granos y oleaginosas para la elaboración de biocombustibles. Desde mediados de 2007, el precio del aceite de soya se incrementó significativamente, si bien esa tendencia se revirtió por una mayor disponibilidad de soya, en los meses recientes ha aumentado el precio, aunque en menor medida que en 2007-08.

Dado el comportamiento del mercado de las oleaginosas, FAPRI estima que para los próximos años el precio de los aceites se incremente gradualmente respecto a los niveles actualmente registrados.

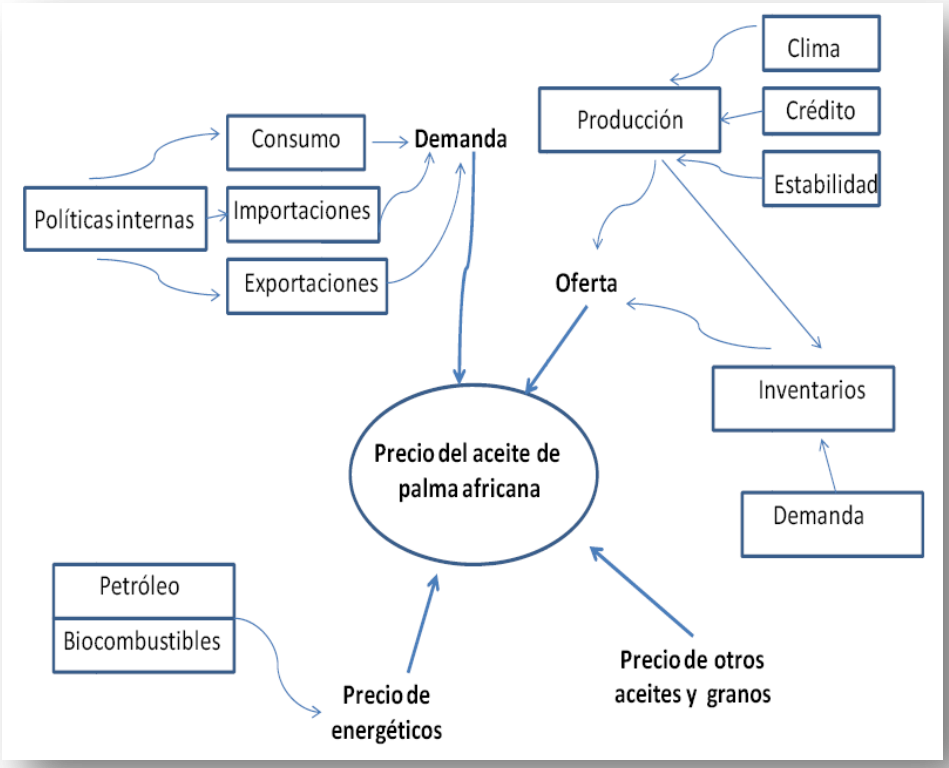

Figura 2.24 Determinantes del precio del aceite de palma (SAGARPA, 2010C)

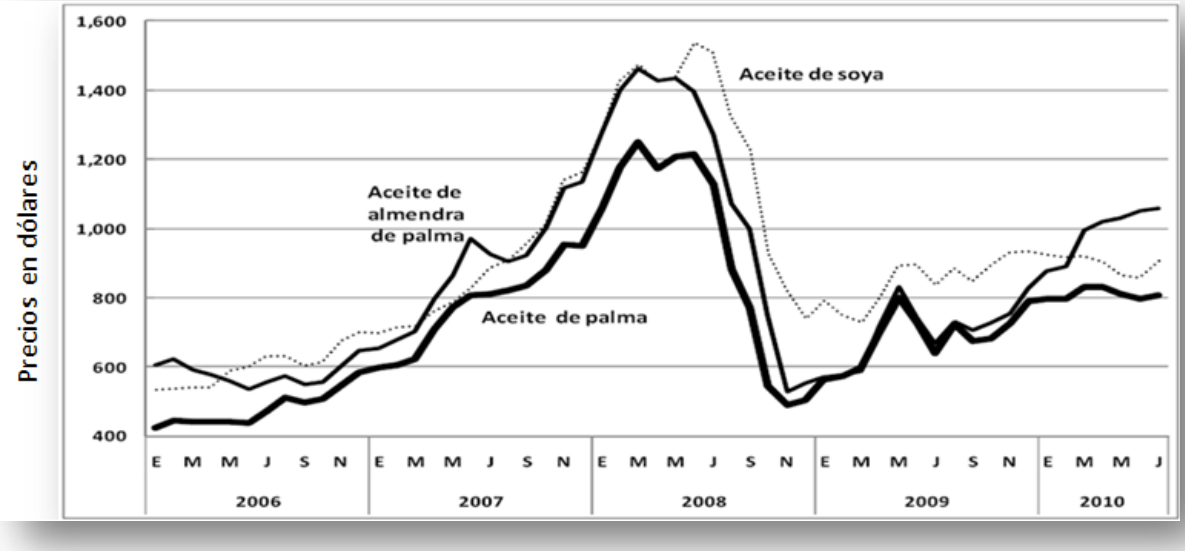

Figura 2.25 Precios internacionales de aceites (SAGARPA, 2010C)

2.4.4 Panorama nacional de la palma de aceite

En México existe un gran déficit de aceites y grasas de origen vegetal. La cadena palma de aceite mexicana está haciendo esfuerzos por disminuir ese déficit, por ello en años recientes ha cobrado un dinamismo importante el cultivo de este fruto en algunas regiones del país.

Chiapas es el estado productor más importante del país con 79% de la producción, seguido de Veracruz con el 13%, el resto se cultiva en Tabasco y Campeche. En la Figura 2.26 se muestra la producción de palma de aceite en México en miles de toneladas. La participación de estos dos últimos estados es reducida debido a que una parte de las palmas cultivadas aún se encuentran en período de maduración para la producción.

A principios del año 2003 de acuerdo al padrón nacional existían un total de 7, 325 productores, de ellos 96% corresponden a pequeños productores y el restante 4% a los de mayor escala. Del total de productores, en dicho año Chiapas contaba con 3,246 (44%); Veracruz con 2, 469 (34%); Campeche con 900 (12%) y Tabasco con 710 (10%).

Se estima que cuando estén en una etapa productiva madura las 32.5 mil hectáreas sembradas en 2008 y con un rendimiento promedio de 18 toneladas por hectárea, se producirán 586 mil toneladas de fruta fresca. Considerando un porcentaje de extracción de aceite del 20% se obtendrían 117 mil toneladas de aceite crudo de palma (SAGARPA, 2010C).

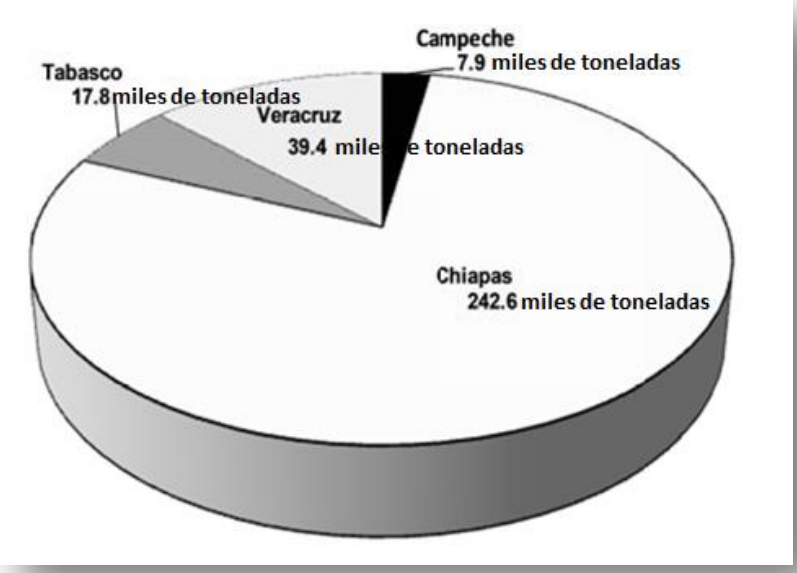

Figura 2.26 Producción de palma de aceite en miles de toneladas en México (SAGARPA, 2010C)

Si se compara este dato con el consumo nacional aparente estimado para los años recientes (alrededor de 390 mil toneladas) aún existe un déficit de 275 mil toneladas), lo que implicaría incorporar alrededor de 75 mil hectáreas adicionales para cubrir la demanda existente (sin considerar posibles incrementos en los requerimientos), así el potencial de desarrollo productivo es muy amplio.

Por otra parte, aún cuando muchas de las plantaciones están en edad productiva, las plantas extractoras todavía están trabajando muy por debajo de su capacidad instalada. La capacidad de las plantas extractoras se calcula en base al mes pico de producción de fruta fresca. Sin embargo, no se obtiene una producción uniforme durante todos los meses. En los meses con más precipitación pluvial es cuando se obtienen los mayores volúmenes de producción de fruta, y por ende, de extracción de aceite.

El comportamiento del consumo de aceite de palma en México en miles de toneladas se puede observar en la Tabla 2.12, también de observa que la importación de este aceite representa más del 90% del consumo total nacional. De la misma manera la Tabla 2.13 indica el consumo de aceite de almendra de palma a nivel nacional, el cual muestra un comportamiento similar al del aceite de palma, es decir, una dependencia importante de las importaciones y un aumento de la demanda año con año.

Tabla 2.12 Consumo nacional aparente de aceite de palma (SAGARPA, 2010C)

	Producción de palma de aceite (miles toneladas)	Producción estimada de aceite de palma (miles toneladas)	Importaciones de aceite de palma (miles toneladas)	Consumo nacional aparente de aceite de palma (miles toneladas)
2000	51.3	10.3	120.9	131.2
2001	135.7	27.1	166.8	194.0
2002	137.1	27.4	187.5	215.0
2003	217.1	43.4	200.8	244.2
2004	247.9	49.6	278.7	328.3
2005	219.3	43.9	279.7	323.6
2006	309.6	61.9	335.7	397.6
2007	292.5	58.5	302.4	360.9
2008	307.8	61.6	326.9	388.4
2009	n.d.	n.d.	359.8	n.d.

2.4.4.1 Precios nacionales de la palma de aceite

Cabe mencionar que el precio de la fruta fresca está directamente relacionado con el precio internacional del aceite de palma, el cual es un commodity, al igual que otros aceites de oleaginosas. El precio de referencia de la fruta fresca es, en promedio, el 12.5% del precio internacional del aceite crudo. Derivado de la escasez de la fruta para cubrir las

necesidades de abastecimiento, de las industrias extractoras de aceite establecidas, éstas en ocasiones han pagado sobreprecios. Sin embargo, en el mediano plazo será más probable que el precio esté relacionado con la calidad de la fruta, y el rendimiento que se obtenga en el proceso de extracción.

En la Tabla 2.14 se observan los precios nacionales de la palma de aceite, el precio teórico de la palma de aceite considera 12.5% del precio internacional del aceite de coco y el precio medio rural es un promedio ponderado por participación estatal.

Tabla 2.13 Consumo nacional aparente de aceite de almendra de palma (SAGARPA, 2010C)

	Superficie cosechada palma aceite (hectáreas)	Producción estimada aceite de almendra de palma (miles de toneladas)	Importaciones aceite de almendra de palma (miles de toneladas)	Consumo nacional aparente (miles de toneladas)
2000	2,748.0	1.2	35.2	36.4
2001	6,884.0	3.0	40.3	43.3
2002	6,884.0	3.0	47.2	50.2
2003	13,557.5	5.8	45.6	51.4
2004	17,836.0	7.7	22.1	29.8
2005	18,376.5	7.9	36.2	44.1
2006	22,033.3	9.5	47.6	57.0
2007	23,804.4	10.2	48.4	58.7
2008	25,917.6	11.1	41.0	52.1
2009	n.d.	n.d	67.9	n.d.

Tabla 2.14 Precios nacionales de la palma de aceite (SAGARPA, 2010C)

	Precio aceite de coco (dlls/ton)	Tipo de cambio (MX$/dlls)	Precio aceite de coco (MX$/ton)	Precio "teórico" palma de aceite (MX$/ton)	Precio medio rural palma de aceite (MX$/ton)	% del PMR respecto precio de aceite de coco (MX$/ton)
2006	478.0	10.9	5,214.0	652.0	630.0	12.1
2007	780.0	10.9	8,529.0	1,066.0	1,155.0	13.5
2008	950.0	11.2	10,594.0	1,324.0	1,093.0	10.3
2009	683.0	13.5	9,220.0	1,153.0	n.d.	n.d.

