



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Conceptos generales de los biocombustibles
para uso vehicular**

TESINA

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Luis Alberto Villa Segura

DIRECTORA DE TESINA

Dra. Alejandra Castro González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

JURADO ASIGNADO

Presidente: M. en I. Alba Beatriz Vázquez González

Vocal: Dra. Alejandra Castro González

Secretaria: Dra. Ana Beatriz Carrera Aguilar

Primer Suplente: M. en I. Liliana Aguilar Yáñez

Segundo Suplente: Ing. Rodrigo Muñoz Sánchez

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Producción y Utilización de Biocombustibles (LAEL), Departamento de Sistemas Energéticos, División de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria. Este tema se desarrolló bajo el Programa PAPIME PEI13624 “DESARROLLO Y MEJORA DEL APRENDIZAJE EN ECONOMÍA CIRCULAR DE LOS RESIDUOS”

ASESORA DEL TEMA:

Dra. Alejandra Castro González

SUSTENTANTE:

Luis Alberto Villa Segura

Página dejada en blanco intencionalmente

Página dejada en blanco intencionalmente

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
GLOSARIO.....	13
RESUMEN.....	14
INTRODUCCIÓN.....	15
OBJETIVO GENERAL.....	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
Capítulo 1. ANTECEDENTES.....	18
1.1 Biocombustibles.....	18
1.2 Tipos de biocombustibles.....	20
1.2.1. Biocombustibles de primera generación.....	20
1.2.2. Biocombustibles de segunda generación.....	22
1.2.3. Biocombustibles de tercera generación.....	23
1.2.4. Biocombustibles de cuarta generación.....	23
1.2.5. Biocombustibles líquidos.....	24
1.2.5.1. Etanol.....	24
1.2.5.2. Biodiésel.....	25
1.2.6. Biocombustibles sólidos.....	26
1.2.7. Biocombustibles gaseosos.....	27
1.2.7.1. Biogás (biometano).....	27
1.2.7.2. Hidrógeno.....	28
1.2.7.3. Gas de síntesis.....	28

1.3	Biocombustibles para uso en vehículos.....	29
1.4	Mercado de los biocombustibles.....	33
1.5	Uso de los biocombustibles.....	40
Capítulo 2. Fundamentos.....		45
2.1	Etanol.....	45
2.1.1.	Producción de etanol.....	45
2.1.2.	Uso de etanol.....	51
2.2	Biodiésel.....	53
2.2.1.	Producción de biodiésel.....	53
2.2.2.	Productores de biodiésel.....	57
2.2.3.	Uso de biodiésel.....	59
2.3	Hidrógeno.....	60
2.3.1.	Producción de hidrógeno.....	61
2.3.2.	Uso de hidrógeno.....	63
2.4	Otros biocombustibles.....	64
2.4.1.	Biogás.....	64
2.4.2.	Butanol.....	68
2.4.3.	Bioaceite.....	68
2.4.4.	Gas de síntesis.....	69
2.4.4.1	Métodos de producción del gas de síntesis.....	69

Capítulo 3. Biocombustibles en el marco internacional y nacional. 71

3.1	Normativas.....	71
3.1.1.	EE. UU.....	80
3.1.2.	Brasil.....	81
3.1.3.	Unión Europea.....	82
3.1.4.	China.....	83
3.1.5.	Canadá.....	84
3.1.6.	Argentina.....	84
3.1.7.	México.....	85
3.2	Consumo para el transporte.....	89
3.3	Producción.....	91

Capítulo 4. Afectaciones y emisiones por el uso de biocombustibles en vehículos..... 95

4.1	Emisiones.....	96
4.2	Uso de la tierra.....	100
4.3	Impactos en salud, empleo, movilidad poblacional y educación... 103	

Capítulo 5. Perspectiva y datos generales para el uso práctico de un biocombustible líquido para un sitio indefinido (Biodiésel).... 106

5.1	Costos de producción a partir de aceites usados.....	106
5.2	Precio de materia prima.....	107
5.3	Escenario tendencial.....	113
5.4	Escenario moderado.....	115

5.5 Escenario optimista.....	116
Capítulo 6. Conclusiones.....	119
Referencias Bibliográficas.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Participación de los biocombustibles en el transporte carretero en porcentajes.....	30
Figura 1.2	Distribución porcentual de biocombustibles líquidos en 2020.....	33
Figura 1.3	Distribución porcentual de biodiésel en 2020.....	34
Figura 1.4	Distribución porcentual de etanol en 2020.....	34
Figura 1.5	Distribución porcentual del consumo de biocombustibles líquidos de 2020.....	42
Figura 1.6	Distribución porcentual del consumo de biodiésel de 2020.....	43
Figura 1.7	Distribución porcentual del consumo de etanol de 2020.....	43
Figura 2.1	Diagrama de procesos del etanol.....	49
Figura 2.2	Reacción de obtención de biodiésel.....	54
Figura 2.3	Producción industrial de biodiésel.....	55
Figura 2.4	Flujos de masas en la producción de éster metílico....	55
Figura 2.5	Esquema de la producción de biodiésel.....	56
Figura 2.6	Producción de biodiésel por transesterificación.....	57
Figura 2.7	Esquema de la degradación anaerobia de la materia orgánica.....	66
Figura 3.1	Apéndice X4. Décimo percentil de marzo, mínima temperatura No. 1.....	75
Figura 3.2	Apéndice X4. Décimo percentil de marzo, mínima temperatura No. 2.....	75
Figura 3.3	Mandatos directos e indirectos de uso de etanol en gasolina en 2020.....	79
Figura 3.4	Mandatos directos e indirectos de uso de biodiésel en diésel fósil en 2020.....	80
Figura 3.5	Evolución de la demanda de biocombustibles en las principales regiones.....	90
Figura 3.6	Evolución de los precios de los biocombustibles y de las materias primas para biocombustibles.....	91
Figura 3.7	Variación interanual porcentual, tendencia y producción total de biocombustibles líquidos en el mundo, en miles de metros cúbicos.....	92
Figura 3.8	Variación porcentual, tendencia y producción total de biodiésel en el mundo, en miles de metros cúbicos.....	93

Figura 3.9	Variación interanual porcentual, tendencial y producción total, en miles de metros cúbicos, de, etanol.....	94
Figura 4.1	Impactos asociados a la producción de biocombustibles.....	95
Figura 4.2	Gases contaminantes de ciudades de América Latina.....	98
Figura 5.1	Cadena de producción de biodiésel a partir de aceites usados.....	106
Figura 5.2		107
Figura 5.3	Costos de la materia prima para la producción de biodiésel.....	108
Figura 5.4	Etapas, procesos y componentes del costo de biodiésel.....	112
Figura 5.5	Condiciones para introducir el biodiésel en 2017.....	114
Figura 5.6	Condiciones para introducir el biodiésel en 2036.....	114
Figura 5.7	Evolución de la cuota de mercado de biodiésel, en millones de m ³ y porcentaje, escenario moderado.....	115
Figura 5.8	Evolución de costos de políticos de apoyo, en millones de pesos, escenario moderado.....	116
Figura 5.9	Evolución de la cuota de mercado de biodiésel, en millones de m ³ y porcentaje, escenario optimista.....	117
Figura 5.10	Evolución de costos de políticos de apoyo, en millones de pesos, escenario optimista.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Uso de biocombustibles y principales preocupaciones durante cuatro épocas históricas.....	19
Tabla 1.2	Historia de los biocombustibles.....	21
Tabla 1.3	Tecnologías para producir biocombustibles de primera generación.....	22
Tabla 1.4	Tipos de biocombustibles por estado físico.....	23
Tabla 1.5	Consumo mundial de biocombustibles en Escenario Referencial (ER) y Escenario de Política Alternativa (EPA)	31
Tabla 1.6	Precios de venta del biodiésel, mostrado en pesos mexicanos.....	37
Tabla 1.7	Precios estimados de la producción de etanol en EE. UU.....	38
Tabla 1.8	Mezclas utilizadas en distintos países.....	40
Tabla 2.1	Modelos de automóviles propulsados por hidrógeno...	63
Tabla 2.2	Composición del gas natural.....	64
Tabla 2.3	Comparativa de métodos de producción de gas de síntesis a partir de metano.....	70
Tabla 3.1	Requerimientos de la ASTM D 975 para diésel.....	73
Tabla 3.2	Apéndice X4. Décimo percentil, mínima temperatura..	76
Tabla 3.3	Límites de la norma ASTM D 6751-09 para biodiésel..	77
Tabla 3.4	Norma Europea para biodiésel EN 14214-2008.....	78
Tabla 4.1	Distribución mundial de las emisiones de GEI por fuente emisora.....	96
Tabla 4.2	Distribución de GEI por fuente emisora en América Latina y el Caribe.....	97
Tabla 4.3	Principales contaminantes locales del aire.....	99
Tabla 5.1	Costo de producción del biodiésel de la opción “puesto en fábrica de biodiésel”.....	109
Tabla 5.2	Costo de producción del biodiésel de la opción “pago de precio de origen”.....	110
Tabla 5.3	Comparativa en recolección de materia prima.....	111
Tabla 5.4	Costos logísticos y de proceso.....	112

GLOSARIO

AIE	Agencia Internacional de Energía
APA	Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.
ASTM	American Society for Testing and Material Standards, o llevada al español, Sociedad Americana de Ensayos y Estándares de Materiales
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BL	Barriles
BTAE	Billones de Toneladas de Aceite Equivalente
BTL	Biomasa a líquido
CEMIE	Centro Mexicano de Innovación en Energía
CH ₄	Metano
CMP + L	Centro Mexicano para la Producción más Limpia
CNDR	Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
ENB	Estrategia Nacional de la Biomasa de Japón
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FFV	Vehículos de combustible flexible (Fuel Flex Vehicle, por sus siglas en inglés)
FUPRO	Fundaciones PRODUCE
GDH	Grano de Destilación Húmedo
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GLP	Gas Licuado del Petróleo
GNC	Gas Natural Comprimido
GSDS	Granos Secos de Destilería con Solubles
HC	Hidrocarburos
H ₂	Biohidrógeno
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno
HNQ	Hidrocarburos no quemados
IEPS	Impuesto Especial sobre Producción y Servicios
IVA	Impuesto sobre el Valor Agregado

GLOSARIO

LPDB	Ley de Promoción y Desarrollo de Biocombustibles
MCI	Motor de Combustión Interna
Mezcla B de Biodiésel	Mezclas compuestas por un porcentaje de biodiésel y gasoil, se presenta con un número a la derecha de la B que representa el porcentaje presente en la mezcla
Mezcla E de Etanol	Son mezcla que se componen por un porcentaje de etanol y de gasolina, representados con un número a la derecha de la E que representa el porcentaje presente en la mezcla
MMT	Motores de Micro Turbina
MP	Materia Particulada
MPa	Mega Pascales
MRT	Mapas de Ruta Tecnológica
MTBE	Metil Ter Butil Éter
Mtoe	Mega toneladas equivalentes de petróleo
MtCO ₂ e	Millones de toneladas de CO ₂ equivalente
MTEP	Millones de Toneladas Equivalentes de Petróleo
NO _x	Óxidos de nitrógeno
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
PIB	Producto Interno Bruto
REMBIO	Red Mexicana de Bioenergía
RGMMB	Reservas de Gas en Miles de Millones de Barriles
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México
SDC	Solubles de Destilería Condensados
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México
SENER	Secretaría de Energía de México
SO _x	Óxidos de azufre
TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte
UTB	Unidad Térmica Británica
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

RESUMEN

La presente investigación propone la implementación de biocombustibles en flotas vehiculares, perfilando la energía renovable como la solución más prudente ante la problemática ambiental actual. Destacando biocombustibles como el Etanol y el Biodiésel.

Tanto el Etanol como el Biodiésel comparten características con los combustibles fósiles, la gasolina y el diésel. La diferencia primordial radica en la emisión de menores agentes contaminantes por parte de los biocombustibles en comparación con los combustibles fósiles, buscando minimizar las repercusiones del efecto invernadero.

El presente trabajo busca brindar una alternativa de consumo de combustible al sector del transporte, debido a que este sector tiene una importante participa en la degradación ambiental, propiciado por el aumento en la población y por ende de la urbanización, con lo que se espera un crecimiento en el consumo de combustibles, siendo ahí donde la implementación de biocombustibles es crucial. Por un lado, tenemos el Etanol, producido mediante fermentación a base de azúcares contenidas en plantas como la remolacha y la caña de azúcar. Del otro lado tenemos el Biodiésel, producido mediante la transesterificación a base de aceites usados y vegetales.

El costo de los insumos agrícolas representa entre el 59% a 91% del costo total de la producción del biodiésel. Se plantean tres escenarios, el escenario tendencial, escenario donde es altamente improbable conseguir cuotas favorables en el mercado Mexicano; el escenario moderado, emplea políticas de apoyo para introducir progresivamente el biodiésel, haciendo obligatoria una cuota de crecimiento de biodiésel a suministradores de combustibles, estimando unos ingresos acumulados entre los 60,000 y 86,000 millones de pesos para el periodo de 2018 a 2036, con una inversión de entre 6,000 y 9,000 millones de pesos en infraestructura industrial para producir biodiésel; por último se planteó el escenario optimista, estima ingresos acumulados de entre 183,000 y 261,000 millones de pesos para el sector agrícola con una inversión entre 12,000 y 18,000 millones de pesos.

INTRODUCCIÓN

Preservar condiciones favorables en el medio ambiente es una preocupación constante. Para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas, principalmente, del continuo uso de vehículos propulsados por combustibles fósiles, diversos gobiernos buscan implementar políticas que permitan realizar una industria estable de biocombustibles y hacer frente a la contaminación ambiental (Rodríguez y col., 2008; Salinas y Gasca, 2009).

El aumento poblacional y la urbanización han propiciado un aumento en las necesidades energéticas. Tal situación ha derivado un incremento en el uso de combustibles fósiles detonando una decadencia acelerada del medio ambiente (Babu y col., 2013). Los conflictos ecológicos desencadenados de las continuas emisiones de CO₂, derivadas de uso de combustibles fósiles en el sector transporte, han llevado al ser humano a buscar alternativas de combustibles que reduzcan las emisiones de GEI al ambiente. Ante tal situación, el uso de biocombustibles ofrece un alivio inmediato al conflicto ambiental actual (Babu y col., 2013).

Gracias a su carácter renovable y su inmensa posibilidad de mejora e ingeniería, los biocombustibles se consideran la solución más prometedora. Debido a que son producidos directo de fuentes renovables, generalmente presentes a nivel local, tienen una gran ventaja respecto a los combustibles fósiles que cuentan con una disponibilidad de recursos cada vez más limitada. La implementación de biocombustibles puede ser la clave para reducir la dependencia de fuentes de energía traídas del extranjero y contribuir en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero propiciadas del uso de combustibles fósiles (Babu y col., 2013).

A pesar de la disponibilidad de fuentes para obtener estas mezclas, el suministro continuo de biocombustibles se presenta como una de las tareas más complejas en la búsqueda de implementar un programa a nivel nacional. El conflicto entre la producción de energía y la seguridad alimentaria es otro desafío para determinar la viabilidad de los biocombustibles, porque la mayoría de los biocombustibles de primera generación se producen a partir de cultivos alimentarios. Es por esto por lo que, producir biocombustibles a partir de residuos agrícolas mediante un proceso termoquímico puede ser una opción sostenible mediante el reciclaje de residuos (Rathmann y Schaeffer, 2010).

En 1925, Henry Ford mencionó lo siguiente: “El combustible del futuro vendrá de frutas como manzanas, maleza o aserrín, es decir, prácticamente de cualquier cosa. Hay combustible en cada trozo de materia vegetal que se puede fermentar”

(Agarwal y col., 2018). Algo que para la fecha sonaba un tanto descabellado, pero hoy en día es toda una realidad.

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA), emplear combustibles renovables genera un ahorro del 20% en emisiones de GEI, dicho ahorro de emisiones puede llegar hasta un 60% si los biocombustibles se producen a partir de biomasa celulósica (Agarwal y col., 2018). Este es uno de los principales motivos por los que varios países han adoptado diferentes medidas con el fin de introducir biocombustibles, con base de los recursos que poseen.

Actualmente, el etanol y el biodiésel son los biocombustibles más explotados y empleados alrededor del mundo. El etanol es un combustible caracterizado por ser un líquido incoloro, olor ardiente, ser fácilmente inflamable, de llama azul y muy higroscópico. Puede ser obtenido por síntesis química y por fermentación. Mientras que el biodiésel es un derivado de ácidos grasos de cadena larga, obtenidos de diferentes oleaginosas, así como aceite de fritura usado y de grasa animal. La obtención de biodiésel, generalmente, se basa en el proceso de transesterificación catalítica de esas grasas en presencia de un alcohol de cadena corta (Monteiro, 2010).

En la actualidad, Brasil y EE. UU., son los países con más influencia dentro del mercado de los biocombustibles; han basado su producción en etanol de caña de azúcar y maíz, respectivamente, mientras que los demás países han elaborado biodiésel a partir de semillas oleaginosas.

En el Libro Verde de la Comisión Europea se propuso una sustitución del 20% de los combustibles fósiles convencionales por combustibles alternativos en el sector del transporte por carretera para el 2020. En el año de 2010, India lanzó un Programa Nacional de Mezclas de Etanol, con el que se establece una mezcla obligatoria de etanol del 5% en 20 estados del país (Agarwal y col., 2018).

Actualmente existe un enfoque, por parte de los científicos, para producir biocombustibles de tercera generación que se pueden producir utilizando biorreactores para etanol y transesterificación para biodiésel, así como la producción de combustibles líquidos para el transporte a partir de microalgas.

OBJETIVO GENERAL

Analizar y evaluar conceptos generales de los biocombustibles definiendo su factibilidad para uso vehicular.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El presente documento se plantea:

- Conocer diferentes tipos de biocombustibles analizando su presencia en el mercado mundial.
- Investigar conceptos generales de biocombustibles analizando aspectos de producción y uso de estos.
- Conocer la situación del mercado de los biocombustibles analizando países de primer y tercer mundo.
- Investigar políticas aplicables a biocombustibles envolviendo la producción y comercialización.
- Analizar emisiones de producción y uso de biocombustibles conociendo el panorama general del medio ambiente.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Biocombustibles

Los biocombustibles son mezclas de origen biológico derivadas de la biomasa. El término biomasa hace referencia a cualquier tipo de materia orgánica obtenido del proceso biológico de organismos recientemente vivos, como plantas o sus desechos metabólicos. La biomasa comprende tanto a productos de origen vegetal como de origen animal (Salinas y Gasca, 2009).

Los biocombustibles pueden presentar en los tres estados de la materia, líquidos como el etanol y el biodiésel, sólidos como las maderas y, gaseosos como el hidrógeno y el metano. Estos combustibles biológicos se derivan de fuentes orgánicas renovables, habitualmente del azúcar, trigo, maíz o semillas oleaginosas (Salinas y Gasca, 2009).

En la actualidad combustibles como el carbón vegetal, el biogás resultante de la descomposición anaerobia de desechos orgánicos y desechos agropecuarios, así como los biocombustibles líquidos, como el etanol y el biodiésel, y la bioelectricidad, producida por la quema de combustibles como el bagazo y la leña son ejemplos de combustibles que contribuyen a mitigar los efectos negativos en el medio ambiente (BNDES, 2008). Además, se encuentra el hidrógeno, empleado en las denominadas celdas de hidrógeno. Dichas celdas convierten, directamente, el hidrógeno en energía generando agua como subproducto sin necesidad de llevar a cabo una combustión. Este biocombustible tiene una eficiencia cercana al 90% y no forman CO₂. Además, es considerado como una de las mejores energías alternativas debido a su abundancia, fácil síntesis y porque no forma subproductos contaminantes cuando se usa en una celda de combustible. Su mayor inconveniente radica en las dificultades para su almacenamiento (Suh y col., 2012).

Se tienen reportes que indican que emplear biocombustibles en motores de vehículos hace posible reducir hasta un 90% las emisiones de CO₂ a diferencia de los combustibles fósiles. Biocombustibles como el etanol, prácticamente no aportan CO₂, aunque si aldehídos que deben ser considerados, como el acetaldehído (Brown y col., 2008; Carere y col., 1998).

A principios del siglo XX, alrededor del 30% de la tierra cultivable estaba sembrada con cultivos, estos cultivos tenían el fin de alimentar a bueyes y caballos utilizados en el transporte. La Tabla 1.1 describe el uso de biocombustibles durante cuatro épocas históricas, así como las principales preocupaciones derivadas de su uso (Singh y col., 2019).

Tabla 1.1. Uso de biocombustibles y principales preocupaciones durante cuatro épocas históricas (Singh y col., 2019)

Periodo de tiempo	Principal preocupación	Uso del biocombustible
Mediados del siglo XIX	-	Como lámpara principal y combustible de cocina
Alrededor del siglo XX	La calidad del combustible y el agotamiento del petróleo	Motor de combustión interna
Mediados del siglo XX	La política petrolera internacional encabeza los embargos petroleros árabes (década de 1970) que estimulan la inversión nacional en seguridad energética	Motor de combustión interna
Principios del siglo XXI	Cambio climático, biodiversidad y sostenibilidad que enmarca ampliamente la investigación energética y los debates sobre políticas	Motor de combustión interna

Una de las grandes tareas para los países ha sido, desde hace algunas décadas, promover el desarrollo rural y la autosuficiencia. Ante tal objetivo, Alemania creó la primera industria de biocombustibles a gran escala del mundo, décadas antes de la Primera Guerra Mundial (London Times, 1902). El programa alemán de 1899 incluía la construcción de destilerías agrícolas, aranceles sobre el petróleo importado, la promoción de electrodomésticos con etanol e investigación sobre automóviles con combustible de etanol (Tweedy, 1917).

En la década de 1900, Alemania desarrolló una exhibición dedicada al automovilismo, los electrodomésticos y motores agrícolas que funcionan con alcohol (Lucien y col., 1902). Para 1904 la exhibición viajó hacia Francia, Italia y España, y entre 1907 y 1908 se dirigió a EE. UU. (Lucke y Woodward, 1907).

En 1914, la defensa británica, creó un comité de combustible de alcohol (London Times, 1914), para motores que se encargó de considerar la fuente de suministro y, el método de fabricación y costos de producción del combustible de alcohol (Fox, 1924). Para 1921, el comité concluyó que el alcohol era un combustible

probable en términos de costo en comparación con el petróleo en áreas tropicales y remotas del mundo (London Times, 1921). Antes de la Primera Guerra Mundial, el Ministerio de Agricultura Francés promovió su programa de combustible de etanol (relacionado con el crecimiento de la importación de petróleo ruso y estadounidense sobre el aumento del excedente de otros cultivos), lo que llevó a una mayor producción de etanol francés, de 10.2 a 31.4 millones de litros desde 1900 hasta 1905 (Sing y col., 2019).

En febrero de 1923, después de la Primera Guerra Mundial, fue aprobado el Artículo Seis sobre la base de la recomendación del comité francés, que requería que los importadores de gasolina compraran alcohol por mezclas al 10% del servicio estatal de alcohol (Fox, 1924). En 1935 la tasa de utilización de biocombustibles estaba en su punto máximo, 406 millones de litros, que representaron el 7% de todo el uso de combustible, pero debido a una mala cosecha se redujeron a 194 millones de litros en 1937 (Egloff, 1939).

En la Tabla 1.2, se presentan perspectivas históricas de diversos biocombustibles. Como reflejo del acelerado crecimiento en la población se ha propiciado un aumento en el consumo energético, lo que ha llevado a expertos en la materia a estimar un incremento del 50% en la demanda de energía, lo que ha obligado al ser humano a desarrollar metodologías alternativas para satisfacer las necesidades futuras sin dañar el medio ambiente (Grande Tovar, 2012).

1.2 Tipos de biocombustibles

Los biocombustibles pueden clasificarse de acuerdo con su producción, de esta forma se pueden encontrar biocombustibles de primera generación, de segunda generación y de tercera generación. Además, debido a su forma física, es posible encontrarlo en los tres principales estados de la materia, comercialmente disponibles es forma sólida, líquida y gaseosa (Maciel, 2009).

1.2.1 Biocombustibles de primera generación

Actualmente los biocombustibles de primera generación han alcanzado una etapa de producción comercial, generalmente provenientes de cultivos alimenticios. Los biocombustibles de primera generación emplean materias primas agrícolas como insumos para su producción, como, por ejemplo, el etanol con la caña de azúcar y el biodiésel con los aceites vegetales. En la Tabla 1.3 se describen las tecnologías de producción de los biocombustibles de primera generación (Babu y col., 2013).

Tabla 1.2. Historia de los biocombustibles (modificado de Singh y col., 2019)

Periodo de tiempo	Evento
Principios de 1970	Lámparas alimentadas con aceite vegetal y grasas, para la iluminación
1800	Aceite de ballena, manteca de cerdo y canfeno preferidos como aceite de lámpara
1830	Aceite de ballena reemplazado por etanol mezclado con trementina como iluminante
1862	El congreso de los EE.UU. aumentó los impuestos sobre el alcohol, lo que dio lugar a un impuesto para la industria petrolera
Alemania	
1899	Se inicia la investigación sobre camiones y automóviles alimentados con etanol
1902	El gobierno promovió los electrodomésticos a base de etanol
1901 - 1904	La exposición viaja a Francia, Italia y España
1917	Alexander Graham Bell citó el etanol como "hace un hermoso, limpio y eficiente combustible" que se puede fabricar a partir de cualquier materia vegetal capaz de fermentar
Gran Bretaña	
1914 - 1921	Una escasez de recursos petroleros generó interés en los biocombustibles. Se creó el comité para combustibles de alcohol, que concluyó que el costo del alcohol lo convertía en un combustible probable en áreas tropicales y remotas del mundo
1935	El uso de biocombustibles alcanzó un máximo de 1,536 millones de litros
Biocombustibles para Motores de Combustión Interna	
1826	Samuel Monrey desarrolló el primer motor de combustión interna auténtico que funcionaba con etanol y trementina
1860	Nicholas August Otto utilizó una mezcla de combustible de etanol como combustible en el motor
1893	Rudolph Diesel imaginó el potencial del aceite vegetal puro para impulsar máquinas e inventó los motores diésel de encendido por compresión
1906 - 1925	Henry Ford mencionó el alcohol etílico como "combustible del futuro" y lo utilizó para propulsar tractores y sus autos modelo T
1917	Alexander Graham Bell destacó la abundancia de materia prima potencial para la producción de etanol
1917 – 1919	Aumento de la demanda de etanol por racionamiento de materias primas durante la Primera Guerra Mundial
1941 – 1945	Metanol utilizado como combustible en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial
Crisis energética de 1970 a 2000	
1973	Crisis energética que tuvo lugar cuando los países árabes redujeron la producción de petróleo en un 5%, lo que provocó un aumento en los precios del petróleo
1978	Crisis energética ocurrida cuando la disidencia iraní realizó una huelga en las refinerías de petróleo de la nación, cerrando el 5% de las exportaciones de petróleo del mundo
Décadas de 1980 a 2000	
1989	Semilla de colza utilizada para la producción de biodiésel en la primera planta de biodiésel del mundo
1996	Procesamiento de grasas residuales en biodiésel a escala comercial
2008 - 2011	La producción estadounidense de etanol y biodiésel aumentó más del 40%
2000 - 2013	La producción comercial mundial de etanol aumentó de 17.03 a 88.57 mil millones de litros. La producción de biodiésel aumentó de 806 a 2,377 millones de litros
2013	Entra en funcionamiento la primera planta de etanol celulósico a escala comercial en todo el mundo

Tabla 1.3. Tecnologías para producir biocombustibles de primera generación (Babu y col., 2013)

Tipo de biocombustible	Nombre específico	Materia prima	Tecnologías de conversión
Biodiésel	Biodiésel de cultivos energéticos: ésteres metílicos y etílicos de ácidos grasos	Cultivos oleaginosos (haba, soja, colza, palma, etc.)	Extracción de prensado en frío y en caliente, purificación, transesterificación
Etanol	Biodiésel de desechos Etanol convencional Etanol con almidón	Aceite comestible de desecho Remolacha azucarera, caña de azúcar Maíz, trigo y otros granos	Hidrogenación Fermentación directa de jugo Hidrólisis enzimática, fermentación

Entre los biocombustibles de primera generación más predominantes se encuentran el etanol, el éster metílico de ácidos grasos (biodiésel o por sus siglas en inglés, fatty acid methyl ester, FAME) y el aceite vegetal puro (AVP o por sus siglas en inglés, pure plant oil, PPO) (Babu y col., 2013).

1.2.2 Biocombustibles de segunda generación

A diferencia de los biocombustibles de primera generación, que emplean almidones, azúcares o aceites fácilmente extraíbles. Los biocombustibles de segunda generación no emplean fuentes comestibles como materia prima, sino que exploran una gama mucho más amplia. Un ejemplo de ello es el etanol producido a partir de biomasa lignocelulósica de diversas fuentes no comestibles utilizando las partes de la biomasa (Babu y col., 2013).

Las materias primas pueden ser residuos agrícolas como paja y rastrojo, residuos de la silvicultura o cultivos de biomasa como pastos (pasto varilla) y madera de la silvicultura de rotación corta. Estas materias primas pueden convertirse en biocombustibles mediante rutas bioquímicas utilizando enzimas y/o microorganismos, incluidos microorganismos modificados genéticamente que se han desarrollado específicamente para este propósito (Foster-Carneiro y col., 2010). A pesar de que los biocombustibles de segunda generación no entran en el dilema “combustible versus alimento”, aún compiten por el uso de tierras agrícolas (Rathmann y col., 2010).

1.2.3 Biocombustibles de tercera generación

Los biocombustibles de tercera generación provienen de algas e hidrógeno producido a partir de biomasa lignocelulósica, además no requieren del uso de tierras para ser producidos. Sus tecnologías emplean rutas de reformado catalítico para convertir el azúcar, almidón y todas aquellas formas de lignocelulosa en compuestos de cadena corta específicos. Cabe señalar que son tecnologías aún en desarrollo, se espera que tengan éxitos de producción a gran escala en el mediano y largo plazo (Babu y col., 2013).

1.2.4 Biocombustibles de cuarta generación

El concepto de biocombustible de cuarta generación, también denominado biocombustibles de algas de cuarta generación o biocombustibles de fotosíntesis, es reciente. Se prevé que el avance en los biocombustibles de algas se producirá mediante la ingeniería metabólica de microorganismos fotosintéticos para producir y segregar biocombustible. La tecnología de cuarta generación combina materias primas genéticamente optimizadas, diseñadas para capturar grandes cantidades de carbono, con microorganismos sintetizados genómicamente, que se desarrollan para producir combustibles eficientemente. Este proceso tiene como clave la captura y el secuestro de CO₂, haciendo al biocombustible de cuarta generación una fuente de combustible con carbono negativo, es decir, eliminan el carbono que producen (Nogueria, 2011; Daroch y col., 2013; Hallenbeck, 2011).

El proceso disminuye significativamente el costo de producción de biocombustible al reducir los costos de separación y procesamiento de biomasa asociados (Daroch y col., 2013; Hallenbeck, 2011).

Por otro lado, la forma física del biocombustible es otro factor que permite clasificarlos, en la Tabla 1.4 se muestran algunos tipos de biocombustibles encontrados en estado sólido, líquido y gaseoso (Salinas y Gasca, 2009).

Tabla 1.4. Tipos de biocombustibles por estado físico (Salinas y Gasca, 2009)

Estado Sólido	Estado Líquido	Estado Gaseoso
Paja	Alcoholes	Gasógeno
Leña sin procesar	Biohidrocarburos	Biogás
Astillas	Aceites vegetales	Hidrógeno
Briquetas ¹ y pellas ²	Ésteres derivados de aceites	
Triturados finos	vegetales	
Carbón vegetal	Aceites pirólisis	

¹ Las briquetas o bloque sólido es un combustible para la estufa o chimenea, en forma de ladrillo, que sustituye la leña. El bloque sólido combustible es una alternativa a la leña en variadas aplicaciones que consumen grandes cantidades de madera

² Los pellas se refieren a pequeñas porciones de aserrín comprimido utilizadas como combustible.

1.2.5 Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles líquidos son de los más empleados en la actualidad (Salinas y Gasca, 2009). Los biocombustibles líquidos más importantes se mencionan a continuación.

1.2.5.1 Etanol

El etanol es producido entre otras fuentes a partir de la caña de azúcar, la remolacha azucarera y el maíz, así como la yuca y materiales celulósicos (pastos, árboles o productos de desecho de cultivos). Se puede mezclar con combustibles convencionales en diversos porcentajes, una de las proporciones suministradas más común es del 10%, es decir un 10% de etanol y 90% de gasolina. En el año 4000 a.C. los humanos, empleando la fermentación, fabricaban alcohol como bebida a partir de cereales, bayas y uvas, entre otras. Desde la antigüedad, el aceite de oliva y varios aceites derivados de plantas y animales se han empleado en lámparas de aceite (Arsuf y Sussman, 1983). Durante la década de 1970, las lámparas eran alimentadas por aceite vegetal y grasas, y durante la década de 1800, se prefirió el aceite de ballena hasta que Abraham Gesner desarrolló un método moderno para refinar el queroseno en 1846 (Russell, 2003). A finales de la década de 1830, debido a una disminución en el suministro de aceite de ballena, se empleó el etanol mezclado con trementina. Antes del descubrimiento del petróleo por Edwin Drake en 1859, el etanol se desarrolló como combustible alternativo (Kovarik y col., 1998). Para financiar la Guerra Civil, el Congreso estadounidense fijó un impuesto de \$11.34 pesos mexicanos por litro de etanol en 1862, que continuó mucho más allá de la conclusión de la guerra. Este impuesto encareció más al etanol que la gasolina, favoreciendo el uso de la gasolina para el motor de combustión interna (MCI) (Dimitri y Effland, 2007). Incluso después de derogar el impuesto en 1906, la infraestructura del etanol tuvo complicaciones para competir con la gasolina (Singh y col., 2019).

En la década comprendida entre 1920 y 1930, Henry Ford promovió un nuevo movimiento llamado quimiurgia, centrada en la utilización de cultivos en materiales de base biológica, movimiento desprendido de la necesidad de producir caucho durante el inicio de la Segunda Guerra Mundial, teniendo al etanol como prioridad. Para 1942, se utilizó etanol para producir casi el 77% del caucho sintético en EE. UU. (Finlay, 2004).

Hoy en día la gran dependencia hacia el petróleo crudo ha suscitado enormes impactos socioeconómicos y ambientales. Para 1973, hubo un resurgimiento del interés por el etanol como combustible derivado de la crisis petrolera. En el año de

1979, en la Universidad de Dakota del Sur, fue establecida la primera planta piloto de etanol con una columna de destilación (Songstad y col., 2009). Debido al embargo de exportación de petróleo de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) en 1973 y la revolución iraní de 1979, la escasez sustancial y los vertiginosos precios afectaron gravemente las economías de los principales países industriales, incluyendo los EE. UU., Europa Occidental, Japón, Canadá y Australia (Lifset, 2014).

Al ser, el etanol, un biocombustible de primera generación, compite con la alimentación humana y animal por la materia prima. Además, para reducir sus efectos adversos, se han explorado materiales vegetales lignocelulósicos no alimentarios (residuos de cultivos, desechos de procesamiento de alimentos, tala de bosques, recortes de jardín y desechos orgánicos) para fabricar etanol de “segunda generación”. Se pueden utilizar varios materiales lignocelulósicos ampliamente disponibles como materia prima para producir etanol, y para la extracción de azúcares simples en biomasa lignocelulósica se puede utilizar hidrólisis ácida y enzimática (Badger, 2002). A través de la planta piloto se produjeron 825,220 litros de etanol celulósico en 2013 (IEA, 2013). El 9 de octubre de 2013, entró en funcionamiento la primera planta de etanol celulósico a escala comercial de todo el mundo, la biorrefinería Crescentino (en Crescentino, Vercelli, Italia) con la producción comercial de etanol celulósico en el futuro, impulsando la producción de etanol a nivel mundial como alternativa a la gasolina (Singh y col., 2019).

1.2.5.2 Biodiésel

La combinación de aceites de origen orgánico con alcohol (etanol o metanol) en presencia de un catalizador para formar éster etílico o metílico propicia la formación de biodiésel, este puede ser usado como combustible puro o mezclarse con diésel convencional (Maniatis, 2003). Una gran variedad de materias primas, como aceite de semilla de mostaza, aceite de palma, girasol, colza, soja y jatropha, maní y semilla de algodón, pueden ser utilizada para la producción de biodiésel (Singh y col. 2019).

A fines del siglo XVIII, antes de la invención de las luces eléctricas y del gas, se usaban aceites vegetales y grasas animales para encender lámparas de aceite (Thompson, 2003). En 1893, el ingeniero alemán Rudolph Diesel imaginó el potencial del aceite vegetal puro para alimentar máquinas en la agricultura y, por lo tanto, inventó el motor diésel de encendido por compresión. En la Feria Mundial de 1900 en París, la compañía francesa Otto, realizó una demostración de un motor diésel de aceite de maní, tal como lo describe Knothe (Knothe, 2001).

Desde la década de 1950, debido a factores geográficos y económicos, ha existido un gran interés en convertir el aceite vegetal en biodiésel. El primer proceso a escala industrial para la producción de biodiésel fue desarrollado en 1977 por el científico brasileño Expedito Parente. En 1989, la colza se utilizó para la producción de biodiésel en la primera planta de biodiésel a escala industrial del mundo, operada en Asperhofen, Austria. El procesamiento de la grasa residual en biodiésel se realizó comercialmente por Pacific Biodiesel, en 1996 en la localidad de Maui, Hawaii, EE. UU. (Singh y col., 2019).

En el mercado mundial, el biodiésel ganó popularidad como lo demuestra su alta producción (de 806 millones a 23,806 mil millones de litros de 2000 a 2013) y debido a una mayor conciencia sobre la seguridad energética, los subsidios fiscales del gobierno y los altos precios del petróleo extranjero después de 2001 (IEA, 2014).

1.2.6 Biocombustibles sólidos

Desde el descubrimiento del fuego, el hombre ha utilizado biocombustibles en forma sólida, con fines domésticos como la leña. Antes del siglo XIX, la leña era el principal combustible del mundo para cocinar y calentar (Babu y col., 2013). A principios del siglo XX, la chimenea de leña, el calentador y la estufa eran equipos domésticos estándar en los EE. UU. En la actualidad con un consumo anual que ronda los 1,730 millones de metros cúbicos, casi 2,600 millones (40%) de la población mundial (principalmente en zonas rurales de los países en desarrollo de Asia y África subsahariana) dependen de la leña para satisfacer sus necesidades energéticas (FAO, 2013; IEA 2013). El consumo de leña ha aumentado ligeramente, alrededor del 3%, durante los últimos 13 años, y se proyecta que el consumo mundial de leña se mantenga constante en el futuro. Por otro lado, las astillas de madera (pequeños trozos de madera de la tala de troncos y ramas de árboles) se han utilizado cada vez más para el bioalentamiento (calefacción) y la bioenergía (generación de electricidad) desde principios del siglo XXI. Los biocombustibles sólidos, en su mayoría, son empleados para calentar espacios mediante combustión (DOE, 2000).