En México se requiere producir oleaginosas como la palma a bajo costo y que a la vez permita a la industria nacional alcanzar la competitividad en la extracción y refinación de aceite. De otra forma el mercado nacional será abastecido por aceite importado. La genética y el manejo de la plantación son los factores clave en la producción primaria.

2.4.5 Políticas institucionales y legales

Actualmente, existe una exención tributaria de facto para los biocarburantes ya que los impuestos aplican sólo a los hidrocarburos, no a los combustibles en general. Sin embargo, la falta de normas explícitas para este punto puede afectar negativamente en la confianza de inversionistas.

Ninguna norma nacional existe hoy para el biodiésel. Sin embargo, la industria automotriz nacional (debido a su fuerte orientación de exportación) está bastante familiarizada con el biodiésel y sus propiedades de combustión. El desarrollo de un estándar nacional, por tanto, no debería plantear un problema importante. El desarrollo de un marco jurídico nacional está en su etapa temprana, pero ha mostrado importantes progresos recientemente:

- Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, LPBD, que ha sido aprobada por el Senado (Cámara de Senadores) y entró en vigor el 2 de febrero de 2008. Mediante esta Ley, se sientan las bases para la promoción de los bioenergéticos en el país, contribuyendo a diversificar las fuentes de energía y a crear condiciones que permitan, de manera sustentable, el crecimiento económico y la protección de los ecosistemas. Entre otros aspectos, la Ley prevé que será necesario contar con programas que definan instrumentos, acciones, procedimientos y reglas que permitan impulsar el desarrollo sustentable de la producción y comercialización de bioenergéticos (SENER, 2010C).

- En cuanto a materias primas para biodiésel, diferentes a los cultivos para aceite vegetal, el uso de grasas animales (es decir, de sebo) y aceites vegetales de desecho actualmente no está previsto dentro de la LPBD y probablemente deben abordarse en relación con las capacidades de producción existentes de biodiésel.

- Ley Para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía. Esta iniciativa de ley es considerablemente más amplia y ambiciosa y va más allá de la LPBD. En particular, establece términos específicos para la financiación de la investigación, la implementación y tecnologías renovables. Actualmente, esta iniciativa es objeto de debate en la Cámara de Diputados (SENER, 2006).

- En materia de bioenergéticos, en cumplimiento a lo dispuesto en la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, relacionadas con la materia. El 4 de octubre de 2010 fueron publicados, en el portal electrónico de la SENER, estudios sobre especificaciones técnicas para el etanol y el biodiésel y sus mezclas, y la infraestructura para su manejo en México. De igual manera, se otorgaron 18 permisos para la producción, almacenamiento,

transporte y comercialización de bioenergéticos del tipo etanol anhidro y biodiésel y se recibieron dos avisos de plantas de producción de biodiésel con capacidad de producción menor o igual a 500 litros diarios (SENER, 2011).

3 Metodología

Se crearán dos escenarios. El primer escenario corresponderá al escenario de tendencia basado en diésel, mientras que el otro, el escenario alternativo se desarrollará de manera que se evalúe la factibilidad para usar el biodiésel en el metrobús en mezclas B20, B10 y B5.

El periodo de análisis será de 10 años. Se evaluarán los aspectos técnicos económicos y ambientales de la producción y uso de las mezclas en el metrobús.

3.1 Construcción del escenario de tendencia del diésel

En el escenario de tendencia se calculará la demanda de combustible diésel UBA y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes criterio del sistema de transporte metrobús de la Ciudad de México en el **periodo de tiempo de estudio**. Para ello se analizará la flota vehicular y su crecimiento a futuro.

Flota vehicular del metrobús y su evolución

El metrobús es un sistema de autobús de tránsito rápido que presta servicio en el Distrito Federal. Su planeación, control y administración está a cargo del organismo público descentralizado metrobús. El metrobús cuenta con 3 líneas. Tiene una extensión total de 67 kilómetros y tiene una flota vehicular de 282 autobuses que se alimentan de diésel UBA (Ultra Bajo Azufre): 217 autobuses articulados tecnología Euro III y Euro IV, 13 autobuses biarticulados tecnología Euro IV y 54 autobuses articulados con tecnología Euro V.

El 19 de junio de 2005, Andrés Manuel López Obrador, jefe de gobierno del Distrito Federal de 2000 a 2005, en una ceremonia efectuada en la estación Reforma, inauguró formalmente el servicio del corredor insurgentes de la línea 1, que se encuentra entre las estaciones Indios Verdes y Doctor Gálvez. Para el 13 de marzo de 2008 se inauguró el corredor Insurgentes sur de 8.5 Km y 10 estaciones Dr. Gálvez-El Caminero. La ficha técnica de cada línea de metrobús se observa en la Tabla 3.1.

A pesar de no tener un programa de corredores a futuro que establezca fechas de puesta en marcha de nuevos corredores, metrobús tiene un estudio completo de las diversas rutas de la Ciudad de México con mayor afluencia de transporte que son candidatas a ser recorridas por éste. Hasta el momento han sido aprobados dos corredores nuevos. La línea 4 es un nuevo concepto de metrobús en el centro histórico de la Ciudad de México el cual correrá de Buenavista a San Lázaro, con un servicio expreso al Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

La longitud de este corredor de transporte será de 28 km (tipo bidireccional) y pondrá en funcionamiento 58 autobuses (piso bajo) no articulados de 12 m de longitud.

Cada uno de ellos con una capacidad de entre 90 a 100 pasajeros considerando parados y sentados, beneficiando a más de 1 millón de habitantes de la Ciudad de México.

Tabla 3.1 Ficha técnica de las líneas actuales del Metrobús (Escalante, 2011)

	Línea 1 Insurgentes	Línea 2 Eje 4 Sur	Línea 3 Eje 1 poniente	**Total**
Inicio de operaciones	2005 y 2008	2009	2011	
Terminales	Indios Verdes-Caminero Buenavista II	Tepalcates-Tacubaya	Tenayuca Etiopía II Buenavista III La Raza II	
Longitud en ambos sentidos (km)	30	20	17	**67**
Demanda de usuarios (pas. / día)	390 mil	146 mil	104 mil	**640 mil**
Flota vehicular	132 Euro III y IV	96 Euro III y IV	54 Euro V	**282**

La línea 5 es parte de un programa de construcción en 2 fases en el eje 3 oriente. La segunda fase aún no está aprobada de manera que sólo se tomará en cuenta la fase 1 en esta tesis. La ficha técnica de los nuevos corredores se muestra en la Tabla 3.2, sus fechas de inicio de operaciones son aproximadas.

Tabla 3.2 Programa de corredores metrobús a futuro (Escalante, 2011)

	Línea 4 Centro histórico	Línea 5 Eje 3 oriente fase 1	**Total**
Inicio de operaciones	2012	2013	
Longitud en ambos sentidos (km)	28	9	**37**
Terminales	Buenavista-San Lázaro-Aeropuerto	A. Rio de los remedios- San Lázaro	
Demanda de usuarios (pax / día)	50 mil	55 mil	**100**
Flota vehicular	54	26	**80**
Tecnología	46 Euro V 8 Híbridos	Euro V articulados	

3.2 Construcción del escenario alternativo

Se proponen la construcción de tres escenarios alternativos con mezclas de diésel UBA y biodiésel de aceite de palma: B5, B10, B20 respectivamente. Escenarios en los cuales no se necesitan hacer modificaciones mayores a los motores a diésel.

La Tabla 3.3 muestra las densidades de energía o contenido energético de las diferentes mezclas en MJ por litro de combustible. Debido a que el contenido energético de las mezclas de biodiésel es menor que el del diésel, la cantidad de litros de mezcla será mayor para poder cubrir el consumo energético. A partir de esta información se calculará la demanda de combustible de cada mezcla así como sus emisiones a la atmósfera en el periodo de estudio, en todos los casos se tendrá como referencia al diésel y al B100.

Tabla 3.3 Contenido energético de las mezclas de biodiésel de palma de aceite (CISRO, 2007)

Combustible	Contenido energético MJ/L
B100	31.4824
B20	34.6598
B10	35.0569
B5	35.2555
Diésel	35.4541

3.2.1 Análisis de factibilidad técnica

El contenido de ácidos grasos libres del aceite crudo de palma es por lo general mayor al 5%, por tal motivo es necesario que el equipo que se utilice para la producción de biodiésel incluya el proceso de esterificación ácida seguido de transesterificación. Para cubrir la demanda de biodiésel de los escenarios alternativos es suficiente un equipo de pequeña escala de 1 a 10 millones de litros de producción anuales.

La Secretaría de Energía realizó un estudio de factibilidad técnica donde se analizan distintas plantas referencia que se muestran en la Tabla 3.4 (SENER, 2006). Entre los principales factores de comparación están la escala de producción: Agrícola e industrial, y también la producción de su propio aceite, la principal materia prima para la generación de biodiésel.

Si la producción de aceite de palma es pobre en México, es necesario tomar en cuenta plantas que produzcan su propio aceite. De esta manera, el impacto de los costos del aceite por su variabilidad en el mercado es menor, ya que el precio de una tonelada de

racimos de fruta fresca por lo general cuesta el 12.5% del precio de una tonelada de aceite.

Cabe resaltar que las plantas agrícolas hacen de la producción de biodiésel un proceso más eficiente desde un punto de vista energético. Es sabido que las plantas a pequeña escala, bien localizadas y de bajo impacto, mantienen más recursos y generan más ganancia dentro de la comunidad, reducen el daño al ambiente y requieren un tratamiento de desechos muy bajo. Una ventaja de las plantas de biodiésel con molino de aceite es que los subproductos de la producción, como el pastel prensado y la glicerina, pueden ser utilizados como alimento o para la producción de energía. Además, permiten que la operación inicie con tiempos relativamente bajos.

Tabla 3.4 Plantas de producción de biodiésel referencia (SENER, 2006)

Planta referencia	Compañía	Máx. AGL	Grado de innovación	Tamaño de la planta en 1,000 ton/año	Costo de la planta
I: Escala agrícola con molino de aceite	AGERATEC, Carry On, SE	< 1 %	bajo	0.26-5	bajo
	IBG Monforts Oekotec	< 1 %	bajo	0.45-3.6	bajo
II + III: Escala industrial	Westfalia – D	< 1 %	mediano	100-120	alto
	De Smet Ballestra - B/I	< 1 %	bajo	100	mediano
	Lurgi Life – D	< 1 %	bajo	100	alto
	AT Agrartechnik – D	< 3%	bajo	53-75	mediano
IV: Escala industrial para cualquier aceite	Energea – A	> 20%	muy alto	40-250	bajo
	BDI - A	> 20%	alto	30-50	alto

3.2.2 Análisis de factibilidad económica de la producción de biodiésel

Además de los criterios de calidad para el biodiésel producido, los costos de producción y suministro de biodiésel específicos son importantes para la aplicación en un mercado de combustibles de transporte comercial en México. Por lo tanto, se presenta un análisis de viabilidad económica para la producción de biodiésel tomando distintas plantas de referencia (SENER, 2006). Con respecto al proceso, para los costos globales de producción de biodiésel (es decir, todos los gastos e ingresos) se analizan las condiciones en el marco mexicano. Además, el análisis de costos se hace particularmente para las plantas de producción de modelo a escala tanto agrícola como industrial. En la práctica los costos están relacionados con las condiciones locales específicas y al diseño de la planta de producción específico.

3.2.2.1 Aproximación metódica

De acuerdo con la cadena de suministro completa del biodiésel, el análisis económico se centra en el análisis de los costos relacionados con la producción de biodiésel; la producción de biodiésel por sí misma y la eficiencia económica. Por lo tanto, se toman en cuenta todos los flujos entrantes como materia prima, utilidades, flujos de energía auxiliar, así como productos (biodiésel) y flujos de subproductos (por ejemplo, glicerina, pastel de prensa).