Los productos de biocombustible más procesados son pellas de madera que se fabrican triturando trozos de madera en aserrín a través de un molino de martillos, para 2012, su producción llegó a 19.1 millones de toneladas y se estima que aumente a 45.2 millones de toneladas en 2020 (Van Tilburg, 2013).

Un importante biocombustible sólido empleado es el carbón vegetal, utilizado por los humanos en la metalurgia para fundir minerales de hierro y cobre desde la edad del Bronce en 3000 a.C. Durante el año 700 d.C., en la dinastía Tang de China, el carbón vegetal era el combustible gubernamental designado para cocinar

y calentar. Durante la Segunda Guerra Mundial, en Europa, el gas de madera, generado por carbón vegetal parcialmente quemado, se utilizó para impulsar automóviles, debido a la escasez de gasolina (De Decker, 2010).

1.2.7 Biocombustibles gaseosos

Los biocombustibles gaseosos se obtienen de las mezclas de gases combustibles como el metano, monóxido de carbono y el hidrógeno, por diferentes vías (Cerutti-Masera y col., 2011).

1.2.7.1 Biogás (biometano)

El biogás es un biocombustible gaseoso renovable generado por la degradación anaerobia de desechos orgánicos, es un combustible alternativo al gas natural. Es común producirlo a partir de materia prima de aguas residuales, desechos orgánicos, estiércol animal y lodos de cultivos dedicados a la energía verde como el maíz, la hierba y el trigo. A escala comercial, el gas natural fue inicialmente explotado en 1821 en Fredonia, Nueva York, para iluminación (DOE, 2013). Ya en el siglo X a.C. en la antigua Asiria, los humanos utilizaban biogás para calentar el agua del baño. La degradación anaerobia de estiércol animal para gas inflamable ya se practicaba en buena manera hace 2000 años, por personas en India y China (Lusk, 1998). El químico inglés Sir Humphry Davy identificó el metano como el gas inflamable de los estanques de estiércol de ganado en 1808. En 1859 en Bombay, se construyó la primera planta de degradación anaerobia registrada. En 1895, se recogió biogás de una instalación de tratamiento de aguas residuales de Exeter, Inglaterra, para encender farolas. En la década de 1950, con el fin de proporcionar biogás para cocinar e iluminar, China construyó alrededor de 3.5 millones de sistemas anaerobios de baja tecnología en las zonas rurales, que han aumentado a 45 millones en 2012 (Xia, 2013). Además, Alemania generó 18,200 millones de kWh de electricidad operando 6,800 plantas de biogás, convirtiéndose en el país líder en satisfacer la demanda nacional de gas natural. En 2012, para convertir los residuos agrícolas, industriales y municipales en biogás, Europa había instalado 8,960 residuos biológicos, predominantemente agrícolas (Stephan, 2013). A menudo, el biogás es empleado para generar calor y electricidad.

Para finales de la década de 1970, con incentivos financieros del gobierno federal para la producción de biogás, EE. UU., comenzó a instalar sistemas de digestión a base de estiércol en las granjas ganaderas. Se ha presentado un aumento en el número de plantas de biogás agrícolas en funcionamiento desde 2000, generando 9,100 millones de kWh de electricidad en 2012 en los EE. UU. (Stephan, 2013). China es, actualmente, el mayor productor de biogás del mundo con una generación de 6 mil millones de metros cúbicos de metano por año (Rajgor, 2013).

El potencial mundial de biogás es bastante notable y, con una mayor conciencia pública sobre el biogás y la degradación anaerobia, podría desempeñar un papel crucial en el sector de la bioenergía en general. La gasificación o pirólisis de materiales vegetales produce gas de síntesis, un biocombustible gaseoso, que con 144 plantas de gasificación operando alrededor del mundo en 2010, su investigación y desarrollo adicionales conducirán a una mejora en la rentabilidad de la preparación de la materia prima y ayudarían a lograr la viabilidad económica de la producción de biogás (Singh y col., 2019).

El biometano, producido mediante la eliminación de CO₂ y sulfuro de hidrógeno (H₂S) del biogás, puede ser empleado como combustible en vehículos y ser suministrado a la red de gas natural, además puede emplearse para producir calor y generar electricidad (Babu y col., 2013). Este biocombustible gaseoso es el más limpio y ecológico de todos los biocombustibles renovables.

1.2.7.2 Hidrógeno

El hidrógeno es denominado el combustible del futuro. Ha sido considerado una buena fuente de energía gracias a su alta densidad energética y sostenibilidad. El hidrógeno es empleado para producir productos químicos, así como para la hidrogenación de grasas y aceites en la industria alimentaria para la producción de margarina, el procesamiento del acero y, para la desulfuración y reformulación de gasolinas en refinerías. El hidrógeno presenta algunas desventajas como la dificultad para ser almacenado y dispersarlo de manera fácil y económica, como sería necesario en aplicaciones comerciales generalizadas (Kapdan y Kargi, 2006; Kotay y Das, 2008; Eroglu y Melis, 2011; Kirtay, 2011).

Emplear el hidrógeno como fuente de energía podría contribuir en la preservación del medio ambiente, la eficiencia energética y la calidad del aire. Es una alternativa relevante a los combustibles fósiles actuales gracias a su facilidad de conversión en energía eléctrica mediante pilas de combustible o quemado y convertido en energía mecánica sin una producción excesiva de CO₂ (Babu y col., 2013).

1.2.7.3 Gas de síntesis

El gas de síntesis es un derivado de la biomasa mediante procesos termoquímicos como la gasificación. Esta gasificación de la biomasa no es más que la combustión incompleta de la biomasa, propiciada por un nivel bajo de oxígeno, para producir CO, CO₂ y H₂ en lugar de CO₂ y agua. Este proceso implica reacciones y etapas de superpuestas, secado, pirólisis, gasificación del carbón y oxidación. La conversión ocurre, regularmente, a temperaturas elevadas (500 °C – 1,400 °C), así como presiones que van desde la presión atmosférica y 3 MPa. Se

emplea un oxidante: aire, oxígeno puro, vapor o una mezcla de estos gases. Considerando que los gasificadores operan en un lecho fijo o flujo arrastrado, este método se ve fuertemente favorecido por los catalizadores; siendo la dolomita, el álcali (metal) y el níquel los más comunes (Sharara y col., 2012).

El gas de síntesis es empleado, entre otras cosas, para la combustión directa en calderas, turbinas o motores de combustión interna, generar electricidad, calor o ambos (Sharara y col., 2012).

El despliegue de vehículos de gas natural ha comenzado a crecer rápidamente, en especial durante la última década, alcanzando participaciones de alrededor de 25% de la flota total de vehículos en países como Bangladesh, Armenia y Pakistán (IEA, 2011).

1.3 Biocombustibles para uso en vehículos

Los biocombustibles comenzaron a producirse a finales del siglo XIX, cuando el etanol se derivó del maíz y el primer motor de Rudolf Diesel funcionó con aceite de maní. No fue hasta la década de 1940 que los biocombustibles se consideraron viables para su uso en transporte, pero debido a una caída en los precios de los combustibles fósiles se detuvo su desarrollo (Babu y col., 2013).

Se espera que, para el año de 2030, el sector del transporte tenga un aumento en la demanda del 60% a nivel global, por tal motivo sustitutos como el biodiésel y el etanol podrían alcanzar el 12% de la demanda energética del sector de transporte en los países desarrollados y alrededor del 8% en países en desarrollo (Fischer y col., 2009). Ante el inminente aumento de la demanda energética en el sector transporte, se requiere garantizar 2 cosas, la primera, contar con la cantidad necesaria de combustibles para atender las necesidades de movilidad, la segunda, contribuir con un cuidado más adecuado del medio ambiente, reduciendo las emisiones de GEI derivadas de la quema de combustibles fósiles. Por otra parte, se debe tener claro que la escasez del petróleo está asegurada, debido a que no es un recurso renovable, lo que hace cada vez más difícil su extracción. Por tal motivo la búsqueda de novedosas alternativas que garanticen una eficiencia energética similar a las brindadas por los combustibles fósiles debe ser prioridad. Ante esta situación se destaca el uso de biocombustibles gracias a que son capaces de sustituir los combustibles fósiles sin necesidad de realizar grandes cambios en el parque vehicular (Rico, 2006).

Hoy en día se debe dar un giro al modelo energético, con el fin de independizar nuestra movilidad de las fuentes fósiles, pero sin pasar por altos todos aquellos aspectos que se ven involucrados en el desarrollo de esta tarea, para evitar que desencadenen más desventajas que beneficios. La participación conjunta de los países hace que este escenario llegue a ser una realidad. En el mundo hay países

con un mercado de biocombustibles altamente desarrollado, como es el caso de Brasil y los EE. UU., de los que se puede aprender para consolidar la industria bioenergética (Rico, 2006).

Es claro que el mercado potencial de los biocombustibles depende de la demanda de los combustibles fósiles requeridos en el transporte y de las posibilidades tecnológicas de los motores para admitir las mezclas con tales motores (Rodríguez y col., 2008).

Como un antecedente, en el año 2005, el etanol representó cerca del 2% del mercado mundial de gasolinas y el biodiésel representó el 0.2% del mercado del diésel. A partir de ese año, los biocombustibles han tenido una gran expansión. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, se espera que la demanda de combustibles para el transporte se incremente de manera importante. Con esto se espera que para 2030, se tenga un crecimiento del 55% respecto a la demanda de 2004, esto respecto a un escenario de referencia, mientras que en un escenario de política alternativa se espera un crecimiento del 38%. A su vez, la expansión prevista para la porción de mercado de los biocombustibles en el transporte automotor se expandiría desde un 1% a un 4% en 2030 en el escenario de referencia; y del 7% en el escenario de política alternativa (Rodríguez y col., 2008).

De acuerdo con este análisis prospectivo, los ritmos de expansión anual promedio serían de 7% y 9% respectivamente en los escenarios de referencia y alternativo. Los mayores incrementos en los mercados de biocombustibles se esperan en los EE. UU. y en Europa, que ha superado a Brasil desde 2010. Esta participación se aprecia en la Figura 1.1 (Rodríguez y col., 2008).

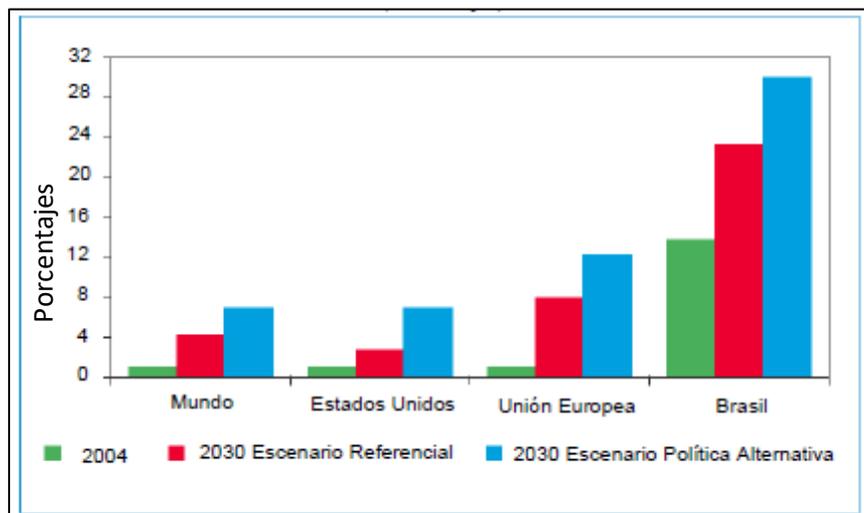


Figura 1.1 Participación de los biocombustibles en el transporte carretero en porcentajes (Rodríguez y col., 2008)

En la Tabla 1.5 se aprecia el consumo mundial de biocombustibles en los Escenarios Referencial (ER) y Escenario de Política Alternativo (EPA) (Rodríguez y col., 2006).

Tabla 1.5. Consumo mundial de biocombustibles en Escenario Referencial (ER) y Escenario de Política Alternativa (EPA) (IEA, 2006)

	Año base 2004	2010		2015		2030	
		(ER)	(EPA)	(ER) Mtoe	(EPA)	(ER)	(EPA)
OECD	8.9	30.5	34.7	39.0	51.6	51.8	84.2
Norteamérica	7.0	15.4	17.4	20.5	28.8	24.2	45.7
EE. UU.	6.8	14.9	16.4	19.8	27.5	22.8	42.9
Canadá	0.1	0.6	1.0	0.7	1.3	1.3	2.8
Europa	2.0	14.8	16.4	18.0	21.5	26.6	35.6
Pacífico	0.0	0.3	0.8	0.4	1.4	1.0	2.9
Economías de transición	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5
Rusia	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5
Países en desarrollo	6.5	10.9	14.0	15.3	21.1	40.4	62.0
Asia en desarrollo	0.0	1.9	4.6	3.7	8.5	16.1	32.8
China	0.0	0.7	1.2	1.5	2.7	7.9	13.0
India	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	2.4	4.5
Indonesia	0.0	0.2	0.3	0.4	0.6	1.5	2.3
Medio Oriente	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.6
África	0.0	0.6	0.7	1.1	1.2	3.4	3.5
África del Norte	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.6	0.5
América Latina	6.4	8.4	8.6	10.4	11.2	20.3	25.1
Brasil	6.4	8.3	8.6	10.4	11.0	20.3	23.0
Mundo	15.5	41.5	48.8	54.4	73.0	92.4	146.7
Unión Europea	2.0	14.8	16.4	18.0	21.5	26.6	35.6

En Brasil, la caña de azúcar es la principal fuente de energía renovable, proporcionando alrededor del 15% del consumo total de energía. La industria de la caña de azúcar en Brasil suministra calor, energía y etanol. El etanol proporciona una parte significativa del requerimiento de combustible líquido en el país (42%), debido a una mezcla obligatoria de etanol del 25% en gasolina. El 55% de la flota de transporte son vehículos de combustible flexible y automóviles impulsados por etanol hidratado. Los propietarios de automóviles Flex pueden elegir entre el

etanol o la gasolina, pero la elección depende de los precios del etanol y la gasolina (Nelson y Starcher, 2017).

Los vehículos de combustible flexible funcionan con más de un combustible (gasolina con etanol o metanol). Los vehículos de combustión flexible de América del Norte y Europa están optimizados para funcionar con E85, una mezcla de 85% de etanol y 15% de gasolina (Rico, 2006). En EE. UU., propietarios de autos que emplean biodiésel casero deben pagar todos los impuestos carreteros, en contraste, en 2014, los vehículos eléctricos no están pagando dichos impuestos por el uso de las carreteras, es por ello, que se está buscando la manera en que se realicen estos pagos. El gas natural comprimido (GNC) está disponible, comercialmente, para algunas flotas y autobuses en un 12% a 15% en EE. UU., mientras que en Argentina está ampliamente disponible, por lo que allí si se emplea en automóviles (Nelson y Starcher, 2017).

En los EE. UU., el modelo de gas natural Honda Civic dejó de estar disponible en el mercado debido a bajas ventas derivadas de la falta de estaciones de servicio. Otros promocionan al hidrógeno como el combustible del futuro, debido a que las celdas de combustible son más eficientes que el motor de combustión interna. Por tal motivo, algunos fabricantes han optado por fabricar un pequeño número de vehículos de celda de combustible para arrendar en mercados seleccionados y ponerlos en venta en 2016. Además, se cuenta con vehículos eléctricos puestos en venta, disponibles a través de diversos fabricantes, incluyendo los fabricantes de vehículos tradicionales (Nelson y Starcher, 2017).

El bioaceite es producido mediante un proceso denominado pirólisis rápida, en el proceso se convierte los compuestos de biomasa en un combustible líquido pesado. El bioaceite tiene un poder calorífico, aproximadamente, de la mitad que la gasolina convencional. No representa riesgos para la salud, el medio ambiente o la seguridad. El bioaceite obtenido por este método, es más adecuado para el transporte a larga distancia que la paja o las astillas de madera.

Los bioaceites son sistemas complejos multidispersados que contienen una gran cantidad de agua, ácidos carboxílicos, carbohidratos y sustancias derivadas de la lignina. Esto arroja propiedades no deseadas, como acidez, inestabilidad térmica, alto contenido de oxígeno (35% - 40%), bajo poder calorífico, alta viscosidad, corrosividad e inestabilidad química, propiedades que limitan su aplicación como combustible para vehículos. Es por tal motivo que las investigaciones actuales se están centrando en la conversión del aceite de pirólisis en biocombustibles avanzados. Esta conversión de bioaceite a combustible de transporte convencional como diésel, gasolina, queroseno, metano y GLP, requieren de una desoxigenación total, así como de un refinado convencional, que se puede lograr

con la pirólisis catalítica integrada, hidrotratamiento, esterificación, gasificación, mezcla u otros procesos (Bridgwater, 2012; Butler y col., 2011; Chen y col., 2011).

1.4 Mercado de los biocombustibles

Los biocombustibles disponibles comercialmente son producidos, casi en su totalidad a partir de cultivos alimentarios como la caña de azúcar, remolacha azucarera, maíz y semillas oleaginosas; por lo que las políticas de la producción de biocombustibles repercuten en los mercados de bienes relacionados con la producción de biocombustibles (Sorda y col., 2010). Para tener certeza en la viabilidad del uso de biocombustibles es claro que se debe pasar de las pruebas en laboratorios a realidad comercial (Bothast, 2005).

Los biocombustibles adquirieron interés tras la crisis petrolera de la década de 1970. Bajo este contexto, los biocombustibles se consideraron una alternativa atractiva desde el punto de vista económica, social y ambiental (Cremones y col., 2015). La Unión Europea menciona que los principales motivos para desarrollar los biocombustibles son garantizar la seguridad energética, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover el desarrollo de la agricultura rural (Su y col., 2015)

En la Figura 1.2 se aprecia el comportamiento del mercado de los biocombustibles donde se aprecia la distribución de participación de los principales países (Carvalho y Torroba, 2021).

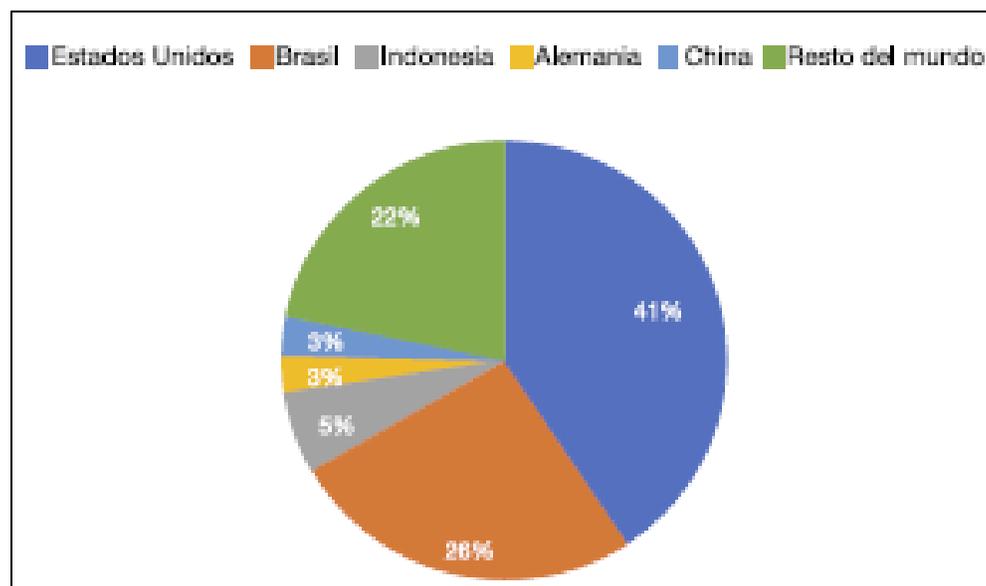


Figura 1.2 Distribución porcentual de biocombustibles líquidos en 2020 (Carvalho y Torroba, 2021)

Haciendo referencia en producción de biocombustibles líquidos a nivel mundial. En la Figura 1.3 se brinda una representación de la producción de biodiésel. Mientras que en la Figura 1.4 se aprecia la producción de etanol (Carvalho y Torroba, 2021).

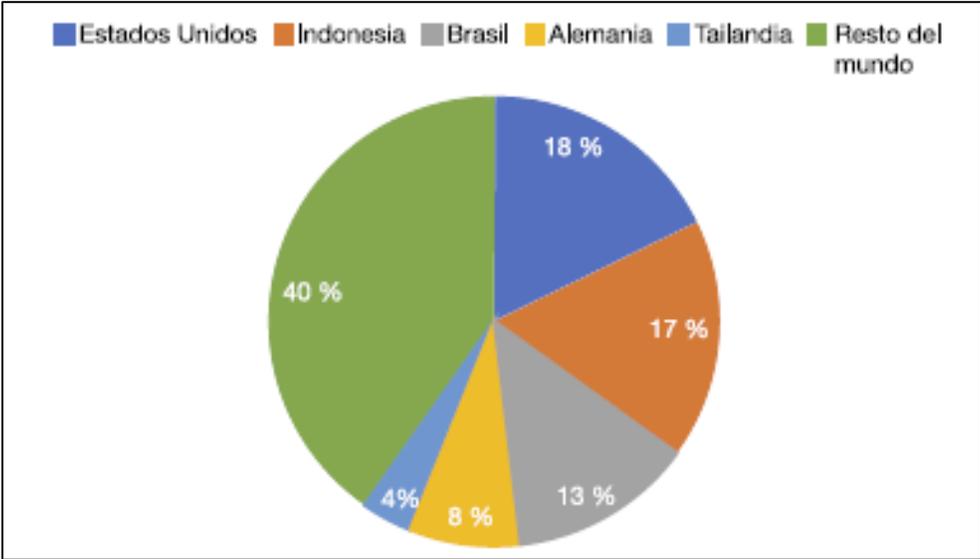


Figura 1.3 Distribución porcentual de biodiésel en 2020 (Carvalho y Torroba, 2021)

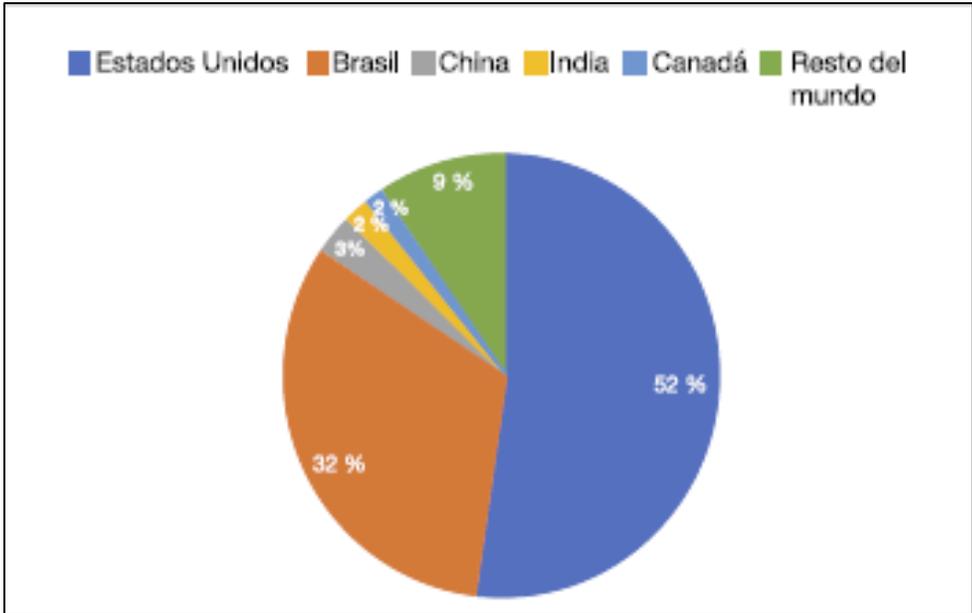


Figura 1.4 Distribución porcentual de etanol en 2020 (Carvalho y Torroba, 2021)

Las principales razones de los países para de producir energía verde son la voluntad o necesidad de reducir la dependencia existente hacia los combustibles fósiles (seguridad energética), reducir las emisiones de GEI y aumentar la demanda de ciertos productos agrícolas. Es claro que estas razones son puestas

en duda, por ejemplo, la seguridad energética se cuestiona al mencionar la ejecución de otras formas de energía renovable, como lo son la energía eólica o solar. Un alza en precios de los productos básicos puede llevar a cultivar más tierra o intensificar los procesos de producción generando un aumento en las emisiones de CO₂ del sector agrícola, algo que puede compensar la reducción de GEI obtenida de un aumento en el consumo de biocombustibles (Cerutti-Mesera y col., 2011).

Desde el año de 1922, Argentina ha desempeñado una buena tarea en la promoción del uso de biocombustibles. En el año 1979, varios fabricantes de automóviles ayudaron a crear el programa “Alconafta”, primer programa de uso de etanol, programa que para 1985 integraba en su totalidad la región noroeste del país. Se pretendía realizar una segunda fase que promoviera las exportaciones de azúcar, pero para principios de la década de 1990 el programa se extinguió, debido a una serie de cosechas pérdidas, un alto precio internacional de azúcar y desfavorables condiciones de mercado. Para 2001, el gobierno argentino buscó restablecer el programa “Alconafta”, con ayuda en el Programa Nacional de Biocombustibles (Resolución 1076/2001) y del Plan de Competitividad del Biodiésel (Decreto 1396/2001). Para 2006, el gobierno tomó la decisión de englobar estos programas y planes dentro de la Ley de Biocombustibles 26 – 093/2006, ley que busca promover un modelo de industria bioenergética semejante al brasileño (Maciel-Álvarez, 2009).

Costa Rica inició su industria de biocombustibles en 1974 con el Programa de Energías Renovables. Dicho programa tiene el objetivo de disminuir la dependencia energética del exterior. Para 1978, se instala la primera destilería de etanol a base de jugo de caña con lo que se comenzó a fomentar el uso y producción de etanol. Referente al biodiésel, el país comenzará a producirlo a corto plazo a partir de palma de azúcar y de algas verdes (Maciel-Álvarez, 2009).

A nivel global, Europa tiene una gran participación en el mercado de los biocombustibles. En 2008, se consumieron 7,694,097 toneladas de petróleo equivalente (TPE) de biocombustibles, cifra comprendida por un consumo de etanol de 1,166,243 TPE (2,235 millones de litros), un consumo de biodiésel de 774,207 TPE (7,326 millones de litros) y una cifra de 753,617 TPE de otros biocombustibles (Maciel-Álvarez, 2009).

El mercado asiático tiene grandes productores de biocombustibles, en 2007, los mayores productores de etanol fueron, China con 1,840 millones de litros, Tailandia con 300 millones de litros, India con 250 millones de litros, Turquía con 60 millones de litros y Paquistán con 35 millones de litros. Mientras que los principales productores de biodiésel son Indonesia con 760 millones de litros,

China con 338 millones de litros y Malasia con 150 millones de litros (Maciel-Álvarez, 2009).

China es el tercer mayor productor de etanol a nivel mundial y el segundo mayor productor de biodiésel en Asia. El 80% del etanol producido en China proviene del maíz, el 20% restante se produce de cosechas de trigo, sorgo, cassava y patata dulce (camote). Por otra parte, el biodiésel se produce a partir de aceites de cocina usados y grasas animales, debido a sus hábitos en la cocina se producen anualmente alrededor de 3 millones de toneladas de dichos aceites y grasas. La baja calidad del biodiésel obtenido hace difícil su uso en mezclas con diésel fósil para fin en el transporte (Maciel-Álvarez, 2009).

Japón está desarrollando una industria en materia de biocombustibles. En 2002, se publicó la Estrategia Nacional de la Biomasa (ENB, conocida como Biomass Nippon Strategy, BNS por sus siglas en inglés), estrategia que destaca el impulso de la industria de la energía alternativa. En el año 2005, el Banco Japonés para la Cooperación Internacional firmó un acuerdo con el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento de Brasil para establecer lineamientos de un programa unilateral con el que Japón importaría biocombustibles del país amazónico (Maciel-Álvarez, 2009).

En Paquistán se produce etanol a partir de caña de azúcar, mismo que se exporta hacia la Unión Europea y Suiza. En 2005, inició el mercado de los biocombustibles, cuando la Unión Europea impuso un arancel al etanol Paquistaní, disminuyendo las exportaciones hacia Europa y produciendo excedentes de alcohol en el país (Maciel-Álvarez, 2009).

En el continente africano, países como Etiopía, Malawi y Sudáfrica son importantes productores de etanol. En Etiopía el etanol se produce mediante la fermentación del jugo de caña de azúcar y se mezcla con queroseno en 50% (K50, sigla en inglés) para uso doméstico. Por otro lado, Malawi produce, desde 1982, etanol a partir de la melaza obtenida del procesamiento de la caña de azúcar, para ser mezclada con gasolina en un 12% (E12) para uso de transporte. Mientras que en Sudáfrica es producido se forma sintética desde la década de 1950 (Maciel-Álvarez, 2009).

Es claro que el mercado de los biocombustibles necesita un mayor desarrollo para ser una alternativa viable al uso de combustibles fósiles. En la actualidad los consumidores solo hacen uso de los biocombustibles si el gobierno compensa este costo o si se ven obligados a usarlos. Los biocombustibles requieren subsidios, tarifas, mandatos de combustibles y otros apoyos gubernamentales para la viabilidad económica. Por lo que, tanto el gobierno como los consumidores pagan una prima significativa para obtener los beneficios esperados de los

biocombustibles. Hay una gran cantidad de políticas para biocombustibles de EE. UU., incluidos los subsidios al consumo, los niveles mínimos obligatorios de consumo y los subsidios de producción, incluidas las materias primas, las barreras de importación y los estándares de sostenibilidad (Gardner y Tyner, 2007). En Asia, la producción de biocombustibles requiere un uso adicional de tierra, agua y fertilizantes.

Se debe considerar que el precio del biodiésel debe ser similar o incluso menor al precio del diésel, lo que hará que el precio del biodiésel dependa de la decisión política tomada al respecto. Además, es de gran relevancia considerar los beneficios ambientales, el desarrollo de los mercados de producción primaria y el sector industrial, otorgar valor agregado a los cultivos, ocupación de mano de obra, entre otras (Stratta, 2000).

La Tabla 1.6 muestra el precio de venta que tendría el biodiésel puro y la mezcla B20, con un costo de \$0.50 dólares por litro de biodiésel.

Tabla 1.6 Precios de venta del biodiésel, mostrado en pesos mexicanos (Stratta, 2000)

	Biodiésel puro 100%		Biodiésel mezcla 20%	
	Con impuestos (USD)	Sin impuestos (USD)	Con impuestos (USD)	Sin impuestos (USD)
Precio a la salida de la planta	0.50	0.50		
Impuestos Ing. Brutos	0.015	-		
IVA (21%)	0.10	-		
Impuesto a los combustibles	0.12	-		
Flete	0.06	0.06		
Margen de estación de expendio	0.06	0.06		
Precio de venta	0.855	0.62		
80% gas oil de 0.5 \$/L			0.400	0.400
20% biodiésel de 0.855 \$/L			0.171	-
20% biodiésel de 0.62 \$/L			-	0.124
Precio de venta			0.571	0.524

Con esto se aprecia que el biodiésel puro tendrá un costo de \$0.85 USD (\$17.1 MNX) por litro, una vez aplicados los impuestos, mientras que la mezcla de biodiésel B20 tendría un costo de \$0.57 USD (\$11.42 MNX) por litro de biodiésel.

La universidad del estado de Iowa en los EE. UU., calcula los costos de retorno mensuales por galón de etanol y por Bushel de maíz para una planta hipotética de Iowa. Utilizan el precio de mercado mensual para etanol, maíz, DDGS y gas natural. Debido al precio del etanol y del maíz, la rentabilidad es extremadamente variable (Nelson y Stracher, 2017).

Para el año 2014, en EE. UU., se apreciaron precios en el etanol de \$0.43 USD por litro y de \$0.39 USD por litro, para el etanol anhidro y el hidratado respectivamente. Mientras que en la Unión Europea se presentó un precio de entre €0.15 a €0.2 euros por litro de etanol (Nelson y Stracher, 2017).

En la Tabla 1.7 se aprecian los precios del etanol alrededor del mundo (Nelson y Stracher, 2017).

Tabla 1.7 Precios estimados de la producción de etanol en EE. UU. (Modificado de Nelson y Stracher, 2017)

Etapa	Millones de dólares	Dólares por galón
Materia prima (maíz)	20, 429	1.43
Enzimas, levaduras, químicos	981	0.07
Desnaturalizante	1, 201	0.08
Gas natural	2, 445	0.17
Electricidad	714	0.05
Agua	237	0.02
Mano de obra directa	866	0.06
Mantenimiento y reparaciones (O y M)	378	0.03
Transporte	109	0.01
Gastos de venta, generales y administrativos (SG y A)	451	0.03
Costos operativos totales	27, 811	1.95

En Europa, países como Rusia, Ucrania y Finlandia planean producir etanol para ser usado como combustible, además buscan expandir su mercado con más países europeos, y en el caso de Rusia, se busca exportar el biocombustible a China para competir con el etanol de Brasil y Paquistán. Respecto al biodiésel, Rusia y Ucrania tienen planteado exportarlo a Alemania y el resto de la Unión Europea para poder competir con la producción local (Maciel-Álvarez, 2009).

El resto de los continentes también participan activamente en el mercado de combustibles biológicos, en América se busca potencializar el desarrollo de los biocombustibles en Bolivia, Chile, Ecuador, México, Uruguay, Venezuela, Cuba, República Dominicana, Guatemala, Haití, Honduras, Jamaica, Nicaragua, Panamá y, Trinidad y Tobago. En Asia, países como Kazajastán Corea del Sur, Brunei, Singapur, Taiwán y Vietnam están desarrollando planes para producir biocombustibles en el corto o mediano plazo. En África, Berún, Burkina Faso, Costa de Marfil, Guinea Bissau, Mali, Mozambique, Nigeria, Senegal, Suazilandia, Zambia y Zimbabwe planean producir etanol a partir de diversos insumos agrícolas como la caña de azúcar, la cassava y el fruto de marañón, para exportarlo a Europa. Y, por último, en Oceanía, naciones como Islas Marshall, Vanuatu, Samoa, Islas Fiji, Islas Salomón, Kiribati y Papúa Nueva Guinea establecieron un mercado interno de aceite de coco como sustituto del diésel (Maciel-Álvarez, 2009).

Malasia e Indonesia son los principales exportadores de biodiésel producido a base de aceite de palma. En Malasia, en el año 2015, el precio del aceite de palma rondó los 600 dólares por litro, lo que derivó en un precio del biodiésel de 900 dólares por tonelada después del transporte a Europa. Malasia cuenta con un mandato de biodiésel, que asigna un precio de 1.1 dólares por litro. El otro gran país exportador de biodiésel, Indonesia, mantiene un uso de alrededor del 8% del aceite de palma para producir biodiésel, además impondrá impuestos de exportación de aceite de palma para financiar el subsidio al biodiésel de 0.31 \$USD por litro (Nelson y Starcher, 2017).

Se requieren avances tecnológicos para la extracción, transesterificación y fermentación de aceite para producir biodiésel y etanol. La demanda energética aumenta conforme avanzan los días debido al constante y rápido aumento de la población, ante tal situación, varios países han promulgado leyes que exijan la producción de biocombustibles para satisfacer la demanda futura (Demirbas, 2008; Kojima y col., 2007).

Hay países que promueven los biocombustibles como una respuesta a los problemas de la dependencia en el abastecimiento energético, mientras que otros lo ven como una oportunidad de especialización productiva (Rodríguez y col., 2008). La Tabla 1.8 presenta las mezclas utilizadas en distintos países.

Ante la incertidumbre que generan los costos futuros de la energía, la constante dependencia del petróleo, reducir la contaminación y emisiones de gases contaminantes, se busca impulsar en gran medida el desarrollo de fuentes de energía renovables.

Tabla 1.8. Mezclas utilizadas en distintos países (Rodríguez y col., 2008)

País	Tipo de mezcla	Materia prima
Brasil	E22 E25, E26 E100 Cualquier mezcla para automóviles de combustible flexible B2, B5	Caña de azúcar Soya, aceite de ricino, palma de aceite
EE. UU. Hawaii/Minesota/Montana Minesota (2013)	E3 E5 Gasolina reformulada (5.7%) E10, E85 B20 (aceite de soya) B2	Maíz (95), sorgo, trigo Soya
Canadá Columbia Ontario (2007)	E10, E85 E5	Trigo, maíz y paja
EUROPA Francia España Suecia Alemania	E3, E5 ETBE (3.7%), B5 ETBE (hasta 4%) E5, E85 B100, B5	
Argentina (2010)	E5 B5	Aceite de soja
Colombia	E10 B5	Caña de azúcar Aceite de palma
Perú	E10	Caña de azúcar
Paraguay	E7	
República Dominicana (2015)	E15 / B2	

1.5 Uso de los biocombustibles

A nivel mundial el uso de la energía se ha ido incrementando conforme aumenta la población, por tal motivo, en los últimos años los biocombustibles han tenido un gran auge en cuestión de desarrollo tecnológico e innovación (Casas-Jiménez y col., 2021).

La extracción de combustibles fósiles se vuelve cada vez más difícil y cara, son una energía que eventualmente se agotarán en un futuro, aunque no se sabe exactamente cuándo. Las previsiones más optimistas, señaladas por el Departamento de Energía de los EE. UU., mencionan una fecha de declive en el año 2037. Cabe mencionar que este cálculo no considera la creciente demanda del día a día, sino que solo se hace en base a la demanda actual de manera

constante, lo que hace pensar que esa fecha puede presentarse antes de lo previsto (Rico, 2006).

La volatilidad del precio del petróleo, las repercusiones tan negativas que tiene sobre el medio ambiente, así como el agotamiento de sus reservas han despertado un interés muy importante en la producción de combustibles a partir de recursos renovables. Por ahora se estima un crecimiento en la demanda futura, con una tasa de crecimiento anual del 5% al 7.9% en los próximos 20 años. Se espera que, para el año de 2050, los biocombustibles ayuden a atender la demanda total de combustible para transporte en un 27% (Muller y col., 2014).

Con el fin de encontrar o desarrollar alternativas ante la escasez del petróleo, la promoción de los biocombustibles es la mejor alternativa para hacer frente tanto a prevenciones en el tema ambiental como al aumento en la demanda de energías de los próximos años. La producción de biocombustibles puede ayudar al desarrollo internacional y, debido a que la mayoría de las personas en países en desarrollo participan en la agricultura, se busca aliviar la pobreza con un aumento en los ingresos agrícolas, mejorando considerablemente el bienestar general y la seguridad alimentaria (Dale y Ong, 2014).

La antigua materia prima del biocombustible es la madera, explotada en forma sólida y que tiene varios usos importantes, con importantes aplicaciones tanto en la cocina como en la calefacción. Más tarde, el biocombustible vio su evolución en los llamadas aceites líquidos, que han sido utilizadas desde tiempos inmemoriales para la iluminación de hogares y caminos. Los aceites de oliva y de ballena son los tipos antiguos de biocombustibles empleados para dicho propósito, en su mayoría derivados de plantas y animales. Estuvieron en uso durante un largo periodo, hasta que fueron reemplazados por el queroseno (Arsuf y Sussman, 1983; Russell, 2003).

Actualmente, los principales biocombustibles empleados en la industria del transporte son el etanol que funge como sustituto de la gasolina, y el biodiésel que se puede utilizar en lugar del diésel fósil (Rico, 2006).

A finales del siglo XVII, surgió el etanol, que es uno de los biocombustibles más explotados gracias a su notable aplicación, sobre todo en el sector del transporte. Posteriormente, se emplearon otras materias primas como fuentes de extracción para los biocombustibles, como el cacahuate, la joroba, cereales y papas (New York Times, 1925). Alrededor del siglo XX, se descubrió otra forma de biocombustible, el biodiésel. Tanto el etanol como el biodiésel son los tipos de biocombustibles más explotados (Fangrui y Hanna, 1999).

Investigadores exploran el potencial del biodiésel como sustituto, ya sea de manera parcial o total, del diésel mineral en un motor de combustión interna. Para

una mejor compresión de combustión de biodiésel en motores de combustión interna, el desarrollo de la cinética de reacción que describe su oxidación empleando sustitutos juega un papel crucial (Agarwal y col., 2018).

El biodiésel es el combustible más atractivo para reemplazar al diésel en los motores que lo emplean como combustibles. La industria petrolera ha impulsado examinar el biodiésel, la creciente demanda de combustibles fósiles ha provocado un aumento en el precio del biocombustible. El biodiésel ofrece características muy similares al diésel, además tiene la ventaja de poseer características amigables con el medio ambiente, contribuyendo a disminuir la emisión de carbono, así como disminuir la necesidad de importar combustibles fósiles. El biodiésel puede ser cargado en la mayoría de los automóviles actuales sin necesidad de ser modificado y sea cual sea la mezcla de este y el gasóleo.

El consumo de combustibles líquidos derivados del petróleo en el mundo rondó, en 2013, los 33 miles de millones de barriles al año (gasolina, diésel, combustible para aviones y bunkers), de los cuales se emplean para transporte alrededor de 18 miles de millones de barriles al año (55%). De esta cantidad, los EE. UU., son el mayor consumidor de petróleo y el mayor uso es en materia de transporte, con un consumo que ronda el 72%, mientras que para Europa ronda el 58%, en Brasil el 54% y en México el 57%. Hay otro nicho de recursos renovables como el biogás que son utilizados para el transporte, sin embargo, estos volúmenes son muy pequeños en la actualidad (Nelson y Starcher, 2017).

Para 2020, en la Figura 1.5 se aprecia el consumo en biocombustibles líquidos a nivel mundial. Las Figuras 1.6 y 1.7 muestran la participación de las naciones en el consumo de biodiésel y etanol, respectivamente, a nivel mundial (Carvalho y Torroba, 2021).

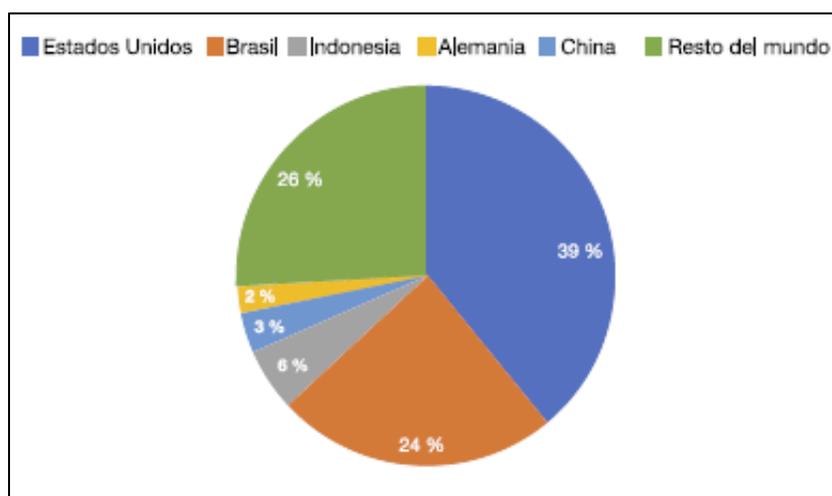


Figura 1.5 Distribución porcentual del consumo de biocombustibles líquidos de 2020 (Carvalho y Torroba, 2021)

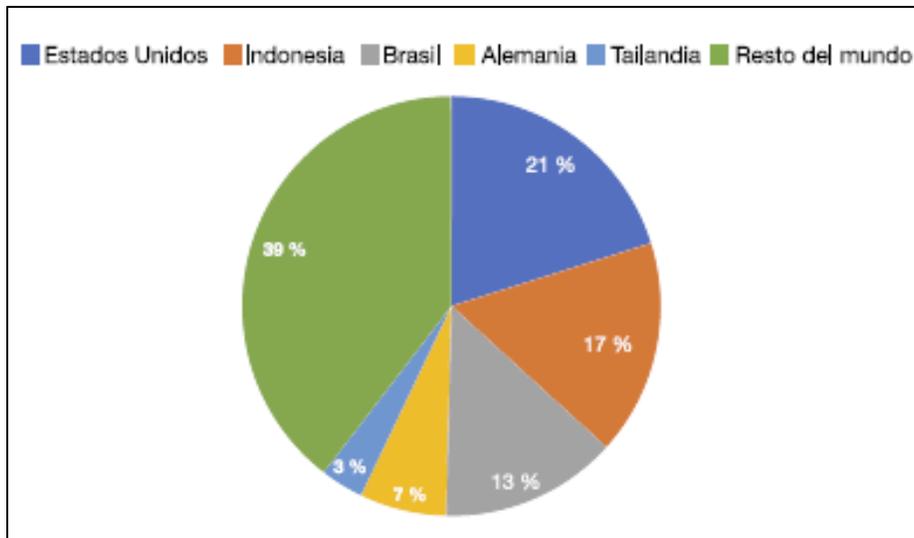


Figura 1.6 Distribución porcentual del consumo de biodiésel de 2020 (Carvalho y Torroba, 2021)

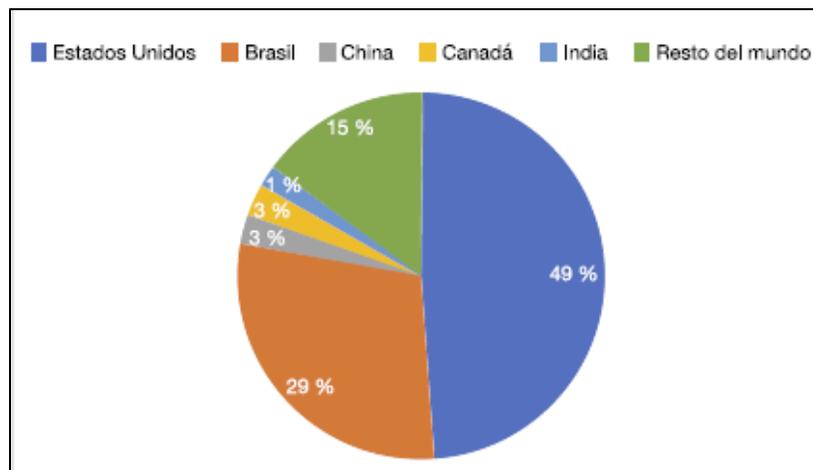


Figura 1.7 Distribución porcentual del consumo de etanol de 2020 (Carvalho y Torroba, 2021)

Entre los principales factores que explican el radical crecimiento tecnológico en el sector de los biocombustibles, se encuentran (Friedmann, 2009):

- i) La oportunidad de reducir la dependencia sobre los combustibles fósiles.
- ii) La búsqueda de seguridad y dependencia energética como economías emergentes.
- iii) Reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera y reducir el calentamiento global.
- iv) Mayores precios en las materias primas, mejorando los ingresos, trayendo consigo mayores oportunidades de empleo rural.

Los sectores del transporte y la agricultura son los mayores consumidores de combustibles fósiles, por lo que tienen una gran contribución en la emisión de contaminantes al ambiente (Agarwal, 2007).

Centrando la atención en el sector del transporte, existe un constante aumento en el uso de los combustibles fósiles, por tal motivo, las políticas de biocombustibles deben motivar la reducción de dependencia sobre el petróleo, mejorando el medio ambiente y aumentando los ingresos agrícolas (Rajagopal y col., 2007). Los encargados de formular las políticas deben considerar las afectaciones a corto, mediano y largo plazo, considerando todos los puntos de vista, aspectos y alternativas. Se deben considerar enfoques como la extensión/reducción de impuestos para biocombustibles y obligaciones de biocombustibles (Masjuki y col., 2013).

Los biocombustibles de origen brasileño son aprovechados en los denominados automóviles de combustible flexible, vehículos que admiten el uso de biocombustibles y gasolina, por parte de compañías como Volkswagen, Chevrolet, Ford, Fiat, Renault, Peugeot, Mitsubishi, Honda, Toyota y Citroen. En el periodo comprendido entre los años de 2003 a 2009 se vendieron unos 7.75 millones de vehículos, equivalente a cerca del 45% del parque vehicular automotor de Brasil no mayor a diez años de antigüedad (Maciel-Álvarez, 2009).

En México, de acuerdo con datos de INEGI, al año 2014 se tenían registrados 38,023,535 vehículos entre los que se encuentran automóviles, autobuses de pasajeros, camionetas, camiones de carga y motocicletas. Como se sabe, cada uno de estos vehículos requiere del uso de combustible, lo que genera emisiones de CO₂. Si las emisiones de CO₂ superan la cantidad disponible de plantas y organismos que asimilen el CO₂, se desencadena la presencia del efecto invernadero, efecto que provoca un aumento en la temperatura media de la superficie terrestre (Díaz de León, 2017).

Es importante señalar que los vehículos no pueden alimentarse solo con biocombustibles “puros”. Por ejemplo, al emplear etanol, debido a que los motores de los vehículos están diseñados para funcionar con gasolina, se debe realizar una mezcla con gasolina en cantidades cercanas al 25%. Mientras que, al hacer uso de biodiésel, y a pesar de que los motores que funcionan con diésel no requieren modificaciones para funcionar con biodiésel, el rendimiento del vehículo puede llegar a ser ligeramente menor debido a que la quema de biodiésel genera un 7% menos energía que el diésel (Díaz de León, 2017). Aunque este comportamiento depende del origen de la grasa que se utiliza para producirlo.

Capítulo 2. Fundamentos

2.1 Etanol

El etanol es uno de los combustibles de origen biológico más utilizados en el mundo. Se puede obtener de diversas fuentes como malezas, cereales, residuos agroindustriales (cáscaras), frutas, así como de material lignocelulósico residual (Akpan, 2005).

El etanol destinado a ser combustible puede ser mezclado con gasolina. Ha tenido una gran participación dentro de los automóviles, esto debido a que produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a las de la gasolina, colocándolo como uno de los biocombustibles más conocidos del mundo (Díaz de León, 2017).

El etanol puede ser distinguido en las siguientes presentaciones, en etanol absoluto, apto para su mezcla con gasolina y uso en motores de gasolina y de ciclo Otto; en etanol hidratado, de uso en algunos motores de ciclo Otto especialmente diseñados para su uso; y etanol de biomasa, obtenido a partir del maíz, sorgo, caña de azúcar, remolacha o de algunos cereales como el trigo o la cebada (Friedmann, 2009).

2.1.1 Producción de etanol

El proceso de producción de etanol, de manera general, consta de 5 partes que dan como resultado este biocombustible (Casas y col., 2021).

Pretratamiento

Varía dependiendo de la materia prima utilizada para producir el etanol. Por ejemplo, en el caso del maíz se debe lavar, moler y mezclar antes de ingresar al reactor. La levadura se separa para que crezca y se utilizará en sus etapas de propagación (Casas y col., 2021).

El pretratamiento tiene el fin de hacer más accesible la biomasa para los procesos posteriores de producción de etanol, permitiendo que los cambios en la estructura cristalina y de la composición química de la matriz lignocelulósica faciliten los procesos de hidrólisis y fermentación de los monosacáridos (Demirbas, 2005; Sánchez y Cardona, 2008). El pretratamiento puede variar dependiendo de la materia prima utilizada (Casas y col., 2021).

Dentro de los principales pretratamientos disponibles para obtener etanol, se encuentran los tratamientos físicos, a continuación, se describen 3 de los más importantes (Grande Tovar, 2012).

- Reducción mecánica de tamaño

Mediante un tratamiento mecánico, molido o triturado, se reduce el tamaño, debido a que permite aumentar el área superficial de contacto de las partículas para la hidrólisis y disminuir la cristalinidad de la celulosa (Sun y Cheng, 2002).

- Pirólisis

Aquí se degrada la materia rápidamente mediante un calentamiento a temperaturas superiores a los 300°C y genera gases como el hidrógeno y el monóxido de carbono a la vez que libera algo de carbono residual, el cual es recuperado a través de un tratamiento con ácido diluido y agua (Das y col., 2004; Sarkar y col., 2012).

- Pre-tratamiento asistido por horno de microondas y por irradiación con haz de electrones

Existen dos procedimientos; el primero es de tipo térmico, genera un calor derivado de las vibraciones de los enlaces polares y del medio acuoso que lo rodea, así se produce una degradación de la estructura cristalina de la celulosa y a un proceso de hidrólisis auto inducido gracias al ácido acético derivado de los procesos de disrupción del complejo lignocelulósico. Además, se tiene el proceso no térmico, en el que se cambia la alineación del campo eléctrico generado por un haz de electrones, que hace que los enlaces polares vibren y se presente la disrupción de los enlaces en la estructura interna de la celulosa, facilitando la degradación (Sarkar y col., 2012).

Además, se encuentran pretratamientos como el pretratamiento ácido, el pretratamiento alcalino, el pretratamiento con solventes orgánicos, el pretratamiento biológico, así como el método de la explosión de vapor o auto hidrólisis, el método del agua caliente, la explosión amoniaca de la fibra (Afex), el método de explosión por dióxido de carbono (CO₂), el pretratamiento químico, la hidrólisis de sustratos lignocelulósicos (Grande Tovar, 2012).

Dentro de estos métodos se destaca la hidrólisis química.

- Hidrólisis química

En el proceso de hidrólisis química, el material lignocelulósico se expone a la acción de productos químicos facilitando la degradación de los polisacáridos y la hemicelulosa en azúcares monoméricos que son fermentables. Generalmente, en este procedimiento, tanto el pretratamiento como la hidrólisis se llevan a cabo en un solo paso (Taherzadeh y Karimi, 2007). Dentro de los procesos de hidrólisis se destacan los siguientes.

- Hidrólisis con ácidos diluidos

Proceso efectuado a altas temperaturas, presiones elevadas y en tiempos de reacción muy cortos, facilitando así la producción continua (Balat, 2011). En estos procesos se presentan dos reacciones; en la primera, la celulosa se degrada en azúcares, y en la segunda, se transforman en otros productos (Demirbas, 2005).

- Hidrólisis con ácidos concentrados

Para este procedimiento se lleva a cabo un pretratamiento con ácido diluido para liberar los azúcares de la hemicelulosa, seguido de un secado de la biomasa y del tratamiento con ácido concentrado (70% - 90%). Este proceso a diferencia de la hidrólisis con ácidos diluidos se lleva a cabo en procesos más prolongados, pero con la ventaja de convertir casi en su totalidad la celulosa a glucosa y la hemicelulosa a azúcares de cinco carbonos (Grande Tovar, 2012).

- Pretratamiento biológico e hidrólisis enzimática

El método enzimático, a comparación del método químico, ofrece ventajas como el empleo de condiciones de reacción mucho más suaves, así como ser más amigable al ambiente gracias a que no produce subproductos tóxicos (Grande Tovar, 2012).

Licuefacción

Aquí el almidón se convierte en dextrinas. Dentro de la licuefacción se encuentran (Casas y col., 2021):

- Licuefacción primaria; minimiza el consumo de vapor y disminuye la viscosidad de la mezcla en la cocción del macerado, añadiendo una enzima alfa amilasa.
- Degradación del almidón; ocurre una gelatinización, donde se libera la amilosa y la amilopectina, además puede ocurrir durante la hidrólisis ácida (ocurre a una temperatura elevada y un pH muy ácido) o enzimática (es la más común, y ocurre a una temperatura más baja y un pH con acidez más leve).
- Cocción del macerado; ocurre a una temperatura de 110 °C aproximadamente.
- Licuefacción secundaria; se realiza en una temperatura controlada de entre 85°C a 90°C añadiendo alfa amilasa nuevamente para que el almidón se transforme en dextrinas.

Sacarificación

Las dextrinas obtenidas en la licuefacción se transforman a glucosa para luego fermentarla. Se emplean enzima glucoamilasas con una tolerancia a la

temperatura de aproximadamente 65°C y un pH de 4.5 (Casas-Jiménez y col., 2021).

Fermentación

Se disminuye la temperatura hasta llegar a los 30°C o 35°C, se agrega levadura y se espera un tiempo aproximado de 48 horas para que ocurra la fermentación. Este proceso es anaerobio, sin embargo, si se utiliza como levadura la *Saccharomyces cerevisiae* ocurre un poco de respiración aerobia que transforma la glucosa en CO₂ con un poco de oxígeno, beneficiando la producción del etanol (Casas-Jiménez y col., 2021).

Postratamiento

En esta etapa se destacan actividades como:

- Tratamiento de vinazas: Se busca separar la vinaza pesada, mediante centrifugación, la mayor cantidad de sólidos para que quede una fase líquida (vinaza liviana) (Casas-Jiménez y col., 2021).
- Deshidratación de etanol: Se eliminará el agua mediante técnicas como la absorción con tamices moleculares, destilación azetrópica, destilación extractiva, pervaporación, entre otras (Casas-Jiménez y col., 2021).
- Recuperación de levaduras para reintegrarlas al proceso y disminuir costos (Casas-Jiménez y col., 2021).
- Obtención de CO₂; en lugar de liberar CO₂ que puede producirse en la fermentación se recupera y utiliza en el otro proceso (Casas-Jiménez y col., 2021).

La producción de etanol se puede clasificar en tres grandes grupos, el etanol proveniente de azúcares reductores, el etanol proveniente de almidón y el etanol proveniente de material lignocelulósico. La producción de etanol depende de la disponibilidad de las materias primas, de las cuales la biomasa lignocelulósica es la más fácil de obtener y de bajo costo. Hay diversos caminos para obtener alcohol etílico a partir de fuentes naturales, pero como se puede apreciar en la Figura 2.1 la obtención de etanol en general se hace por medio de un proceso de fermentación catalizada por levaduras y luego destilación de alcohol (Balat, 2011).

Las azúcares contenidas en diversas plantas son la base de la producción del etanol. Plantas como la remolacha, caña de azúcar o el sorgo azucarero, así como el almidón o inulina presentes en los granos de cereal o tubérculos de patata, que deben ser previamente hidrolizados para obtener glucosa o fructosa, son de las más destacadas en producción de etanol. Además de estas fuentes de producción, existe la biomasa lignocelulósica, de la que, a través de la hidrólisis de la celulosa, se obtiene glucosa fermentable. Los dos primeros casos son los más

extendidos en la actualidad, pero el tercero es el más atractivo por su abundancia y bajo costo (Cediell-Galán y col., 2006).

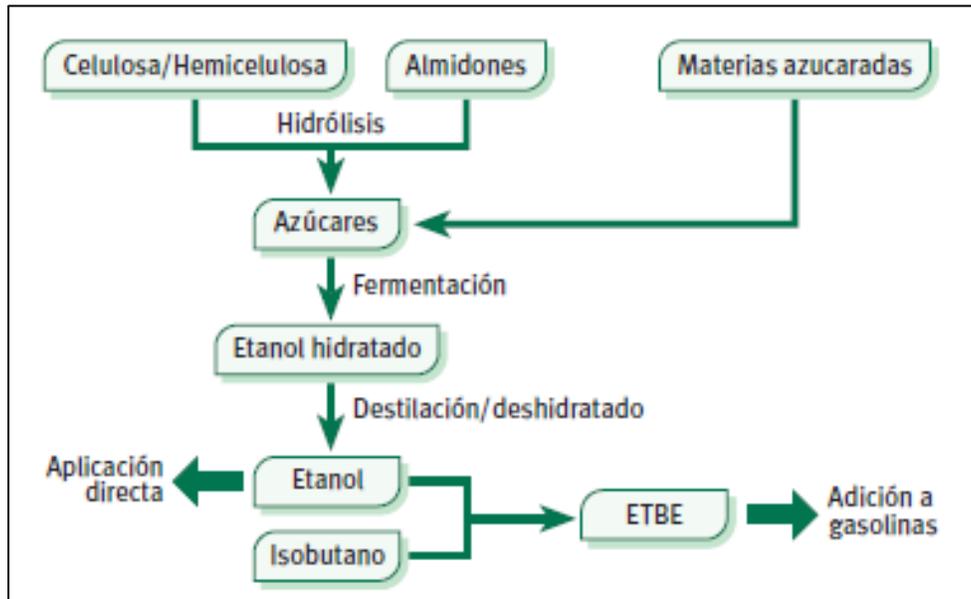


Figura 2.1 Diagrama de procesos del etanol (Rico, 2006)

El etanol puede obtenerse gracias a dos procesos, uno a partir de síntesis y otro mediante la vía fermentativa de fuentes naturales. Cuando el alcohol se aplica en la industria, se emplea la síntesis para obtener una pureza del 99.9%. Cuando el uso se remite a farmacéutica, perfumería y alimentación, basta con el alcohol proveniente de la fermentación, cuya pureza es del 99.5% (Grande y Tovar, 2012).

Con cualquiera de estas dos opciones, se obtiene un mosto azucarero que se fermenta en ausencia de oxígeno, transformando la glucosa en etanol hasta obtener un líquido con un grado alcohólico de entre el 10% y 15%, que se destila para conseguir alcohol hidratado, con entre un 4% y 5% de agua. De este proceso resulta un producto que es capaz de sustituir la gasolina en motores de explosión convencional, aunque requiere de algunas modificaciones mecánicas (Rico, 2006).

Se realiza una segunda fase, de deshidratación, obteniendo una mezcla con pureza superior al 99.8%, mezcla que tiene una amplia gama de usos, como lo es en mezclas con gasolina, donde aumenta el índice de octano. Hay otra posibilidad de mezclarlo con gasóleo de automoción en porciones comprendidas de un 10% a un 15% y añadir aditivos para hacerlo apto en motores diésel. Modalidad empleada en flotas de autobuses que ha demostrado su eficiencia contra la contaminación frente a vehículos que consumen únicamente gasóleo (Rico, 2006).

Los microorganismos de levadura, hongos y bacterias se pueden utilizar para la fermentación, proceso en el que se convierte el azúcar en etanol y dióxido de

carbono. Este microorganismo usa parte del azúcar para su crecimiento (Nelson y Starcher, 2017).

El proceso de producción de alcohol a partir de materia lignocelulósica sacarificada se lleva a cabo con apoyo de una gran variedad de microorganismos, sin embargo, uno de sus inconvenientes es la ausencia de un microorganismo capaz de efectuar la fermentación de los dos tipos de azúcares de cinco y seis miembros para producir etanol con rendimientos elevados, transformar una variedad de sustratos y tolerar condiciones exigentes dentro de las que se incluyen concentraciones de etanol elevadas (Balat, 2011; Sarkar, 2012).

Se conocen varios procesos para obtener etanol a partir de materia lignocelulósica hidrolizada, como son la sacarificación y fermentación simultáneas (SFS), la hidrólisis y fermentación separadas (HFS), la conversión microbiana directa (CMD) y la sacarificación y cofermentación simultáneas (SCS) (Balat y col., 2008).

El etanol se puede producir mediante cuatro tipos de operación, lote, lote alimentado, continuo y semi continuo. La mayor parte de la producción de etanol se realiza por lotes, debido a que la esterilización y la gestión de la materia prima son más fáciles. En dicho proceso, la solución se alimenta y el efluente se elimina a intervalos. En las operaciones continuas, existen problemas de esterilización, contaminación y mutación de la levadura debido a largos periodos de cultivo y manipulación periódica (Nelson y Starcher, 2017).

Las materias primas de almidón requieren hidrólisis para descomponer el almidón en azúcares fermentables. En la molienda en seco, el grano se muele en harina. La suspensión de almidón y agua (conocida como puré) se agita y calienta para romper las paredes celulares y se agregan enzimas al puré para convertir el almidón en dextrosa, un azúcar simple. Se agrega amoníaco para controlar el pH y como nutriente para la levadura. El contenido se procesa en una olla de alta temperatura para reducir los niveles de bacterias y luego se enfría y se transfiere a fermentadores donde la levadura convierte el azúcar en etanol y dióxido de carbono (Nelson y Starcher, 2017).

El proceso de fermentación suele durar entre 40 y 50 horas. Durante dicho proceso, el macerado se agita y se mantiene a una temperatura constante para facilitar la actividad de la levadura. Después de la fermentación, el producto resultante se transfiere a columnas de destilación donde el etanol se separa de la vinaza restante. El etanol se concentra a 190 °C usando destilación convencional y luego se deshidrata a aproximadamente 200 °C en un sistema de tamiz molecular. Luego, el etanol anhidro se mezcla con aproximadamente un 5% de desnaturizante, como la gasolina, para hacerlo imbebible. El CO₂ producido puede capturarse y venderse para su uso en bebidas y la fabricación de hielo

seco. La vinaza se envía a través de una centrífuga que separa el grano grueso de los solubles. Los solubles se concentran hasta aproximadamente un 30% de sólidos por evaporación, solubles de destilería condensados (CDS). El grano grueso y el jarabe luego se secan para producir granos de destilería secos (DDGS), un alimento nutritivo para los animales (Nelson y Starcher, 2017).

En la molienda húmeda, el grano se sumerge en agua y ácido sulfuroso diluido en un periodo de 24 a 48 horas, lo que separa el grano en sus componentes. La lechada se procesa mediante molinos para separar el germen de maíz, del cual se extrae el aceite, mientras que los componentes restantes de fibra, gluten y almidón se segregan mediante centrifugación, tamiz y separadores hidroclónicos. La lechada se concentra en un evaporador y luego se codifica con el componente de fibra, que es vendido como alimento de gluten de maíz en industrias ganaderas. El almidón se procesa para producir etanol, similar al proceso de molienda en seco, descrito con anterioridad (Nelson y Starcher, 2017).

Durante el periodo de años comprendido de 2004 a 2006, la producción de etanol combustible creció un 26%. Específicamente en 2004, se produjeron 12,870 millones de litros de combustible de etanol a partir del 10% de la cosecha de maíz, y se espera que la demanda de etanol se duplique para los próximos 10 años (Singh y col., 2019).

La producción mundial de etanol proviene aproximadamente en un 60% de las materias primas de las cosechas de azúcar, con la caña de azúcar, el trigo y la remolacha azucarera; además se puede producir a base de residuos de cultivos, árboles, pastos perennes y desechos agrícolas, aunque esto se realiza en menor medida (Singh y col., 2019).

En 2010, la producción de etanol alcanzó 86 mil millones de litros, 17% más que en 2009. La producción fue arrinconada por los EE. UU. (57%) y Brasil (31%), revirtiendo cada vez más la relación que existía entre estos países cuando Brasil era el mayor productor del mundo (Ramos-Delgado, 2012).

2.1.2 Uso de etanol

El etanol absoluto puede ser empleado solo como combustible o puede mezclarse con gasolina. El etanol, es uno de los biocombustibles más representativos de uso en el sector del transporte, tiene un mayor octanaje que la gasolina, esta diferencia hace necesario realizar ajustes y prestaciones diferentes en los motores. El mayor octanaje presente en el bioetanol permite obtener más potencia y más par motor que con la gasolina convencional. Además, es empleado para sintetizar el ETBE (5 – etil – ter – butil – éter), sustituto del MTBE (metil – ter – butil – éter), aditivo que se añade a la gasolina para incrementar su número de octanaje (Rico, 2006). El etanol empleado para el sector del transporte es

aproximadamente del 80%, además tiene un uso del 20% en el sector de la producción de bebidas alcohólicas, medicamentos y cosméticos (CEDRSSA, 2020).

Como se recuerda, Brasil es un importante productor mundial de etanol en el sector transporte, más del 80% de los vehículos utilizan combustibles mezclados con etanol. A partir del año 2000, alrededor del 98% de etanol se utilizó en el sector transporte, surgiendo así, los autos de etanol – gasolina; agregado a ello, es rescatable señalar que la industria de la caña de azúcar y el etanol han creado millones de empleos y representan el 3.5% del PIB nacional del país amazónico (Su y col., 2015).

La producción de etanol ha permitido obtener diversos coproductos primarios, como el grano de maíz y subproductos de cereales del proceso de destilación, particularmente, granos secos (GDS) y húmedos (GDH) de destilería, este tipo de granos pueden ser utilizados como alimento para animales, principalmente de ganado, así como en la industria láctea y de corrales de engorda.

El inventor estadounidense Samuel Morey, diseñó la primera patente de motor de combustión interna (MCI), emitida el 1 de abril de 1826, alimentada por etanol y trementina. En 1860, otro MCI fue desarrollado por el ingeniero alemán Nikolaus August Otto. Este motor operaba con una mezcla de combustible de etanol. Para finales del siglo XIX y principios del XX, época en la que los biocombustibles cobraron protagonismo, se relacionaron con la invención del automóvil. El primer automóvil práctico del mundo, que funcionaba con un motor de combustión interna, se diseñó y construyó por el ingeniero alemán Karl Benz en 1885. Debido a que el etanol se puede utilizar como sustituto de la gasolina para alimentar motores de gasolina, en 1913, se probó el etanol como combustible de motor. Henry Ford, industrial estadounidense, desarrolló tractores propulsados por etanol. Para 1906, Henry Ford mencionó que los carburadores de sus autos Modelo T usarían gasolina o alcohol. Por lo que, en 1925, Ford señaló el alcohol etílico como el “combustible del futuro”. Además, Alexander Graham Bell, mencionó en una entrevista de National Geographic de 1917 lo siguiente, “el alcohol hace un combustible hermoso, limpio y eficiente que se puede fabricar a partir de cualquier materia vegetal capaz de ser fermentada, tales como residuos de cultivos, pastos, desechos agrícolas y basura de la ciudad”. A mediados de la década de 1930 se vendieron en el mercado las marcas Alcolene y Agrol (mezclas de gasolina y alcohol) (Anónimo, 1917; Loeb, 2004; Songstad y col., 2009).

El Modelo T en 1908 en los EE. UU., de Ford, propició el interés por el etanol como combustible, debido a que el modelo fue pensado para emplear dicho combustible (Rico, 2006).

El etanol muestra una incompatibilidad en materiales como el zinc, plomo, aluminio, aleaciones de plomo y estaño, acero chapado y soldadura basada en plomo, caucho natural, poliuretano, juntas de corcho, cuero, PVC, poliamidas, plástico de metil metacrilato y ciertos plásticos termoestables (Cediel y col., 2008).

2.2 Biodiésel

Hoy en día, una de las definiciones más aceptadas para el biodiésel se basa en la estipulada por la Sociedad Americana de Ensayos y Estándares de Materiales (American Society for Testing and Material Standards, ASTM, por sus siglas en inglés). Esta definición menciona al biodiésel como un combustible líquido sintético, proveniente de materia prima renovable, que consiste en una mezcla de ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, obtenidos a partir de lípidos de fuentes renovables como los aceites y, las grasas vegetales y animales (Benjumea y col., 2009; Herrera y Vélez, 2008). Además, se define como un derivado de la biomasa renovable que puede reemplazar, total o parcialmente, los combustibles fósiles en la combustión interna de los motores o para generar otro tipo de energía (Babu y col., 2013). Los ésteres más utilizados son aquellos que se obtienen del proceso de transesterificación entre un éster de cadena larga y un alcohol de bajo peso molecular como el metanol o etanol.

Físicamente el biodiésel es un líquido con una coloración que va desde el amarillo clara hasta uno oscuro, es prácticamente, inmisible con el agua y con una viscosidad similar al diésel obtenido del petróleo.

2.2.1 Producción de biodiésel

La materia prima empleada para producir biodiésel puede ser distinguida en dos grandes grupos (Cediel y col., 2008):

- El primer grupo incluye aceites usados de frituras o aceites vegetales de final de campaña, como el aceite de oliva de gran acidez, aunque se disponibilidad es limitada por lo que se hace un mayor uso de la materia prima del segundo grupo.
- El segundo grupo, está comprendido por aceites vegetales puros cultivados para su uso energético, obtenido a partir de semillas de plantas oleaginosas como el girasol, la colza, la soya, el coco y la palma oleífera.

La forma de más utilizada en la actualidad para obtener el biodiésel es la transesterificación de triacilglicéridos, proceso observado en la Figura 2.2. Implica la reacción de un mol de triglicérido con tres moles de alcohol de bajo peso molecular para producir tres moles de alquil ésteres y un mol de glicerina (Grande Tovar, 2012).

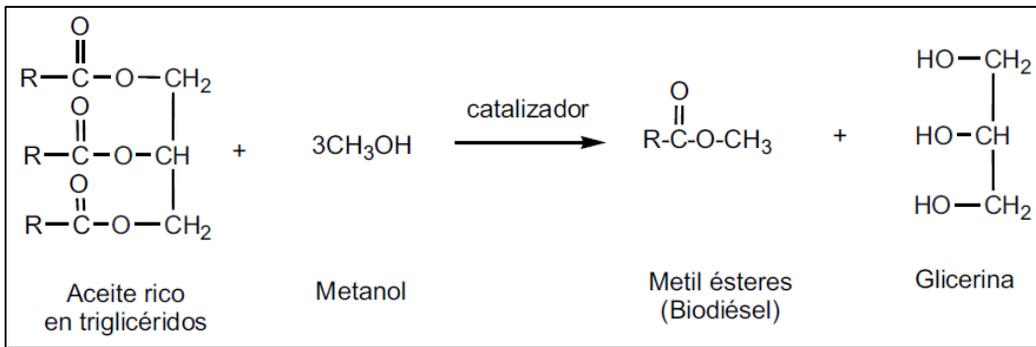


Figura 2.2 Reacción de obtención de biodiésel (Grande Tovar, 2012)

La transesterificación tiene como objetivo modificar la estructura molecular del aceite vegetal lo que hace que sus características fisicoquímicas sean similares a las del aceite mineral. En un balance de masa típico, por cada 100 kg de aceite vegetal crudo se requieren entre 10 a 15 kg de alcohol para producir de 100 a 105 kg de biodiésel y 10 kg de glicerol (Babu y col., 2013). Las principales variables que pueden alterar la reacción, específicamente el rendimiento y la conversión, son la calidad y el tipo de materia prima, la cantidad y tipo de alcohol, el sistema y la cantidad del catalizador y la temperatura (Grande Tovar, 2012).

El proceso de producción industrial de biodiésel catalizado por álcali se lleva a cabo como se muestra en la Figura 2.3, siempre y cuando los aceites o grasas no contengan un porcentaje de agua mayor al 2.5% en peso del aceite dado que requieren un pretratamiento previo a la transesterificación para evitar la saponificación (ISTC, 2006).

El proceso inicia con el uso de la grasa animal o los aceites vegetales, para el caso de las grasas son extraídas, mientras que para el caso de los aceites se realiza una caracterización, sin importar si son usados o vírgenes (Casas y col., 2021).

Europa es el principal productor de biodiésel, seguido por EE. UU., sin embargo, otros países han aumentado sustancialmente su producción (Nelson y Starcher, 2017). Los aceites usados de frituras o aceites de oliva de gran acidez para la producción de biodiésel se obtienen a partir de las semillas de plantas oleaginosas, como el girasol, la soya y la palma oleífera (Rico, 2006).

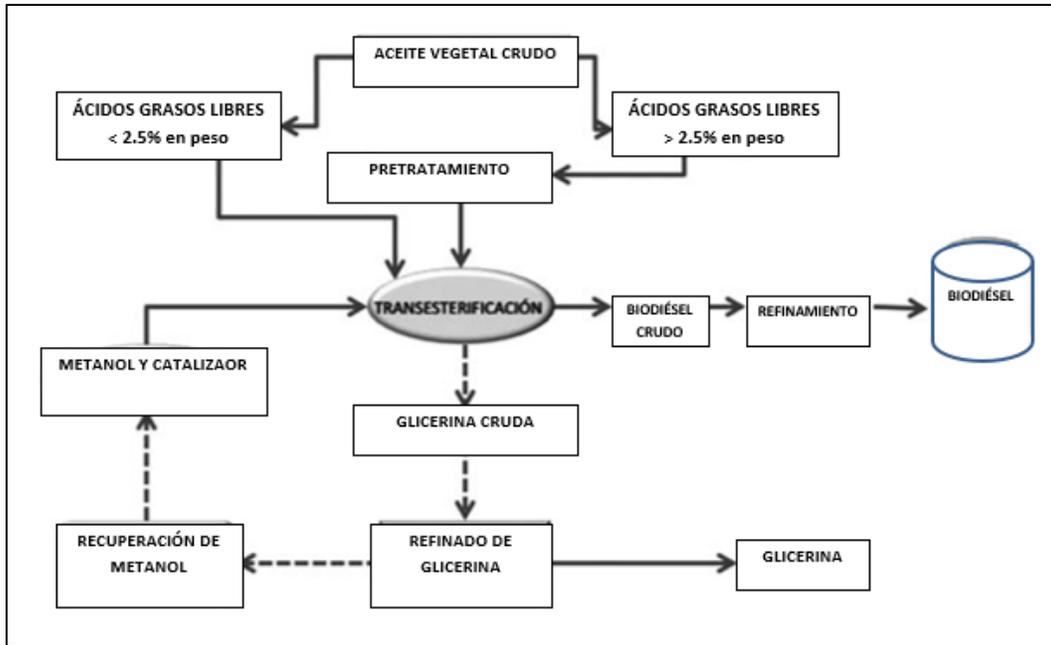


Figura 2.3 Producción industrial de biodiésel (Modificado de Grande Tovar, 2012)

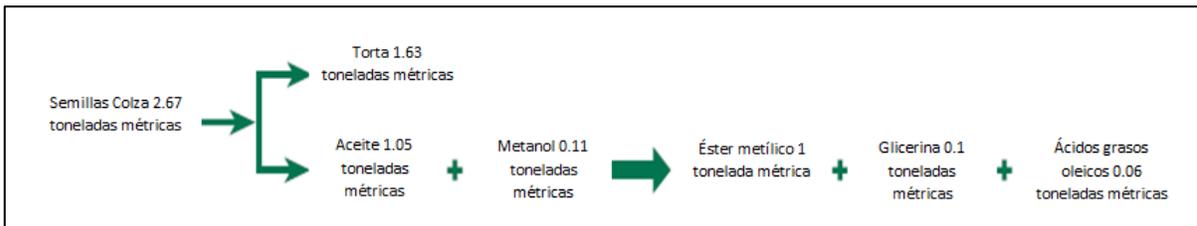


Figura 2.4 Flujos de masas en la producción de éster metílico (Modificado de Rico, 2006)

Una vez obtenida la materia prima, el proceso de fabricación resulta bastante sencillo desde el punto de vista técnico, en la figura 2.3 se aprecia la manera de distribución de las masas en la producción de éster metílico. Como se observa en la figura 2.5, el aceite es sometido a transesterificación, proceso en el que se hidrolizan los enlaces éster de los triglicéridos, obteniendo nuevos ésteres con los ácidos grasos liberados en la hidrólisis y un alcohol sencillo que se utiliza como un reactivo (Rico, 2006).