3.2.2.1.1 Modelo de cálculo

Para la determinación de los costos de producción de biodiésel y la eficiencia económica de las diferentes plantas referencia se aplica un modelo de cálculo base. Se calculan los costos de producción de biodiésel específicos mediante el método de anualidad (VDI, 1996). Además, se evalúan las eficiencias económicas específicas con respecto al flujo de caja de la planta de biodiésel. Este análisis de flujo de caja consiste en el cálculo de la anualidad y la tasa interna de retorno (TIR) como un indicador de la eficiencia económica.
El principio del modelo de cálculo se muestra en la Figura 3.1. Dentro de este modelo, para cada planta referencia, los principales conceptos de costo están en el lado de los gastos: (i) Capital de inversión de la planta y periféricos, (ii) La operación y mantenimiento así como las utilidades, los residuos, el personal, (iii) Materia prima. En el lado de los ingresos: (iv) Créditos de subproductos. Basado en este gasto anual y los ingresos, los costos de producción de biodiésel específicos se calculan como el costo promedio de todos los períodos teniendo en cuenta la tasa anual de producción de biodiésel y la tasa de inflación anual. Además, la anualidad y la TIR se calculan para la comparación de los diferentes conceptos en términos de eficiencia económica.

Además, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de posibles incertidumbres de los parámetros asumidos y en segundo lugar, mostrar la influencia de las evoluciones futuras del precio (por ejemplo, la materia prima). Para ello, los parámetros razonables son variados por el modelo de cálculo aplicado. En cuanto a los costos del combustible biodiésel, los principales componentes (por ejemplo, capital, materias primas, subproductos) de los gastos y la carga total anual de la planta será variada dentro de rangos realistas. Además, esta determinación se realiza para la eficiencia económica.

Para determinar si los subsidios son necesarios para la aplicación de biodiésel en el mercado mexicano, se comparará con los precios del diésel del año de referencia 2006.

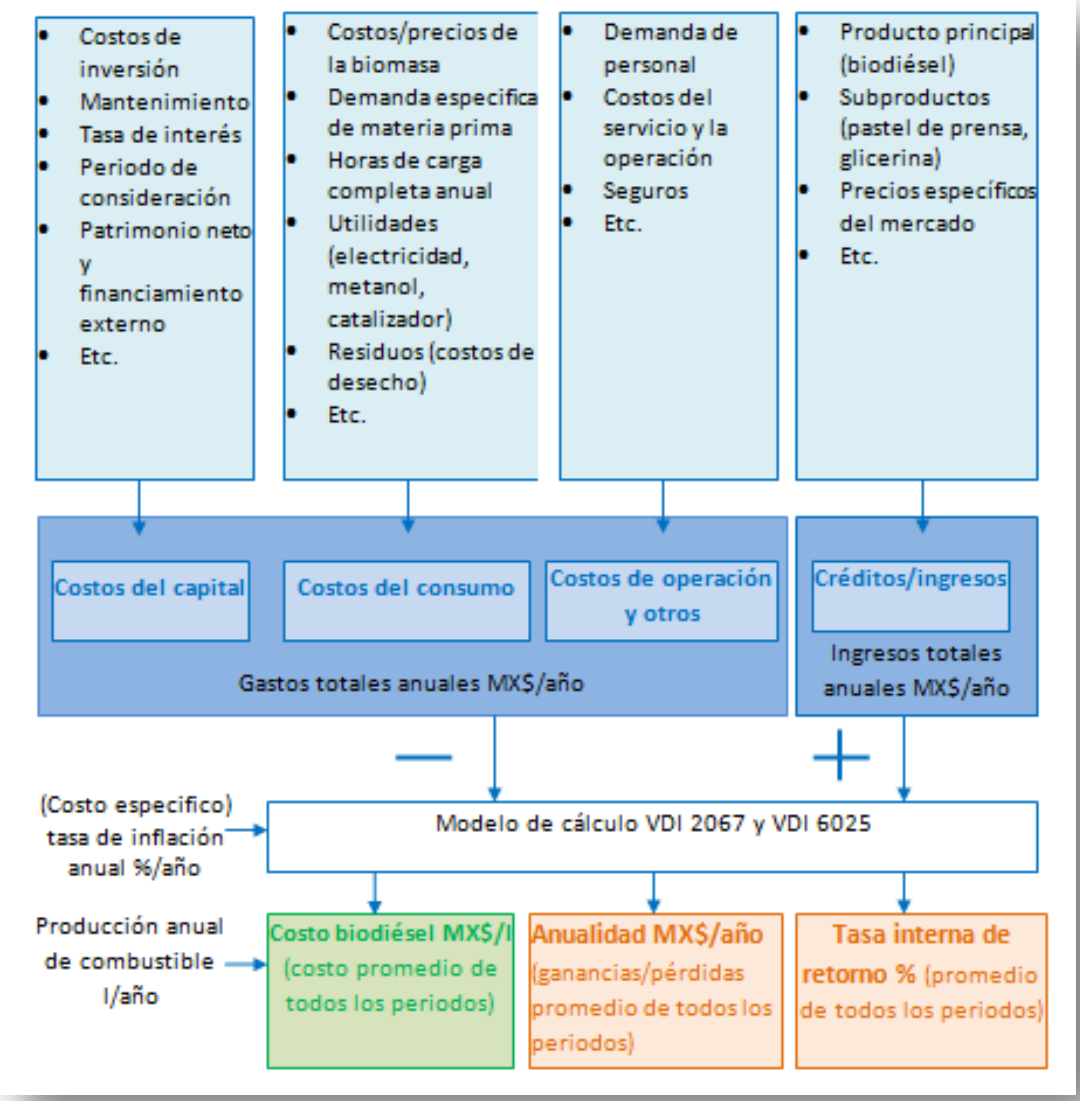

Figura 3.1 Modelo de cálculo para el costo de producción del biodiésel (SENER, 2006)

3.2.2.1.2 Condiciones del marco del análisis

Hay muchos aspectos a considerar, como la escala de producción, ubicación de plantas, tecnología de procesamiento, así como materias primas y cualquier subproducto que pueda comercializarse. Por ejemplo, una planta de biodiésel que es dependiente de comprar la materia prima necesaria enfrenta diferentes condiciones que una que tiene una materia prima garantizada o cautiva. Existe una amplia experiencia del flujo de masa y energía para las plantas de producción de biodiésel basadas en semillas de colza. También es el caso para el análisis de los costos. Dado que los costos de producción de biodiésel principalmente dependen de los precios de la materia prima y los gastos de operación, el

análisis de los costos de inversión de capital total, así como los costos de operación se basarán en plantas de modelo de referencia de semillas de colza.

3.2.2.1.3 Supuestos generales

Para el análisis económico se supone que las plantas de biodiésel de referencia son nuevas, haciendo caso omiso de su competencia a las instalaciones existentes y la utilización de la planta se considera que es en horas de la carga total equivalente. Por otra parte, las actuales condiciones marco son la base de una comparación común de los conceptos de biodiésel.

En general, los parámetros tales como impuestos específicos (por ejemplo, las subvenciones de impuestos de petróleo) y tarifas, la fluctuación de los ingresos y los gastos incurridos durante el inicio, salvamento y el desmantelamiento de la planta no se toman en cuenta. La vida económica (es decir, el período de examen típico para el sector de inversión) se supone que es de 10 años.

La tasa de inflación anual está sujeta a una amplia gama para los diferentes sectores industriales (industria del metal, por ejemplo, importar y exportar); por otra parte, está sujeta a fluctuaciones. En cuanto a la evaluación de la viabilidad económica general, se supone una tasa media de inflación anual del 5.5%, que corresponde a la tasa general de inflación, dada como promedio del horizonte temporal de enero de 2000 a mayo de 2006 (BM, 2006).

Además, para la ganancia monetaria se considera un interés de aproximadamente 7% de acuerdo con los "Certificados de la Tesorería de la Federación" (CETES) (BM, 2006).

3.2.3 Análisis de factibilidad ambiental

Se evaluará la factibilidad ambiental de acuerdo al impacto ambiental de la producción y uso de biodiésel en el metrobús tomando en cuenta los siguientes factores: Emisiones de GEI y de contaminantes criterio y el uso de energía fósil.

Emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio

Si se siembra la palma de aceite en terrenos de cultivo provenientes de selvas y bosques talados, los niveles de emisión de GEI de la producción y uso del biodiésel superan a aquellos del diésel. Por tal motivo, se tomará como supuesto que el biodiésel proviene de tierras existentes de cultivo, y esos factores de emisión serán utilizados para analizar su factibilidad ambiental. Las emisiones del biodiésel se compararán con aquellas del diésel.

Uso de energía fósil en la producción y uso de biodiésel

Se comparará la suma total de energía fósil utilizada en la producción y el uso del biodiésel de palma de aceite con el sistema de referencia del diésel. La unidad funcional de medición será 100 km recorridos por un automóvil impulsado por biodiésel.

4 Resultados

4.1 Resultados del escenario de tendencia

4.1.1 Demanda del combustible diésel

El metrobús inició operaciones en 2005 con el corredor insurgentes. Para 2008 se inauguró la extensión del corredor insurgentes sur (Dr. Gálvez- El Caminero) y la demanda de pasajeros se incrementó a casi 78 millones al igual que el consumo de 7.87 millones de litros de diésel.

En la Tabla 4.1 se puede observar el histórico de kilómetros recorridos, pasajeros transportados y litros de diésel consumidos y su costo al año 2010. Los años 2005 a 2007 corresponden al corredor insurgentes (Dr. Gálvez-Indios Verdes) y se observa el enorme crecimiento en el número de pasajeros transportados de 2005 a 2006 de más del doble. Al 2010 su flota vehicular ha crecido en un 30%.

Dada la creciente demanda de pasajeros, el consumo de combustible diésel también se ha incrementado. De tal manera que al cierre del año 2010, el consumo de la línea 1 (El Caminero-Indios verdes) ha sido de 8.94 millones de litros. La Tabla 4.2 enlista los datos de consumo y costo de combustible diésel UBA de las líneas 1 y 2 durante todo el año 2010. De la Tabla 4.2 se obtiene el consumo total actual de las líneas 1 y 2 en 2010 de 13.36 millones de litros de diésel.

De la línea 3 no se tienen datos publicados del consumo de combustible, pero se puede calcular tomando en cuenta que cada autobús recorre del orden de 65,000 kilómetros al año, con un rendimiento que va de 1.25 a 1.5 kilómetros por litro, en función de la antigüedad del vehículo, mantenimientos, etc. De esta forma, cada autobús consume entre 43,000 y 52,000 litros de combustible al año, dado que la línea 3 cuenta con 54 autobuses en operación, se consumirán entre 2.34 y 2.808 millones de litros al año.

Para el caso de la línea 4 que operará con 46 autobuses EURO V y 8 híbridos diésel-eléctricos EURO V, todos ellos de 12 metros por lo que el rendimiento es mayor, se estima que los EURO V tienen un rendimiento de 3km/l y los híbridos de 3.9km/l. Asumiendo que recorrerán 65,000 kilómetros al año, cada autobús a diésel consumirá aproximadamente 22,000 litros de combustible, si son 46, consumirán 1 millón de litros al año. Cada autobús hibrido consumirá 17,000 litros anuales, siendo 8 consumirán 136,000 litros de combustible. El consumo total de la línea 4 será entonces de 1, 136, 000 litros de combustible al año.

Para la línea 5 asumimos los mismos valores de rendimiento y kilometraje por autobús de las tres primeras líneas de tal manera que el consumo será entre 1 y 1.35 millones de litros.

Con los datos obtenidos por línea se muestra la Tabla 4.3 que enlista el consumo de diésel en el periodo de estudio. Se toma en cuenta la integración de las nuevas líneas (3,4 y 5) así como el valor de actualización de consumo de combustible anual, proporcionado por la Dirección de Planeación, Evaluación y Sistemas del metrobús. 2.5%, es el aumento en el consumo de diésel debido al incremento de la demanda de pasajeros que año con año se suman a la movilización por medio de este sistema de transporte. Este valor se toma en cuenta desde el inicio de operaciones de un corredor hasta 5 años después cuando la demanda de pasajeros y por lo tanto de combustible se estabiliza. La línea 5, por ejemplo, ha llegado a su periodo estable en el 2010.