Los ésteres son compuestos como aceites y grasas que se forman cuando se mezcla alcohol y ácidos. El aceite vegetal contiene glicerina (ronda el 20%) y tres cadenas de ácidos grasos (triglicéridos), por lo que es más viscoso que el diésel de petróleo. Emplear aceites vegetales sin modificar puede causar daños al motor de diésel, la elaboración de biodiésel mediante transesterificación separa la glicerina, misma que es vendida para uso en jabones y otros productos.

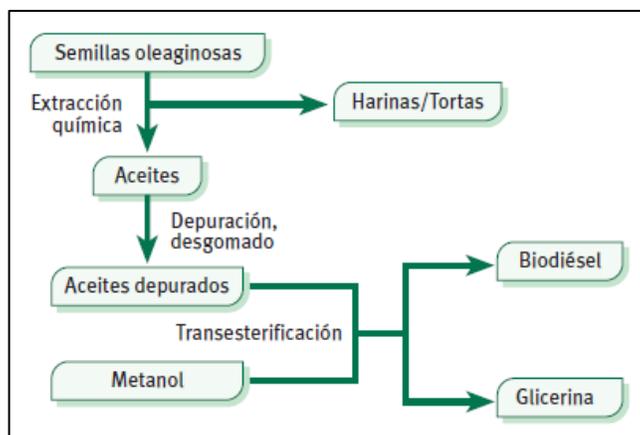


Figura 2.5 Esquema de la producción de biodiésel (Rico, 2006)

Como ya se mencionó, el proceso de la transesterificación se realiza en presencia de un catalizador, normalmente sosa o potasa a una temperatura de 60°C. Los catalizadores más empleados son los básicos, como el hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, así como los ácidos y enzimáticos, y los catalizadores químicos (Benjumea y col., 2009). Es un proceso muy parecido a la elaboración del jabón casero. De hecho, durante la elaboración del biodiésel se obtiene el principal compuesto de los jabones, la glicerina, un subproducto de gran valor añadido y con múltiples salidas comerciales en los sectores químico, agrario y alimentario, así como la mezcla de monoalquilésteres (biodiésel). Al ser la glicerina más densa que el biodiésel, se puede hacer una separación simple por decantación y sedimentación de esta fase. Estos tiempos de separación van desde unos minutos hasta horas. Algunas veces es conveniente emplear centrifugación para facilitar estos procesos (Rico, 2006).

Con la transesterificación, de una tonelada de aceite, 156 kg de metanol y 9.2 kg de potasa se obtienen 956 kg de biodiésel y 178 kg de glicerina sin refinar, así como recuperar 23 kg de metanol (Cediel y col., 2008). Gracias a su bajo costo, los catalizadores ácidos y básicos son más empleados que los enzimáticos. En la Figura 2.6 se puede apreciar el proceso esquemático de la producción de biodiésel a partir de algas mediante la transesterificación con la participación de un catalizador y un ácido (Babu y col., 2013).

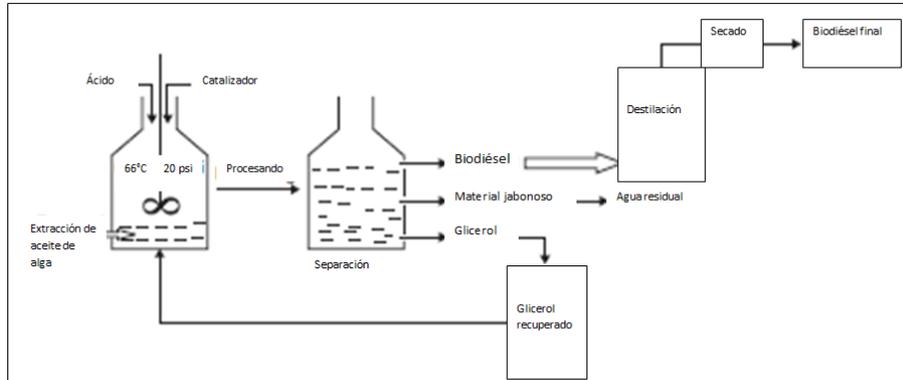


Figura 2.6 Producción de biodiésel a partir de algas por transesterificación (modificado de Babu y col., 2013)

La producción de biodiésel mediante el método por lotes es empleada para producciones a pequeña escala, mientras que en grandes refinerías industriales se utilizan procesos de flujo continuo. Se mezclan metanol e hidróxido de sodio (lejía) con aceite vegetal y luego se agitan. El biodiésel sube a la parte superior del tanque mientras la glicerina y el catalizador se depositan en el fondo, son retiradas después de alrededor de 8 horas y luego se elimina el agua tras varios días (en algunos casos esto último no es necesario).

2.2.2 Productores de biodiésel en México

La Secretaría de Energía (SENER), ha evaluado la posibilidad de desarrollar un programa que fomente el uso de biocombustibles como fuente de energía renovable, contribuyendo al abasto energético y la reducción de consumo de combustibles fósiles (IICA, 2010). En el país existen 4 empresas dedicadas a recolectar el aceite usado para producir biodiésel (Riegalhaupt y col., 2016):

- Reoil México

Empresa encargada de recolectar Aceite Residual Usado de Cocina, principalmente de Toluca y la CDMX, produciendo Pre-aceite técnico de planta (Pre TPO). El Pre TPO se exporta a la Unión Europea para ser procesado a biodiésel.

- MORECO

Esta empresa recolecta aceite usado de cocina y lo transforma en biodiésel. Cuenta con plantas instaladas en Michoacán, Guanajuato y Querétaro, cada una procesa de 100 a 200 m³/año.

- Biofuels de México

Recolecta aceite usado de cocina y produce biodiésel en Puebla, Toluca, Cuernavaca, Tlaquepaque, Zapopán, Tonalá, Veracruz, Córdoba, Xalapa, Boca del Río, Querétaro, Cancún, Playa del Carmen y Chetumal, produciendo cerca de 288 m³/año.

- SOLBEN

Trabaja en Monterrey, recolecta aceite usado de cocina, produce biodiésel, vende plantas de biodiésel y presta servicios de caracterización de semillas y aceites, soporte técnico, automatización y análisis de calidad del biodiésel. Su planta produce 960 m³/año.

México cuenta con 3 plantas productoras de biodiésel que, lamentablemente, han cesado sus operaciones (Riegalhaupt y col., 2016):

- Una planta establecida en Cadereyta, Nuevo León, en 2005 por el Grupo Energéticos con participación del ITESM Campus Monterrey. Esta planta empleaba grasas animales y aceites vegetales de desecho, tienen una capacidad de 18,000 m³/año. Dejó de operar en 2011.
- En Lázaro Cárdenas, Michoacán, se instaló una planta anexa a una fábrica de aceite vegetal en 2007. Contaba con una capacidad de 9,000 m³/año, requiriendo cultivos como la *Jatropha curcas* e higuera, pero por falta de producción de dichos cultivos cerró en 2008.
- El Instituto de Bioenergéticos de Chiapas instaló en el estado, el año de 2010, una planta de 10,000 m³/año. La planta requería de la *Jatropha curcas*, pero al no tener producción de semillas cerró en 2011.

En los recientes años la producción de biodiésel de algas ha despertado un gran interés. Como la productividad en algas es mayor que las de las plantas terrestres, acumula grandes cantidades de triacilglicéridos, además de no requiere tierras agrícolas. La producción de biodiésel de algas involucra la producción de biomasa de alga, la extracción de aceite, la transesterificación, la pirólisis y el hidroprocesamiento (Scott y Davey, 2010).

2.2.3 Uso de biodiésel

El biodiésel puede ser utilizado en motores diésel, siendo mezclado en diferentes porcentajes con el combustible fósil. Su incorporación de hasta un 5% es considerada como un buen aditivo en los motores diésel. El biodiésel tiene la peculiaridad de poder ser empleado como combustible en un 100% realizando pequeños cambios de conexiones de plástico y caucho en los motores, esto debido a que este biocombustible tiene mayor poder de solubilidad que el diésel tradicional.

El biodiésel ha brindado la gran ventaja de ser un sustituto al diésel mineral sin la necesidad de modificar los motores, esto gracias a que comparte varias características de compatibilidad con los combustibles fósiles, como lo son, el alto poder calorífico, de 39 – 41 MJ/kg en el biodiésel y de 43 MJ/kg en el diésel, así como similitud en los parámetros de índice de cetano, punto de inflamación y viscosidad cinemática. Gracias a ello, estos combustibles pueden mezclarse con combustibles fósiles en cualquier proporción, siendo empleados en la misma infraestructura y compatibles con motores diésel o de encendido por compresión (Ramos y col., 2009). Una de las mezclas más habituales es la B5, 5% de biodiésel y 95% de diésel. Hay algunos fabricantes que señalan que sus vehículos pueden emplear mezclas hasta del 30%, pero este tipo de mezclas con porcentajes superiores pueden deterioran las juntas de caucho y obstruir los inyectores (Cediel y col., 2008).

Derivado del proceso del biodiésel, se obtiene el glicerol, también conocido como glicerina, un coproducto líquido de la transesterificación de aceites y grasas, utilizado en una variedad de productos, entre los que se incluyen cosméticos farmacéuticos, productos de la industria alimentaria, como endulcorantes, emulsionantes y disolventes.

El biodiésel es el biocombustible más estudiado en las turbinas de gas a pequeña escala. Se puede emplear el biodiésel en las turbinas de gas actuales de industrias terrestres con ligeras modificaciones para resistir el combustible. Su potencial en turbinas de gas se ha investigado utilizando el tipo de quemador de llama en forma de remolino en la escala de la turbina de gas (Yazan y col., 2021).

El uso de turbinas de gas se ha investigado para probar el rendimiento de la combustión de biodiésel, que contiene motores de turbina de gas industriales, turbinas de Micro Gas (MGT, por sus siglas en inglés) y de aviación. En comparación con los combustibles para aviones, el requisito para el uso biodiésel en turbinas de gas no es tan estricto, lo que hace al biodiésel el más adecuado para turbinas de gas estacionarias (Yazan y col., 2021).

El biodiésel tiene características de combustión muy similares al diésel, además se observó que funcionaba mejor que las enzimas y catalizadores ácidos para el catalizador básico. Al emplear una mezcla de aceite vegetal y diésel se produjo un rendimiento menor del motor debido a que el aceite de alta viscosidad contaminó el aceite lubricante y la coquización del inyector. Observando un comportamiento mejorado con el uso de mezclas de aceite refinado. Sin embargo, comparado con el diésel, se encontró una mayor emisión de NOx e hidrocarburos no quemados (HC) en todas las mezclas de combustibles (Basha y col., 2009).

Para emplear biodiésel puro (B100) en motores diésel antiguos se deben realizar unas pequeñas modificaciones técnicas en el compuesto de las gomas y/o cauchos de los manguitos, juntas y latiguillos del circuito del combustible, debido a que el biodiésel puro puede disolver las gomas. Además de este material, el biodiésel es incompatible con el cobre y aleaciones de cobre, latón, zinc, bronce y materiales galvanizados, debido a que los efectos de la corrosión sobre estos materiales forman jabones metálicos (Cediel y col., 2008).

La revisión de las emisiones de escape y el rendimiento del motor de los motores diésel hace referencia a los efectos del biodiésel y sus mezclas sobre las características de escape único, materia particulada (MP) y biodiésel, producidos a partir de un grupo específico de mezclas de biodiésel, como pueden ser mezclas de biodiésel y alcohol. Una de las mejores opciones para mejorar las características de emisión y rendimiento de motores diésel es mezclar diferentes tipos de biodiésel, disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles. Para mejorar el rendimiento y emisiones se requiere el uso de emulsiones, aditivos metálicos, aditivos de óxidos, entre otros, debido a mejoras en la emisión de NOx del biodiésel.

2.3 Hidrógeno

El hidrógeno (H_2), es una fuente de energía limpia y renovable. Su utilización no genera emisiones de carbono, responsables de la contaminación ambiental y el cambio climático (Levin y col., 2004). Puede convertirse fácilmente en energía eléctrica en pilas de combustible o se puede quemar y convertirse en energía mecánica sin producción excesiva de CO_2 , tiene un rendimiento energético que supera en un 2.75 veces a los combustibles a base de hidrocarburos (Magnusson y col., 2008).

2.3.1 Producción de hidrógeno

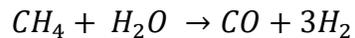
El hidrógeno es producido, en un 95%, a través de fuentes fósiles convencionales como carbón, petróleo o gas natural, entre otros. Su producción no está exenta de emisiones contaminantes (Babu y col., 2013).

La producción de hidrógeno parte de fuentes renovables, clasificándose en dos grandes categorías, una perteneciente a producción por biomasa y otra que engloba diferentes formas de producción mediante fuentes renovables. Producir hidrógeno por biomasa involucra, básicamente, combustibles derivados de la biomasa mediante procesos de reformado, gasificación y producción de hidrógeno biológico – biomimético. El hidrógeno puede ser producido a partir del agua y después de la combustión, el producto obtenido también es agua, haciéndolo totalmente renovable (Babu y col., 2013).

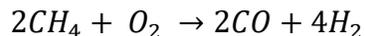
Además, el hidrógeno puede producirse por métodos como fotólisis directa, fotólisis indirecta, foto fermentación y fermentación oscura. La velocidad con que se produce la fermentación oscura la hace de los mejores métodos para producir el H₂, además esta tecnología puede contribuir a tratar una variedad de corrientes de desechos. La combinación de fermentación oscura y de foto fermentación se considera el método más eficiente para producir hidrógeno mediante fermentación. El método inicia con la ruptura de materiales de desechos en ácidos orgánicos en la fermentación oscura para ser utilizados como sustrato en el proceso de foto fermentación. La biomasa puede convertirse en hidrógeno mediante procesos de conversión termoquímica como la pirólisis o la gasificación con vapor. Biológicamente se puede producir por algas o cianobacterias a través de fotólisis del agua. La foto fermentación se produce a partir de sustancias orgánicas por bacterias fotosintéticas.

Además, para producir hidrógeno, se pueden destacar los siguientes métodos:

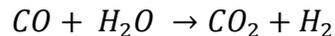
- El proceso de reforma con vapor; inicia con la eliminación de impurezas, como el azufre, gas rico en metano. El metano reacciona con vapor a una temperatura relativamente alta, utilizando el níquel como catalizador (reforma con vapor) (Babu y col., 2013), esto se describe como:



A continuación, se agrega aire para convertir cualquier metano residual que no haya reaccionado durante la fase de vapor reformado:

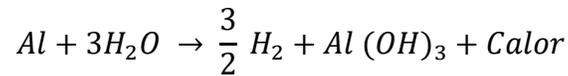


Finalizado con la reacción de desplazamiento de “agua – gas” A menor temperatura que produce más hidrógeno a partir del CO y el vapor:



- Reacción del vapor con el carbono, es posible hacer reaccionar vapor con carbón sólido de metano. En este caso se obtiene un gas sintético, una mezcla de CO e hidrógeno. El CO resultante luego reacciona con vapor en la reacción de cambio “agua – gas”, similar al caso del metano reformado con vapor (Babu y col., 2013).
- Producción electrolítica de hidrógeno, se realiza mediante la imposición de voltaje entre dos electrodos, lo que arroja la evolución del gas hidrógeno en el negativo y de oxígeno en el positivo. Este método brinda un hidrógeno relativamente puro (Babu y col., 2013).
- Por descomposición térmica del agua, se descomponen térmicamente el agua calentándola a una temperatura que ronda los 4,300 K, haciéndolo un método no tan viable (Babu y col., 2013).

- Interacción química del hidrógeno del agua, se obtiene cuando se descompone químicamente el agua. Algunas especies producen óxido al entrar en contacto con el agua. En algunos casos, se forma un hidróxido de aluminio y se produce hidrógeno (Babu y col., 2013).



Hans Gaffron, en 1939, obtuvo hidrógeno fotoquímico y fermentativo a partir de algas, informó, junto a su compañero, que la luz verde desarrolló hidrógeno molecular bajo luz después de haber sido mantenida en condiciones anaeróbicas y oscuras.

Desde la década de 1980, la producción de hidrógeno se ha investigado con diferentes bacterias anaeróbicas, después se integró con actividades agrícolas e industriales para la futura demanda de energía renovable (Demirbas, 2009).

Para la producción de hidrógeno pueden emplearse tres tipos de bacterias diferentes; cianobacterias, consideradas una fuente ideal gracias sus requerimientos nutricionales tan simples; bacterias anaeróbicas, bacterias como la *Clostridium ssp* han sido empleados para su producción; y bacterias fermentativas, la fermentación ácida mixta de *E. Coli* y la fermentación de butilenglicol por *Aerobacter* también produce hidrógeno. Además, las bacterias púrpuras sin azufre son otro tipo de bacteria prometedor para la producción de hidrógeno por fotosíntesis anoxigénica y foto fermentación.

2.3.2 Uso de hidrógeno

El hidrógeno es un producto no convencional limpio, confiable, renovable y asequible. Tiene aplicaciones versátiles en la industria, industria del automóvil y como combustible líquido en cohetes (Babu y col., 2013).

Se sabe que el hidrógeno se puede utilizar directamente en motores de combustión interna con modificaciones menores, además puede ser empleado en pilas de combustible de hidrógeno/oxígeno para producir electricidad, con el único producto, el agua. La eficiencia energética de las pilas de combustible puede llegar al 60%. Cuando se utilizan pilas de combustible de alta temperatura se puede obtener electricidad y utilizar el calor generado en la pila de combustible para fines de calefacción. Con ello se alcanza una eficiencia energética total que alcanza el 80% en vehículos eléctricos, los motores eléctricos pueden tener una eficiencia energética, aproximadamente, del 90%. Actualmente las pilas de combustible cuestan 100 veces más que los motores de combustión interna equivalentes en potencia. Sin embargo, es posible reducir costos de producción en

masa y esperar un mayor desarrollo de las pilas de combustibles (Babu y col., 2013).

El hidrógeno como combustible automotor se puede emplear de dos maneras:

i) Pilas de combustible

El combustible se combina con el oxígeno del aire, convirtiéndose en agua y generando electricidad. Dentro del vehículo el hidrógeno se almacena en un depósito o puede producirse a partir de otro combustible reformador instalado a bordo (Cediel y col., 2008).

ii) Motores de combustión interna alternativa

El combustible se combina con el oxígeno generando energía mecánica (Cediel y col., 2008).

Los vehículos de pila de combustible aún no se encuentran disponibles para todos los usuarios interesados en esta tecnología. La Tabla 2.1 muestra los modelos propulsados por esta tecnología (Cediel y col., 2008).

Tabla 2.1. Modelos de automóviles propulsados por hidrógeno (Cediel y col., 2008)

Marca	Modelo
Honda	Honda FCX Honda EV Plus
Mercedes	Mercedes F – cell
Ford	Ford FWD
General Motors	Hy – wire HydroGen3
Hyundai	Santa Fe FCEV (tecnología UTC Power)
Mazda	RX – 8 (hidrógeno y gasolina)
Nissan	X – TRAIL FCV (tecnología UTC Power)
Toyota	Vehículo híbrido bivalente (gasolina e hidrógeno)
Volkswagen	Modelos propios

Además, el hidrógeno puede ser empleado como carburante en motores de combustión interna de encendido provocado, aunque esta alternativa es menos eficiente que las pilas de combustible. El hidrógeno, en motores de combustión interna, es compatible con relaciones de compresión mucho mayores, gracias a su alta resistencia de dotación espontánea exhibida por el combustible. Con esto los motores de inyección directa tienen una mayor eficiencia con carga potencial. El hidrógeno, puede ser utilizado en los motores adaptados para gas natural (Cediel y col., 2008).

La viabilidad económica de los vehículos que emplean estos motores está ligada a una mejora de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno de los vehículos (Cediel y col., 2008).

Gracias a sus atractivas características y su uso versátil, se espera que el hidrógeno alcance un papel importante dentro de los sistemas energéticos del mundo en un futuro (Babu y col., 2013). Algunos fabricantes señalan que, si se quiere dar ese salto hacia el futuro energético, como evidente consecuencia, se producirá un aumento en la demanda de hidrógeno, lo que conllevaría a desarrollar infraestructura de estaciones de suministro, esto debido a que en la actualidad hay un número muy limitado de estaciones y la mayoría de ellas son de carácter privado.

2.4 Otros biocombustibles

Existen otros biocombustibles que están recibiendo una gran atención, como lo son los descritos a continuación.

2.4.1 Biogás

El biogás es una mezcla de diversos gases (principalmente metano), generados principalmente por descomposición o degradación anaerobia de la materia orgánica. En este proceso se aprovecha el contenido bacteriano del material orgánico (sustrato) que en la ausencia de oxígeno llevan a cabo un proceso de degradación cuyos productos finales digeridos son el efluente (materia orgánica procesada) y el biogás (Barrena y col., 2019). La Tabla 2.2 muestra los principales componentes del biogás y su porcentaje de producción.

Tabla 2.2 Composición química del biogás (Barrena y col., 2019)

Nombre del compuesto	Fórmula química	Porcentaje (V/V)
Metano	CH ₄	40 - 70
Dióxido de carbono	CO ₂	30 - 60
Hidrógeno	H ₂	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0.1

El biogás tiene entre sus principales características el poder calorífico de 23 MJ/m³ que va aumentando si se elimina su contenido en CO₂. Por tal característica, el biogás en México se emplea principalmente para la generación de energía térmica, mecánica o eléctrica y es considerado un bioenergético de gran impacto,

pues es capaz de sustituir los combustibles fósiles en cuestión de energía generada (Cortés y col., 2019).

Las principales fuentes de producción de biógas son la vegetación, los cultivos sumergidos (arroz y totorales), pantanos y humedales (descomposición de la vegetación en el fondo), estiércol de animales de granja, desagües y rellenos sanitarios (Barrena y col., 2019).

Esta producción de biógas se rige por la denominada Degradación Anaerobia (DA), en la que se presentan 4 etapas consecutivas.

1. Hidrólisis

Se transforma por acción de enzimas extracelulares producto de bacterias hidrolíticas realizan la ruptura de los compuestos de alto peso molecular (proteínas, carbohidratos o lípidos) para generar compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos) (Casas y col., 2021)

2. Acidogénesis o fermentativa

Se produce principalmente ácido acético, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono.

3. Acetogénesis

Consiste en la transformación de los ácidos grasos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono para pasar a la última etapa.

4. Metanogénesis

En esta etapa se aprovechan los productos de la etapa acetogénica para producir metano. En la Figura 2.7 se aprecia el esquema de la Degradación Anaerobia de la materia orgánica en la producción del biogás, donde se aprecian las etapas y los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia.

De acuerdo con el contenido de compuestos pesados, el gas natural se puede catalogar como de mezcla rica o mezcla pobre. La mezcla rica se caracteriza por tener una proporción relativamente alta en hidrocarburos distintos al metano, mientras la mezcla pobre se caracteriza por tener una proporción relativamente baja en hidrocarburos distintos al metano. El gas natural se obtiene gracias a las llamadas bolsas de gas encontradas bajo la tierra o en los océanos, mismas que a su vez se ubican encima de los depósitos de crudo de petróleo o en los yacimientos exclusivos de gas natural (Cediel y col., 2008).

Para llevar a cabo una digestión anaerobia y por ende una producción de biogás se requiere de un digester, un reactor cerrado herméticamente e impermeable en el que se deposita la biomasa (Torres y González, 2020).

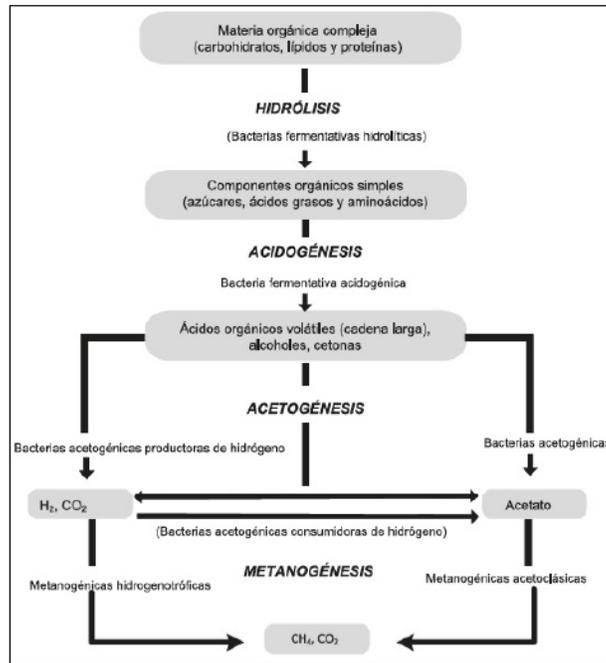


Figura 2.7 Esquema de la degradación anaerobia de la materia orgánica (Casas y col., 2021)

La producción de biogás dentro del digester depende de un correcto desarrollo de la degradación anaerobia la cual a su vez depende íntegramente de cinco parámetros clave.

1. pH

Es el parámetro que permite medir las concentraciones de los iones de hidrógeno o hidroxilo en el medio. En un proceso de reacción anaerobia el pH afecta a los organismos metalogénicos ya que estos son altamente sensibles a valores de pH menores a 6.5 y mayores a 8.0 por lo que una variación en el pH fuera de valores neutros provoca una reducción e incluso la inhibición de la actividad bacteriana (Auris y col., 2019; Moreno 2020).

2. Temperatura

Determina la velocidad de degradación de la materia orgánica y por ende la producción de biogás ya que, conforme la temperatura también crece la tasa de hidrólisis de los compuestos orgánicos complejos y se promueve el crecimiento microbiano (Auris y col., 2019). Para llevar a cabo una producción óptima de biogás se pueden utilizar diversos rangos de temperaturas, esto debido a que el

proceso puede ser psicrófilo, con temperaturas inferiores a 20°C, mesófilo con temperaturas entre los 25°C y 40°C, y termófilo con temperaturas entre los 45°C y 60°C (Auris y col., 2019; Moreno, 2020).

3. Relación C/N

En lo que se refiere a la relación Carbono/Nitrógeno, este parámetro indica la proporción de carbono, nitrógeno y fósforo en el sustrato ya que estos elementos son de suma importancia para el crecimiento de los microorganismos. La relación óptima es de 100:30:1, una disposición diferente provoca diferencias en la capacidad buffer o en la insuficiencia de nutrientes (Moreno, 2020).

4. Tiempo de retención hidráulica

Parámetro esencial al momento de realizar la reacción anaerobia ya que se debe garantizar un tiempo que permita tanto en la fase de hidrólisis como en la actividad metanogénica, ya que ésta última empieza a partir de tiempos de retención entre 5 y 15 días (Moreno, 2020).

5. Carga orgánica

Si el proceso es continuo, es de suma importancia el determinar la cantidad de materia orgánica que será agregada para un determinado tiempo de retención hidráulica ya que si se excede la carga esto puede ocasionar una desestabilización del sistema ya que las bacterias acidogénicas producirán ácidos rápidamente y las metanogénicas no podrían consumir ácidos a la misma velocidad de producción (Casas-Jiménez y col., 2021).

2.4.2 Butanol

El butanol ha sido señalado como un combustible “nuevo”, algo totalmente erróneo debido a que ha sido producido desde principios del siglo XX como un solvente y químico básico (Babu y col., 2013).

La fermentación acetona, butanol y etanol (ABE), utiliza *Clostridia* como microorganismo y una materia prima almidonada o lignocelulósica. La fermentación ABE no es económicamente viable, pero el creciente interés por el desarrollo de biocombustibles ha llamado la atención en los bioprocesos para producir butanol. China es el único país que actualmente produce butanol por fermentación. El butanol, además de ser empleado como combustible, es utilizado como precursor químico para pinturas, polímeros y plásticos. Su producción, en 2012, alcanzó casi 4 millones de toneladas, obteniendo un crecimiento esperado, a 2018, del 5% (Jiang y col., 2015).

La creciente demanda del butanol ocurrió en el periodo de la posguerra, debido al desarrollo de la industria automotriz y del caucho (Jones y Woods, 1986). El

crecimiento de esta industria se vio afectado por el desarrollo de la industria petroquímica en los años 60, lo que hizo más costosa la obtención del butanol a partir de materia vegetal, dado que los costos de la síntesis a partir del petróleo resultaban ser más económicos (Maciel-Álvarez, 2009).

2.4.3 Bioaceite

El bioaceite producido mediante pirólisis rápida, proceso que consiste en calentar rápidamente (de 2 a 3 segundos) la biomasa del suelo a temperaturas que oscilan entre los 400°C y 600°C, en ausencia de aire y con un enfriado rápido. Además, el biocarbón se produce como subproducto de este proceso, pudiendo utilizarlo como combustible sólido o aplicarse en la tierra como medida para el secuestro de carbono y la fertilización del suelo. El aceite de pirólisis se puede procesar de manera similar al petróleo crudo. El bioaceite y el biocarbón pueden ser tratados como materias primas para la producción de biomasa a líquido (Bridwater, 2012; Sharara y col., 2012).

Dentro de la pirólisis rápida se han considerado cualquier forma de biomasa, probando más de 100 tipos diferentes de biomasa, que van desde desechos agrícolas como paja, huesos de aceituna y cáscaras de nueces hasta cultivos energéticos como miscanthus y sorgo, así como desechos forestales como la corteza y desechos sólidos (Bridgwater, 2012).

2.4.4 Gas de síntesis

El gas de síntesis es de importancia comparable o incluso superior al hidrógeno. Este gas se deriva de la mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono ($H_2 + CO$) y funge como una materia prima de gran valor para diversas aplicaciones en la industria (Haarlenmer y Bansabath 2016; Vázquez y col., 2009; Wilhelm y col., 2001).

El gas de síntesis, al estar compuesto en su mayoría por hidrogeno, es uno de los grandes precursores de este y al variar su la composición del gas de síntesis, enfocado en la relación molar de H_2/CO , se puede producir metanol (Rytter y col., 2016).

2.4.4.1 Métodos de producción del gas de síntesis

Al ser el hidrógeno uno de los principales componentes del gas de síntesis, todos los procesos de producción del hidrógeno permiten obtener el gas sintético (Martínez y col., 2017; Wilhelm y col., 2001).

- a) Reformado de metano con vapor (RMV)

El proceso de reformación de metano con vapor de agua (RMV) es la tecnología dominante para la producción del gas de síntesis (Antzara y col., 2015; Dincer y Canan, 2015; Jansen y col., 2015; Makarsin y col., 2015; Voldsund y Anantharaman, 2016; Zubizarreta, 2015). El proceso se lleva normalmente con temperaturas de entre 500°C y 900°C a presiones de 20 a 35 Atm y regularmente con catalizadores de níquel para asegurar una máxima conversión del metano (Celik y Yildiz, 2017; Yancheshme y col., 2016; Zubizarreta, 2015). El método RMV tiene entre sus principales ventajas el hecho de ser una tecnología establecida y ampliamente utilizada en el mundo, teniendo una eficiencia superior al 80%, la más alta relación molar relativa de H₂/CO (relación de 3), además se produce hidrógeno de alta pureza (99.95%) (Da Silva y col., 2017; Yancheshme y col., 2016). Sin embargo, requiere de grandes cantidades de energía al ser una reacción altamente endotérmica, tiene altos gastos de operación, genera CO₂ debido a la combustión de combustibles fósiles para obtener vapor de agua y al tratarse de un proceso catalítico, el catalizador llega a desactivarse debido a la formación de carbón residual depositado (Da Silva y col., 2017).

b) Reformado auto – térmico (RAT)

Está conformado por una sección de precalentamiento del combustible, un reactor reformador auto-térmico con un lecho de catalizador y una sección de recuperación de calor y un separador de gas. El combustible, regularmente metano, el vapor de agua y/o el oxígeno son alimentados al reactor a presión. El calor necesario para la reformación es aportado por la oxidación parcial, alcanzando temperaturas de 950°C a 1,050°C (De los Ríos, 2010; Khila y col., 2017).

c) Gasificación de carbón

Consiste fundamentalmente en la oxidación parcial del combustible. Este proceso no es utilizado frecuentemente en la actualidad, debido a su complejidad en la operación (temperaturas de hasta 1,350°C y presiones de 1 a 70 atmósferas) y al daño que provoca al medio ambiente. Solo es conveniente, económicamente, en procesos a grandes escalas como la gasificación integrada en ciclo combinado (IGCC) (De los Ríos y col., 2010; Jeong y col., 2017).

d) Oxidación parcial de metano (OPM)

El proceso se puede realizar con una relación H₂/CO molar de 2. Presenta un ahorro sustancial de energía, requiere de pequeños reactores, exhibe altas conversiones de metano (alrededor del 90%) y selectividades hacia el hidrógeno (entre un 94% y 99%) (De los Ríos y col., 2013). Pero, por otro lado, se realiza en altas temperaturas (900°C a 1500°C), necesita de una planta de oxígeno en el

lugar y un estricto control de flujo de oxígeno de acuerdo con la relación molar de metano alimentado, haciendo muy costoso el proceso (De los Ríos y col., 2013).

La Tabla 2.3 muestra una comparación de los procesos de producción del gas de síntesis empleando metano como materia prima.

Tabla 2.3 Comparativa de métodos de producción de gas de síntesis a partir de metano (De los Ríos y col., 2010)

Proceso	Condiciones de operación		H ₂ /CO	Eficiencia
	Temperatura (°C)	Presión (atm)		
RMV	750 a 900	15 a 40	3 a 5	83%
RAT	850 a 1050	20 a 40	1.6 a 2.62	74% a 71%
OPM	1200 a 1500	20 a 150	1.6 a 2	70% a 80%
OPM catalítico	800 a 1000	10 a 80	2	Mayor a 80%

Capítulo 3. Biocombustibles en el marco internacional y nacional

El interés por los biocombustibles inició tras la crisis de petróleo de 1970. El impulso de las tecnologías de producción de biocombustibles se ha visto enriquecido en los últimos años por mandatos, subsidios, preocupaciones por el cambio climático, objetivos de emisiones y seguridad energética (Carvalho y Torroba, 2021).

La producción de biocombustibles de EE. UU. y la Unión Europea se vio incrementada gracias al empleo de subsidios, mandatos y tarifas presenciales de importaciones, razón por la que, a partir de 2002 existió un incremento acelerado en los precios. Sin estas políticas, la producción de biocombustibles sería menor y los costos de productos de alimentos serían más pequeños (Salinas y Gasca, 2009). Además, en Asia, la producción de biocombustibles requiere un uso adicional de tierras, agua y fertilizantes (Dellomonaco y col., 2010).

El impulso que puedan tener los biocombustibles dentro del mercado internacional puede traer consigo un mayor número de trabajos rurales, un aumento sobre la renta, una reducción de emisiones de GEI y una reducción de la dependencia de importaciones de petróleo por parte del país de origen.

3.1 Normativas

No cabe duda de que los biocombustibles son la alternativa con mayores perspectivas para encaminar al ser humano hacia la independencia de los combustibles fósiles y para satisfacer la demanda de energía global, gracias a sus propiedades de combustión y poder calorífico comparables. El desarrollo de los biocombustibles será una necesidad en los años futuros, por lo que la regulación o implementación de normas que guíen la producción y distribución de combustibles renovables es una gran necesidad para países en desarrollo para asentar las bases hacia la independencia energética.

El impulso que tienen los biocombustibles se ha derivado de la implementación de iniciativas y regulaciones de los diferentes países, mismas que buscan atender, principalmente, la demanda de combustibles para conductores estadounidenses y europeos. Por ejemplo, la Unión Europea estipuló para 2020, que el 10% del combustible utilizado para el sector del transporte sea biocombustible. Sudáfrica fijó un objetivo similar, con el 2%. En los EE. UU., se decidió producir 136 barriles de biocombustible para 2022, mientras que China decidió producir 13 barriles de etanol y 2.3 barriles de biodiésel para 2020 (Ramos Delgado, 2012).

Las regulaciones y aplicaciones de los biocombustibles no son igual en todos los países, las porciones de etanol / gasolina varían de un país a otro. Por ejemplo, en

Finlandia se emplea una mezcla E6, mientras que en Etiopía es E10. Un caso similar ocurre con el biodiésel, en Tailandia se emplean mezclas B3 y B5, mientras que en España se emplean mezclas B6 y B7 en 2012 (Ramos Delgado, 2012).

Con el fin de garantizar la calidad de la mezcla de biodiésel se cuenta con las normas establecidas por la Sociedad Americana de Ensayos y Estándares de Materiales (American Society for Testing and Material Standards, o por sus siglas en inglés ASTM), sociedad encargada de regular, comprobar y aceptar productos y transacciones comerciales a nivel mundial, y por el Comité Europeo para la Normalización (CEN), organización que fomenta la economía europea en el negocio global, así como buscar el bienestar de los ciudadanos y del medio ambiente (Grande Tovar, 2012).

En la actualidad, se cuenta con la norma ASTM D 975, la más importante para combustibles diésel. La norma comprende sus principales características, así como los métodos de ensayo que se deben llevar a cabo para determinar su calidad. Dentro de las propiedades a considerar con esta norma se encuentran la tendencia al autoencendido, la viscosidad, el desempeño a baja temperatura, la capacidad lubricante, la pureza y compatibilidad con materiales y el manejo seguro (Benjumea y col., 2009). La Tabla 3.1 muestra los requerimientos de la ASTM D975 para diésel.

Las propiedades apropiadas de operabilidad a baja temperatura deben ser acordadas entre el comprador y el proveedor de combustible para el uso previsto y las temperaturas ambientales previstas. Los métodos de prueba D 4539 y D 6371 pueden ser especialmente útiles para estimar los límites de operabilidad del vehículo a baja temperatura cuando se utilizan mejoradores de flujo. Debido a las diferencias en el sistema de suministro de combustible, el diseño del motor y el método de prueba es posible que las pruebas de operabilidad a baja temperatura no rinden el mismo grado de protección en varias clases de operación del vehículo. Temperaturas mínimas del aire del décimo percentil se aprecian en el Apéndice X4 (mostrado en las Figuras 3.1 y 3.2, así como en la Tabla 3.2) como un medio para estimar las temperaturas regionales esperadas. Las temperaturas mínimas del aire del décimo percentil se pueden usar para estimar las temperaturas objetivo-regionales esperadas para usar con los métodos de prueba D 2500, D 4539 y D 6371.

Tabla 3.1 Requerimientos de la ASTM D975 para diésel (ASTM, 2004)

Propiedad	Método de prueba ASTM ^B	Grado						
		No. 1-D S15	No. 1-D S50 0 ^C	No. 1-D S50 00 ^D	No. 2-D S15	No. 2-D S50 0 ^{C,E}	No. 2-D S500 0 ^{D,E}	No. 4-D ^D
Punto de inflamabilidad (°C, min)	D 93	38	38	38	52 ^E	52 ^E	52 ^E	55
Agua y sedimentos (% vol, máx)	D 2709 D 1796	0.05 ...	0.05 ...	0.05 ...	0.05 ...	0.05 ...	0.05 ...	... 0.5
Destilación: uno de los requerimientos se debe cumplir								
1. Destilación física	D 86							
Temp. Dest. °C 90%, % Vol. Recup.								
Mín		...	...	...	282 ^E	282 ^E	282 ^E	...
Máx		288	288	288	338	338	338	...
2. Destilación simulada	D 2887							
Temp. Dest. °C 90%, % Vol. Recup.								
Mín						300 ^E	300 ^E	
Máx		304	304			356	356	
Viscos. Cinem., mm ² /S a 40°C	D 445							
Mín		1.3	1.3	1.3	1.9 ^E	1.9 ^E	1.9 ^E	5.5
Máx		2.4	2.4	2.4	4.1	4.1	4.1	24
Ceniza % mass, máx	D 482	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1
Azufre, ppm (µg/g) ^F máx	D 5453	15	...	...	15	...	...	...
% mass, máx	D 2622 ^G	...	0.05	...	...	0.05	...	...
%mass, máx	D 129	...	...	0.5	...	...	0.5	2
Clasificación de corrosión de la tira de cobre, máx 3 h a 50°C	D 130	No. 3	No. 3	No. 3	No. 3	No. 3	No. 3	...
Número de cetano, mín ^H	D 613	40'	40'	40'	40'	40'	40'	30'
Una de las propiedades debe cumplirse								
1. Índice de cetano, min	D 976-	40	40	...	40	40	...	...
2. Aromaticidad, % vol, máx	80 ^G D 1319 ^G	35	35	...	35	35	...	...
Requerimientos de operación								
Punto de nube, °C, máx	D 2500	J	J	J	J	J	J	J
LTFT/CFPP, °C, máx	D 4539/ D 6371							
Residuo de carbono en 10% de residuo de destilación, % en masa, máx	D 524	0.15	0.15	0.15	0.35	0.35	0.35	

A – Para cumplir con las condiciones operativas especiales, se pueden acordar modificaciones de los requisitos de limitación individuales entre el comprador, el vendedor y el fabricante.

B – Los métodos de prueba indicados son los métodos de árbitro aprobados.

C – De acuerdo con las reglamentaciones de EE. UU. si los grados No. 1-D S500 o No. 2-D S500 se venden con fines exentos de impuestos, entonces, en o más allá de los tanques de almacenamiento de la terminal, el 26 CFR Parte 48 exige que contengan el tinte Solvent Red 164 a una concentración espectral equivalente a 3.9 libras por cada mil barriles del solvente estándar sólido Rojo 26, o se debe recaudar el impuesto.

D – De acuerdo con reglamentaciones de EE. UU. los grados No. 1-D S5000, No. 2-D S5000 y No. 4-D requieren que el 40 CFR Parte 40 contenga suficiente solvente del tinte Rojo 164 por lo que su presencia es visualmente evidente. En o más allá de los tanques de almacenamiento de la terminal, el 26 CFR Parte 48 requiere que contenga el Solvent Red 164 a una concentración espectral equivalente a 3.9 lb por cada mil barriles del colorante sólido estándar Solvent Red 26.

E _ Cuando se especifica un punto de enturbiamiento inferior a -12°C como puede ocurrir durante los meses fríos, se permite y es una práctica normal de mezcla combinar los grados No. 1 y No. 2 para cumplir con los requerimientos de baja temperatura. En ese caso, el punto de inflamación mínimo será de 38°C, la viscosidad mínima a 40°C será de 1.7 mm²/s y la mínima del 90% se renunciará a la temperatura recuperada.

F – Se pueden aplicar otros límites de azufre en áreas seleccionadas de EE. UU. y en otros países.

G – Estos métodos de prueba se especifican en 40 CFR Parte 80.

H – Cuando el número de cetano por el método de prueba D 613 no esté disponible, se puede usar el método de prueba D 4737 como una aproximación.

I – Las bajas temperaturas ambientales, así como el funcionamiento del motor a grandes altitudes, pueden requerir el uso de combustibles con índices de cetano más altos.

J – No es realista especificar propiedades a baja temperatura que aseguren un funcionamiento satisfactorio en todas las condiciones ambientales. En general, punto de enturbiamiento (o punto de aparición de cera).

La prueba de flujo a baja temperatura y la prueba del punto de obstrucción del filtro frío se pueden usar como una estimación de los límites de temperatura de funcionamiento para los grados No. 1-D S500, No. 2-D S500 y aceites combustibles diésel No.1-D S5000 y No. 2-D S5000. Sin embargo, se puede lograr una operación satisfactoria por debajo del punto de turbidez (o punto de aparición de cera) dependiendo sobre el diseño del equipo, las condiciones de operación y el uso de aditivos mejorados de flujo.

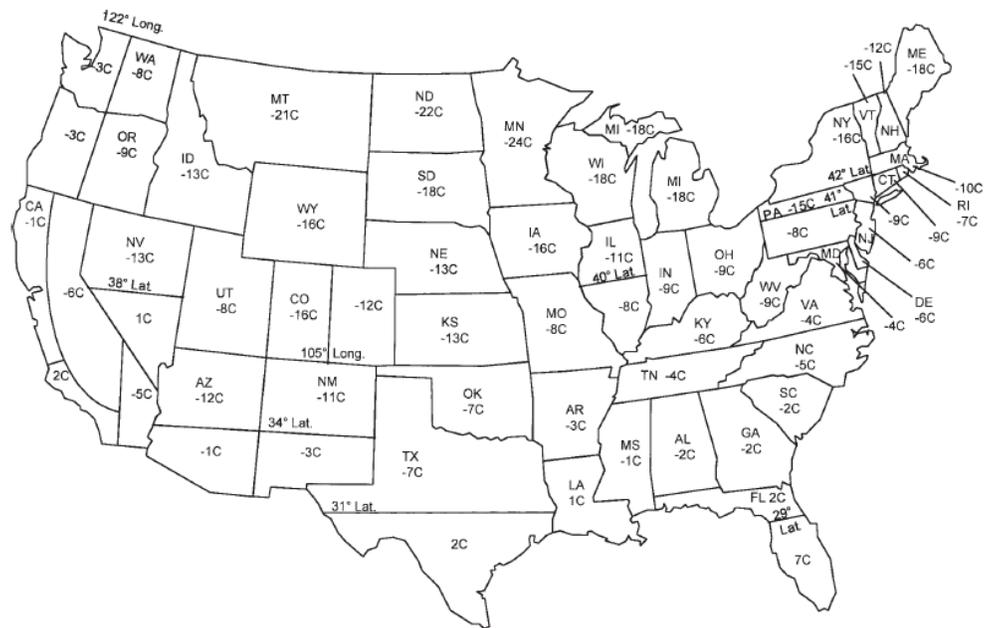


Figura 3.1 Apéndice X4. Décimo percentil de marzo, mínima temperatura No. 1 (ASTM Internacional, 2004)

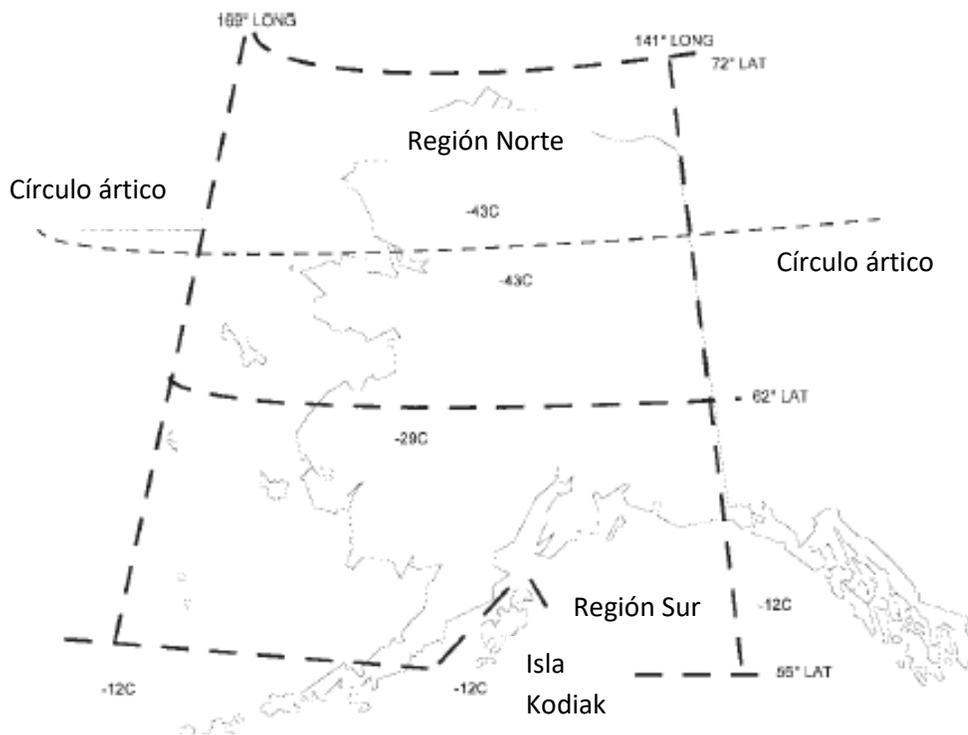


Figura 3.2 Apéndice X4. Décimo percentil de marzo, mínima temperatura No. 2 (ASTM, 2004)

Tabla 3.2 Apéndice X4. Décimo percentil, mínima temperatura (ASTM, 2004)

Estado		Décimo percentil Temp. °C, min					
		Oct	Nov	Dec	Ene	Feb	Marz
Alabama		4	-3	-6	-7	-3	-2
Alaska	Norte	-25	-37	-45	-49	-47	-43
	Sur	-11	-13	-18	-32	-32	-29
	Sureste	-4	-11	-16	-19	-13	-12
Arizona	Norte 34° lat	-4	-12	-14	-17	-16	-12
	Sur 34° lat	7	0	-2	-4	-3	-1
Arkansas		2	-4	-7	-11	-7	-3
California	Costa norte	3	0	-2	-2	-1	-1
	Interior	2	-3	-4	-7	-6	-6
	Costa sur	6	2	0	-1	0	2
	Sureste	1	-6	-8	-11	-7	-5
Colorado	Este 105° long	-2	-12	-14	-19	-15	-12
	Oeste 105° long	-8	-18	-25	-30	-24	-16
Connecticut		-1	-7	-16	-17	-16	-9
Delaware		2	-3	-10	-11	-10	-6
Florida	Norte 29° lat	7	1	-2	-3	-1	2
	Sur 29° lat	14	7	3	3	5	7
Georgia		3	-2	-6	-7	-6	-2
Idaho		-4	-13	-18	-21	-18	-13
Illinois	Norte 40° lat	-1	-9	-19	-21	-18	-11
	Sur 40° lat	1	-7	-16	-17	-15	-8
Indiana		-1	-7	-16	-18	-16	-9
Iowa		-2	-13	-23	-26	-22	-16
Kansas		-2	-11	-15	-19	-14	-13
Kentucky		1	-6	-13	-14	-11	-6
Louisiana		5	-1	-3	-4	-2	1
Maine		-3	-10	-23	-26	-26	-18
Maryland		2	-3	-10	-12	-10	-4
Massachusetts		-2	-7	-16	-18	-17	-10
Michigan		-2	-11	-20	-23	-23	-18
Minnesota		-4	-18	-30	-34	-31	-24
Mississippi		3	-3	-6	-6	-4	-1
Missouri		1	-7	-14	-16	-13	-8
Montana		-7	-18	-24	-30	-24	-21
Nebraska		-3	-13	-18	-22	-19	-13
Nevada	Norte 38° lat	-7	-14	-18	-22	-18	-13
	Sur 38° lat	8	0	-3	-4	-2	1
Nueva Hampshire		-3	-8	-18	-21	-21	-12
Nueva Jersey		2	-3	-11	-12	-11	-6
Nuevo Mexico	Norte 34° lat	-2	-11	-14	-17	-14	-11
	Sur 34° lat	4	-4	-8	-11	-7	-3
Nueva York	Norte 42° lat	-3	-8	-21	-24	-24	-16
	Sur 42° lat	-1	-5	-14	-16	-15	-9
Carolina del norte		-1	-7	-10	-11	-9	-5
Dakota del norte		-4	-20	-27	-31	-29	-22
Ohio		-1	-7	-16	-17	-15	-9
Oklahoma		1	-8	-12	-13	-8	-7
Oregon	Este 122° long	-6	-11	-14	-19	-14	-9
	Oeste 122° long	0	-4	-5	-7	-4	-3
Pennsylvania	Norte 41° lat	-3	-8	-19	-20	-21	-15
	Sur 41° lat	0	-6	-13	-14	-14	-8
Rhode Island		1	-3	-12	-13	-13	-7
Carolina del sur		5	-1	-5	-7	-4	-2
Dakota del sur		-4	-14	-24	-27	-24	-18
Tennessee		1	-5	-9	-11	-9	-4
Texas	Norte 31° lat	3	-6	-9	-13	-9	-7
	Sur 31° lat	9	2	-2	-3	-1	2
Utah		-2	-11	-14	-18	-14	-8
Vermont		-3	-8	-20	-23	-24	-15
Virginia		2	-3	-9	-11	-9	-4
Washington	Este 122° long	-2	-8	-11	-18	-11	-8
	Oeste 122° long	0	-3	-3	-7	-4	-3
Virginia del este		-3	-8	-15	-16	-14	-9
Wisconsin		-3	-14	-24	-28	-24	-18
Wyoming		-4	-15	-18	-26	-19	-16

Las normas de calidad para biodiésel más difundidas por el mundo son las ASTM D 6751 y la EN 14214, que han sido vitales para el desarrollo comercial del biocombustible y servido de base para el desarrollo de la normativa interna de cada país (Benjumea y col., 2009). En las Tablas 3.4 y 3.5 se presentan los límites de las normas ASTM D 6751 y de EN 14214.

Tabla 3.4 Límites de la norma ASTM D 6751-09 para biodiésel (Knothe, 2010)

Propiedad	Límite		Unidad	Método de prueba
	Mínimo	Máximo		
Punto de inflamación	93		°C	D 93
Control de alcohol Debe cumplir con una de las siguientes:				
1. Contenido de metanol	130	0.2	Masa % °C	EN 14110 D 93
2. Punto de inflamación				
Agua y sedimentos		0.05	% volumen	D 2709
Número ácido		0.50	Mg KOH / g	D 664
Ceniza sulfatada		0.02	% masa	D 874
Corrosión lámina de cobre		No. 3		D 130
Residuo de carbono		0.05	% masa	D 4530
Viscosidad cinemática	1.9	6.0	Mm ² / s	D 445
Número de cetano	47			D 613
Punto de turbidez		Reporte	°C	D 2500
Filtrabilidad de impregnado en frío		360	Segundos	Anexo A1
Estabilidad de oxidación	3		Horas	EN 14112
Glicerina libre		0.02	% masa	D 6584
Glicerina total		0.24	% masa	D 6584
Sodio y potasio, combinados		5	Ppm (µg/g)	EN 14538
Calcio y magnesio, combinados		5	Ppm (µg/g)	EN 14538
Azufre*		0.0015 0.05	% masa (ppm)	D 5453
Contenido de fósforo		0.001	% masa	D 4951
Temperatura de destilación, temperatura atmosférica equivalente, 90% recuperado		360	°C	D 1160

Diferentes límites de azufre para S15 (15 ppm azufre) y S500 (500 ppm azufre combustible).

Tabla 3.5 Norma Europea para biodiésel EN 14214 - 2008 (Knothe, 2010)

Propiedad	Límite		Unidad	Método de prueba
	Mínimo	Máximo		
Contenido de éster	96.5			EN 14103
Punto de inflamación	101		°C	EN ISO 2719 EN ISO 3679
Contenido de metanol		0.20	% (m/m)	EN 14110
Contenido de agua		500	Mg / kg	EN ISO 12937
Valor ácido		0.50	Mg KOH / g	EN 14104
Ceniza sulfatada		0.02	% masa	ISO 3987
Corrosión lámina de cobre		No. 1		EN ISO 2160
Residuo de carbono (100% residuo dist.)		0.30	% (m/m)	EN ISO 10370
Densidad a 15°C	860	900	Kg/m ³	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidad cinemática	3.5	5.0	Mm ² / s	EN ISO 3104
Número de cetano	51			EN ISO 5165
Estabilidad de oxidación, 110 °C	6		Horas	EN 14112
Glicerina libre		0.02	% (m/m)	EN 14105
Glicerina total		0.24	% (m/m)	EN 14105
Contenido de monoglicéridos		0.80	% (m/m)	EN 14105
Contenido de diglicéridos		0.20	% (m/m)	EN 14105
Contenido de triglicéridos		0.20	% (m/m)	EN 14105
Índice de yodo		120	g yodo / 100 g	EN 14111
Contenido de ácido linoléico		12	% (m/m)	EN 14103
Contenido de esteres metálicos de ácidos grasos (FAME) con ≥4 enlaces dobles		1	% (m/m)	
Metales Grupo I (Na + K)		5	mg/g	EN 14108 EN 14109 EN 14538
Metales Grupo II (Ca + Mg)		5	mg/g	EN 14538
Azufre		10	mg/g	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Contenido de fósforo		4	mg/g	EN 14107

La obligación de mezclar biocombustibles con combustibles fósiles se lleva a la práctica a través de diversos mecanismos. Una de las prácticas más difundidas es el mandato de mezcla obligatoria, tanto de etanol con gasolinas como de biodiésel

con diésel fósil. Dichas mezclas suelen expresarse en unidades volumétricas (mezclas de volumen/volumen) o en unidades energéticas (mezclas de energía/energía). Contribuyendo a esto se tienen los mandatos generales, que hacen hincapié en la obligatoriedad de usar biocombustibles en mezclas con combustibles fósiles. Además, se encuentra un mecanismo adicional, fijar metas de reducción de gases de efecto invernadero promoviendo el uso de biocombustibles para cumplirlo (Torroba y Carvalho, 2020).

Se tienen contabilizados alrededor de 60 países con obligaciones de uso de etanol mediante estos tres tipos de mecanismos. Dentro de los mandatos de mezcla obligatoria se destaca a Brasil con un rango de mezcla de 18% a 27.5% de bioetanol en gasolina, seguido por Paraguay con un 25% y por Argentina con un 12%; pero dentro de estos mandatos de mezcla obligatoria existe una larga lista de países con un mandato obligatorio del 10%, el más utilizado en el mundo. En lo referente a mandatos generales se destacan países como Finlandia con el 18% y Países Bajos con el 12.5%. En la Figura 3.3 se aprecian los mandatos directos e indirectos del uso de etanol en gasolina a nivel mundial para 2020 (Torroba y Carvalho, 2021).

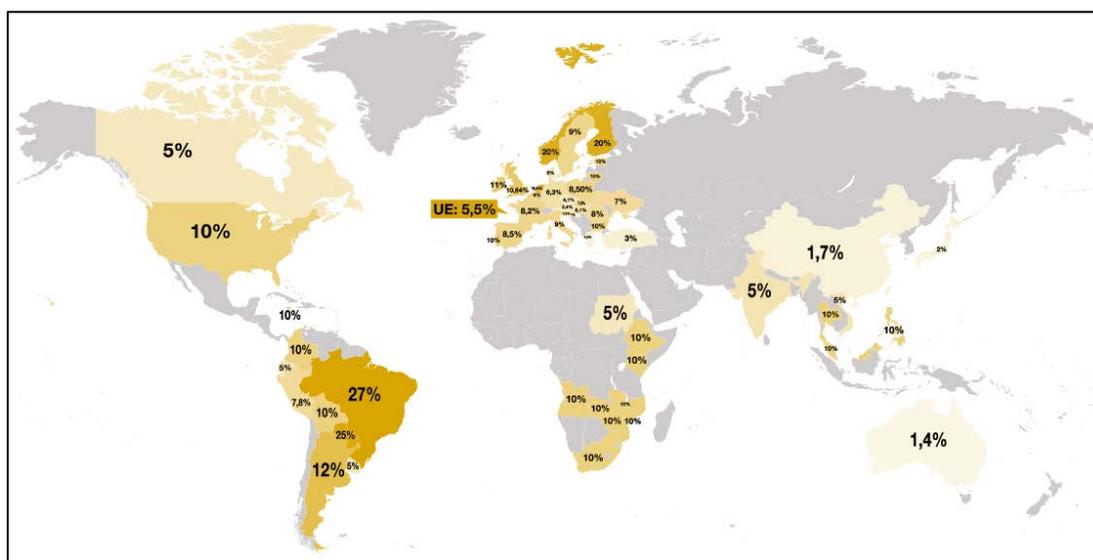


Figura 3.3 Mandatos directos e indirectos de uso de etanol en gasolina en 2020 (Torroba y Carvalho, 2021)

En lo referente al biodiésel se contabilizaron 49 países con obligación de uso de biodiésel bajo los tres mecanismos. Bajo el mecanismo de mandatos de mezcla obligatoria se destaca Indonesia con una mezcla obligatoria del 20%, seguido por Brasil con el 12% y por Argentina, Colombia y Malasia con el 10%. Referente a las mezclas generales se destaca Finlandia con el 20%, Noruega con el 20% y Países Bajos con el 16.4%. Un caso de relevancia es Suecia, que tiene fuertes metas de

reducción de gases de efecto invernadero logrando una penetración de biodiésel y diésel renovable del 33%, dicho comportamiento se aprecia en la Figura 3.4 (Torroba y Carvalho, 2021).

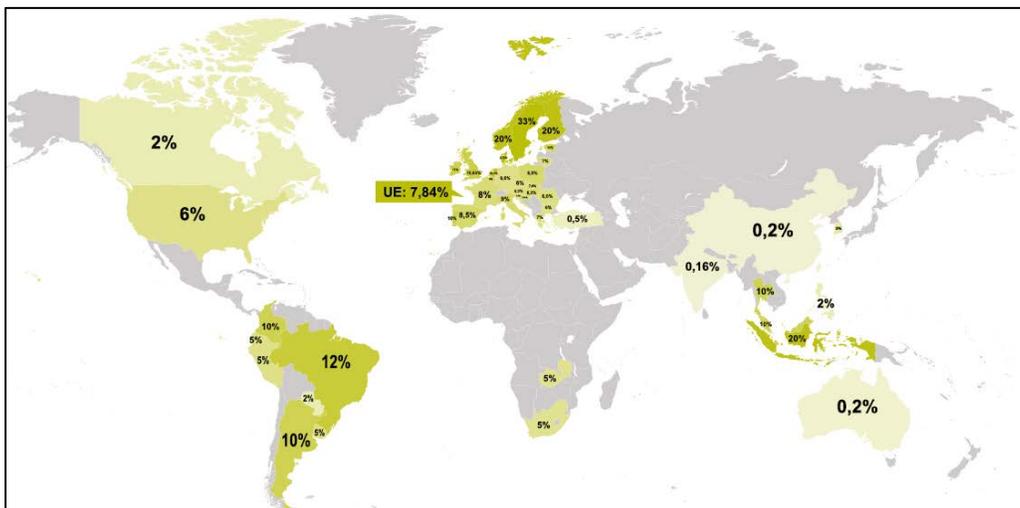


Figura 3.4 Mandatos directos e indirectos de uso de biodiésel en diésel fósil en 2020 (Torroba y Carvalho, 2021)

3.1.1 EE. UU.

En los EE. UU., los subsidios oscilan entre los 5.5 y 7.3 mil millones de dólares anuales, subsidios que apoyan la producción en crecimiento exponencial de etanol de maíz. Gracias a este impulso, la producción de etanol ha crecido de 16,200 millones de litros en 2005 a cerca de 24,500 millones de litros en 2007, con lo que se espera un crecimiento en los próximos años que alcance los 136.27 mil millones de litros de combustibles renovables para 2022 (Singh y col., 2019).

Sin embargo, diversos estados de la unión americana mantienen reducciones de impuestos especiales sobre biocombustibles puros y mezclas, con un valor aproximado de 0.2 dólares estadounidenses por galón (1.09 pesos mexicanos por litro). Complementando así con mandatos sobre biocombustibles que respaldan aún más el consumo de biocombustibles (Singh y col., 2019).

EE. UU., produce además un pequeño volumen de biodiésel, principalmente a base de soja. Los productores de soja también reciben subsidios del Gobierno Federal. El apoyo al biodiésel es mucho más reciente. Minnesota fue el primer estado en inducir el requisito de que el diésel debe contener al menos un 2% de biodiésel en 2005. Para enero de 2005, se introdujo un crédito fiscal sobre el consumo de 1 centavo estadounidense por galón de biodiésel (0.0545 pesos mexicanos por litro por cada punto porcentual de la mezcla de combustible).

El sistema de innovación se apoya en innumerables iniciativas públicas y privadas interesadas en la producción de biodiésel en el corto plazo y que se encuentran en búsqueda de inversionistas. En el país existe un fuerte sistema innovación relacionado con la producción de fuentes alternativas de energía en general y de biodiésel en particular, que resulta muy difícil y fuera del alcance de este trabajo intentar describirlo (IICA, 2010).

3.1.2 Brasil

Desde la década de 1970, Brasil ha encabezado la producción de biocombustibles, particularmente la producción de etanol de la caña de azúcar. El país amazónico ha conseguido ser líder gracias a una combinación de clima, suelo y alrededor de 45 años de investigación y desarrollo tecnológico sostenible, logrando producir caña de azúcar al menor costo en la actualidad y etanol para el transporte automotor (Singh y col., 2019).

Brasil no ofrece subsidios en producción de etanol. Sin embargo, el Gobierno Brasileño, desde 1977, ha hecho obligatorio que los vehículos ligeros tengan la mezcla E20 y los vehículos en funcionamiento utilicen mezclas de hasta E25. El mandato E20 causa una distorsión mínima, porque requiere etanol hasta el nivel de costo equivalente. Debido a que Brasil tiene el único etanol competitivo con el petróleo, el país ha sido aclamado como un ejemplo de subsidio exitoso a los biocombustibles, gracias a que, supuestamente, su mandato es por razones ambientales más que económicas (Marcus, 2007).

Aunque el etanol no está subvencionado en la actualidad, el gobierno ha concedido exenciones fiscales a las empresas productoras de biodiésel para apoyar la producción, investigación y desarrollo de biodiésel. El Gobierno Brasileño creó el Programa Brasileño de biodiésel en 2003 con el fin de fomentar la producción nacional de biodiésel a partir de aceite vegetal puro y limitar la importación de biodiésel (Singh y col., 2009).

Todas las estaciones de servicio en Brasil venden etanol hidratado casi puro (E95) y gasohol anhidro, y aproximadamente una cuarta parte también vende una mezcla de etanol anhidro al 20% (E20). En Brasil casi dos tercios del etanol consumido son de tipo anhidro. Debido al alza en los precios internacionales del azúcar, el precio del etanol ha sufrido un aumento más rápido que la gasolina. Esto ha motivado al gobierno Brasileño a reducir el contenido mínimo de etanol en la mezcla de gasolina, pasando del 25% al 20% para evitar la escasez de etanol. En Brasil, gasolina que ya no contiene etanol ya no puede comercializarse (Singh y col., 2009).

3.1.3 Unión Europea

En los últimos años, el consumo de biocombustibles ha crecido significativamente. Estimaciones del año de 2006, arrojaron que el consumo de biocombustibles tuvo un crecimiento de 3 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MTEP) a 6 millones de toneladas equivalentes de petróleo en 2005, lo que significó un crecimiento que rondó el 86.5%, alcanzando una participación del 1.9% en el sector del transporte. En la Unión Europea predomina el biodiésel con un 71.6% en cuanto a biocombustibles destinados al transporte, teniendo una menor influencia de etanol con un 16.3% y otros biocombustibles que rondan el 12.1% (Singh y col., 2019).

Los derechos de importación sobre el biodiésel y los aceites vegetales oscilan entre el 0% y 5%. En Europa, los biocombustibles se han defendido como una fuente que proporciona nuevos ingresos para los agricultores tanto a nivel nacional como al extranjero, aumenta la seguridad del suministro de energía y reduce emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del uso del transporte (CEC, 2006).

En la Unión Europea no existe un impuesto especial sobre el consumo en toda la comunidad de combustibles para el transporte, y los estados que son miembros pueden otorgar preferencias fiscales de acuerdo con sus necesidades. Sin embargo, se están realizando esfuerzos para aumentar el uso de biocombustibles y así cumplir con un mandato propuesto para cubrir el 10% de las necesidades de energía del transporte con biocombustibles para 2020. Durante la cumbre del Consejo Europeo (llevada a cabo del 8 al 9 de marzo de 2007), los estados miembros de la Unión Europea respaldaron de manera formal el objetivo de biocombustible del 10%, pero se dejó en claro que este objetivo estará sujeto a la producción sostenible de biocombustible y que los llamados biocombustibles de segunda generación se vuelvan viables. Condición vinculada a las preocupaciones sobre la sostenibilidad de la primera generación, fabricados a partir de cultivos agrícolas (CCE, 2007).

Cultivos energéticos de estados miembros de la Unión Europea están fuertemente subsidiados y los agricultores son compensados por reservar tierras. Las tierras retiradas representan cerca del 10% del total de tierras agrícolas de la Unión Europea, y se utiliza el 95% del tiempo para cultivos energéticos. Dichos cultivos también cumplen los requisitos para recibir pagos por retirada de tierras y ayudas a los cultivos energéticos, y están excluidos de las cuotas de producción. Nueve estados miembros de la Unión Europea además establecieron requisitos obligatorios de mezcla, y la mayoría combina el mandato con exenciones de impuestos especiales sobre el combustible. Si bien el apoyo en la inversión de capital es difícil, por los programas individuales, los datos disponibles arrojan que

la ayuda estatal ha llegado a representar hasta el 60% de la inversión inicial, y los gobiernos otorgan, regularmente, subvenciones que representan entre el 15% y 40% de la inversión en infraestructura de capital (Singh y col., 2019).

3.1.4 China

China centra sus políticas especialmente en la producción de etanol, debido a que el país es un importador neto de aceite vegetal. En el año de 2002, el gobierno lanzó el Programa de Producción del Etanol para reducir las existencias excesivas de maíz. En 2004, la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma (CNDR) inició el plan estatal de proyectos piloto extensivos sobre etanol gasolina para automóviles con el que el gobierno pueda controlar tanto la producción y distribución de etanol. En 2006, se ejecutaron algunos proyectos piloto en 5 provincias y 27 ciudades alcanzando el objetivo de combinación del 10% (Singh y col., 2019).

En 2007, la CNDR puso en marcha el Plan de desarrollo a medio y largo plazo de las energías renovables, que establece que la participación de las energías renovables en el consumo total de energía primaria debe aumentar al 10% y 15% para los años de 2010 y 2020, respectivamente. También se establecieron objetivos de consumo de biodiésel para 200,000 toneladas para 2010 y 2 millones de toneladas para 2020. El gobierno está completamente comprometido con el cumplimiento de estos objetivos. Para llevarlos a cabo no se permite que las fábricas empleen maíz en la producción de etanol, sino que fomenten el uso de cultivos como mandioca, sorgo y batata. Estas restricciones reducen el potencial de producción de China, a pesar de ello, se percibió una producción que ronde 1.7 millones de toneladas en 2009 (Singh y col., 2019).

En 2007, se concedió a los productores una subvención de 200 dólares estadounidenses por tonelada, sustituida en 2008 por pagos basados en la evaluación del rendimiento de cada planta. Además, los productores de etanol no tienen que pagar el impuesto al consumo del 5% y el IVA del 17%, similar a lo que ocurre en la Unión Europea y EE. UU. Además, China investiga sobre la producción de biocombustibles de segunda generación. El subsidio es aproximadamente 438 dólares por hectárea para las plantaciones de *Jatropha* y 394 dólares para la yuca (Singh y col., 2019).

En 2007, la CNDR firmó un memorando de entendimiento con los departamentos de Energía y Agricultura de Estados Unidos para facilitar un mayor desarrollo de los biocombustibles y facilitar la transferencia de conocimientos científicos y técnicos sobre materias primas y producción de biocombustibles. Aunque todavía no se han establecido mandatos generalizados en China, existen mezclas obligatorias de E10 en cinco provincias: Heilongjiang, Jilin, Liaoning, Anhui y Henan (Singh y col., 2019).

3.1.5 Canadá

Canadá, al igual que EE. UU., exige una mezcla de gasolina regulada con etanol. El proyecto de Ley C – 33 de la Ley de Protección Ambiental estableció en 2010, que la gasolina debe contener un 5% de combustible renovable, así como la adición de un 2% de contenido renovable en el diésel y el aceite de calefacción para 2012. Se estima que, para cumplir con estos objetivos, en el país se deben producir cerca de 1,900 millones de litros de etanol, esto para afrontar las tendencias actuales de venta de gasolina. Para lograr el objetivo de diésel y combustible de calefacción, se debe producir o importar la cantidad de 520 millones de litros adicionales de etanol. Los fabricantes de etanol disfrutaron de una tasa de incentivo de 0.1 dólares canadienses por litro desde abril de 2008, esto gracias al programa “ecoENERGY for Biofuels”. A partir de 2011, la tasa de incentivo comenzó a disminuir en 0.01 dólares canadienses por año hasta alcanzar los 0.04 dólares canadienses en 2015 y 2016. Para biodiésel, el incentivo de tasa es de 0.2 dólares canadienses, se espera que disminuya en los próximos años hasta llegar a 0.06 dólares canadienses para 2016. Además, se han establecido varios esquemas para expandir la producción de biocombustibles a través de un aumento en la capacidad de producción (Singh y col., 2019).

Canadá ha implementado medidas federales con sus propias políticas. Es importante señalar que los países que integran el TLCAN pueden importar los combustibles renovables libres de impuestos, mientras que existen aranceles de importación de 0.05 dólares canadienses por litro de etanol proveniente de Brasil (Singh y col., 2019).

3.1.6 Argentina

A partir de 2007, se comenzaron a subsidiar los biocombustibles, ello con el objetivo de diversificar el suministro de energía, reducir el impacto ambiental y promover el desarrollo rural. El programa está enfocado en biocombustibles convencionales, dado que Argentina ya cuenta con una gran industria de biodiésel a base de aceite de soja, así como una industria de etanol en crecimiento basada en caña de azúcar y granos. Desde enero de 2010, tanto la gasolina y el diésel vendidos en el país deben contener un 5% de biocombustible. Los precios asignados, tanto al etanol como el biodiésel, están establecidos por la ley (Singh y col., 2019).

Los productores de biocombustibles no disfrutaron de incentivos fiscales si venden sus productos en el extranjero. Mientras que los productores que venden en el mercado interno pueden solicitar el reembolso del valor al agregado (IVA) (Singh y col., 2019).

Argentina todavía es un pequeño actor dentro del mercado mundial de los biocombustibles, con una producción en pleno ascenso. Los biocombustibles argentinos, son exportados casi en su totalidad, debido a que disfrutan de aranceles de exportaciones más favorables (una tasa efectiva de 15%) que las materias primas en que se producen. Sin embargo, las nuevas normas de la Unión Europea para los biocombustibles (reducción mínima de 35% en emisiones de GEI) podrían representar una limitación para las exportaciones argentinas de los próximos años (Singh y col., 2019).

3.1.7 México

El Ministerio de Energía, con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica, realizó una evaluación sobre la viabilidad de producir y usar los biocombustibles en el sector del transporte. La evaluación dio como resultado el informe *Potenciales y viabilidad del uso de etanol y biodiésel para el transporte en México*. Dicho informe arrojó que la caña de azúcar es el cultivo más prometedor para la producción de etanol a corto plazo. Además, tras estudiar diferentes insumos para biodiésel, el informe señala que “en todos los casos, los costos de producción de biodiésel son superiores al costo de oportunidad del diésel vendido por PEMEX”, destacando que, en todo caso, los cultivos más competitivos son las palmeras, girasoles y la soja (Ramos Delgado, 2012).

Considerando los antecedentes y evaluación del informe, la Cámara de Diputados aprobó la Ley de Promoción y Desarrollo de Biocombustibles (LPDB) el 26 de abril de 2007. Esta Ley es la columna vertebral de la legislación mexicana en materia de biocombustibles. En dicha ley define al biocombustible como combustibles obtenidos de la biomasa proveniente de materia orgánica de diversas actividades como la agricultura, pecuaria, silvicultura y acuicultura (actividades primarias), así como de sus derivados producidos por procesos tecnológicos sustentables. Además, se creó una Comisión de Biocombustibles, un Programa de Introducción de Biocombustibles y Programas Anuales de producción, almacenamiento, transporte, distribución, comercialización y uso eficiente de biocombustibles. Emprendimientos comerciales involucran cultivos en Veracruz y Chiapas de caña de azúcar y palma, respectivamente (Ramos Delgado, 2012).

El país cuenta con dos leyes que permiten el desarrollo específico de los bioenergéticos, estas son la Ley de Promoción y Desarrollo de Biocombustibles busca la promoción y el desarrollo de los bioenergéticos con el fin de contribuir a la diversificación energética y el desarrollo sustentable, esto para promover el uso del etanol y biodiésel. Promueve, entre otras cosas, la producción de insumos para bioenergéticos, desarrollar la producción, comercialización y uso eficiente de

los biocombustibles para contribuir con la reactivación del sector rural, generar empleos y mejorar la calidad de vida de la población de alta y muy alta marginalidad. Además de procurar reducir las emisiones de gases contaminantes hacia la atmósfera, empleando instrumentos internacionales contenidos en Tratados en los que el país sea parte. Por otro lado, se cuenta con la Ley de Aprovechamiento de las Energías Renovables y Financiamiento para la Transición Energética. La ley busca regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a los del servicio eléctrico público (Cerutti y col., 2011).

Para lograr una transición hacia las energías verdes en el país, se creó el Centro Mexicano de Innovación en Energía (CEMIE) enfocado en la creación de biocombustibles. Además se requiere una correcta elaboración de Mapas de Ruta Tecnológica (MRT), por lo que es importante determinar las necesidades tecnológicas de la industria partiendo del análisis de la información, realizando un enfoque en la revisión de la información relacionada a cada uno de los retos tecnológicos considerados como prioritarios, y con ello, determinar las problemáticas específicas para definir las problemáticas asociadas con la carencia o deficiencia de elementos que componen las capacidades tecnológicas requeridas y, así poder definir las necesidades tecnológicas, identificando alternativas de atención y proponer una estrategia adecuada para disminuir las brechas entre el estado actual y el deseado.