Tabla 4.1 Histórico del consumo de diésel del metrobús (Escalante, 2010)

Indicador	Unidades	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Pasajeros transportados	millones	347.2	74.2	77.6	82.2	127.1	136.9
Kilómetros recorridos	millones	4.1	7.1	7.3	10.2	16.7	17.3
Transporte de pasajeros	millones de pas/km	---	10.5	10.7	8.1	7.6	7.9
Consumo de energía:							
Diésel	millones de litros	3.1	5.5	5.6	7.9	13.0	13.4
Costo de diésel	millones de pesos	16.5	30.1	33.1	51.0	102.5	116.1

Tabla 4.2 Consumo y costo de diésel del metrobús 2010 (Escalante, 2010)

	Diésel millones de litros			**Costo diésel millones de pesos**		
Periodo	**Total**	**Línea 1**	**Línea 2**	**Total**	**Línea 1**	**Línea 2**
Enero	1.02	0.68	0.35	8.43	5.57	2.86
Febrero	1.01	0.67	0.34	8.44	5.61	2.83
Marzo	1.13	0.75	0.38	9.48	6.31	3.17
Abril	1.07	0.71	0.36	9.09	6.05	3.04
May0	1.13	0.75	0.38	9.66	6.45	3.22
Junio	1.16	0.78	0.39	10.04	6.71	3.33
Julio	1.12	0.77	0.36	9.8	6.69	3.11
Agosto	1.17	0.79	0.38	10.32	6.95	3.37
Septiembre	1.12	0.75	0.37	9.93	6.63	3.3
Octubre	1.18	0.79	0.39	10.61	7.12	3.49
Noviembre	1.14	0.77	0.37	10.33	6.96	3.37
Diciembre	1.09	0.73	0.36	9.93	6.64	3.28
Total	**13.36**	**8.94**	**4.42**	**116.06**	**77.68**	**38.38**

Tabla 4.3 Evolución de la demanda en el escenario de tendencia

Año	Línea 1 (millones de litros)	Línea 2 (millones de litros)	Línea 3 (millones de litros)	Línea 4 (millones de litros)	Línea 5 (millones de litros)	Total (millones de litros)
2010	8.94	4.42	-	-	-	**13.36**
2011	8.94	4.53	2.56	-	-	**16.03**
2012	8.94	4.64	2.63	1.14	-	**17.35**
2013	8.94	4.76	2.69	1.16	1.18	**18.73**
2014	8.94	4.88	2.76	1.19	1.20	**18.98**
2015	8.94	4.88	2.83	1.22	1.23	**19.11**
2016	8.94	4.88	2.83	1.25	1.27	**19.17**
2017	8.94	4.88	2.83	1.25	1.30	**19.20**
2018	8.94	4.88	2.83	1.25	1.30	**19.20**
2019	8.94	4.88	2.83	1.25	1.30	**19.20**
2020	8.94	4.88	2.83	1.25	1.30	**19.20**

4.1.2 Emisiones del escenario de tendencia

Para calcular las emisiones del sistema de transporte metrobús es necesario obtener un factor de emisión en kgCO_2-e/L de combustible. Para ésto, el valor calorífico inferior del diésel es 42.46 MJ/kg y la densidad del diésel es de 0.835 kg/L, multiplicando estos valores se obtiene 35.4541 MJ/L. Ahora se multiplica el factor de emisiones de GEI de la Tabla 3.10 por 35.4541 MJ/L y así se obtiene el factor de emisión con las unidades necesarias como 2.956 kgCO_2-e/L. La Tabla 4.4 muestra el cálculo de las emisiones anuales de GEI (CO_2, CH_4 y N_2O) con respecto al consumo de diésel en millones de litros y el factor de emisión. También se incluyen las emisiones a la atmósfera de los contaminantes criterio CO (20.5 gCO/L), NOx (60.6 gNOx/L) y PM10 (2.031 gPM10/L).

Tabla 4.4 Emisiones de GEI y contaminantes criterio del escenario de tendencia

Año	Consumo diésel (millones de litros)	TCO2-e/año	TCO/año	TNOx/año	TPM10/año
2010	13.36	39,492.16	274.25	809.02	27.14
2011	16.03	47,397.98	329.15	970.98	32.57
2012	17.35	51,280.28	356.12	1,050.51	35.24
2013	18.73	55,374.92	384.55	1,134.39	38.06
2014	18.98	56,098.63	389.58	1,149.22	38.55
2015	19.11	56,483.27	392.25	1,157.10	38.82
2016	19.17	56,664.39	393.51	1,160.81	38.94
2017	19.20	56,746.27	394.07	1,162.48	39.00
2018	19.20	56,755.20	394.14	1,162.67	39.01
2019	19.20	56,755.20	394.14	1,162.67	39.01
2020	19.20	56,755.20	394.14	1,162.67	39.01

4.2 Resultados de los escenarios alternativos

4.2.1 Demanda del combustible para los escenarios alternativos

A partir de la Tabla 4.3 se obtienen las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7 donde se calcula la cantidad de mezcla, diésel y biodiésel respectivamente, necesarios para cubrir la demanda energética en los escenarios alternativos y su comparación con el escenario de tendencia en el periodo de estudio (las cifras están redondeadas).

Tabla 4.5 Demanda anual de combustible mezcla de los distintos escenarios

Año	Diésel (millones de litros)	B100 (millones de litros)	B20 (millones de litros)	B10 (millones de litros)	B5 (millones de litros)
2010	13.36	15.05	13.67	13.53	13.45
2011	16.03	18.06	16.40	16.23	16.14
2012	17.35	19.54	17.75	17.56	17.46
2013	18.73	21.10	19.16	18.97	18.85
2014	18.98	21.37	19.41	19.21	19.10
2015	19.11	21.52	19.55	19.35	19.23
2016	19.17	21.59	19.61	19.41	19.29
2017	19.20	21.62	19.64	19.44	19.32
2018	19.20	21.62	19.64	19.44	19.32
2019	19.20	21.62	19.64	19.44	19.32
2020	19.20	21.62	19.64	19.44	19.32

Tabla 4.6 Demanda anual de combustible diésel de los distintos escenarios

Año	Diésel (millones de litros)	B100 (millones de litros)	B20 (millones de litros)	B10 (millones de litros)	B5 (millones de litros)
2010	13.36	15.05	10.93	12.16	12.76
2011	16.03	18.06	13.12	14.59	15.32
2012	17.35	19.54	14.20	15.79	16.57
2013	18.73	21.10	15.33	17.05	17.90
2014	18.98	21.37	15.53	17.27	18.13
2015	19.11	21.52	15.64	17.39	18.25
2016	19.17	21.59	15.69	17.45	18.31
2017	19.20	21.62	15.71	17.47	18.34
2018	19.20	21.62	15.71	17.48	18.34
2019	19.20	21.62	15.71	17.48	18.34
2020	19.20	21.62	15.71	17.48	18.34

Tabla 4.7 Demanda anual de biodiésel (B100) de los distintos escenarios

Año	Diésel (millones de litros)	B100 (millones de litros)	B20 (millones de litros)	B10 (millones de litros)	B5 (millones de litros)
2010	13.36	15.05	2.73	1.37	0.68
2011	16.03	18.06	3.28	1.64	0.82
2012	17.35	19.54	3.55	1.77	0.89
2013	18.73	21.10	3.83	1.92	0.96
2014	18.98	21.37	3.88	1.94	0.97
2015	19.11	21.52	3.91	1.95	0.98
2016	19.17	21.59	3.92	1.96	0.98
2017	19.20	21.62	3.93	1.96	0.98
2018	19.20	21.62	3.93	1.96	0.98
2019	19.20	21.62	3.93	1.96	0.98
2020	19.20	21.62	3.93	1.96	0.98

4.2.2 Factibilidad técnica

Abastecimiento de aceite de palma

Para producir 1 tonelada de biodiésel se necesitan aproximadamente 1.14 toneladas de aceite crudo de palma. A partir del consumo de biodiésel de los escenarios alternativos se obtiene la cantidad en toneladas de aceite crudo de palma (ACP) necesarias para cubrir esta demanda (Tabla 4.8).

Tabla 4.8 Toneladas de aceite crudo de palma (ACP) necesarias para cubrir la demanda de los escenarios alternativos

Año	B20 (toneladas ACP)	B10 (toneladas ACP)	B5 (toneladas ACP)
2010	2,059.52	1,029.76	514.88
2011	2,471.81	1,235.90	617.95
2012	2,674.27	1,337.14	668.57
2013	2,887.81	1,443.90	721.95
2014	2,925.55	1,462.77	731.39
2015	2,945.61	1,472.80	736.40
2016	2,955.05	1,477.53	738.76
2017	2,959.32	1,479.66	739.83
2018	2,959.79	1,479.89	739.95
2019	2,959.79	1,479.89	739.95
2020	2,959.79	1,479.89	739.95

5.8 toneladas de racimos de fruta fresca, en promedio, se transforman en 1 tonelada de ACP y se cosechan 17.2 toneladas aproximadamente de RFF por hectárea, luego en la Tabla 4.9 se muestran las toneladas de RFF necesarias para cubrir la demanda de aceite crudo de palma (ACP). En la Tabla 4.10 se muestran las hectáreas que serían necesarias sembrar para obtener los racimos de fruta fresca de los escenarios de tendencia. La situación actual en México es mayoritariamente dependiente de las importaciones de aceite de palma debido a que localmente las hectáreas actuales que se dedican a esta plantación no son suficientes para cubrir la demanda alimenticia. De no haber un impulso en este sector por parte de los gobiernos locales para incrementar la producción de palma, el país no podrá eliminar la dependencia de las importaciones.

Tabla 4.9 Toneladas de racimos de fruta fresca (RFF) para cubrir la demanda de aceite de palma de los escenarios alternativos

Año	B20 (toneladas RFF)	B10 (toneladas RFF)	B5 (toneladas RFF)
2010	11,945.21	5,972.61	2,986.30
2011	14,336.49	7,168.24	3,584.12
2012	15,510.77	7,755.38	3,877.69
2013	16,749.28	8,374.64	4,187.32
2014	16,968.18	8,484.09	4,242.04
2015	17,084.52	8,542.26	4,271.13
2016	17,139.30	8,569.65	4,284.83
2017	17,164.07	8,582.03	4,291.02
2018	17,166.77	8,583.38	4,291.69
2019	17,166.77	8,583.38	4,291.69
2020	17,166.77	8,583.38	4,291.69

Tabla 4.10 Hectáreas necesarias para sembrar palma de aceite y cubrir la demanda de los escenarios alternativos

Año	B20 (hectáreas)	B10 (hectáreas)	B5 (hectáreas)
2010	694.49	347.24	173.62
2011	833.52	416.76	208.38
2012	901.79	450.89	225.45
2013	973.80	486.90	243.45
2014	986.52	493.26	246.63
2015	993.29	496.64	248.32
2016	996.47	498.24	249.12
2017	997.91	498.96	249.48
2018	998.07	499.03	249.52
2019	998.07	499.03	249.52
2020	998.07	499.03	249.52

Técnicamente es factible dedicar esta superficie en hectáreas. Como se mencionó en el capítulo 3, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, (INIFAP) informa que existen en el país, alrededor de 2.5 millones de hectáreas con buen potencial para su cultivo, localizadas en los estados de Chiapas, Campeche, Guerrero, Michoacán, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco y Veracruz.

4.2.3 Factibilidad ambiental

4.2.3.1 Emisiones de GEI de los escenarios alternativos

Los escenarios alternativos involucran el uso en el metrobús de mezclas de biodiésel de palma de aceite. De acuerdo al análisis de ciclo de vida el impacto de la producción y uso de biodiésel se enfocará únicamente en los gases de efecto invernadero y los contaminantes criterio involucrados tanto en la producción como en el uso del combustible así como en el uso de energía fósil.

En la Tabla 4.11 se muestran los resultados del cálculo de emisiones de GEI del metrobús en el periodo de estudio. Se enlistan los distintos escenarios alternativos y su comparación con el escenario de tendencia donde se utiliza diésel UBA. Se observa una reducción de emisiones de GEI mientras más puro el biodiésel sea, excepto en el caso de las emisiones de NOx donde se presenta un ligero incremento. En Tabla 4.12 se observan los resultados de las emisiones al aire de contaminantes criterio, también en el escenario alternativo.

A partir de las tablas anteriores se obtiene la Tabla 4.13 donde se aprecian en porcentajes las emisiones de GEI y contaminantes criterio de las mezclas con respecto al diésel. Los porcentajes positivos significan una reducción, mientras que los negativos un aumento como es el caso de los NOx.