México tiene la Comisión de Bioenergéticos, dicha comisión tiene entre sus funciones (SSPM, 2008):

- Participar dentro del marco del Plan Nacional de Desarrollo y de programas sectoriales en la elaboración de programas a corto, mediano y largo plazo, en la producción y comercialización de insumos, así como la producción, almacenamiento, transporte, distribución, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos.
- Establecer bases y lineamientos para realizar acuerdos o convenios coordinados entre gobiernos federales, estatales y municipales, en lo relativo a producción y comercialización de insumos, así como en producción, almacenamiento, transporte, distribución, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos.
- Dar seguimiento a programas derivados de esta Ley, compromisos adquiridos por los gobiernos Federal, Estatal y Municipal, y de los sectores privado y público, relativos a producción y comercialización de insumos, así como la producción, almacenamiento, transporte, distribución, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos.

- Fomentar la agroindustria, la inversión, infraestructura y tecnologías necesarias para una eficiente producción y comercialización de insumos, así como la producción, almacenamiento, transporte, distribución, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos.
- Proponer lineamientos programativos y presupuestales para realizar actividades y apoyar la producción y comercialización de insumos, además de contribuir en la producción, almacenamiento, transporte, distribución, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos.
- Promover la coordinación de acciones de las Dependencias y Entidades de la Administración Pública Federal, así como revisar la congruencia de las Normas Oficiales Mexicanas, relativas a la producción y comercialización de insumos, y contribuir en la producción, almacenamiento, transporte, distribución, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos.

Esta Comisión se encuentra integrada por los titulares de la SAGARPA, SENER, SEMARNAT, así como de las Secretarías de Economía y de Hacienda y Crédito Público. Siendo la SAGARPA y la SENER, las instituciones que apoyan en la investigación científica y tecnológica para la producción y usos de los bioenergéticos (SSPM, 2008).

En términos de legislaciones y regulaciones aplicables al mercado energético, se pueden destacar las siguientes (IICA, 2010):

- Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo
- Ley del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios (IEPS)
- Ley del IVA
- Ley de Energía para el Campo
- NOM – 086 – SEMARNAT – SENER – SCFI – 2005, especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental.

Además, se destaca la norma mexicana NOM – 016 – CRE – 2016, de especificaciones de la calidad de los petrolíferos, en donde se prohíbe el uso de etanol en las gasolinas que se surten en las zonas metropolitanas del valle de México, de Guadalajara y de Monterrey, pero se permite un volumen de 5.8% de etanol anhidro oxigenante de las gasolinas regular y Premium en el resto del país. Para 2017 se realizó una modificación en la norma, permitiendo incrementar el contenido máximo de etanol anhidro a un 10%, aunque con las prohibiciones en las zonas metropolitanas del valle de México, Guadalajara y Monterrey. Aunque a principios de 2020 esta modificación se determinó como inconstitucional por parte de la Suprema Corte de Justicia de la Nación (CEDRSSA, 2020).

En el país, alrededor de 2.9 millones de hectáreas tienen el potencial para ser sembradas con caña de azúcar. La mayor dificultad es la capacidad de

procesamiento, debido a que solo dos plantaciones cuentan con la tecnología para producir etanol, la Gloria y San Nicolás, ambas en Veracruz. Además, la protección regulatoria de la industria azucarera hace inviable la producción de etanol (Ramos Delgado, 2012).

Los interesados en el negocio de los biocombustibles han señalado que las acciones concretas para implementarlos, que van desde la investigación hasta la producción, continúan siendo muy limitadas, esto derivado en gran medida por el poco apoyo financiero del gobierno.

El fomento de la energía sustentable en el país parece ser insuficiente, es por ello que, en el año 2020, el actual gobierno de México, encabezado por el presidente Andrés Manuel López Obrador publicó una estrategia para promover tecnologías y combustibles más limpios (biocombustibles). Para llevar a cabo esta acción se busca facilitar el acceso a financiamientos para producir bioenergía sustentable, impulsar la inversión necesaria para atraer biocombustibles al mercado y fomentar la investigación científica sobre su producción e impactos ambientales y económicos (CEDRSSA, 2020).

Como parte de la búsqueda de financiamiento, el país ha implementado 2 programas para bioenergía y busca la promoción de dos más (Cerutti y col., 2011):

- Programa para la producción de insumos para biodiésel

El programa promueve la *Jatropha* (piñón, piñoncillo, xuta) para producir biodiésel.

- Programa Nacional de estufas ahorradoras de leña

Establecido en 2006. Se hizo entrega de estufas de manera gratuita, buscando cumplir con la meta del 10% de la demanda objetivo (500 mil familias con estufa).

- Promoción a la producción sustentable de carbón vegetal

La Comisión Nacional Forestal, mediante el programa ProÁrbol, apoya con subsidios en producción de carbón vegetal a través de capacitaciones para mejorar las prácticas productivas, la adquisición de equipos, el apoyo a cadenas productivas, planes de negocios y comercialización.

- Promoción al biogás

La SAGARPA y el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), diseñaron el Proyecto de Apoyo al Valor Agregado de agronegocios con esquemas de riesgo compartido (PROVAR). Este proyecto tiene el fin de apoyar a empresas y personas en la construcción de digestores con un millón de pesos o hasta 250 mil pesos para los que generen electricidad, con un aporte del 50% o más de los beneficiarios. Es un apoyo para productores primarios y empresarios del sector rural.

3.2 Consumo para el transporte

El sector del transporte consume cerca del 30% de toda la energía utilizada en el mundo. Para el año 2020, se consumieron alrededor de 112 millones de barriles diarios, cifra que demuestra la gran dependencia hacia el uso del petróleo.

Una de las mejores alternativas, con gran accesibilidad para satisfacer la creciente demanda energética global es el biodiésel. Comparado con el petrodiésel, el biodiésel tiene características de combustión similares. El biodiésel es el biocombustible con más estudios para ser aplicado en turbinas de gas, especialmente en motores de microturbinas (MMT) de pequeña escala. La combustión de aire a alta temperatura es una de las últimas técnicas en cámaras de combustión de turbinas de gas, reduciendo las emisiones de CO y NOx en temperaturas que superan los 1,000 °C en la entrada de la cámara. Cuando los biocombustibles líquidos se prueban en cámaras de combustión de turbinas de gas han demostrado tener bajas emisiones y una combustión estable con valores caloríficos más bajos, demostrando una reducción en las emisiones de CO y NOx mediante el uso de las tecnologías de combustión catalítica y combustión modesta o intensiva con baja dilución de oxígeno.

La producción de etanol representa la mayor parte del volumen actual de producción de biocombustibles para el transporte (Reijnders y Huijbregts, 2009).

Para el año 2009 la producción mundial de biocombustibles aumentó, principalmente en las regiones productoras, aunque en tasas más lentas a las del periodo 2010 – 2019. Situación derivada del aumento en el precio del aceite vegetal para el caso del biodiésel, y del azúcar para el caso del etanol. A pesar de dicha situación, se espera que el consumo de biocombustibles siga en aumento, primordialmente en las regiones en desarrollo (OCDE y FAO, 2020).

Es claro que los precios mundiales de los biocombustibles están vinculados con la evolución de los precios de las materias primas (en su mayoría están disminuyendo), los precios del petróleo crudo (se mantienen constantes), los costos de distribución y las políticas referentes a los biocombustibles. Ante esto se espera que los precios internacionales aumenten durante los términos nominales (OCDE y FAO, 2020).

En gran medida se espera que las políticas nacionales y la demanda de combustible impulsen el aumento de los mercados de biocombustibles. En el informe Perspectivas de la energía mundial de la IEA World Energy Outlook, se prevé una disminución de la demanda total de combustibles en la Unión Europea y los EE. UU., lo que resulta en un crecimiento limitado en el consumo de biocombustibles, como se aprecia en la Figura 3.5 (OCDE y FAO, 2020).

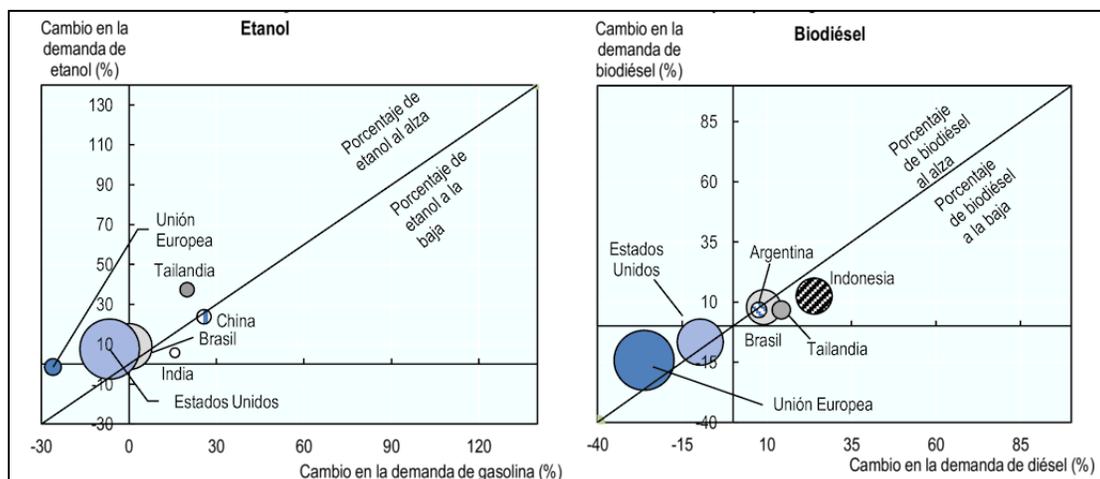


Figura 3.5 Evolución de la demanda de biocombustibles en las principales regiones (OCDE y FAO, 2020)

Las políticas sobre los biocombustibles de diversos países tienden a respaldar los mercados nacionales por lo que los volúmenes internacionales son relativamente bajos. Se espera que en el próximo decenio el comercio mundial de biocombustibles disminuya. Referente al biodiésel se espera una disminución derivada de la reducción de la demanda de biodiésel basado en aceite de palma en la Unión Europea, mientras que para el etanol se espera una disminución moderada. En el tema de la exportación se espera que para Argentina aumenten y para Indonesia disminuyan debido a la demanda interna (OCDE y FAO, 2020)

Bajo la influencia de la evolución de los mercados de aceite vegetal, se prevé que los precios nominales del biodiésel se incrementen a un ritmo más lento, 1.5% al año, mientras que los precios del etanol aumentarán en un 2.5%. En términos reales se espera que los precios del biodiésel bajen en 2023 y los del etanol en 2026. La principal razón por tomar en cuenta para que los precios del etanol sean más fuertes que los del biodiésel es que, hoy en día, los precios del etanol se encuentran en un mínimo histórico y su recuperación esperada en los primeros años del periodo de proyección comenzara a partir de esta base baja, en la Figura 3.6 se puede apreciar la evolución de los precios del etanol y el biodiésel en el periodo comprendido de 2009 a 2029 (OCDE y FAO, 2020).

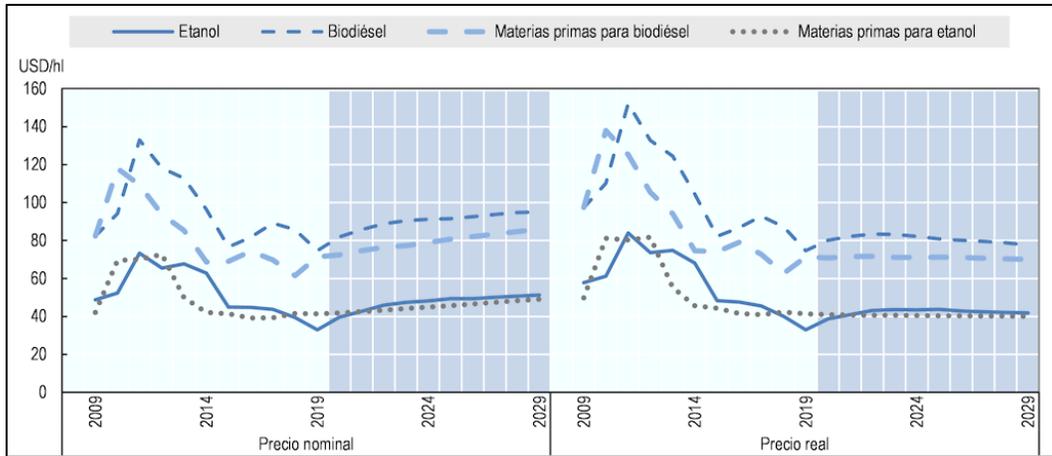


Figura 3.6 Evolución de los precios de los biocombustibles y de las materias primas para biocombustibles (OCDE y FAO, 2020)

En estas perspectivas se espera que la producción de biocombustibles aumente a un ritmo mucho menor durante el periodo de proyección que en los decenios anteriores, esto derivado de los cambios en las políticas de EE. UU. y la Unión Europea donde se están reduciendo el apoyo a este sector. Para 2029 se espera una producción de etanol cercana a las 140 millas de millones de litros y de 46 millas de millones de litros de biodiésel. Se espera que el comercio mundial de etanol se mantenga con una baja participación en la producción mundial, disminuyendo de un 9% a un 7% para 2029 (OCDE y FAO, 2020).

En los próximos años se espera que EE. UU. continúe en su posición de exportador neto de etanol basado en maíz, pero se contempla que las exportaciones de EE. UU. de etanol disminuyan en el periodo de proyección debido a la combinación de la demanda interna y una débil producción. De la misma manera para el periodo de proyección, en Brasil no se espera una expansión en exportaciones de etanol. Para Argentina si se espera un aumento en las exportaciones de biodiésel, seguido por la Unión Europea y los EE. UU, mientras que para Indonesia no se espera este aumento en las exportaciones (OCDE y FAO, 2020).

3.3 Producción

Con el aumento de la población y la urbanización, encontrar la solución energética más adecuada se ha convertido en un objetivo primordial. Se requiere dar un empuje energético en los sectores del transporte, la industrialización y la agricultura. A pesar de que los combustibles fósiles son claves para soportar la carga de la necesidad de combustible que cada vez es mayor, su existencia limitada ha obligado a emplear enfoques alternativos en materia de energía renovable y producción sostenible de energía (Kamm y col., 2005).

El crecimiento de la producción de biocombustibles trae consigo la necesidad de estandarizar la calidad de los productos, esto con el fin de asegurar el comercio de los biocombustibles y de las tecnologías asociadas. Los biocombustibles requieren de estándares de calidad para, entre otras cosas, evitar daños en los motores, unificar las características de los combustibles y asegurar el funcionamiento del motor en el largo plazo (Rodríguez y col., 2008).

En la última década, 2010 – 2019, la producción mundial de biocombustibles líquidos mostró un crecimiento acumulado del 53%, con una tasa de variación interanual entre el 1% y 13%, con una clara tendencia alcista en la producción de 163 millones de metros cúbicos en 2019, comportamiento apreciado en la Figura 3.7 (Torroba y Carvalho, 2020).

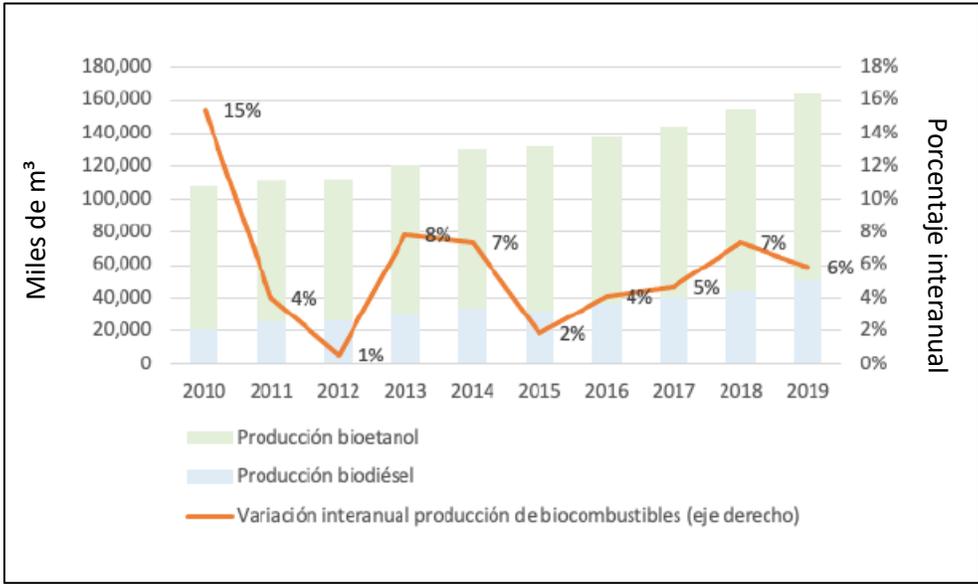


Figura 3.7 Variación interanual porcentual, tendencia y producción total de biocombustibles líquidos en el mundo (Torroba y Carvalho, 2020)

La producción de biocombustibles líquidos en el año 2019, tomando como principal productor a los EE. UU. con un 40%, seguido de Brasil (23%), Indonesia (5%), China (3%) y Alemania (3%), mientras que el resto de la producción (26%) se distribuye entre naciones como Francia, Argentina, Tailandia, India y España (Torroba y Carvalho, 2020).

Referente a la producción de biodiésel, se mostró un crecimiento acumulado del 140% en la década de 2010 a 2019, como se aprecia en la Figura 3.8, alcanzando una producción de 50 millones de metros cúbicos y con una tasa de variación interanual que osciló entre un -6% y 21% con una tendencia alcista (Torroba y Carvalho, 2020).

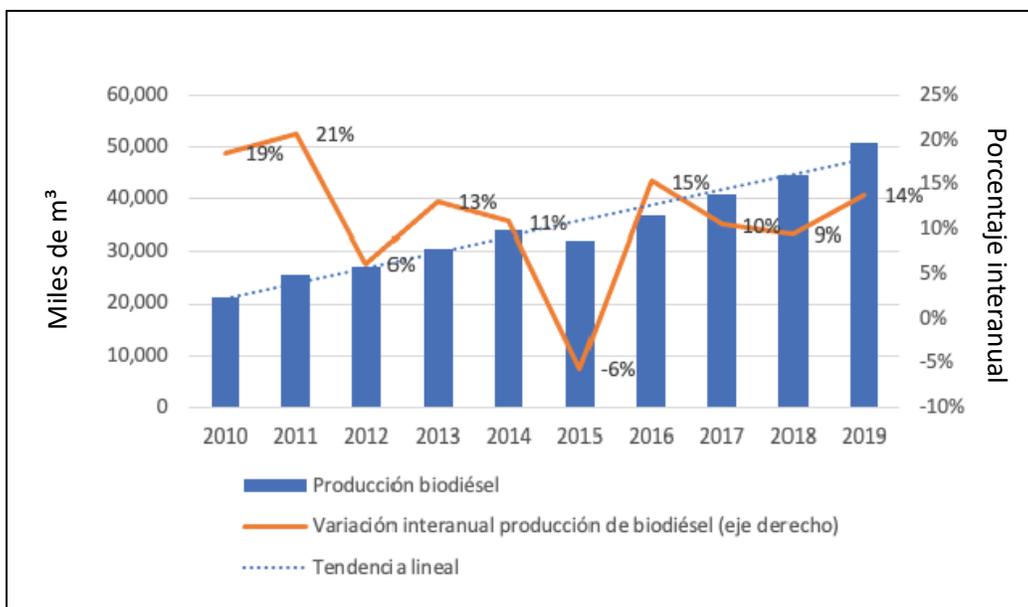


Figura 3.8 Variación porcentual, tendencia y producción total de biodiésel en el mundo (Torroba y Carvalho, 2020)

El biodiésel, a nivel mundial, es producido principalmente por Indonesia (16%), seguido de países como EE. UU. (13%), Brasil (11%), Alemania (8%) y Francia (5%). En el resto de la producción (47%) se destacan países como Argentina, España, Países Bajos, Tailandia y Malasia (Torroba y Carvalho, 2020).

En lo referente a la producción de etanol en el mundo, se destacan EE. UU con el 53% de la producción, seguido de Brasil (28%), China (4%), India (3%) y Canadá (1%), así como el 11% restante en donde se destacan países como Tailandia, Argentina, Francia y Alemania (Torroba y Carvalho, 2020).

Haciendo un enfoque en la producción de etanol, se aprecia un crecimiento acumulado de 31% en la década de 2010 a 2019, con una producción que llegó a los 112 millones de metros cúbicos y una tasa de variación interanual que osciló entre el -1% y el 15%, mostrando una clara tendencia creciente. En la Figura 3.9 se aprecia este comportamiento mencionado (Torroba y Carvalho, 2020).

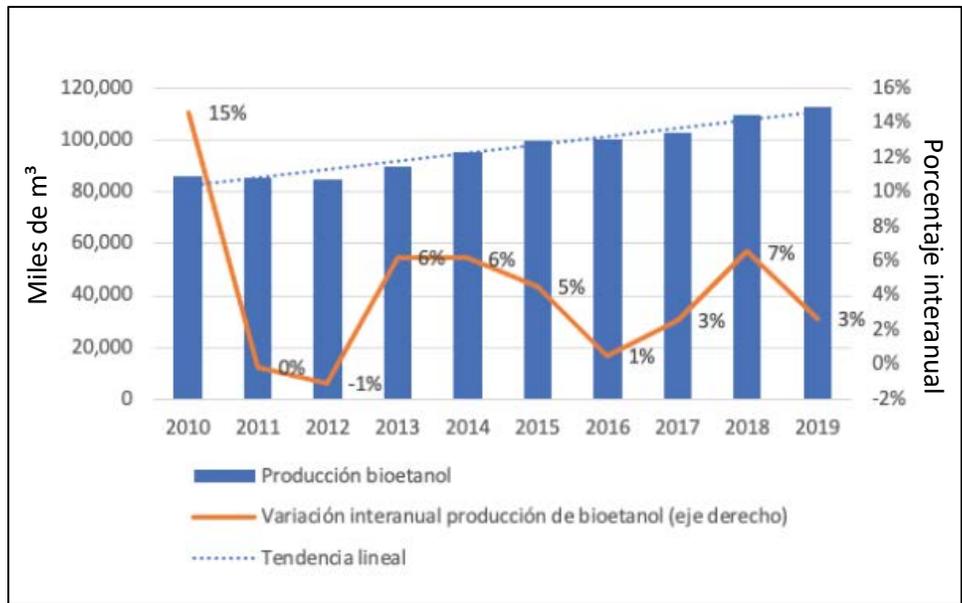


Figura 3.9 Variación interanual porcentual, tendencial y producción total de etanol (Torroba y Carvalho, 2020)

Capítulo 4. Afectaciones y emisiones por el uso de biocombustibles en vehículos

En la actualidad las consideraciones ambientales no siempre son el principal motor de impulso de las políticas referentes a la implementación de biocombustibles en varias áreas del mundo. En efecto la extensión del uso de biocombustibles genera diversos beneficios, pero ello, no quiere decir que no trae consigo riesgos ambientales. La Figura 4.1 engloba los impactos más relevantes que tienen los biocombustibles (Rodríguez y col., 2008).

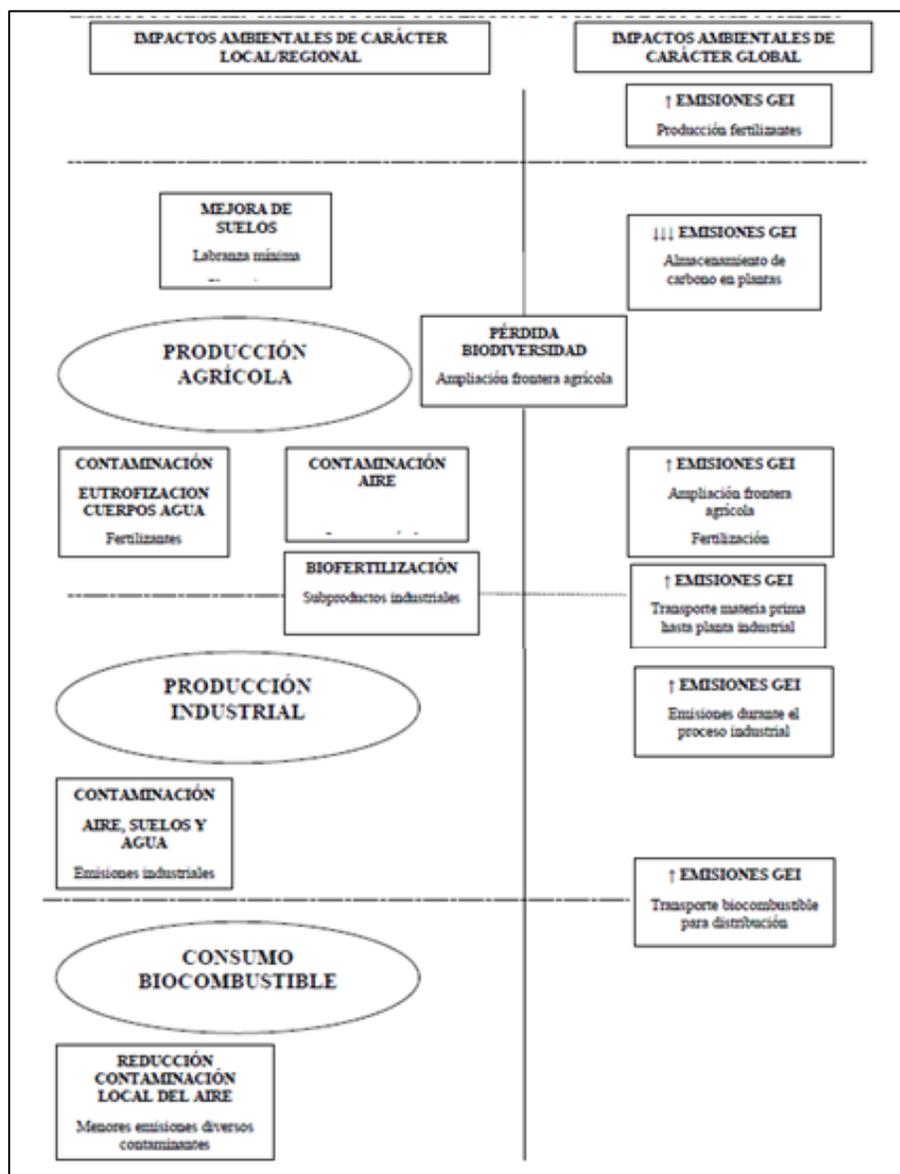


Figura 4.1 Impactos asociados a la producción de biocombustibles (Rodríguez y col., 2008)

El tema de los biocombustibles es discutido de manera controversial en la esfera pública y científica. La mayoría de los aspectos de los biocombustibles son un tema de intenso debate, entre los que se destaca la huella de carbono, su influencia en selvas tropicales, impacto con trabajadores y comunidades indígenas, así como su relación con los precios de los alimentos y con la agricultura industrial (Fast, 2009; McMichael, 2009; Venghaus y Selbmann, 2014).

Los biocombustibles son una de las alternativas más eficaces para afrontar los impactos ambientales generados por el continuo uso de los combustibles fósiles. A pesar de las pocas generaciones ambientales que producen, esta razón no siempre es el principal motor que impulsa las políticas de utilización de los biocombustibles. Para determinar si las repercusiones son positivas o negativas se debe conocer el sistema o proyecto a considerar, determinando así, el impacto neto general. Se puede conocer el impacto específico o impactos específicos dependiendo del tipo de materias primas, sistema de producción de biomasa, la tecnología de conversión, el transporte o sistema de distribución, así como el uso o disposición de coproductos y subproductos.

4.1 Emisiones

Las principales fuentes de emisiones de GEI a nivel mundial se concentran en actividades como la generación de electricidad, manufactura y construcción, transporte, quema de otros combustibles y emisiones fugitivas (quema de gas natural en el proceso de extracción de petróleo y carbón, fugas en el almacenamiento de combustible y gases en pozos, roturas de tuberías, explosión de tanques, entre otras), con un 71% del total; seguidos del sector agropecuario con un 13% y de las emisiones netas derivadas del cambio de uso de suelo con un 6%. En la Tabla 4.1 se aprecia la distribución de las emisiones de GEI a nivel mundial (Frohmann y Olmos, 2013).

Tabla 4.1 Distribución mundial de las emisiones de GEI por fuente emisora (Frohmann y Olmos, 2013)

Fuente emisora	Distribución porcentual
Agricultura	13%
Emisiones fugitivas	6%
Transporte	13%
Electricidad	30%
Uso y cambio de uso de tierra	6%
Procesos industriales	5%
Quema de otros combustibles	9%
Manufactura y construcción	13%
Combustibles bunkers	2%
Desechos	3%

Mientras que, por otro lado, en la Tabla 4.2, se aprecia el comportamiento de América Latina y el Caribe en la emisión de GEI (Frohmann y Olmos, 2013).

Tabla 4.2 Distribución de GEI por fuente emisora en América Latina y el Caribe (Frohmann y Olmos, 2013)

Fuente emisora	Distribución porcentual
Agricultura	24%
Emisiones fugitivas	3%
Transporte	10%
Electricidad	24%
Uso y cambio de uso de tierra	34%
Procesos industriales	3%
Quema de otros combustibles	4%
Manufactura y construcción	6%
Combustibles bunkers	1%
Desechos	5%

Si bien en términos generales los biocombustibles presentan menores emisiones que los contaminantes fósiles, es un efecto positivo que se ve rápidamente neutralizado por el crecimiento del parque automotor. Ante este panorama, aplicar medidas como la mejora en la calidad de los combustibles fósiles, normas estrictas para las emisiones de los vehículos y fiscalización de su cumplimiento, mejoras en las modalidades y calidad del transporte público (Rodríguez y col., 2008).

Los combustibles fósiles son los principales responsables de las emisiones generadas al ambiente, gases como el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y el ozono, han propiciado niveles crecientes en la temperatura global. Las emisiones de GEI se deslindan de la combustión de combustibles fósiles como el carbón, gas natural y petróleo, generalmente producto de la actividad del transporte, alrededor del 22% que liberan hacia la atmósfera el carbono que almacenan en forma de dióxido de carbono, enriqueciendo al efecto invernadero. Se ha estimado, a través de la Agencia Internacional de Energía (AIE), que las emisiones de dióxido de carbono tendrán un aumento de hasta un 92% para los años comprendidos entre 1990 y 2020, mientras que para el periodo comprendido entre 2020 y 2035, la liberación de CO₂ alcanzará los 8.6 mil millones de toneladas métricas, lo que se traduce en un aumento de la temperatura global de 2°C, lo que traería consigo millones de muertes de personas (Mofijur y col., 2015).

La Figura 4.2 muestra la contribución del transporte en tres ciudades latinoamericanas a los problemas de contaminación a la atmósfera, entre los que se aprecian al óxido de azufre (SO₂), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x) (Rodríguez y col., 2008).

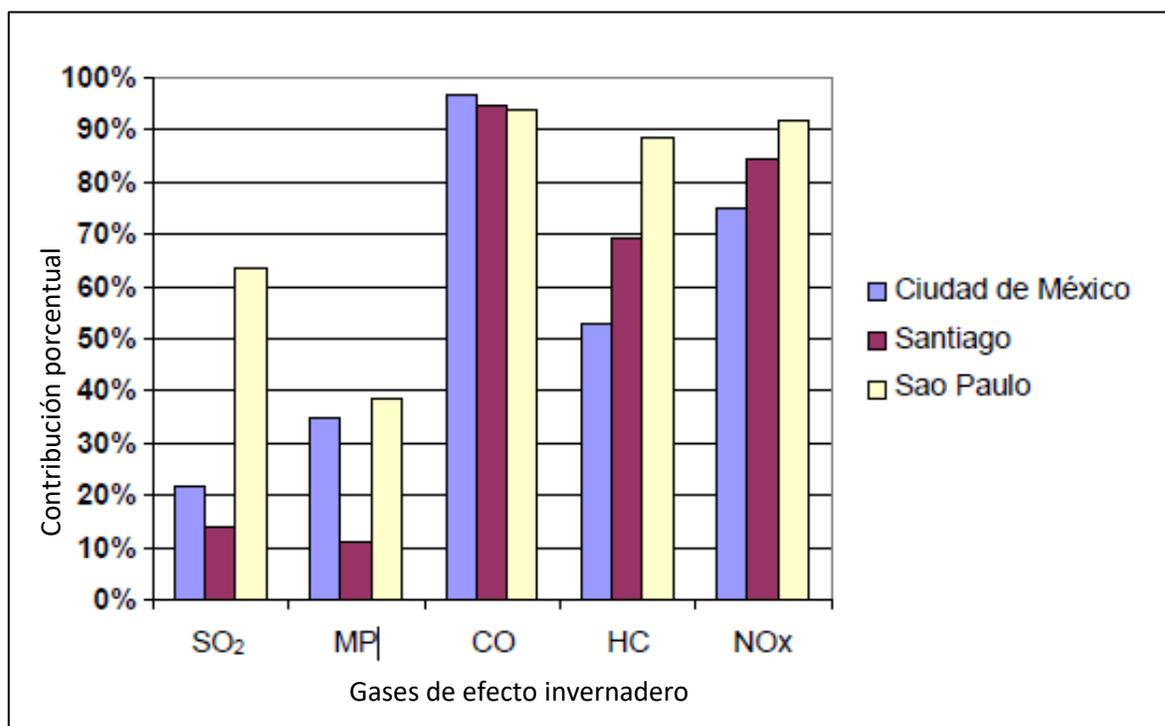


Figura 4.2 Gases contaminantes de ciudades de América Latina (Rodríguez y col., 2008)

La bioenergía tiene la ventaja de ser neutra en cuanto a estas cantidades de carbono liberado hacia la atmósfera, como se sabe uno de los impactos positivos, dentro del ámbito ambiental, de emplear los biocombustibles es la poca emisión de GEI, ya que la bioenergía parte de un proceso en el que las plantas absorben dióxido de carbono atmosférico y lo convierten en tejido vegetal. El carbono es liberado hacia la atmósfera al quemar la biomasa quedando disponible nuevamente para ser absorbido por la planta, con lo que no contribuyen con el calentamiento global. Biocombustibles tales como el etanol y el biodiésel, son renovables y de combustión limpia, pudiendo ser almacenados, con lo que se distribuyen mediante la infraestructura existente, contribuyendo a su comercialización de manera más fácil en comparación con otras alternativas.

La Tabla 4.3 brinda una explicación sobre aquellos gases que contribuyen a la contaminación local del aire, así como los efectos que tienen en la salud de la sociedad y en el medio ambiente (Rodríguez y col., 2008).

Tabla 4.3 Principales contaminantes locales del aire (Rodríguez y col., 2008)

Contaminante	Características	Efectos generales sobre la salud	Efectos generales sobre el medio ambiente
Óxido de azufre (SO ₂)	Contaminante primario precursor de MP10 y MP2.5 en forma de sulfatos, también puede generar ácido sulfúrico	Agrava problemas respiratorios y cardiovasculares	Contribuye a la formación de lluvia ácida, con formación en materiales y daños a la vegetación
Óxidos de nitrógeno (NOX)	Contaminante primario y también precursor en la formación de MP2.5 y de ozono	Daños a pulmones y vías respiratorias, formaciones de edemas, aumento en la susceptibilidad a infecciones respiratorias	Contribuye a la formación de lluvia ácida, con corrosión en materiales y daños a la vegetación
Monóxido de carbono (CO)	Gas resultante de la combustión incompleta en los vehículos	Reduce la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre, afecta a los sistemas cardiovascular, nervioso y pulmonar	Contribuye a la formación de gases de efecto invernadero
Material Particulado (MP10 y MP2.5)	Partículas dispersas en la atmosfera como polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, con diámetro inferior a 10 µm; la fracción respirable más pequeña son las MP2.5, con un diámetro de 2.5 µm	Debido a su tamaño puede alcanzar los alvéolos pulmonares; potencial cancerígeno y mutagénico; alergias, asma, bronquitis, crónica, silicosis	Daño a la vegetación, deterioro de visibilidad, contaminación de suelos, alteraciones del patrón de lluvias
Ozono (O ₃)	Contaminante secundario resultante de la reacción química ente NOX y compuestos orgánicos en presencia de luz solar	Tos y dolor de cabeza, irritación de ojos, nariz y garganta; dolor de tórax; cierre de las vías respiratorias; náusea; aumento en la incidencia de ataques asmáticos	Daños a la vegetación y disminución de cosechas
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	Gases foto químicamente reactivos, son precursores de ozono	Cancerígenos y mutagénicos	

A diferencia de los combustibles fósiles, los biocombustibles son menos tóxicos, pueden reducir las emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado. Además, con el uso de etanol y biodiésel, las emisiones de NOx son de poca magnitud y dependiendo de las condiciones pueden ser positivas o negativas (Rodríguez y col., 2008).

Los biocombustibles son la alternativa que puede reducir la dependencia del petróleo en varios de los sectores industriales. Es por esto por lo que varios países han fijado como uno de sus objetivos explotar los biocombustibles, gracias a su potencial para reducir alrededor del 80% de las emisiones de GEI (Monfijur y col., 2015). Como una respuesta y con el fin de reducir las emisiones por el uso de combustibles fósiles, diversas aerolíneas han optado por probar mezclas de biocombustibles en su combustible para aviones (Krauss, 2008).

Apostar por el uso de biocombustibles parece ser la opción más adecuada, más aun considerando que el sector del transporte fue el responsable, en 2009, de consumir alrededor de 96 EJ (exajoules) de energía, la mayoría derivados de combustibles fósiles. Además, se debe tener en mente que la expansión de la flota vehicular no se detiene, se ha pronosticado que la flota circulante pase de 1,200 millones a 2,600 millones de unidades para el año 2050. Situación que pone en predicamentos el ámbito ambiental, por lo que es importante reducir las emisiones netas de GEI. Incluso con la mejora de los combustibles vehiculares, para el mejor de los casos la tendencia de generación de emisiones apunta a un aumento que ronda un 50% más para 2030 y un 80% para 2050, de lo contrario se espera un aumento del 130% para el año 2050. Sin embargo, sigue siendo un tema controversial, por lo que no solo se requieren revisar las repercusiones derivadas de las emisiones de GEI (Ramos Delgado, 2012).

Los biocombustibles favorecen mucho la reducción de emisiones de SO₂, gracias a que están libres de azufre. La magnitud de este beneficio depende del contenido de azufre de los combustibles convencionales y de la edad del parque vehicular, debido a que mientras mayor sea la edad del parque vehicular y del contenido de azufre, mayor es el beneficio (Rodríguez y col., 2008).

4.2 Uso de la tierra

La producción de bioenergía puede ocasionar impactos directos e indirectos. Estos impactos tienen diversas implicaciones como pueden ser la tenencia de la tierra, la producción de productos básicos, la urbanización, el secuestro de carbono, la independencia energética, entre otros (Quin y col., 2018).

La tierra cultivable, por definición, incluye la tierra bajo cultivos agrícolas (áreas de cultivos múltiples son contados una sola vez), prados temporales para segar o pastos, tierras de cultivos y huertas, así como tierras temporalmente en barbecho menor a 5 años (técnica de agricultura por la cual la tierra de cultivo se deja sin sembrar durante uno o varios ciclos vegetativos), tierra bajo árboles y arbustos que producen flores (Quin y col., 2018).

Los recursos naturales disponibles, en México, hacen posible el desarrollo de una importante industria de agro energía y biocombustibles. A pesar de que el país es

un importante exportador neto de combustibles, se estima que el potencial de desarrollo de biocombustibles puede desplazar hasta un 30% las importaciones del país para el consumo interno. Diversos estudios estiman que la bioenergía puede abastecer entre el 54% y el 85% de las necesidades totales de energía (IICA, 2007).

México cuenta con un área de siembra para caña de azúcar que ronda las 680 mil hectáreas, con una capacidad de producción de etanol por hectárea de 4,659 litros y de 52.8 toneladas de caña de azúcar. El consumo anual promedio de petróleo y gasolina es cercano a los 39,455 metros cúbicos (IICA, 2007).

La energía basada en biomasa agrícola y forestal se considera una buena opción para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, aumentar la producción de energía renovable de la nación y mejorar la sostenibilidad de bosques y tierras marginales. La energía obtenida de la biomasa celulósica o los llamados biocombustibles de segunda generación presentan ciertas ventajas sobre los biocombustibles de primera generación, una de las más importantes es que los biocombustibles de segunda generación no se ven inmiscuidos en la competencia entre los cultivos agrícolas destinados para alimentación y los destinados para producción de biocombustibles (Hill y col., 2006).

Es importante mencionar que los cultivos energéticos son generadores de gases de efecto invernadero, generando el óxido nitroso cuando se utilizan fertilizantes para aumentar los rendimientos de los cultivos. Cuando la tierra forestal se convierte en plantaciones para cultivos energéticos, se pierde la absorción de dióxido de carbono de los bosques, además se degrada la materia orgánica del suelo, generando CO₂. De tal manera, la producción de biocombustibles genera emisiones de GEI, en mayor o menor medida, generando una compensación entre las reducciones de dióxido de carbono derivadas del uso de los biocombustibles en lugar de los combustibles fósiles y su producción.

Durante la fase de destilación y deshidratación de la producción de etanol a partir de caña de azúcar se produce un residuo llamado vinaza, un efluente industrial rico en materia orgánica y potasio, un efluente que produjo graves problemas en cuerpos de agua. En EE. UU., ha surgido una gran preocupación debido a que las plantas productoras de etanol a base de granos han vertido sus efluentes. En la producción de biodiésel, respecto a los vertidos en agua, se producen aguas jabonosas y aceitosas.

Ante situaciones como las mencionadas anteriormente se tienen dos interrogantes: ¿cuál es el impacto en el uso de la tierra del uso de energía basada en biomasa? y ¿cómo cambia la tierra con el tiempo? Conforme avanza el tiempo la presión de la agricultura alimentaria, las demandas forestales, industriales, así

como urbanas, hace que la tierra cultivable se vaya convirtiendo en un recurso escaso. Este escenario se agrava debido a que el cambio de uso de la tierra asociado al aumento de la bioenergía puede anular los potenciales beneficios de producción y degradar el medio ambiente (Baker y col., 2010; De Oliveira y col., 2015; Vasile y col., 2016).

El uso de la tierra tiene efectos directos e indirectos derivados de la producción de biocombustibles. El cambio de uso de suelo directo produce un efecto más obvio y medible en la tierra y áreas adyacentes. Este tipo de cambio de uso de suelo ocurre comúnmente en áreas no cultivadas (bosques o pastizales), cuando son convertidas en tierras para cultivo de producción de biocombustibles (FNVS 2014; UCP, 2008). El cambio de uso de suelo de manera directa puede desencadenar problemáticas como la destrucción de ecosistemas forestales, así como impactar sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos como la filtración de agua (FNVS, 2014). Un claro ejemplo de estas repercusiones se aprecia en la caña de azúcar, cultivo que ganó gran popularidad a lo largo de los años y actualmente es un cultivo base en Brasil y los EE. UU., países que juntos representan alrededor del 90% de la producción mundial de etanol. Se encontró que las prácticas de cultivo de la caña de azúcar pueden contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero, como por ejemplo la quema de residuos. Además, se encontró que expandir las plantaciones de caña de azúcar contribuyó en la emisión de GEI, pero alrededor del 57% de esto fue compensado a través de la absorción de carbono en la nueva biomasa (De Oliveira y col., 2015).

Por otro lado, el cambio de uso de suelo indirecto es más difícil de definir. Por ello comprender el posible alcance de este tipo de cambio de uso de suelo es fundamental para tomar decisiones de gestión que puedan reducir con éxito las emisiones de carbono y, al mismo tiempo proteger los ecosistemas locales y asegurar que la operación no produzca una cantidad nociva de GEI (Qin y col., 2018). El impacto del cambio de uso de suelo indirecto se destacó durante el debate alimentos versus combustibles. Crítica que se refiera al conflicto entre el uso de cultivos alimentarios como combustible en lugar de alimenticios (Naylor y col., 2007).

Debido a que el cambio de uso de suelo indirecto es difícil de cuantificar hay algunos escépticos y una gran confusión sobre su relevancia. Se señala que las emisiones derivadas del cambio de uso de suelo indirecto pueden ser engañosas y dar lugar a una comparación desequilibrada con combustibles fósiles. Además, metodologías como la evaluación integral del ciclo de vida y los modelos insumo-producto pueden abordar los desafíos de contabilizar el cambio de uso de la tierra directo e indirecto de manera más precisa (Dilekli y Duchin, 2015; Lian y col., 2012; Marvuglia y col., 2013).

Existen opositores a los biocombustibles como Jean Ziegler, relator especial de las Naciones Unidas, que mencionó, sobre el derecho de alimentación, que es un crimen contra la humanidad el desvío de tierras cultivables para la producción de cultivos que luego son quemados para obtener combustibles. Actualmente, las tierras ocupadas para el desarrollo de biocombustibles rondan el 1%, para el año 2050, se espera una ocupación que ronde el 20%, según estimaciones de la FAO. En Indonesia y Malasia, para desarrollar plantaciones de palma aceitera, se han limpiado entre 14 y 15 millones de hectáreas de turberas. Esta transformación de ecosistemas y sistemas agrícolas a monocultivos industriales puede llegar a representar una amenaza para la integridad del ecosistema (Singh y col., 2019).

Los responsables de tomar la decisión de producir materias primas bioenergéticas deben considerar el uso de la tierra y el cambio de uso de suelo. El uso de suelo es la gestión de los recursos de la tierra con fines económicos, incluyendo actividades de labranza, mantenimiento y cosecha, así como prácticas de conservación. El cambio de uso de suelo incluye la conversión de ecosistemas nativos en uso agrícola (cambio de cobertura de la tierra) y el cambio de un tipo de cultivo a otro. Tanto el uso de la tierra y el cambio de uso de suelo asociados a producir de materias primas para bioenergía pueden aumentar o disminuir los beneficios directos, indirectos y no financieros de los ecosistemas nativos y manejados. La conversión de tierras podría disminuir los hábitats nativos, la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas.

Derivado de la producción y combustión de etanol a base de maíz se puede presentar contaminación, de agua y aire, lo que se puede traducir en repercusiones nocivas para la salud humana y el medio ambiente. Además, tanto la disminución de la fertilidad y composición del suelo a través de la producción biomasa genera una preocupación más.

4.3 Impactos en salud, empleo, movilidad poblacional y educación

La obtención de altos rendimientos en los cultivos por hectárea ha demandado el uso de ciertos tipos de agroquímicos, como los fertilizantes y pesticidas (Rodríguez y col., 2008).

Al usar fertilizantes se presentan tres principales problemáticas, especialmente con los fertilizantes nitrogenados (Rodríguez y col., 2008), como son:

- i) El arrastre del nitrógeno y del fósforo hacia los cuerpos de agua provocando la proliferación de algas y la disminución del oxígeno disponible (eutrofización).
- ii) Problemas graves de salud si la lixiviación de nitratos y fosfatos llegasen a acuíferos empleados para el abastecimiento de agua poblacional.

- iii) El incremento de las emisiones de GEI durante el proceso de producción de los fertilizantes sintéticos y en su aplicación al cultivo a través de la liberación de N₂O.

Mientras que el uso de pesticidas, en concentraciones altas puede generar daños importantes a la salud (Rodríguez y col., 2008).

De acuerdo con el tipo de cultivo utilizado como materia prima se pueden anticipar algunos impactos ambientales, por ejemplo, cultivos de carácter anual, como la soja y el girasol, son muy propensos a riesgos de erosión. La degradación de suelos, derivado de la erosión, depende importantes factores como el tipo de cultivo (Rodríguez y col., 2008).

En México, el consumo de combustibles líquidos ha aumentado, según SENER, se espera que el consumo de gasolina aumente un 57%, y el diésel un 43% para el 2025. Por tal motivo el uso de etanol y biodiésel debe tener un aumento significativo para mitigar los efectos del cambio climático. Para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se señala que para una mezcla E20, para 2025, se requiere un equivalente del 44% de la superficie terrestre del área a ser plantado si los rendimientos por hectáreas aumentaran. Con respecto al agua, el costo del etanol es elevado. La ZMVM dispone de 4,224 giga litros, con dicha cantidad solo podría cubrir los requisitos de la ciudad, pero para 2025 sería un poco corto para la mezcla E20. En otras palabras, se tendría que hacer uso de aproximadamente la mitad del territorio del área, así como todo el suministro natural de agua para producir etanol elaborado a partir de caña de azúcar. Un argumento con fines comparativos, debido a que estos impactos ocurrirán en las zonas productoras de caña de azúcar donde las disputas por el uso de la tierra y el agua se pueden llegar a intensificar (Ramos Delgado, 2012).

Un caso similar se presenta para la producción de biodiésel a partir de aceite de palma. Si se enfocará solo a su producción, sin dejar nada para la industria alimentaria, solo se alcanzaría a cubrir una mezcla B11, debido a que, a nivel nacional ni siquiera representaría el 1% de la mezcla. Para dar una representación de lo señalado, si el país busca lograr una mezcla nacional B5, la tierra plantada con aceite de palma debe multiplicarse por 6, agudizando así la demanda de tierras y agua. Si se busca una mezcla B7, la cantidad de agua necesaria equivale a toda el agua natural disponible en la ZMVM. Para una mezcla B20, este escenario es aún más difícil, debido a que la superficie requerida equivaldría a la totalidad del área de los estados de Tlaxcala y Morelos combinados (Ramos Delgado, 2012).

Basar la producción de los biocombustibles en el país en tecnologías de primera generación es extremadamente limitado por el intenso uso de la tierra y del agua,

esto se puede desencadenar en una competencia por la tierra y en el peor de los casos por el agua disponible. El argumento de ahorro de emisiones parece no ser suficiente para justificar esta apuesta tan grande, ni el de la supuesta reactivación del campo mexicano, ya que parece estar mal enfocada, debido a que parece favorecer más a los grandes productores (Ramos Delgado, 2012).

En México, el impulso de los biocombustibles requiere un análisis más detallado, no solo se debe basar en problemas atmosféricos y socio ambientales, sino además echar un vistazo al uso de tierras y agua, la posible pérdida de biodiversidad, así como la presencia de erosión y soberanía alimentaria. Si el objetivo principal es mitigar el cambio climático, se puede hacer énfasis en acciones de reducir el desperdicio energético, desarrollar la energía solar, planificar un mejor uso de suelo, recuperar ríos y suelos, entre otros temas asociados a reducir la vulnerabilidad de los pueblos y desigualdades socioeconómicas (Ramos Delgado, 2012).

Capítulo 5. Perspectiva y datos generales para el uso práctico de un biocombustible líquido para un sitio indefinido (Biodiésel)

Como se mencionó en el Capítulo 2, en el apartado 2.2, en el inciso 2.2.3, el biodiésel brinda la ventaja de ser un sustituto al diésel mineral sin la necesidad de modificar los motores, gracias a que comparte características de compatibilidad con los combustibles fósiles. Por tal motivo se analizará con más detalle al Biodiésel como una alternativa hacia la transición energética.

5.1 Cadena de valor del biodiésel

La cadena de valor del biodiésel se compone del sistema de producción de biomasa, sistema logístico de biomasa, sistema de producción del biocombustible, sistema de distribución del biocombustible y uso final del biocombustible. Estos componentes son similares a los de la cadena de valor del petróleo, pero con diferentes estrategias de producción, transporte y almacenaje debido a la diferencia de insumos y productos (Yue y col., 2014).

En general, la materia prima presenta problemas relacionados a la cadena de suministro, en actividades como cosechar, tratar, transportar y entregar alrededor de todo el año los grandes volúmenes a la planta procesadora (IEA, 2008). Para esto se requiere de un buen entendimiento de la disponibilidad de materia actual, tales como su distribución geográfica, producción, transporte y costos de procesamiento (Sims y col., 2010).

En México, el biodiésel es producido por aceites usados y grasas, así como por aceites vegetales crudos, en México la más empleada es la producción de aceites usados y grasas (Riegelhaupt y col., 2016).

- Cadena de producción de biodiésel a partir de aceites usados

En la Figura 5.1 se muestra de manera esquemática la cadena de producción de biodiésel a partir de aceites usados.

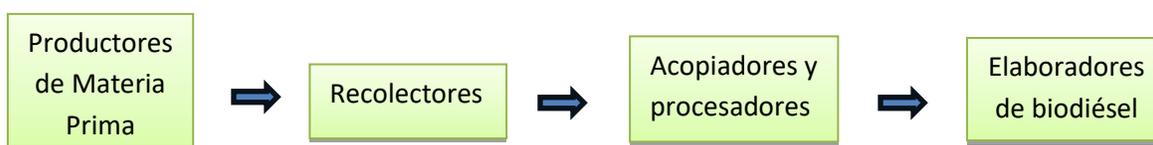


Figura 5.1 Cadena de producción de biodiésel a partir de aceites usados
(Realizada a partir de Riegelhaupt y col., 2016)

Productores de Materia Prima: son los usuarios de aceites para la cocina.

Recolectores: nivel de organización y eficiencia, depende de costos finales y la eficacia de la recolección.

Acopiadores y procesadores: acumulan y refinan los aceites usados.

Elaboradores de biodiésel: convierten los aceites a biodiésel

- Cadena de producción de biodiésel a partir de grasas animales

En la Figura 5.2 se presenta la esquematización de la cadena de producción de biodiésel a partir de grasas animales.



Figura 5.2 Cadena de producción de biodiésel a partir de grasas animales
(Realizada a partir de Riegalhaupt y col., 2016)

Productores de Materia Prima: rastros, graserías, procesadores de derivados de cerdo.

Recolectores: quienes recolectan las grasas de carnicería.

Elaboradores de biodiésel: convierten los aceites a biodiésel.

5.2 Precio de materia prima

El biodiésel convencional producido mediante transesterificación emplea, principalmente, aceites comestible y metanol. Por otra parte, para el biodiésel avanzado se requiere de aceites de cultivos no alimenticios/no comestibles, aceites/ grasas residuales y materiales lignocelulósicos denominados fuentes de segunda generación, así como los aceites derivados de microorganismos que se consideran insumos de tercera generación (Sandoval, 2010).

En el biodiésel de primera generación el costo del aceite vegetal ronda entre un 75% a un 88% del costo de producción (Haas y col., 2006). En 2010, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura señaló en 2010, que el costo de insumos agrícolas representa del 59% al 91% del costo total de la producción del biodiésel.

El biodiésel tiene un costo de producción de \$5.3 a \$12.4 por litro equivalente, en función de la materia prima utilizada. En la Figura 5.1 se pueden apreciar los

costos de producción de biodiésel derivado del tipo de materia prima utilizado (IICA, 2010).

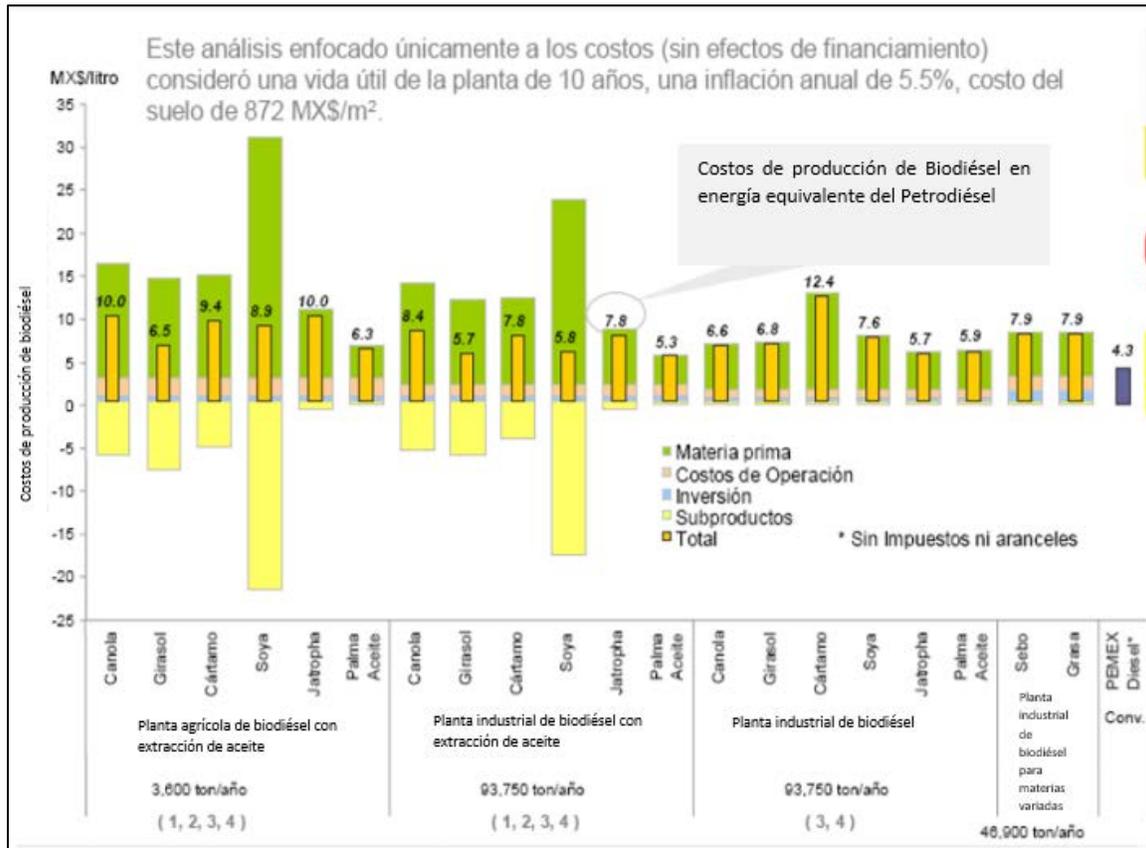


Figura 5.3 Costos de la materia prima para la producción de biodiésel (IICA, 2010)

El biodiésel se puede producir utilizando diversas fuentes de materia prima, aunque debido a su alto costo, la mayoría de las empresas optan por producir biodiésel mediante aceite residual como materia prima (Alva Caudillo, 2020).

Considerando que el aceite residual es la materia prima más empleada para la producción de biodiésel se destacan dos acciones de recolección de la materia prima, una en la que el aceite usado será llevado a la fábrica de biodiésel y otra en la que se deberá recolectar el aceite usado (Riegalhaupt y col., 2016).

A continuación, se presentan los dos casos que puede presentar la empresa en lo que respecta a la recolección de la materia prima. Se menciona el costo de cada elemento que intervienen en la producción de biodiésel por litro, con información recopilada de diferentes fuentes como CMP + L (Centro Mexicano para la Producción más Limpia), FFV (vehículos de combustión Flexible); SENER (Secretaría de Energía) y REMBIO (Red Mexicana de Bioenergía), por lo que es posible que existan generalidades y cierta diferencia entre los resultados de este esquema contra alguna planta en particular, debido a que la tecnología empleada,

la capacitación general y la eficiencia energética de cada proceso de producción de cada planta es diferente (Alva Caudillo, 2020).

- Aceite llevado a la fábrica de biodiésel

En el país se reporta un pago de entre \$7 y \$8 pesos mexicanos por litro de aceite usado. Se tiene una relación de conversión de aceite a biodiésel de 1:1 (en volumen) (Riegalhaupt y col., 2016). La Tabla 5.1 muestra los conceptos a tomar en cuenta bajo esta condición.

Tabla 5.1 Costo de producción del biodiésel de la opción “puesto en fábrica de biodiésel” (Alva Caudillo, 2020).

Costos de producción	Monto (MXN/L)	Participación
Aceite residual	8.50	62%
Materiales**	1.50	11%
Energía	0.60	4%
Operación y mano de obra	2.30	17%
Mantenimiento	0.90	7%
Total	13.80	100%

** El concepto de materiales se refiere al costo de catalizadores y alcoholes en la producción.

- Recolección del aceite

En esta condición se asumen los costos de recolección, donde destacan los costos de combustible y mantenimiento del vehículo recolector. Para realizar esta operación es de suma importancia considerar la distancia existente entre la planta de producción y el sitio o los sitios donde será recolectado el aceite.

Sheinbaum (2014) formula una ecuación para determinar los factores presentes en la recolección y así determinan el costo de recolección.

$$C = Fc + Lc + Mc + Ge$$

Dónde:

C = costo de recolección

Fc = costo del combustible

Lc = salario del chófer

Mc = costo de mantenimiento del vehículo

Ge = gastos generales

En la Tabla 5.2 se aprecian los conceptos que componen esta condición (Guillermo, 2020)

Tabla 5.2 Costo de producción del biodiésel de la opción “pago de precio de origen” (Alva Caudillo, 2020).

Costos de producción	Monto (MXN/L)	Participación
Recolección	3.60	32%
Aceite residual	2.50	22%
Materiales**	1.50	13%
Energía	0.60	5%
Operación y mano de obra	2.30	20%
Mantenimiento	0.90	8%
Total	11.40	100%

** El concepto de materiales se refiere al costo de catalizadores y alcoholes en la producción.

En el país existen empresas encargadas a la recolección de aceite residual y animal para la fabricación de biodiésel, pero su alcance comercial no es lo suficiente para asegurar, en el mediano o largo plazo, que la rentabilidad sea suficiente para atraer la inversión (Alva Caudillo, 2020), como lo son las empresas de Reoil México, MORECO, Biofuels de México y SOLBEN (Riegalhaupt y col., 2016). Esto propiciado por el limitado conocimiento técnico de los requerimientos de desempeño y calidad de los motores y, por otro lado, a que la industria automovilística no ha determinado condiciones para el uso de biodiésel puro y/o mezclado con diésel en sus motores y componentes mecánicos, provocando que los usuarios no se inclinan al uso de biodiésel (Ríos y col., 2017).

Para revertir esta barrera se busca la colaboración conjunta del gobierno y la industria automotriz para comunicar información técnica sobre los beneficios del biodiésel y sus diferentes mezclas en los motores de los fabricantes. Esto podría traer beneficios para el Gobierno Federal, como: programas de verificación vehicular tanto para vehículos híbridos como eléctricos, mejorar la opinión de consumidores hacia vehículos que utilicen biodiésel (Alva Caudillo, 2020).

En cuanto a la reducida capacidad de procesamiento de aceite de las plantas productoras en México, se requiere promover la inversión para crear plantas de mayor capacidad. No solo es necesario el capital para incrementar la capacidad de promoción, sino también contemplar la ubicación estratégica para que la materia prima se traslade con facilidad hacia las biorrefinerías y disminuir costos (Alva Caudillo, 2020).

Si bien se sabe que el biodiésel se puede producir de diversas fuentes de materia prima, en México, se emplea aceite residual y aceite vegetal puro para su fabricación. Pero, debido al alto costo de las materias primas para elaborar aceite

vegetal exclusivo para el biodiésel, la mayoría de las empresas optan por emplear aceite residual para su creación (Alva Caudillo, 2020).

Conociendo que el aceite residual es el más empleado en el país se mencionan los elementos que intervienen en la producción de biodiésel por litro, cabe mencionar que la información se obtuvo del promedio de plantas productoras del país, por lo que es posible que existan generalidades y ciertas diferencias de los resultados de este caso con los costos de una planta en particular, debió a la tecnología, personal y eficiencia energética de cada planta (Alva Caudillo, 2020).

Comprando las Tablas 5.1 y 5.2, en la Tabla 5.3 se aprecia que recolectar el aceite residual es la opción más viable de obtención de la materia prima, debido a que realizar la recolección por parte de la empresa arroja un costo de \$11.40 pesos mexicanos por litro de biodiésel, mientras que recibir la materia prima en la planta productora demanda un costo de \$13.80 pesos mexicanos por litro de biodiésel, con lo que se mejoraría el margen de utilidad (Alva Caudillo, 2020).

Tabla 5.3 Comparativa en recolección de materia prima (Alva Caudillo, 2020).

Características	Recolección del aceite por parte de la empresa (\$MXN)	Aceite llevado a la planta productora (\$MXN)
Recolección	3.60	-
Aceite residual	2.50	8.50
Materiales**	1.50	1.50
Energía	0.60	0.60
Operación y mano de obra	2.30	2.30
Mantenimiento	0.90	0.90
Total	11.40	13.80

Es claro que para que el biodiésel tenga éxito debe presentarse con un precio menor que el del diésel, por lo que ponerlo debajo del precio del combustible fósil podrá hacer efectiva la venta de su producción (Alva Caudillo, 2020).

Los escenarios analizados parten de un consumo que ronda los 380 mil barriles diarios de combustibles diésel, a base de estadísticas de PEMEX de 2016 (Petróleos Mexicanos, 2016). Basado en las proyecciones oficiales de consumo definidas en la Prospectiva de petróleo y petrolíferos 2015 – 2029 se asume un incremento anual del consumo de 18,920 barriles diarios por año para el periodo de 2017 – 2036 (SENER, 2015).

El escenario moderado y optimista señala un crecimiento limitado al 70%, alrededor de 13,244 barriles, mientras el escenario tendencial se limita al 50%, con una cantidad de 9,460 barriles diarios. Los precios del biodiésel son regulados por el Gobierno Mexicano (Riegelhaupt y col., 2016).

Para tener un mejor panorama de los costos de producción de insumos se deben considerar todos los procesos en la cadena de valor del biodiésel.

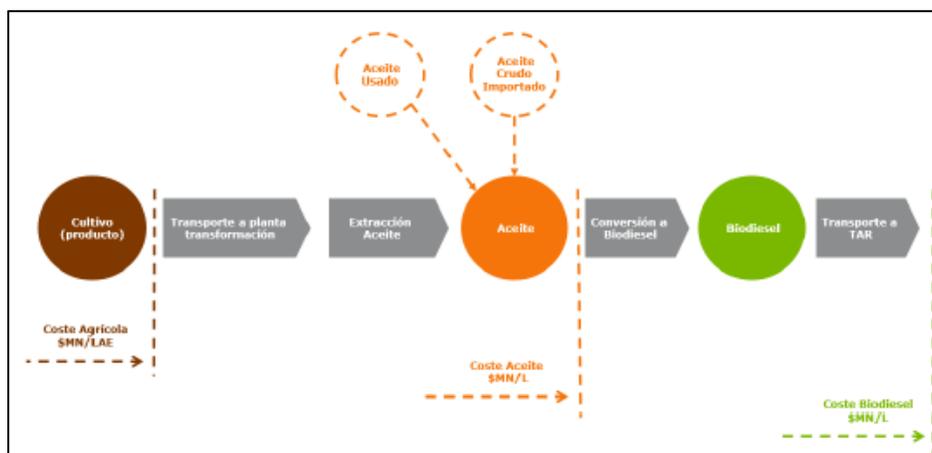


Figura 5.4 Etapas, procesos y componentes del costo de biodiésel (Riegelhaupt y col., 2016)

Los valores de estos procesos se detallan en la tabla 5.9.

Tabla 5.4 Costos logísticos y de proceso (Riegelhaupt y col., 2016)

	Costo estimado (\$MN/L)	Observaciones
Transporte de materia prima a la planta de transformación	0.99	Basados en una distancia media a planta de entre 100 km y 200 km (dependiendo del cultivo considerado) y asumiendo un costo unitario de transporte de 1.70 \$MN/Km (Tauro R., 2016)
Extracción de aceite	1.70	Estimación a base de costos históricos de industria aceitera obtenida de comunicaciones personales.
Conversión a biodiésel	5.00	Estimación a base de valores de encuesta REMBIO a productores en México (tabla 5.3 y 5.4), ajustada con valores de referencia internacional para plantas de escala comercial (>100,000 m ³ /a)
Transporte a TAD	0.19	En base a una distancia media a TAR de 100 km, asumiendo un costo unitario de transporte de 1.70 \$MN/L (Tauro R.,2016)

Partiendo de la producción de 100,000 m³ de biodiésel al año, en cada año del escenario, año “n”, se analiza la demanda de biodiésel esperada dos años más tarde, año “n+2”. El año “n+1” se añade la capacidad al volumen ya existente de capacidad de conversión. Se asume el año 2017 como el año cero (Riegelhaupt y col., 2016).

5.3 Escenario tendencial

El escenario tendencial planteó las condiciones existentes en el 2016, además se asume que no se adoptó ninguna política en específico de apoyo al biodiésel (Riegelhaupt y col., 2016).

Para la idealización del escenario se consideró, además:

- Cargas fiscales diferenciadas del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios (IEPS) para cada tipo de combustible, de acuerdo con el DOF (29/07/2016) esta cuota para el diésel, en agosto de 2016, fue de \$4.580 por litro, mientras que para combustibles no fósiles fue de \$2.866 por litro. Se asume que a futuro esta diferencia entre el diésel y el biodiésel se mantiene (Riegelhaupt y col., 2016).
- Una continuidad de precios baratos de petróleo, por debajo de los 45 dólares por barril (Riegelhaupt y col., 2016).

Bajo estas condiciones, el biodiésel no es competitivo en el mercado nacional durante el periodo de estudio. A continuación, se presentan las curvas de oferta y demanda de biodiésel del año 2017, donde el biodiésel más barato resulta ser más caro que el precio de referencia del diésel fósil, con un costo de producción estimado en \$12.4 por litro. El diferencial fiscal actual, de \$1.71 por litro, desplaza la curva de demanda del biodiésel de manera vertical con respecto al precio de referencia del diésel, haciendo nada atractiva la introducción del biodiésel (Riegelhaupt y col., 2016).

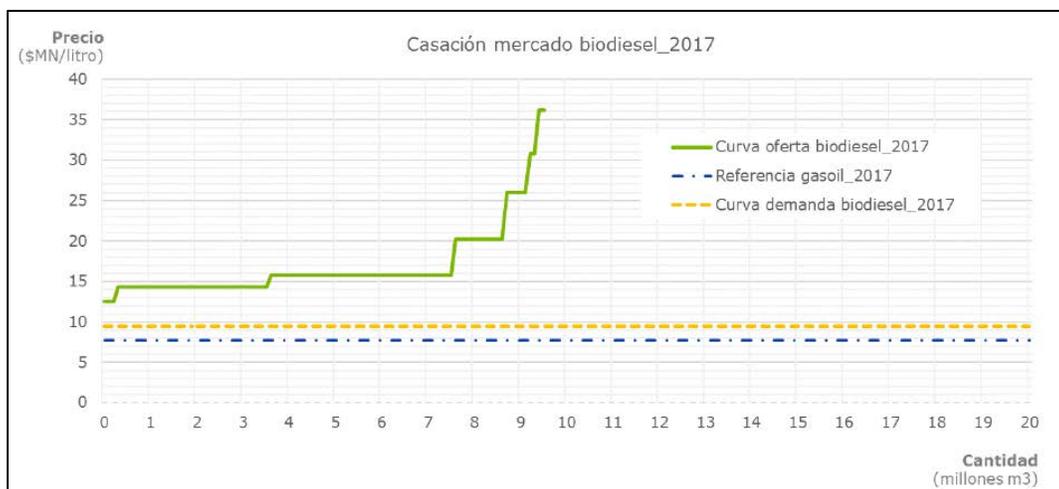


Figura 5.5 Condiciones para introducir el biodiésel en 2017 (Riegalhaupt y col., 2016)

Bajo estas condiciones se aprecia que la situación no cambiaría en los próximos 20 años, se aprecia un estrechamiento en la diferencia entre el costo del biodiésel y el precio de referencia del diésel fósil, pero a pesar de ello, el diferencial fiscal sigue siendo insuficiente para inducir la demanda del biodiésel (Riegalhaupt y col., 2016).

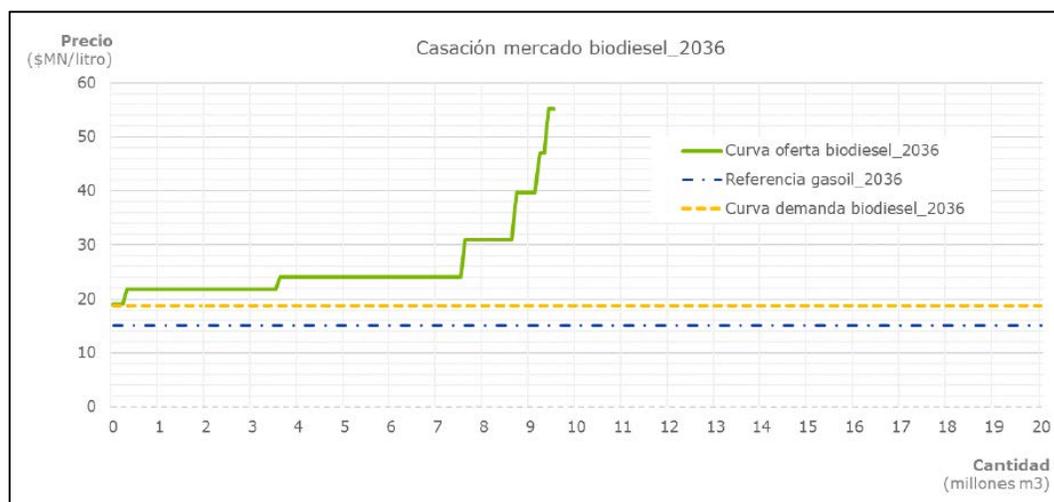


Figura 5.6 Condiciones para introducir el biodiésel en 2036 (Riegalhaupt y col., 2016)

Con estas condiciones, es altamente improbable que se consigan cuotas de mercado apreciables en el futuro (Riegalhaupt y col., 2016).

5.4 Escenario moderado

El escenario moderado emplea la adopción de políticas de apoyo para introducir progresivamente el biodiésel hasta alcanzar cuotas de mercado del 3% en 15 años. Este objetivo a largo plazo se considera apropiado si consideramos que la Unión Europea, tras más de 15 años, tiene una cuota de mercado que ronda el 5% (Riegalhaupt y col., 2016).

Para esto se asume lo siguiente, una obligación de cuota creciente de biodiésel a suministradores de combustibles, incrementada de media en 71,000 m³ al año, hasta alcanzar el objetivo en 2031, momento en el que la cuota se volvería constante (Riegalhaupt y col., 2016).



Figura 5.7 Evolución de la cuota de mercado de biodiésel, en millones de m³ y porcentaje, escenario moderado (Riegalhaupt y col., 2016)

Para construir este escenario se utiliza una trayectoria de precios moderados del petróleo, que crecerían progresivamente desde los 45 ó 50 dólares por barril hasta encontrar la estabilización en los 70 dólares por barril en el año 2025. Además, se asumen crecimientos moderados del consumo de combustible diésel en México, de alrededor del 70% de aquellos proyectados en la Prospectiva de petróleo y petrolíferos 2015 – 2029 (Riegalhaupt y col., 2016).

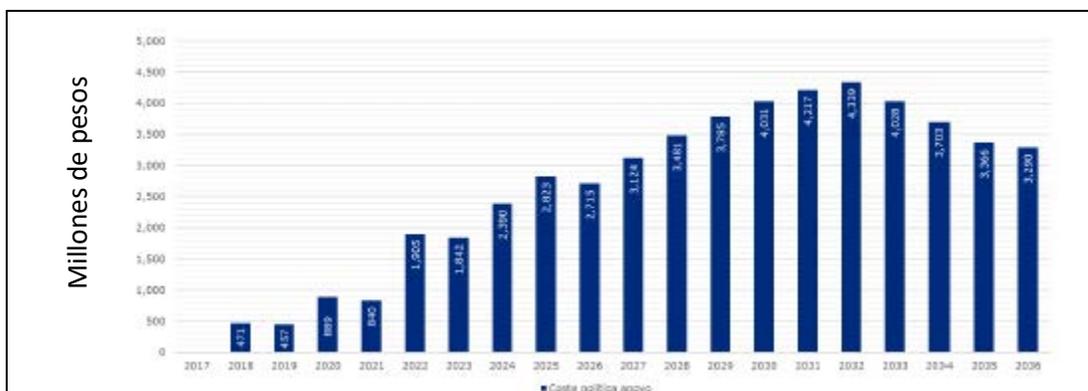


Figura 5.8 Evolución de costos de políticas de apoyo, escenario moderado (Riegelhaupt y col., 2016)

Para 2032, se espera que los costos totales de apoyo aumenten progresivamente en línea con el incremento de la cuota obligatoria de biodiésel hasta un máximo de 4,339 millones de pesos. En ese momento los costos de apoyo comenzarán a bajar a consecuencia de la cuota establecida del 3% y el incremento en el largo plazo de los precios de importación del diésel de origen fósil (Riegelhaupt y col., 2016).

En lo referente a reducir las emisiones de GEI, este escenario llegaría a un máximo de mitigación anual de entre 1.7 y 2.4 MtCO₂e por año, con un total acumulado de emisiones mitigadas en el periodo 2018 – 2036 de entre 17 y 24 MtCO₂e (Riegelhaupt y col., 2016).

Económicamente, se estima que los ingresos acumulados percibidos rondan entre los 60,000 y 86,000 millones de pesos para el sector agrícola en el periodo comprendido entre 2018 y 2036, con una inversión acumulada de entre 6,000 y 9,000 millones de pesos en infraestructura industrial de producción de biodiésel (Riegelhaupt y col., 2016).

5.5 Escenario optimista

Se emplea la adopción de políticas de apoyo que se encargan de introducir el biodiésel en México, se plantea un objetivo a largo plazo del 6% de cuota de mercado (Riegelhaupt y col., 2016).

El escenario asume el establecimiento de una obligación creciente de cuota de biodiésel como porcentaje de las ventas totales de diésel a suministradores de combustibles, que se incrementa de media en 160,000 m³ al año hasta alcanzar el objetivo en 2028, momento en el que la cuota se vuelve constante (Riegelhaupt y col., 2016).