Tabla 4.11 Emisiones de GEI de las diferentes mezclas

Año	Diésel (TCO_2-e)	B100 (TCO_2-e)	B20 (TCO_2-e)	B10 (TCO_2-e)	B5 (TCO_2-e)
2010	39,492.16	8,255.40	33,535.84	36,544.15	38,049.22
2011	47,397.98	9,908.02	40,249.29	43,859.82	45,666.18
2012	51,280.28	10,719.57	43,546.05	47,452.32	49,406.63
2013	55,374.92	11,575.51	47,023.13	51,241.30	53,351.66
2014	56,098.63	11,726.79	47,637.68	51,910.99	54,048.93
2015	56,483.27	11,807.20	47,964.31	52,266.92	54,419.52
2016	56,664.39	11,845.06	48,118.11	52,434.51	54,594.01
2017	56,746.27	11,862.18	48,187.65	52,510.28	54,672.91
2018	56,755.20	11,864.04	48,195.23	52,518.54	54,681.51
2019	56,755.20	11,864.04	48,195.23	52,518.54	54,681.51
2020	56,755.20	11,864.04	48,195.23	52,518.54	54,681.51

Tabla 4.12 Emisiones de contaminantes criterio (2010-2010) en de las diferentes mezclas

Año	B20 (TCO)	B10 (TCO)	B5 (TCO)	B20 (TNOx)	B10 (TNOx)	B5 (TNOx)	B20 (TPM10)	B10 (TPM10)	B5 (TPM10)
2010	259.10	266.98	270.70	836.50	823.70	816.83	30.57	27.76	27.48
2011	310.96	320.43	324.89	1,003.95	988.60	980.35	36.68	33.32	32.98
2012	336.43	346.67	351.50	1,086.18	1,069.57	1,060.65	39.69	36.05	35.68
2013	363.30	374.35	379.56	1,172.91	1,154.97	1,145.34	42.86	38.93	38.53
2014	368.05	379.25	384.52	1,188.24	1,170.07	1,160.31	43.42	39.44	39.04
2015	370.57	381.85	387.16	1,196.39	1,178.09	1,168.26	43.72	39.71	39.30
2016	371.76	383.07	388.40	1,200.23	1,181.87	1,172.01	43.86	39.84	39.43
2017	372.29	383.62	388.96	1,201.96	1,183.58	1,173.70	43.92	39.89	39.49
2018	372.35	383.68	389.02	1,202.15	1,183.76	1,173.89	43.93	39.90	39.49
2019	372.35	383.68	389.02	1,202.15	1,183.76	1,173.89	43.93	39.90	39.49
2020	372.35	383.68	389.02	1,202.15	1,183.76	1,173.89	43.93	39.90	39.49

Tabla 4.13 Porcentaje de reducción o aumento de las emisiones de las mezclas con respecto al diésel UBA

Emisiones	B100	B20	B10	B5
Porcentajes GEI	79.1%	15.1%	7.6%	3.7%
Porcentajes CO	21.6%	5.5%	2.8%	1.4%
Porcentajes NOx	-18.1%	-3.4%	-1.7%	-0.9%
Porcentajes PM10	41.7%	12.6%	6.5%	3.3%

4.2.3.2 Uso de energía fósil en la producción y uso del biodiésel

De acuerdo a un análisis de ciclo de vida llevado a cabo por la Universidad Leuven en Bélgica, se compara el uso de energía fósil de la producción de biodiésel de palma de aceite contra el diésel. Se encontró que existe una reducción del 45% de energía fósil en la producción y uso de biodiésel medido en 100 km recorridos por un automóvil. En la Figura 4.1 se observa la energía fósil utilizada en la producción de biodiésel en comparación con el escenario referencia del diésel.

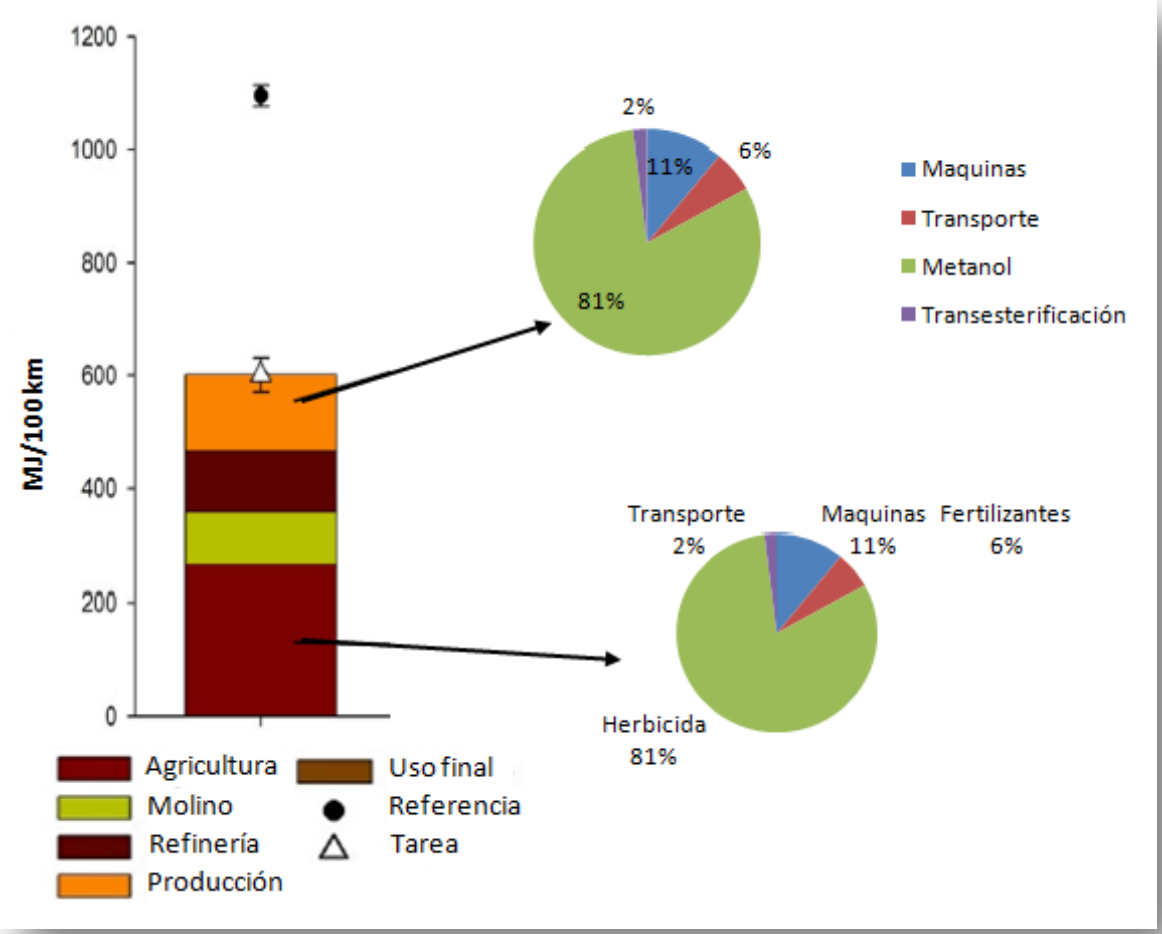

Figura 4.1 Uso de energía fósil en la producción y uso de biodiésel de palma de aceite (Achten y col., 2009)

De manera que al contrario de la idea general que se tiene del biodiésel, este estudio prueba que la producción y uso de biodiésel representa una importante reducción en el consumo de energía fósil en comparación con el sistema de referencia del diésel.

4.2.4 Factibilidad económica

4.2.4.1 Gastos del capital

Los gastos de capital se basan en la inversión de capital total de: (i) La planta de biodiésel propia (ya sea incluyendo el molino y unidad de producción de biodiésel o sólo la última), (ii) Los costos de periferia o tierra respectivamente, así como (iii) El desarrollo de la planta y costos de ingeniería.

Inversión de capital y costos de mantenimiento

El cálculo de costos de la inversión de capital para las plantas de biodiésel de referencia se estima basado en las experiencias existentes de plantas comerciales en Europa, Estados Unidos y México. Se puede suponer una mayor inversión de capital para las plantas de biodiésel que incluyen trituradora y sistemas de refinamiento de aceite. En general, debido a la economía de escala, la inversión de capital específica disminuye con el aumento de la capacidad de la planta de biodiésel. El costo de tierra para el desarrollo industrial depende fuertemente de la ubicación e infraestructura disponible. Para fines industriales en los parques en el centro de México, el costo de la tierra varía entre 14 y 400 dólares por m². Para este estudio se considera un costo representativo de 872 MX$/m² (80 dólares/m²). Por otra parte, de acuerdo con las plantas de biodiésel existente los factores típicos para " la tierra requerida por la capacidad de la planta" se toman en cuenta y son los siguientes:

- Escala agrícola: 0.33 m²/ton combustible para plantas que incluyen producción de aceite.
- Escala industrial: De 0.075 m²/ton de combustible a 0.27 m²/ton de combustible para plantas que no incluyen y que incluyen producción de aceite respectivamente; 0.085 m²/ton de combustible para plantas con multi-materia prima.

Los costos de la inversión total estimada se resumen en la Tabla 4.14. Por otra parte, los costos anuales de mantenimiento se estiman como el 1.5% de la inversión de capital total.

Tabla 4.14 Inversión total de capital (promedio) de las plantas referencia (SENER, 2006)

Planta referencia	Materia prima	Capacidad (ton/año)	Inversión (miles de pesos)	Costo tierra (miles de pesos)	Inversión de capital especifica (miles de pesos/MW combustible)
Con molino (pequeña escala)	RFF	3,600.00	11,800.00	1,040.00	2,100.00
Con molino (gran escala)	RFF	93,750.00	310,900.00	23,550.00	2,590.00
Sin molino (gran escala)	Aceite vegetal	93,750.00	184,400.00	6,540.00	1,490.00
Multi-materia sin molino (gran escala)	Gasas y aceites	46,900.00	268,600.00	3,706.00	4,170.00

Cuota de capital y tasa de interés

Bajo las condiciones mexicanas las empresas pequeñas y medianas tienden a hacer fuertes inversiones dado que los intereses bancarios son relativamente altos y la financiación económica de los bancos es de difícil acceso. Por otra parte, las expectativas con respecto al retorno de capital son al menos, anualmente, de 15 a 20%.

Por lo tanto, se considera un patrimonio neto de aproximadamente el 50% de la inversión total de capital y una tasa de retorno de 20%. Para las empresas industriales y extranjeras se supone un patrimonio neto de aproximadamente el 30% y la tasa de retorno de 15%.

4.2.4.1.1.1 Gastos relativos al consumo

Materia prima

Por experiencias y estudios existentes se sabe que los costos de la materia prima son los de mayor influencia en la producción de biodiésel. En la siguiente información se muestran los precios representativos de: (i) Las semillas oleaginosas, (ii) Aceite vegetal, (iii) Grasas animales. Para las plantas de producción de biodiésel industrial, se asume que el aceite vegetal se entrega en la calidad que se requiere para la planta referencia apropiada. En la Tabla 4.15 se enlista un resumen de precios y costos supuesto para este cálculo de costo, no se incluye IVA ni costos de transporte.

Tabla 4.15 Costos de las materias primas (SENER, 2006)

Materia prima	Intervalo (pesos/ton)	Usado para el cálculo (pesos/ton)
Semillas/frutos		
Girasol	2,367 a 3,129	2,750
Colza	2,839 a 3,927	3,380
Cártamo	2,255 a 2,875	2,570
Soya	2,356 a 3,000	2,680
Palma	487 a 627	560
Jatropha	1,660	1,660
Aceite Vegetal(crudo)		
Girasol	4,140 a 5,341	4,740
Colza	4,578	4,580
Cártamo	12,640 a 15,000	6,910
Soya	4,469 a 6,289	5,380
Palma	3,270 a 4,750	4,010
Jatropha	n.a.	3,800
Aceite de cocina		
Grasa amarilla	4,400	4,400
Grasas animales		
Sebo de res	3,500 a 5,200	4,350

Sustancias auxiliares

Con respecto a los análisis técnicos para la producción de biodiésel a través de esterificación y transesterificación se utilizan sustancias auxiliares específicas tales como metanol, catalizadores ácidos y alcalinos (por ejemplo, sulfuro de hidrógeno, hidróxido de sodio, así como agentes de lavado). Dado que estos precios no afectan significativamente al precio de producción de biodiésel total, los precios mayoristas internacionales se implementan en el modelo de cálculo de costo. En la Tabla 4.16 se muestran los costos de las sustancias auxiliares en pesos.