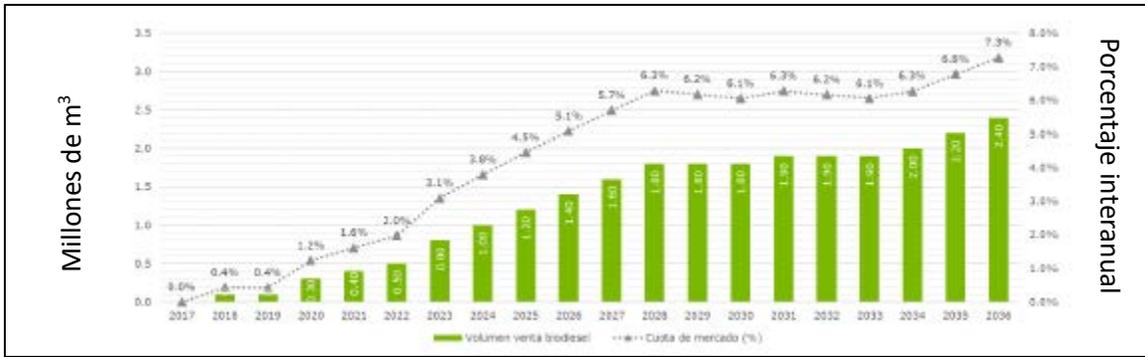


Figura 5.9 Evolución de la cuota de mercado de biodiésel, escenario optimista (Riegalhaupt y col., 2016)

En este escenario se utiliza la trayectoria de precios altos del petróleo, creciendo progresivamente de 45 ó 50 dólares por barril a los 100 dólares por barril en 2025, momento en el que se estabiliza. El volumen de demanda de combustible diésel se asume con un crecimiento medio anual bajo, equivalente al 50% del proyectado en la Prospectiva de petróleo y petrolíferos 2015 – 2029 (Riegalhaupt y col., 2016).

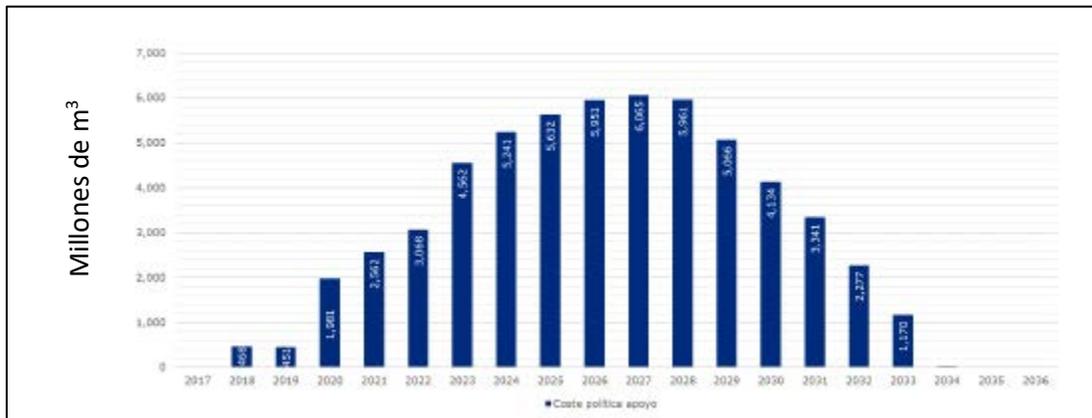


Figura 5.10 Evolución de costos de políticos de apoyo, escenario optimista (Riegalhaupt y col., 2016)

En este escenario los costos totales aumentan en línea con el volumen de biodiésel introducido en el mercado de 6,065 millones de pesos en 2027, momento en el que la cuota comienza a bajar, debido al objetivo del 6% (Riegalhaupt y col., 2016).

Haciendo referencia a emisiones de gases de efecto invernadero, este escenario lleva a un máximo de mitigación anual de entre 3.3 y 4.8 MtCO_{2e} por año, y una mitigación acumulada de entre 35 y 50 MtCO_{2e} para el periodo comprendido de entre 2017 y 2036 (Riegalhaupt y col., 2016).

En lo económico, se estiman ingresos adicionales acumulados de entre 183,000 y 261,000 millones de pesos para el sector agrícola en el periodo comprendido entre

2018 y 2036, así como una inversión acumulada de entre 12,000 y 18,000 millones de pesos en infraestructura industrial de producción de biodiésel (Riegalhaupt y col., 2016).

Capítulo 6. Conclusiones

Tener una industria estable de biocombustibles es la clave para buscar una independencia de los combustibles fósiles y con ello fomentar la transición hacia las energías verdes. Hacer un uso eficaz y viable de los biocombustibles dentro de las flotas vehiculares aun parece un camino lejano, es claro que los constantes y acelerados avances tecnológicos pueden maximizar las ventajas que ofrecen los combustibles de origen natural, reduciendo los efectos negativos desencadenados de las emisiones y/o afectaciones presentes en su proceso de producción.

Biocombustibles como el bioetanol y el biodiésel, hoy en día, se presentan como las alternativas más sólidas para hacer frente al uso de los productos derivados del petróleo ante la creciente demanda energética. Debido a que el sector de transporte es uno de los principales emisores de GEI, se presta una gran atención en el desarrollo de combustibles de origen biológico.

Es cierto que los biocombustibles no son tan rentables sin la organización ni la tecnología adecuada, aunque es un gran reto, es una enorme oportunidad de desarrollo tecnológico. Países pioneros como Brasil, en donde la implementación del biodiésel se ha convertido en toda una realidad, son un claro ejemplo para lograr la transición energética. Una condición importante como la latitud de ciertas regiones del mundo, hace que países cercanos al Ecuador tienen climas que permiten cosechas a lo largo del año, y sumado a su capacidad económica y/o tecnológica hacen posible la implementación de biocombustibles con un bajo coste de producción.

Para el caso específico del biodiésel, en México el emplear la recolección de aceites usados para la fabricación de biodiésel permite hacer aún más rentable el uso del combustible, permitiendo un costo de producción de \$11.40 MNX, lo que abriría un panorama alentador ofreciéndolo a un precio más accesible y aún competente en comparación al diésel. La logística es un factor importante para garantizar la utilidad de un producto, empleando la recolección de aceites si el cultivo no resulta ser tan viable es una alternativa que contribuye a la producción, así como brindar un uso adecuado de estos residuos líquidos.

Comenzar ofreciendo el biocombustible en zonas clave donde exista un tránsito constante vehicular, permitirá asegurar un escenario alentador, buscando y evaluando una estrategia adecuada que garantice la introducción del biodiésel al mercado. Considerando la evaluación de los biocombustibles de manera general, es verdad que no es rentable en ciertas partes del mundo, en zonas en las que el traslado de los cultivos como principal materia prima eleva los costos de producción, el emplear la recolección de aceites usados permite disminuir las distancias de traslados de la materia prima, mejorando los costos de producción,

volviendo más rentable su producción. Las nuevas e innovadoras tecnologías en tema automotriz, como el mayor desarrollo de motores híbridos y completamente amigables al ambiente son vitales para continuar con la búsqueda de más y mejores opciones de combustible, debido a que es claro que la energía fósil llegará a un punto de escasez por lo que es necesaria la inclusión de más energías al mercado internacional y comenzar por el crecimiento de los biocombustibles puede marcar el camino hacia una independencia energética fósil.

Referencias bibliográficas

- Akpan U. G., Kovo A. S., Abdullahi M y Ijah J. J., 2005. *The production of ethanol from maize cobs and groundnut shells*. Publicación del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Federal de Tecnología Minna, Minna, Nigeria.
- Agarwal A. K., 2007. *Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines*. **Progress in Energy and Combustion Science** 33: 233-271.
- Agarwal, A. K., Agarwal, R. A., Gupta, T., y Gurjar, B. R., 2018. *Biofuels: Technology, Challenges and Prospects*. 1ra ed. Editorial Springer. Singapur.
- Alva Caudillo G., 2020. *Mercado de Biodiésel en México*. Publicación de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Estado de México, México.
- Anónimo, 1917. *The National Geographic*, **The National Geographic Society** 31:131.
- Antzara A., Heracleous E., Bukur D. B. y Lemonidou A. A., 2015. *Análisis termodinámico de la producción de hidrógeno a través del reformado de metano con vapor de bucle químico junto con la captura de CO₂ in situ*. **Revista Internacional de Control de Gases de Efecto Invernadero** 32: 115-128.
- Arsuf, A. y Sussman V., 1983. *The samaritan oil lamps from Apollonia—Arsuf*. **Revista del Instituto de Arqueología de la Universidad de Tel Aviv**. 10(4): 71 – 96.
- ASTM, 2004. *ASTM D 975-04a: Standard specification for Diesel Fuel Oils*. Publicación de ASTM International. EE. UU.
- Auris R. R. I. y Morales de la Cruz, F. K., 2019. *Evaluación de la influencia de la temperatura en el tiempo de producción de biogás de excretas de*

bovino en el centro poblado de Callqui Grande – Huancavelica. Publicación de la Universidad Nacional de Huancavelica. Huancavelica, Perú.

- Babu, V., Thapliyal, A., y Patel, G. K., 2013. *Biofuels Production*. 1ra ed. Editorial Wiley-Scrivener. EE. UU.
- Badger, P. C., 2002. *Ethanol from cellulose: A general review*. **Trends in New Crops and New Uses**: 17-21. Alexandria, EE. UU.
- Baker J. S, McCarl B. A., Murray B. C., Rose S. K., Alig R. J., Adams D., Latta G., Beach R. y Daigneault A., 2010. *Net farm income and land use under a U. S. greenhouse gas cap and trade*. Publicado por la Asociación de Economía Agrícola y Aplicada. EE. UU.
- Balat M., Balat H. y Oz C., 2008. *Progress in bioethanol processing*. **Progress in Energy and Combustion Science** 34: 557–573.
- Balat M., 2011. *Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review*. **Energy Conversion and Management** 52: 858–875.
- BNDES y CGEE, 2008. *Bioetanol de Caña de Azúcar, Energía para el Desarrollo Sostenible*, p: 316. Publicado por el Banco Nacional de Desenvolvimento Económico y Social (BNDES). Río de Janeiro, Brasil.
- Barrera M. A., Maicelo J. L., Gamarra O. A., Oliva M., Leiva S. T., Taramona L. A., Huanes M. A. y Ordinola C. A. 2019. *Biogás: producción y aplicaciones*. Publicado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), Chachapoyas, Perú.
- Basha S. A., Gopal K. R. y Jebaraj S. A., 2009. *A review on biodiesel production, combustión, emissions and performance*. **Renawable and Sustainable Energy Reviews** 13: 1628-1634.
- Benjumea P., Agudelo J. y Ríos L., 2009. *Biodiésel: Producción, calidad y caracterización*. Publicado por la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Bothast, R.J., 2005. *New technologies in biofuel production (Presentation at USDA)*. Publicación en Agricultural Outlook Forum (AOF). Washington, DC, EE. UU.

- Bridgwater A. V., 2012. *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading*. **Biomass and Bioenergy** 38: 68-94.
- Brown M., Levine M., Romm J. y Koomey J., 1998. *Engineering – economic studies of energy technologies to reduce greenhouse gas emissions: opportunities and challenges*. **Revista anual del entorno energético** 23:287-385.
- Butler E., Devlin G., Meier D. y McDonnell K., 2011. *A review of recent laboratory research and commercial developments in fast pyrolysis and upgrading*. **Energy Reviews** 15: 4171–4186.
- Carere C., Sparling R., Cicek N. y Levin D., 2008. *Third generation biofuels via direct Cellulose Fermentation*. **Revista Internacional de las ciencias moleculares** 9(7):1342-1360.
- Carvalho A. y Torroba A., 2021. *Atlas de los biocombustibles líquidos 2020-2021*. Publicación del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Casas Jiménez P. M., Escudero González, C. A., Martínez Guerrero T. Z., Mendoza Díaz M. C., Barroso Ramírez C., Gutiérrez Ortega N. L. y Ramos Ramírez E., 2021. *Procesos sustentables para la producción de biocombustibles: a review*. En: XXVI Verano de la ciencia de la Universidad de Guanajuato. Guanajuato, México.
- Cediél Galán A., Fernández López C. A., Larrazábal Roche J. F., Plá de la Rosa J. L., Vivaracho Ruiz L. A., Aragón Mesa A., Ciordia Escribano O., Monclús González J. y Muñoz Babiano A., 2008. *Nuevos combustibles y tecnología de propulsión: Situación y perspectivas para automoción*. Publicación de Grupo IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía) y Grupo FITSA (Fundación Instituto Tecnológico para la Seguridad del Automóvil). Madrid, España.
- CEE, 2009. *EN 590: Automotive fuels - Diesel - Requirements and test methods*. Publicado por el Comité de Estandarización Europea. Bruselas, Bélgica.

- Celik D. y Yildiz M., 2017. *Investigación de métodos de producción de hidrógeno de acuerdo con los principios de la química verde. **International Journal of Hydrogen Energy** 42(36): 23395-23401.*
- CEDRSSA, 2020. *La producción y el comercio de los biocombustibles en México y en el mundo.* Publicación del Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA), Cámara de Diputados. Ciudad de México, México.
- Cerutti-Masera O., Coralli F., Bustamante García C., Riegelhaupt E., Chalico Avarias T., Gregg Vega J., Jiménez Díaz R., Pacheco Guerrero G. y Cecotti L., 2011. *Cuaderno Temático No. 4. La Bioenergía en México.* Publicación de Red Mexicana de Bioenergía, A. C., Imagia Comunicación. México.
- Chen H. W., Song Q. H., Liao B. y Guo Q. 2011. *Further Separation, Characterization, and Upgrading for Upper and Bottom Layers from Phase Separation of Biomass Pyrolysis Oils.* Publicado por American Chemical Society. EE. UU.
- CEC, 2006. *Biofuels in the European Union: A visión for 2030 and beyond.* Publicado por European Commission. Bruselas, Bélgica.
- CEC, 2007. *EU energy Summit: A new start for Europe.* Publicado por European Commission. Bruselas, Bélgica.
- Cortés-Sánchez M. D., Gata-Montero E. M., Pipió-Ternero A. Rivas-Rodríguez A. y Sánchez-Santos J. M., 2019. *Biocombustibles: tipos y estrategias de producción.* Publicado por la Universidad Pablo de Olavide. Sevilla, España.
- Cremonez P. A., Feroldi M., Nadaleti W. C., De Rossi E., Feiden A., De Camargo M. P., Cremonez F. E. y Klajn F. F., 2015. *Biodiesel production in Brazil: current scenario and perspectives.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 42: 415-428.
- Da Silva Veras T., Mozer Simonato T., Da Costa Rubin Messeder Dos Santos D. y Da Silva César A., 2017. *Hidrógeno: Tendencias, producción y*

caracterización del principal proceso a nivel mundial. **International Journal of Hydrogen Energy** 42(4):2018-2033.

- Dale B. E. y Ong R. G., 2014. *Design, implementation and evaluation of sustainable bioenergy production system.* **Biofuels, Bioproducts & Biorefining** 8(4): 487-503.
- Daroch M., Geng S. y Wang G., 2013. Recent advances in liquid biofuel production from algal feedstocks. **Applied Energy** 102: 1371-1381.
- Das P., Ganesh A. y Wangikar P., 2004. *Influence of pretreatment for deashing of sugarcane bagasse on pyrolysis products.* **Biomass and Bioenergy** 27: 445–457.
- De Decker, K., 2010. *Wood gas vehicles: Firewood in the fuel tank.* Publicado por la Revista Low-Tech. Barcelona, España.
- De los Ríos Castillo T. I., 2010. *Óxidos metálicos mixtos como portadores de oxígeno para procesos REDOX a partir de metano.* Publicado por el Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Chihuahua, México.
- De los Ríos C. T. Salinas G. J., López O. A. y Collins M. V., 2013. *Evaluación cinética global durante la reducción de CoWO_4 con metano para la producción de hidrógeno.* **International Journal of Hydrogen Energy** 38(28): 12519-12526.
- De Oliveira B. R., Lal R., Aguiar D. A., De Figueiredo E. B., Perillo L. I., Adami M., Rudorff B. F. T. y La Scala N., 2015. *Greenhouse gas balance from cultivation and direct land use change of recently established sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in south-central Brazil.* **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** 52: 547-556.
- Dellomonaco C., Fava F. y González R., 2010. *The path to next generation biofuels: Successes and challenges in the era of synthetic biology.* **Microbial Cell Factories** 9(3).
- Demirbas A., 2005. *Bioethanol from cellulosic materials: a renewable motor fuel from biomass.* **Energy Sources** 27(4): 327–333.

- Demirbas A., 2008. *Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections*. **Energy Conversion and Management** 49: 2106–2116.
- Demirbas, A., 2009. *Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review*. **Applied Energy** 86: S108–S117.
- DOE, 2000. *Biomass Co-Firing: A Renewable Alternative for Utilities*. U. S. Publicado por el Department of Energy, Washington, DC, EE. UU.
- DOE, 2013. *The History of Natural Gas*. Publicado por el Department of Energy, Washington, DC, EE. UU.
- Díaz de León C. M., 2017. *Biocombustibles para el Transporte*. En: Revista de Ciencia 68: 55–61. Academia Mexicana de Ciencias, México.
- Dilekli N y Duchin F., 2015. *Prospects for Cellulosic Biofuel Production in the Northeastern United States: A Scenario Analysis*. **Journal of Industrial Ecology** 20(1): 120-131.
- Dimitri, C. y Effland A., 2007. *Fueling the automobile: An economic exploration of early adoption of gasoline over ethanol*. **Journal of Agricultural y Food Industrial Organization**. 5(1): 1191-1191.
- Dincer I. y Canan A., 2015. *Revisión y evaluación de métodos de producción de hidrógeno para una mejor sostenibilidad*. **International Journal of Hydrogen Energy** 40:11094-11111.
- Egloff G., 1939. *Motor Fuel Economy of Europe*. Publicado por el American Petroleum Institute. Washington, DC, EE. UU.
- Eroglu E. y Melis A., 2011. *Photobiological hydrogen production: Recent advances and state of the art*. **Bioresource Technology** 102(18):8403-8413.
- Fangrui M. y Hanna M. A., 1999. *Biodiesel production: a review*. **Bioresource Technology** 70(1): 1-15.
- FAO, 2013. *FAOStat—Forestry database*. Publicado por la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Geneva, Switzerland
- Fast S., 2009. *The biofuels debate: Searching for the role of environmental justice in environmental discourse*. **Environments Journal** 37: 83-100.

- Finlay M. R., 2004. *Old efforts at new uses: A brief history of chemurgy and the American search for biobased materials*. **Journal of Industrial Ecology** 7(3-4):33–46.
- Fischer G., Hizsnyik E., Prieler S., Shah M., y Van Velthuizen H., 2009. Biofuels and food security. Publicado por el Fondo OPEP para el Desarrollo Internacional (OFID). Viena, Austria.
- FNVS, 2014. *Land use change and biofuels*. Publicado por la Federación Nacional de Vida Silvestre. EE. UU.
- Foster-Carneiro T., Riau V. y Pérez M., 2010. *Mesophilic anaerobic digestion of sewage sludge to obtain class B biosolids: Microbiological methods development*. **Biomass and Bioenergy** 34(12): 1805–1812.
- Fox, H. S., 1924. *Alcohol motor fuels*. Encontrado en World Trade in Gasoline, Trade Promotion Series No. 20. Publicado por el Departamento de Comercio de EE. UU. Government Printing Office. Washington, DC, EE. UU.
- Friedmann A., 2009. *Biocombustibles. Alternativa de negocios verdes*. Publicación de la Unidad de Comunicaciones del programa Paraguay Vende. Paraguay.
- Frohmann A. y Olmos X., 2013. *Huella de carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático*. Publicado por accioness Unidas. Santiago de Chile, Chile.
- Gallardo Ortiz V. G., 2017. *Cartera de necesidades de innovación y desarrollo tecnológico. Biodiésel*. Publicado por el Instituto Mexicano del Petróleo. México.
- Gardner, B. y Tyner, W., 2007. *Exploration in biofuels, economics, policy and history: Introduction to the special issue*. **Journal of Agricultural y Food Industrial Organization** 5(2): 1–7.
- Grande Tovar C. D., 2012. *Aprovechamiento de residuos agroindustriales. Biocombustibles*. Editorial Bonaventuriana. Cali, Colombia.

- Haarlénmer G. y Bensabath T., 2016. *Comprehensive Fischer-Tropsch reactor model with non-ideal plug Flow and detailed reactions kinetics. Computers and Chemical Engineering* 84: 281-289.
- Hallenbeck P. C., 2011. *Hydrogen Production by Cyanobacteria*, 15 - 28. Publicado en *Microbial Technologies in Advanced Biofuels Production*, Editorial Springer. EE. UU.
- Sharara M. A., Clausen E. C. y Carrier D. J., 2012. *Biorefinery Co-Products: Phytochemicals, Primary Metabolites and Values-Added Biomass Processin, An overview of Biorefinery Technology*, 1: 1 - 18, Editorial Jhon Wiley and Sons. Reino Unido.
- Haas M. J., McAloon A. J., Yee W. C. y Foglia T. A., 2006. *A process model to estimate biodiesel production costs. Bioresource Technology* 97: 671–678.
- Herrera J. y Vélez J. 2008. *Caracterización y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtención de un biocombustible (biodiésel)*. Publicado por la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.
- Hill. J. E., Nelson E. y Tilman D., 2006. *Environmental. Economic and energetic costs and benefits of biodiesel and etanol biofuels. Authors Info and Affiliations* 103(30): 11206-11210.
- IEA, 2006. *World Energy Outlook 2006*, p. 394. Publicación de la International Energy Agency of EE. UU. Publicado por la Organización para la Cooperacion y el Desarrollo Económicos (OCDE). Paris, Francia.
- IEA, 2008. *From 1st to 2dn generation biofuel technologies*. Publicación de International Energy Agency. Publicado por Information Energy Administration. París, Francia.
- IEA, 2011. *Technology Roadmap: Biofuels for Transport*. Publicación de International Energy Agency. Publicado por la International Energy Agency. París, Francia.
- IEA, 2013. *World Energy Outlook 2013*. Publicación de la International Energy Agency. Publicado por la Information Energy Administration. París, Francia.

- IEA, 2014. *Monthly biodiesel production report*. U. S. Publicación de la International Energy Agency. Publicado por la Information Energy Administration. Washington, DC, EE. UU.
- IER, 2013. *EPA ignores reality with 2014 ethanol mandates*. Publicado por Institute for Energy Research. Washington, DC, EE. UU.
- IICA, 2007. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: I Bioetanol. Publicado en formato digital por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- IICA, 2010. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiésel. Publicado en formato digital por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- ISCT, 2006. *Feasibility Report: Small Scale Biodiesel Productio*. Publicado por Waste Management and Research Center. Illinois, EE. UU.
- Jansen D., Gazzani M., Manzolini G. y Van Dijk E., 2015. *Pre-combustion CO₂ capture*. ***International Journal of Greengouse Gas Control*** 40: 167-187.
- Jeong J. H., Hwang S. I., Park S. S. y Hwang J., 2017. *Investigación sobre cogasificación de carbón y biomasa en gasificador Shell utilizando un modelo de gasificación validado*, pp: 371 – 377. Publicado por la Universidad de Yonsei. Seúl, Corea del Sur.
- Jiang Y., Liu J., Jiang W., Yang Y. y Yang S., 2015. *Current status and prospects of industrial bio-production of n-butanol in China*. ***Biotechnology Advances*** 33(7): 1493 – 1501.
- Jones D. T. y Woods D. R., 1986. Fermentacion de acetona – butanol revisada. Publicado en la revista Mibiología y Biología molecular (50). DOI: 10.1128/mr.50.4.484-524.1986
- Kamm B., Gruber P. R. y Kamm M., 2005. *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*. Editorial WILEY – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. EE. UU.
- Kapdan J. K. y Kargi F., 2006. *Bio – Hydrogen Production from Waste Materials*. ***Enzyme and Microbial Technology*** 38(5): 569–582.

- Khila Z., Baccar I., Jemel I. y Hajjaji N., 2016. *Thermo-environmental life cycle assessment of hydrogen production by autothermal reforming of bioethanol*. **Energy for Sustainable Development** 37: 66-78.
- Kirtay E., 2011. *Recent Advances in Production of Hydrogen from Biomass*. **Energy Conversion and Management** 52(4): 1778-1789.
- Knothe G., 2001. *Historical perspective on vegetable oil-based diesel fuels*. Publicado en American Oil Chemists Society. EE. UU.
- Knothe G., 2010. *Calidad del combustible biodiésel y la norma ASTM*. **Revista Palmas** 31: 162-171. Bogotá, Colombia.
- Kojima, M. Donald, M. y William, W., 2007. *Considering Trade Policies for Liquid Biofuels*. Publicado por la Gestión del Sector Energético, Programa de Asistencia (ESMAP, siglas en ingles). The World Bank Group. Washington, DC, EE. UU.
- Kotay S. M. y Das D., 2008. *Biohydrogen as a renewable energy resource - Prospects and potentials*. **International Journal of Hydrogen Energy** 33 (1): 258 – 263.
- Kovarik, B., 1998. *Henry Ford, Charles Kettering y el combustible del futuro*. **Automotive History Review** 32: 7–27.
- Krauss C., 2008. *Taking flight on jatropha fuel*. Publicado en The New York Times. EE. UU.
- Levin D. B., Pitt L. y Love M., 2004. *Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application*. **International Journal of Hydrogen Energy** 29(2): 173-185.
- Lian S., Xu M. y Zhang T., 2012. *Unintended consequences of bioethanol feedstock choice in China*. **Bioresource Technology** 125: 312-317.
- Lifset R., 2014. *American Energy Policy in the 1970s*. Publicado por la Universidad de Oklahoma Press. EE. UU.
- Loeb A. P., 2004. *Steam versus electric versus internal combustion: Choosing vehicle technology at the start of the automotive age*.

Transportation research Record Journal of th Transportation Research Board 1885(1):1–7.

- London Times, 1902. *The Kaiser's new scheme*. Publicado en el periódico The New York Times.
- London Times, 1914. *Alcohol motor fuel*. Publicado en el periódico The London Times.
- London Times, 1921. *Fuel from waste*. Publicado en el periódico The London Times.
- Lucien P., Gustave C., Auguste M., Gustave R., 1902. *Congres des application de l'alcool denature, Paris*. Editorial Automobile Club de France. París, Francia.
- Lucke, C.E. y Woodward S. M, 1907. *The use of alcohol and gasoline in farm engines*. Publicado por Scientific American, una Division de Springer Nature America, Inc. EE. UU.
- Lusk P., 1998. *Methane recovery from animal manures: The current opportunities casebook*. Publicado por Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Golden. Colorado, EE. UU.
- Maciel-Álvarez. C., 2009. *Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional*. Publicado en el Posgrado de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, CDMX, México.
- Magnusson L., Islam R., Sparling R., Levin D. y Cicek N., 2008. *Direct hydrogen production from cellulosic waste materials with a single-step dark fermentation process*. ***International Journal of Hydrogen Energy*** 33(20): 5398-5403.
- Makarshin L. L., Sadykov V. A., Andreev D. V., Gribosvsky A. G., Pricenzentsev V. V. y Parmon V. N., 2015. *Syngas production by partial oxidation of methane in a microchannel reactor Ni–Pt/La_{0.2} Zr_{0.4} Ce_{0.4} Ox catalyst*. ***Fuel Processing Technology*** 131: 21-28.
- Maniatis K., 2003. *Biofuels in the European Union*. Publicado por F.O. Lichts World Biofuels, Sevilla, España.

- Marcus R. X., 2007. *The Brazilian Sugarcane Ethanol Experience*. Publicado por el Competitive Enterprise Institute. Washington, DC, EE. UU.
- Martínez G. J., Nápoles R. F., Ponce O. J. M y El Halwagi M. M., 2017. *Optimization of the production of syngas from sale gas with economic and safety considerations*. ***Applied Thermal Enigineering*** 110: 678-685.
- Marvuglia A., Benetto E., Rege S. y Jury C., 2013. *Modelling approaches for consequential life-cycle assessment (C-LCA) of bioenergy: Critical review and proposed framework for biogas production*. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews*** 25: 768-781.
- Masjuki H. H., Kalam M. A., Mofijur M. y Shahabuddin M., 2013. *Biofuel: Policy, Standardization and Recommendation for Sustainable Future Energy Supply*. ***Energy Procedia*** 42: 577-586.
- McMichael P., 2009. *The agrofuels project at large*. ***Critical Sociology*** 35(6): 825-839.
- Mofihur M., Rasul M. G., Hyde J. y Bhuyia M. M. K., 2015. *Role of biofuels on IC Engines Emission reduction*. ***Energy Procedia*** 75: 886-892.
- Monteiro M. C. M., 2010. *Situación de los biocombustibles de 2da y 3ra generación en América Latina y Caribe*. Publicación de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Quito, Ecuador.
- Montejano Gamboa C., 2009. Biocombustibles. Estudio teórico conceptual, iniciativas presentadas en la LX legislatura, derecho comparado y opiniones especializadas. Publicado en el Centro de Documentación, Información y Análisis de la Cámara de Diputados de la Ciudad de México. Ciudad de México, México.
- Moreno S. M., 2020. Dinámica de los polifenoles procedentes de aguas residuales de la industria vinícola durante el proceso de digestión anaerobia. Publicado por la Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España.

- Muller Langer F., Majer S y O'keffe S., 2014. *Benchmarking biofuels—A comparison of technical, economic and environmental indicators*. **Energy, Sustainability and society** 4(20):1-14.
- Naylor R. L, Liska A. J., Burke M. B., Falcon W. P., Gaskell J. C., Rozelle S. D. y Gassman K. G., 2007. *The ripple effect: biofuels, food security and the environment*, 49(9): 30–43. Publicado por la Universidad de Nebraska. Lincoln, EE. UU.
- Nelson, V. y Starcher, K., 2017. *Introduction to Bioenergy (Energy and the Environment) (English Edition) (1.ª ed.)*. CRC Press (Taylor & Francis Group). Nuevo México, EE. UU.
- New York Times, 1925. *Ford Predicts Fuel from Vegetation*. Publicado en el periódico The New York Times. EE. UU.
- Nogueira L. A., 2011. *Does Biodiesel make sense?*. **Energy** 36(6): 3659-3666.
- OCDE y FAO, 2020. *Perspectivas agrícolas 2020 – 2029*. Publicado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). París, Francia.
- OCDE y FAO, 2020. *Estadísticas de la OCDE sobre Agricultura (base de datos)*. Publicado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). París, Francia.
- Petróleos Mexicanos (PEMEX), 2016. *Volumen de las ventas internas de productos petrolíferos y gas natural (estadísticas petroleras)*. Publicado por el Gobierno de México. México, México.
- Quin Z., Mishra U. y Hastings A., 2018. *Bioenergy and land use change*. Publicado por John Wiley and Sons y la Unión de Geofísica Americana. EE. UU.
- Rajagopal D., Sexton S., Hochman G., Roland – Holst D. y Zilberman D., 2007. *Challenge of biofuel: filling the tank without emptying the stomach?* **Environmental Research Letters** 2(4): 1-9.

- Rajgor G., 2013. *Renewable power generation — 2012 figures. Part six: Biomass*. Publicado por la revista Renewable Energy Focus (REFocus). No. 14: 24–25. EE. UU.
- Ramos-Delgado G. C., 2012. *Mexico and the biofuel challenge. A critical balance sheet*. **Voices of Mexico** 94: 118 – 123, UNAM, México.
- Ramos M. J., Fernandez C. M., Casas A., Rodriguez L. y Perez A., 2009. *Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties*. **Bioresource Technology** 100(1): 261-268.
- Rathmann R., Szklo A. y Schaeffer R., 2010. *Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate*. **Renewable Energy** 35(1): 14-22.
- Reijnders L. y Huijbregts M. A. J., 2009. *Biofuels for road transport. a seed to Wheel perspective*. Editorial Springer. Alemania.
- Rico J., 2006. *Biocarburentes en el transporte*. Publicado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). Madrid, España.
- Riegalhaupt E., Odenthal J. y Janeiro L., 2016. *Diagnóstico de la situación actual del biodiesel en México y escenarios para su aprovechamiento*. Publicado por ECOFYS: Energía sostenible para todos. Países Bajos.
- Rodríguez A., Razo C., Gómez J. J., y Coviello M. F., 2008. *Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe*. Publicado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Naciones Unidas. Santiago de Chile, Chile.
- Russell L. S., 2003. *A Heritage of Light: Lamps and Lighting in the Early Canadian Home*. Publicación de la Universidad de Toronto. Toronto, Canadá.
- Rytter E., Sousková K., Lundgren M. K. y Ge W., 2016. *Process concepts to produce syngas for Fischer-Tropsch fuels by solar thermochemical splitting of water and/or CO₂*. **Fuel Processing Technology** 145:1-8.
- Salinas Callejas E. y Gasca Quezada V., 2009. *Los biocombustibles*. Publicado en El Cotidiano, núm. 157, 75-82. Ciudad de México, México.

- Sánchez Ó. J. y Cardona C. A., 2008. *Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks*. **Bioresource Technology** 99(13): 5270–5299.
- Sandoval G., 2010. *Biocombustibles Avanzados en México*. Publicado por la Red Mexicana de Bioenergía. México.
- Sarkar N., Ghosh S. K., Bannerjee S. y Aikat K., 2012. *Bioethanol production from agricultural wastes: An overview*. **Renewable Energy** 37(1): 19–27.
- Scott S. A. y Davey M. P., 2010. *Biodiesel from algae: Challenges and prospects*. **Current Opinion in Biotechnology** 21(3): 277-286.
- SENER, 2015. *Prospectiva de petróleo y petrolíferos 2015 – 2029*. Publicado por la Secretaría de Energía (SENER). México.
- Sharara M. A., Clausen E. C. y Carrier D. J., 2012. *Biorefinery Co-Products: Phytochemicals, Primary Metabolites and Value-Added Biomass Processing*. Pp: 1-18. Editorial Wiley. EE. UU.
- Sheinbaum P. C.; Calderón I. A. y Ramírez S. M., 2013. *Potential of biodiésel from waste cooking oil in Mexico*. *Biomass and Bioenergy*. **Biomass and Bioenergy** 56: 230-238.
- Sims R. E., Mabee W., Saddler J. N. y Taylor M., 2010. *An overview of second generation biofuel technologies*. **Bioresource Technology** 101(6): 1570–1580.
- Singh, R. S., Gnansounou, E., y Pandey, A., 2019. *Biofuels. Production and Future Perspectives*. Editorial CRC Press (Taylor & Francis Group). Nueva York, EE. UU.
- Soccol, C. R., Brar, S. K., Faulds, C. y Ramos, L. P., 2018. *Green Fuels Technology: Biofuels*. Editorial Springer. EE. UU.
- Songstad, D. D., Lakshmanan, P., Chen, J., Gibbons, W., Hughes, S. y R. Nelson., 2009. *Historical perspective of biofuels: Learning from the past to rediscover the future*. *In Vitro Cellular and Developmental Biology* 45(3):1-7.

- Sorda, G. Banse, M., y Kemfert, C., 2010. *An overview of biofuel policies across the world*. **Energy Policy** 38(11): 6977-6988.
- SSP, 2008. *Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos*. Publicado en el Diario Oficial de la Federación por la Secretaría de Servicios Parlamentarios de México. México.
- Stephan D., 2013. *Germany Remains the World's Leading Biogas Energy Producer*. Publicado por el Grupo de comunicaciones Vogel. Würzburg, Alemania.
- Stratta J., 2000. *Biocombustibles: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiésel*. Publicado en la Bolsa de Comercio de Rosario por el Departamento de Capacitación y Desarrollo de Mercado. Rosario, Argentina.
- Su Y., Zhang P. y Su Y., 2015. *An overview of biofuels policies and industrialization in the major biofuel producing countries*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 50: 991-1003
- Suh M., Park H., Prasad T. y Lim D. W., 2012. *Hydrogen storage in Metal – Organic Framework*. **Chemical Reviews** 112(2):782-835. American Chemical Society (ACS). Washington, DC, EE. UU.
- Sun Y. y Cheng J., 2002. *Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review*. **Bioresource Technology** 83(1): 1 – 11.
- Taherzadeh M. J. y Karimi K., 2007. *Acid-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: A review*. Publicado en *Biosources* 2, p: 472 – 499.
- Takeuchi, K., Shiroyama, H., Saito, O. u Matsuura, M., 2018. *Biofuels and Sustainability: Holistic Perspectives for Policy-making*. Editorial Springer Open. EE. UU.
- Tauro R., 2016. *Estudio de costos de transporte de biomasa para co-combustión en central Petacalco*. (No publicado)
- Thomson J., 2003. *The Scot Who Lit the World: The Story of William Murdoch Inventor of Gas Lighting*. Gardners Books. Glasgow, Inglaterra.

- Torres D. A. y González E. R., 2020. Biodigestión anaerobia de los desechos del camal del Distrito Metropolitano de Quito para obtención de compost, biol y biogás. Publicado por Quito: UCE. Quito, Ecuador.
- Torroba A. M. y Carvalho A. C., 2020. *Atlas de biocombustibles líquidos 2019 – 2020*. Publicado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica.
- Tweedy R. N., 1917. *Industrial Alcohol*. Publicado en la Biblioteca de referencia cooperativa. Dublin, Irlanda.
- UCP, 2008. *Land and Biofuels*. Publicado por la Unión de científicos preocupados. Massachusetts, EE. UU.
- UE, 2010. *Strategic Research Agenda 2010 Update: Innovation driving sustainable biofuels*. Publicado por la Unión Europea. Bruselas, Bélgica.
- Van Tilburg M., 2013. *More pellets, please!* Publicado por la revista Site Selection. Conway Data, Inc. EE. UU.
- Vasile A. J., Andreea I. R., Popescu G. H., Elvira N. y Marian Z., 2016. *Implications of agricultural bioenergy crop production and prices in changing the land use paradigm—The case of Romania*. **Land use Policy** 50: 399-407.
- Vázquez M. I. S., Vigilia M. D. D. D., Gutiérrez J. S., Collins Martínez V y Ortiz A. L., 2009. *Producción de gas de síntesis mediante ciclos redox de óxidos bimetálicos y metano*. **Nuevos materiales para sistemas electroquímicos** 12: 29-34. Canadá.
- Venghaus S. y Selbmann K., 2014. *Biofuel as social fuel: Introducing socio-environmental services as a means to reduce global inequity?*. **Ecological Economics** 97: 84-92.
- Voldsund M., Jordan K. y Anantharaman R., 2016. *Hydrogen production with CO₂ capture*. **International Journal of Hydrogen Energy** 41(9): 4969-4992.
- Wilhelm D. J., Simbeck D. R., Karp A. D. y Dickenson R. L., 2001. *Syngas production for gas-to-liquids applications: technologies, issues and outlook*. **Fuel Processing Technology** 71(1-3): 139-148.

- Xia Z., 2013. *Domestic Biogas in a Changing China: Can Biogas Still Meet the Energy Needs of China's Rural Households?* Publicado por el International Institute for Environment and Development, Inglaterra.
- Yancheshme M. S., Radfarnia H. R. e Iliuta M. C., 2016. *High temperatura CO₂ sorbents and their applications for hydrogen production by sorption enhanced steam reforming process.* **Chemical Engineering Journal** 283:420-444.
- Yazan S. M., Altarazi, Abd Rahim A. T., Jianglong Y., Ezanee G. Mohd Fahmi A. G., Jonh L. y Talal Y., 2021. *Effects of biofuel on engines performance and emission characteristics: A review.* **Energy** 238(C): 121910.
- Yue D., You F. y Snyder W. S., 2014. *Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges.* **Computers and Chemical Engineering** 66:36-5.
- Zubizarreta Enríquez J. I., 2007. *Hidrógeno, gas de síntesis y derivado.* Publicado por la Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.