Tabla 4.16 Precios de substancias auxiliares al mayoreo (SENER, 2006)

Substancia auxiliar	Precio en el mercado (pesos/ton)
Alcohol	
Metanol	3,630
Catalizador/Agentes Lavado	
Sulfuro de Hidrógeno	1,330
Hidróxido de Potasio	9,970
Metilato de sodio	8,310

Consumibles para el suministro de energía del proceso

Se suponen los siguientes costos para los consumibles auxiliares como valores promedio (SENER, 2006):

- Electricidad: aprox. 0.75 MX$ / kWh
- Gas natural para suministro de calor en el proceso en gran escala 75 MX$/GJ
- Aceite para suministro de calor de proceso en pequeña escala: 5.50 MX$ /l

4.2.4.1.1.2 Gastos relacionados a la operación y otros

Personal

El cálculo de costos de personal se basa en el salario mínimo oficial en México de 15,000.00 MX$/año (es decir, mensualmente 1,250.00 MX$). Si se incluye el seguro social, la contribución es de aproximadamente 35%, es decir, aproximadamente 20,250.00 MX$/año. Dependiendo del grado de educación del personal los costos van desde 40,500.00 MX$/año (por ejemplo, trabajadores semicalificados), más de 121,500.00 MX$/año (por ejemplo, técnico) a 2,025,000.00 MX$ /a (por ejemplo, Gerente de una empresa de tamaño mediano o grande). Para el cálculo del costo se suponen los siguientes costos de personal por empleado:

- Plantas agrícolas: 81,000 MX$/año
- Plantas industriales: 121,500 MX$/año

Seguros y Servicios

Referido a un estándar común, los costos anuales por seguros y servicios se consideran cada uno del 1% de la inversión de capital total dentro del cálculo de costos.

4.2.4.1.1.3 Créditos por subproductos

Durante la producción de aceite vegetal se acumulan subproductos (por ejemplo, pastel de prensa) y, dependiendo de los auxiliares que se utilicen (es decir, catalizadores y solventes de lavado), durante los pasos del proceso de producción de biodiésel (glicerina cruda, fertilizantes). Generalmente, estos subproductos pueden ser puestos a la venta. Así se analizan aspectos típicos del mercado y los créditos de los subproductos.

Glicerina

La glicerina se utiliza principalmente para cosméticos, alimentos y bebidas, polioles de uretano, productos farmacéuticos, resinas alcídicas, tabaco, explosivos y celofán. La demanda de glicerina mundial actual es de unas 950,000.00 ton/año. En 2005 se produjo una cantidad de aproximadamente 1 a 1.1 millones de toneladas de muchas fuentes, como:

- Glicerina natural, un subproducto de la producción de jabón y oleoquímica de aceites vegetales y grasas animales o sebo,
- Glicerina sintética, producida mediante hidrólisis de epiclorhidrina de propileno y cloro,
- Glicerina cruda, subproducto de la producción de biodiésel (aproximadamente el 10% del biodiésel).

En el mercado mundial existe un desequilibrio creciente de la oferta sobre la demanda de glicerina cruda; este creciente problema provoca una disminución de los precios del mercado. Especialmente, el crecimiento de la producción de biodiésel y la demanda en el mercado europeo (un 28% por año desde el 2000) y en los Estados Unidos (un suministro adicional de 36,000 a 50,000 toneladas) ha causado un superávit de mayor suministro de glicerina cruda sin suficiente demanda o capacidad de refinación en el mercado para absorber ese creciente volumen (EurObserv'ER, 2006).

Aunque el consumo de glicerina disminuye considerablemente (por ejemplo, porque los centros de producción de cosméticos y productos farmacéuticos han sido transferidos a

ubicaciones geográficas más baratas, como México o China), en los Estados Unidos las importaciones constituyen al menos el 40% de la oferta de glicerina. Europa exportó 40,000 toneladas de glicerina en 2003. La información general de precios de glicerina cruda (aproximadamente un 80% de contenido), así como la glicerina de grado farmacéutico de alta calidad (contenido 99.7%) (Figura 4.2).

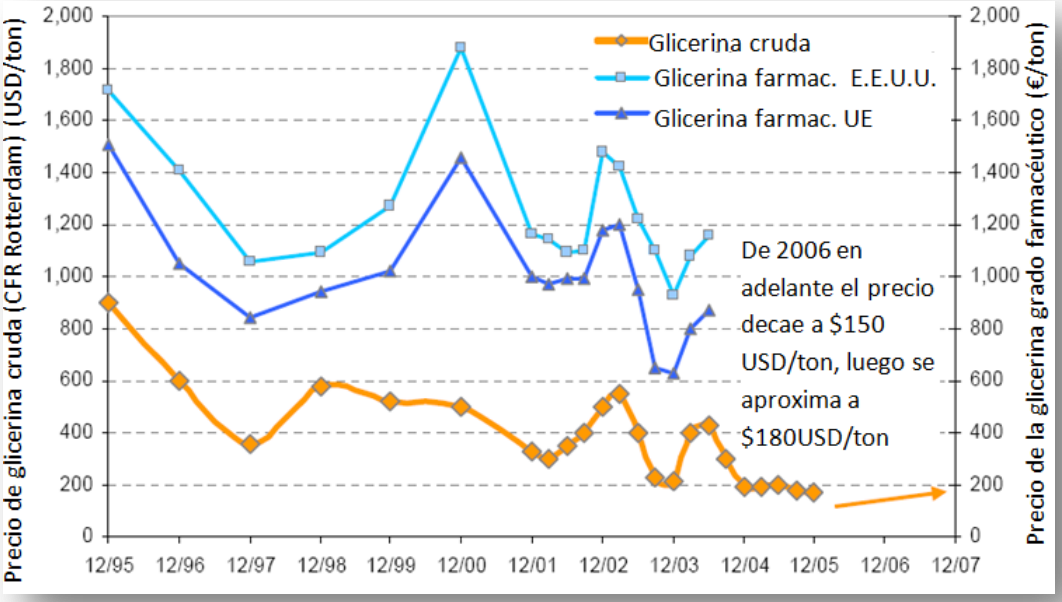

Figura 4.2 Costos internacionales de la glicerina (Oleoline, 2004)

Se espera una producción de glicerina global de alrededor de 1.8 a 2 millones de toneladas para el año 2010. La clave para crear nueva demanda de mercado para el cultivo de suministros de glicerina cruda es descubrir alternativas de usos finales (por ejemplo, fluidos de deshielo de aviones, conversión de polioles, biorremediación y otras aplicaciones industriales) (Graff, 2006).

Las empresas de México como Aprotec de México, Bayer de México, Industrias Crown Chemical y Sigma-Aldrich Química son los usuarios industriales de glicerina, la mayoría de los cuales importan. De acuerdo con información de Solvey de México, el precio de glicerina es 17.69 MX$/Kg (grado farmacéutico). Sin embargo, para el posterior cálculo del costo sólo se tomará en cuenta la glicerina cruda en un precio de 1.635 MX$/ton a disposición en el mercado.

Otros subproductos

Los subproductos, cuando se utilizan catalizadores de potasio y los derivados de la glicerina y sal pueden utilizarse como fertilizantes. Para las diferentes regiones mexicanas

donde el sulfato de potasio es utilizado como fertilizante existe una gama de precios de 3,900.00 MX$/ton en Michoacán (Sahuayo) hasta 9,200.00 MX$/ton en Baja California Sur (La Paz) (SENER, 2006). Con respecto a las oportunidades de venta para el productor de biodiésel un promedio de 4,000 MX$/ton es asumido para el cálculo del costo.

4.2.4.1.1.4 Distribución del biodiésel y uso

El biodiésel se distribuirá de manera similar al diésel. Se calcula que el costo de transporte de diésel en remolques de tanque es de 0.8 MX$ /(kg·1,000 km) (SENER, 2006). Los costos totales para la distribución de biodiésel desde una planta industrial a una estación de mezcla o combustible pueden suponerse en la dimensión de aprox. 0.34 MX$/l.

4.2.4.2 Costo de producción de biodiésel y eficiencia económica

Los siguientes resultados para los costos de producción de biodiésel y la eficiencia económica de las plantas de producción (plantas de referencia) se calculan mediante la aplicación del modelo de cálculo de costo anterior (Figura. 4.1). Además, se describen los resultados del análisis de sensibilidad para los costos de producción.

Vista general de los costos de producción

En la Figura 4.3 se muestran los costos de producción de biodiésel en MX$ por litro de diésel PEMEX equivalente (indicado como DE), en comparación con el diésel PEMEX (sin impuestos y aranceles). Los costos tales como los costos de materia prima, los relacionados con la operación de la planta y el capital se muestran como los gastos, mientras que los créditos de los subproductos (es decir, para el pastel de prensa, glicerina cruda y fertilizantes) se muestran como ingresos; la suma de ambos es el resultado que se indica como los costos de producción de biodiésel total.

Además los resultados del análisis de sensibilidad se muestran para el biodiésel de palma en una planta industrial con molino en la Figura 4.4. Básicamente se puede resumir que para todas las plantas los costos más importantes son los de: (i) Materia prima, en muchos casos seguidos por (ii) Ingresos de subproductos, (iii) Costos de operación de la planta; (iv) La inversión de capital es de poca influencia, ésto se ve reflejado en el bajo impacto de la disminución de la carga anual. Mientras mayor sea la inversión de capital mayor será el impacto en la carga anual de una planta. Relacionado con el impacto de la inversión de capital, los parámetros financieros tales como el interés del período, el financiamiento bancario y sus intereses tienen un impacto muy marginal.

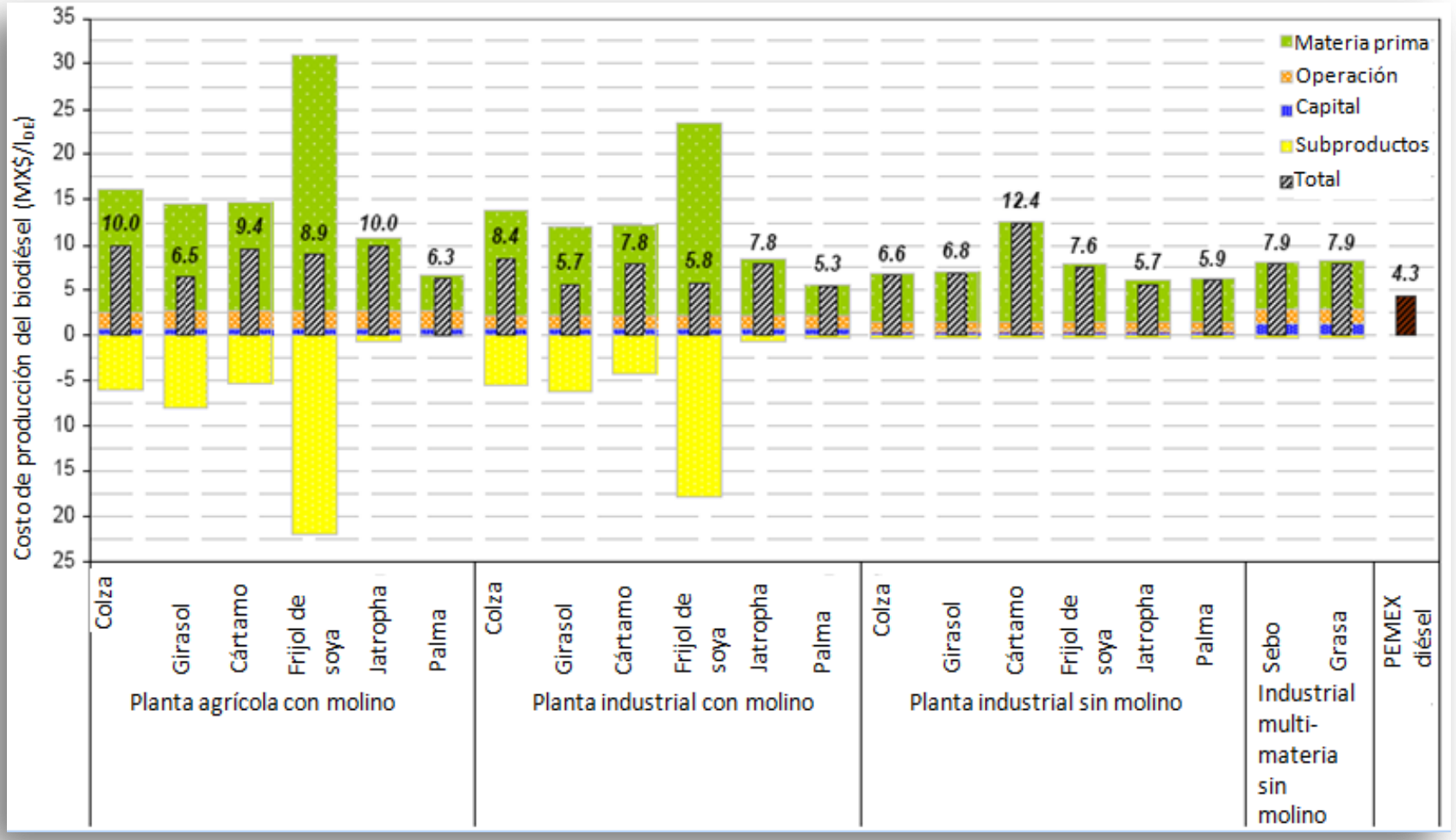

Figura 4.3 Costos de la producción del biodiésel (SENER, 2006)

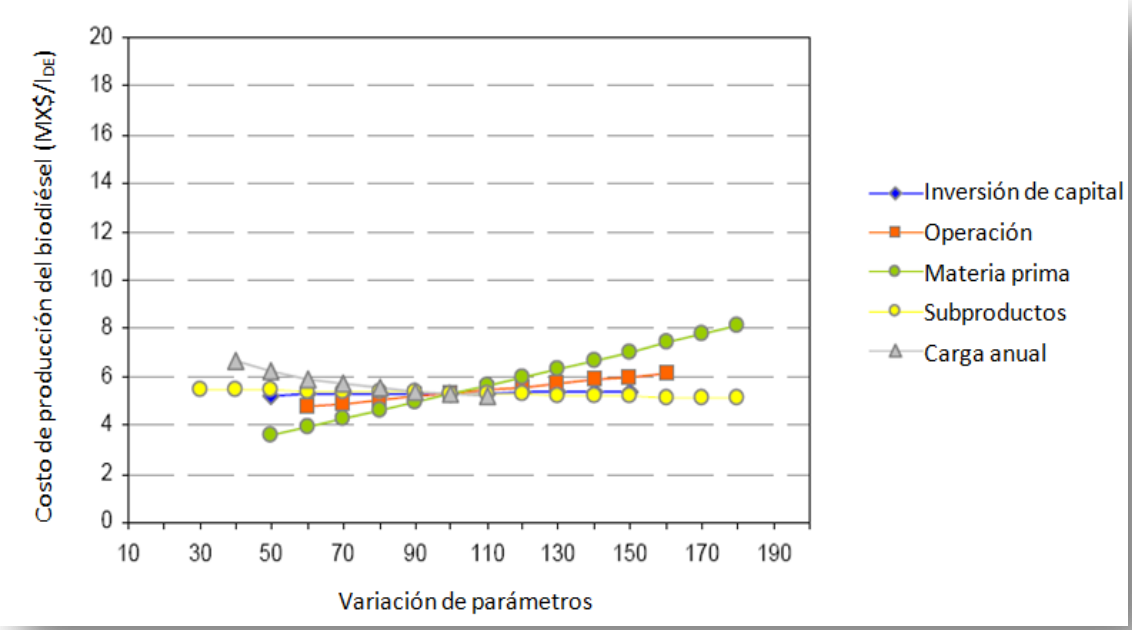

Figura 4.4 Análisis de sensibilidad-biodiésel de palma de aceite en escala industrial (SENER, 2006)

A continuación se enlistan algunos ejemplos para plantas con molino:

- Una variación del período de cálculo de 10 años en el caso base a 20 años resulta en una disminución en los costos de biodiésel de 7 a 12%. Para 5 años es aproximadamente de 4 a 6%.
- Una variación de intereses bancarios del 15% en el caso base a 7.5% da como resultado una disminución en los costos de biodiésel de aproximadamente 0.5% y por lo tanto puede ser despreciada.

Por lo tanto, las condiciones favorables de capitales pueden utilizarse como incentivo financiero para la implementación de las plantas de biodiésel en México. Sin embargo, para el funcionamiento de la planta económicamente ésto es sólo marginalmente relevante; para este punto los aspectos de costos favorables de materia prima, así como los mercados adecuados para el pastel de prensa son de vital importancia.

Eficiencia económica

Los resultados del examen de la eficiencia económica se muestran en la Figura 4.5. Aquí se aplica el criterio para determinar el precio de venta que se requiere para el biodiésel (excluyendo impuestos posibles) con una TIR del 20%. Los resultados se comparan con el precio del diésel PEMEX (es decir, incluyendo impuestos y aranceles). Así puede ser

revelado que el biodiésel de producción industrial a partir de palma, soya y girasol puede ser competitivo con el diésel PEMEX si se omiten los impuestos y deberes para los biocombustibles. Esto también es cierto para el biodiésel de palma y girasol producido en plantas agrícolas, así como para el uso de aceite de colza y jatropha en plantas industriales de biodiésel en las condiciones asumidas.

Además, se indica la anualidad específica de la planta. La anualidad correlaciona a la TIR y según el tipo de planta de producción y capacidad está en un rango de 1.2 millones MX$/año para plantas agrícolas a unos 21 millones MX$/año para plantas industriales con molino.

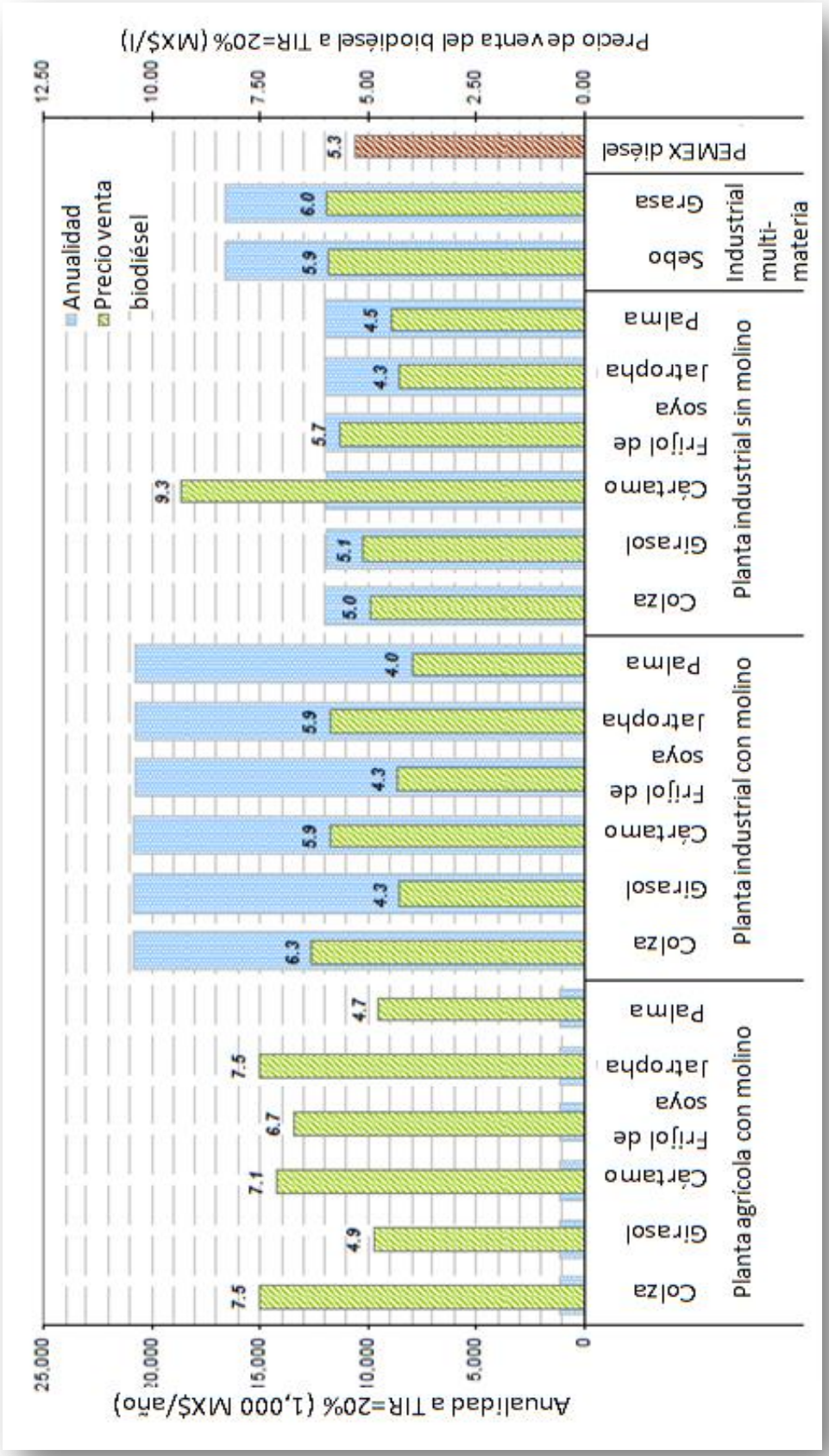

Figura 4.5 Precio de venta del biodiésel requerido para plantas económicamente

5 Conclusiones

A partir de los resultados del análisis de factibilidad económica se concluye que el biodiésel a partir de palma de aceite de producción industrial puede competir con el precio del diésel PEMEX siempre y cuando se omitan los impuestos y deberes para los biocombustibles. Esto también es cierto para el biodiésel de palma y girasol producido en plantas agrícolas. El factor más importante de los costos de producción de biodiésel en general es la materia prima, en el caso del biodiésel de palma de aceite representan un 59%. Factores como la inversión de capital y la tasa de interés bancario representarían una pequeña disminución en el costo de producción.

A corto plazo no es concebible la implementación del uso de biodiésel en el metrobús basado en materia prima local. Para el escenario B5 se tendrían que dedicar un total de 250 hectáreas de cultivos de palma de aceite para producir 4,300 toneladas de racimos de fruta fresca que se convertirían en 1 millón de litros de biodiésel. En 2008, se sembraron 32.5 mil hectáreas de palma en México, que una vez alcancen su madurez, producirán 586 mil toneladas de fruta fresca. A mediano plazo la introducción de B5, B10 y B20 parece técnicamente factible siempre y cuando se establezca un esquema exhaustivo de apoyo a la agricultura porque en la actualidad más del 80 por ciento del aceite de palma que se consume en México es importado. Es indispensable que el sector agrícola mexicano sea actor clave en la producción de biocombustibles, para proveer materia prima de calidad, desarrollar tecnología de punta que genere cada vez mayor rendimiento de los cultivos y sobre todo sea el factor que elimine la dependencia de las exportaciones de aceite para consumo alimenticio en México. Mientras no se logre una independencia total en el sector de los aceites vegetales para consumo alimenticio más lejos se puede ver a la agricultura como parte de una cadena de suministro de biocombustibles que supondría una nueva fuente de empleos en ambientes rurales, fortaleciendo la economía y mitigando la migración. Cabe resaltar que las plantas agrícolas hacen de la producción de biodiésel un proceso más eficiente desde un punto de vista energético. Es sabido que las plantas a pequeña escala, bien localizadas y de bajo impacto, mantienen más recursos y generan más ganancia dentro de la comunidad, reducen el daño al ambiente y requieren un tratamiento de desechos muy bajo. Una ventaja de las plantas de biodiésel con molino de aceite es que los subproductos de la producción, como las aguas residuales y el pastel prensado pueden ser utilizados para la producción de energía de la misma planta y la glicerina como alimento del ganado. Además permiten que la operación inicie en un corto plazo.

La explotación de las tierras de cultivo de palma debe hacerse de manera racional y ordenada, ya que de talarse selvas y bosques para este propósito las emisiones de $CO_{2\text{-}e}$ aumentan en casi 1000%. Puede ser casi imposible evitar por completo la deforestación de las selvas (debido a ineficiencias administrativas e incumplimiento de leyes), pero al menos debería ser difícil para esas plantaciones tener acceso a subsidios y otros incentivos financieros). Si se cultiva de plantaciones existentes las emisiones se reducen en un 80% con el biodiésel puro, 15% con B20, 7.6% con B10 y 3.7% con B5. En la Figura 5.1 se

observan las emisiones de dióxido de carbono equivalentes de la producción y uso del biodiésel de palma de aceite en el escenario de tendencia y los escenarios alternativos. De la misma, se concluye que el uso de biodiésel a partir de palma de aceite es ambientalmente factible de implementarse en el metrobús de la Ciudad de México.

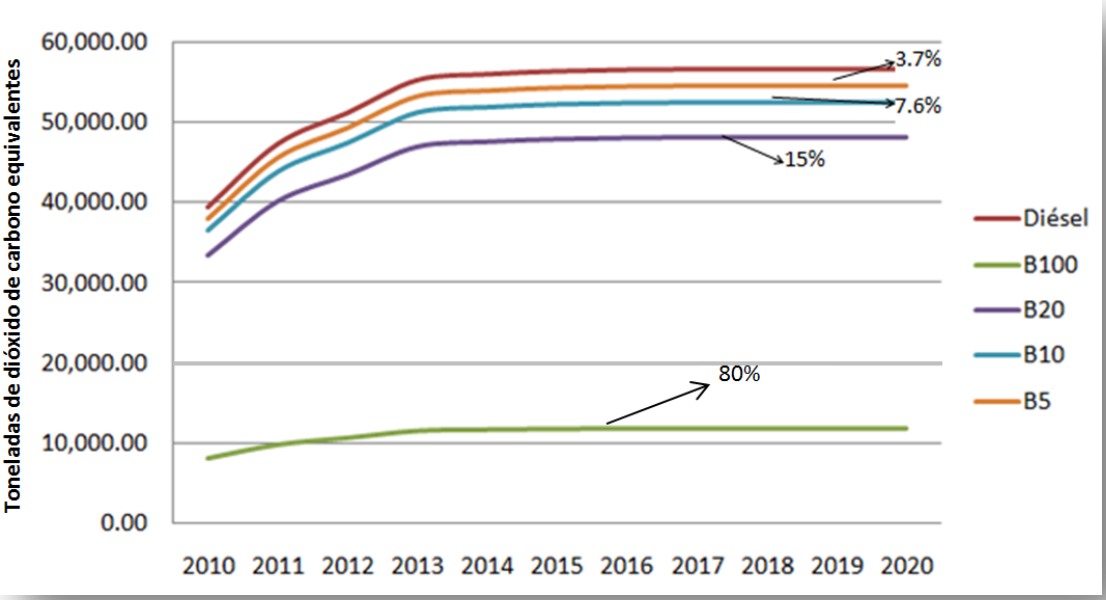

Figura 5.1 Emisiones de $CO_{2\text{-}e}$ en el caso de estudio del metrobús

Existen muchas tareas a futuro para crear un mercado fértil de biocombustibles, no sólo para el caso del metrobús sino para todo el país, entre ellas están:

- Incluir al sector privado en la inversión de capital
- Un marco legal que regule el mercado de los biocombustibles para evitar prácticas monopolizadas y deforestación
- Incentivar al campo para el cultivo de palma de aceite
- Propiciar la investigación tecnológica para encontrar un mercado más amplio para los subproductos
- Un estándar de calidad que garantice un combustible apropiado para uso en los automóviles actuales basado en estándares internacionales
- Buscar tecnologías de producción de biodiésel que reduzcan la demanda de energía fósil y disminuyan la necesidad de agua
- Una producción flexible que diferencie el aceite para biodiésel y asegure el producto para consumo alimenticio
- Incentivar la producción de biodiésel omitiendo impuestos y deberes para los biocombustibles

6 Referencias

Achten, W., Vandenbempt, P., Mathijs, E. y Muys, B. 2009. LCA of a palm oilsystem producing both biodiesel and cooking oil: A Cameron case. En: International Palm Oil Life Cycle Assessment Conference. Kuala Lumpur, Malasia.

AGQM, 2006. Running vehicles successfully on biodiesel. Publicación de Biodiesel Quality Management Work Group. Berlin, Alemania.

AIE, 2004. Biodiesel in North America: Implementation Issues. Publicacion de la Agencia Internacional de Energía. Delta, Columbia Británica, Canadá.

AIE, 2008. Renewable Energy Outlook. Publicación de la Agencia Internacional de Energía. Estados Unidos de América.

AIE, 2010. Balances de energía de los paises fuera de la OECD. Publicación de la Agencia Internacional de Energía. Estados Unidos de América.

AIE, 2010B. Sustainable production of second generation biofuels: Potential and perspectives in major economies and developing . Publicación de la Agencia Internacional de Energía. Paris, Francia.

AIE, 2010C. Medium-term oil and gas markets. Publicación de la Agencia Internacional de Energía. Paris, Francia.

BM, 2006. Índice nacional de precios al consumidor. Publicación del Banco de México. México, D.F. México.

Barsic, N. y Humke, A. 1981. Performance and emissions characteristics of a naturally aspirated diesel engine with vegetable oil fuels. Publicación de Society of Automotive Engineers. Warrendale, Pensilvania. EE.UU.

Becker, K. y Francis, G. 2005. Biodiesel from Jatropha plantations on degraded land. Publicación de Universität Hohenheim. Stuttgart, Alemania.

Benjumea, P., Agudelo, J. y Rios L. 2009. Biodiésel: Produccion, calidad y caracterización. Editado por Universidad de Antioquiaro. Pág. 1-88. Medellin, Colombia.

BMME, 2009. Brazilian Energy Balance. Publicación de Brazilian Ministry of Mines and Energy. Brasil.

Chisti, Y.2007. Biodiesel from microalgae. ***Biothechnology Advances***. 25(3): 294-306.

CISRO, 2007. The greenhouse and air quality emissions of biodiesel blends in Australia. Publicación de Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Sidney, Australia.

CONAE, 2006. Guía de gestiones para implementar en México plantas de generación eléctrica que utilicen energías renovables. Publicación de Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. México, D. F. México.

CONUEE, 2010. Las energías renovables en México y el mundo. Publicación Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. México, D. F.. México.

CRE, 2007. Las energías renovables en México. Publicación de la Comisión Reguladora de Energía. México, D.F. México.

Crespo, V. 1999. Biodiesel: una alternativa real al gasóleo mineral. Publicacion del Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense. Madrid, España.

EEA, 2006. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?. Publicación de European Evironment Agency. Copenhague, Dinamarca.

EnAu, 2003. National standard for biodiesel. Publicación de Environment Australia, Commonwealth of Australia. Sidney, Autralia.

EPA, 2002. A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions. Publicación de U.S. Environmental Protection Agency. Washington DC, EE. UU.

EPA, 2011. Inventory of U.S. greenhouse emissions and sinks: 1990 – 2009. Publicación de U.S. Environmental Protection Agency. Washington DC, EE. UU.

Escalante, D. 2011. Dirección de Planeación, Evaluación y Sistemas del Metrobús. México, D.F. México.

EurObserv'ER, 2006. Biofuels Barometer. Systèmes solaires n° 173. Publicación de L'Observatoire des Energie Renouvelables. París, Francia.

FBDS, 2005. Liquid Biofuels for transportation in Brazil. Publicación de Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. Brasil.

GOF, 2009. Estrategia Intersecretarial de los bioenergéticos . Publicación del Gobierno Federal (SAGARPA, SENER, SE, SEMARNAT, SHCP). México, D.F. Mexico.

Graff, G. 2006. Glycerin glut send price plummenting. ***Purchasing Magazine Online***.EE. UU.

IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Publicación de Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Reino Unido.

IPCC, 2007. Guidelines for national greenhouse gas inventories 2006. Publicación de Intergovernmental Panel on Climate Change. Hayama, Kanagawa. Japón.

Knothe, G.,Van, G., Krahl, J. 2005. The Biodiesel Handbook. Editado por Taylor & Francis Ltd. Chicago, EE. UU.

Lazcano, I. 2006. Aspectos agrícolas y recursos potenciales para el propósito: Desarrollo de un estudio de factibilidad para el uso del biodiesel como combustible para el transporte en México. Publicación de la Secretaria de Energía. Mexico, D.F. México.

Macedo, I. 2006. Feasibility of Biomass-Derived as Fuel for Transportation. Activity 6: Potentials in Relation to Sustainability Criteria. Publicación de la Secretaría de Energía. México, D.F. México.

MBC, 2003. A review of the engineering aspects of the biodiesel industry. Publicación de Mississippi Biomass Council. Misisipi, EE. UU.

Mittelbach, M. 2004. Biodiesel: The Comprehensive Handbook . Editado por Institute of Chemistry Karl-Franzens-University Graz. Pág. 25-58. Graz, Austria.

NFRE, 2008. Biogas for transport. Publicación de Nordic Folkcenter for Renewable Energy. Suecia.

NREL, 2001. Biodiesel handling and use guidelines. Publicacion de National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado. EE. UU.

NREL, 2003. Production of Biodiesels from multiple feedstocks and properties of biodiesels and biodiesel/diesel blends. Publicación de National Renewable Energy Laboratory. Oak Ridge, Tenesí. EE. UU.

NREL, 2004. Biodiesel management for biodiesel producers august 2002- january 2004. Publicación de National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado. EE. UU.

Oleoline, 2004. Glycerin market report. Issue N°65. Montmorency, Francia.

Papong, S. y Malakul, P. 2009. Life cycle energy efficiency and potentials of biodiesel production fom palm oil in Thailand . ***Energy Policy.*** 10(26) 10-29.

PEMEX, 2010. Testimonio Público. Adquisición de bienes consistentes en etanol anhídrido para oxigenar gasolinas en la zona metropolitana de Guadalajara, Jal., bajo la modaliad de

contrato abierto sujeto a ajuste de precios, para los años 2011-2015. Publicación de Petróleos Mexicanos. México, D.F. México.

Plenjai, S., Shabbir, H. 2004. Environmental evaluation of biodiesel production from palm oil in a life cycle perspective. En: The Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment". Bangkok, Tailandia.

REN21, 2010. Global Status Report. Publicación de Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. París, Francia.

SAGARPA, 2009. Programa de Produccion Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico. Publicación de la Secretaria de Agricultuta, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D. F. México.

SAGARPA, 2010. Impulsa México el uso de energías renovables. COMUNICADO DE PRENSA NUM.535/10. Publicación de Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. México.

SAGARPA, 2010B. Tecnologías de Mitigación. Publicación de Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. México.

SAGARPA, 2010C. Monografía de cultivos: Palma de aceite. Publicación de Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. México.

SENER, 2006. Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte Mexicano. Publicacion de la Secretaría de Energía. México, D.F. México.

SENER, 2008. Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. Publicacion de la Secretaría de Energía. México, D.F. México.

SENER, 2010. Balance Nacional de Energía 2009. Publicacion de la Secretaría de Energía. México, D.F. México.

SENER, 2010B. Prospectiva de Petrolíferos 2010-2025. Publicacion de la Secretaría de Energía. México, D.F. México.

SENER, 2010C. Programa de Introducción de Bioenergéticos . Publicacion de la Secretaría de Energía. México, D.F. México.

SENER, 2011. Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía. Publicacion de la Secretaría de Energía. México, D.F. México.

UFOP, 2004. Status Report Biodiesel: Biodiesel Production and Marketing. Publicación de UNION ZUR FÖRDERUNG VON OEL- UND PROTEINPFLANZEN E. V. Berlín, Alemania.

USDA, 2006. GAIN Report: "México Oilseeds and Products Annual 2006" . Publicación de U.S. Department of Agriculture. EE. UU.

USDA, 2010. Mexico: Oilseeds and Prodcuts Annual . Publicación de U.S. Department of Agriculture. EE. UU.

USDA, 2010B. Oilseeds: World Markets and Trade Monthly Circular. Publicación de U.S. Department of Agriculture. EE. UU.

WWF, 2006. Sustainability Standards for Bioenergy. Publicación de World Wilflife Fund Germany. Frankfurt, Alemania.

VDI, 1996. Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investionsgüter und Anlagen VDI 6025. Publicación de Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf, Alemania.

Xu, H., Miao, X., Wu, Q. 2006. High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. ***Journal of Biotechnology***. 126: 499-507.

Zhang, Y. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. ***Bioresource Technology.*** 89: 1-16.

Ziejewski, M. 1984. Diesel engine evaluation of an nonionic sunflower oil-aqueous ethanol microemulsion. ***Journal of the American Oil Chemists Society***. 60 (8): 1620-1626.