



BIOCOMBUSTIBLES AVANZADOS EN MÉXICO

Estado actual y perspectivas

GEORGINA SANDOVAL





Título del cuaderno:
BIOCOMBUSTIBLES AVANZADOS EN MÉXICO
ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Edición: Septiembre 2010
Autora: Georgina Sandoval

© Edición original publicada por
RED MEXICANA DE BIOENERGÍA, A.C.

www.rembio.org.mx
redmexbioen@gmail.com



MESA DIRECTIVA 2009 - 2011

Dr. Omar Masera Cerutti
PRESIDENTE

Ing. Enrique Riegelhaupt
SECRETARIO GENERAL

M en C. René Martínez Bravo
TESORERO

Coordinación general de la obra: Omar Masera Cerutti

Coordinación editorial: Fabio Coralli

Diseño editorial: Itzel Álvarez

Revisión técnica: Enrique Riegelhaupt y Alfredo Martínez

Corrección de estilo: Tomás González

LA AUTORA:

Georgina Sandoval obtuvo su grado de doctora en Biología, Salud y Biotecnología, en el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Toulouse, Francia, en el 2002. Es Investigadora Titular en el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), donde abrió una nueva línea de investigación en Biotecnología Industrial, con aplicaciones en los campos de Nutracéuticos, Biocombustibles y Nanomateriales, entre otros. Sus líneas de investigación en Bioenergía se centran en Producción Biotecnológica de Biocombustibles Avanzados. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores, a la Red Mexicana de Bioenergía y es miembro fundador de la Sociedad Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal.

Esta publicación se llevó a cabo con el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Las ideas, opiniones y conclusiones contenidas en el presente documento, son de exclusiva responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Red Mexicana de Bioenergía, A.C.

Reservados todos los derechos. Queda prohibida la reproducción parcial o total, directa o indirecta, del contenido de este cuaderno, ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, registro u otros medios sin contar con el permiso previo, expreso y por escrito de los editores, en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor.

PRESENTACIÓN

Estimados Lectores:

Tengo el gusto de poner a su consideración el Cuaderno Temático: "Biocombustibles Avanzados en México", redactado por la Dra. Georgina Sandoval con la colaboración del Dr. Alfredo Martínez, ambos connotados investigadores mexicanos con amplia experiencia en este tema.

Los biocombustibles líquidos que están disponibles comercialmente en la actualidad son el etanol y el biodiesel de primera generación, obtenidos principalmente de cultivos alimenticios como caña de azúcar, maíz, soya o palma de aceite. La viabilidad de estos cultivos para reemplazar masivamente a los combustibles fósiles en el sector transporte o mitigar el cambio climático se ha cuestionado en diversos ámbitos, y se debaten sus efectos potencialmente negativos respecto a la seguridad alimentaria o la deforestación.

Como respuesta a esta problemática, hay una gran cruzada a nivel internacional para desarrollar un conjunto amplio de "biocombustibles avanzados" que posibilitarían el uso integral de los recursos biomásicos; por ejemplo, mediante el aprovechamiento de residuos y materiales lignocelulósicos. Este documento responde a la necesidad de contar con un análisis actualizado y riguroso sobre las oportunidades y retos que ofrecen estas nuevas generaciones de biocombustibles en nuestro país. En particular, es importante examinar de manera crítica qué opciones existen, su grado de madurez tecnológica, su potencial para expandir la producción de manera sustentable en el contexto de México y considerar acciones para promover su desarrollo futuro en el país.

El presente volumen forma parte de la colección Cuadernos Temáticos, mediante la cual la Red Mexicana de Bioenergía inicia su Proyecto Editorial. El proyecto persigue brindar materiales de calidad sobre los distintos aspectos de la problemática bioenergética, tanto a nivel internacional como de nuestro país. Con este esfuerzo, procuramos también difundir las actividades de la REMBIO y ofrecer herramientas útiles a los socios y al público en general. La colección Cuadernos Temáticos incluirá diversos volúmenes que tratarán aspectos centrales de la bioenergía en México, en términos tecnológicos, económicos, ambientales o de política pública y legislación.

Espero que este volumen y otros títulos de la colección sean de su interés.

Omar Masera Cerutti

Presidente

RED MEXICANA DE BIOENERGÍA, A. C.





Í N D I C E

Resumen ejecutivo	3
1. Introducción	5
1.1. Desarrollo sustentable o sostenible	5
1.2. Biocombustibles líquidos avanzados: hacia la búsqueda de la sustentabilidad	5
2. Panorama Internacional	6
2.1. Beneficios ambientales de los “biocombustibles avanzados”	7
2.2. Costos y viabilidad económica de los “biocombustibles avanzados”	9
2.3. Etanol carburante	11
2.4. Biodiesel	16
2.5. Diésel verde	20
2.6. Alcances y Retos a futuro	23
3. Estado del arte en México	23
3.1. Materias primas y tecnologías	23
3.2. Aspectos ambientales	24
3.3. Aspectos sociales y políticos.	24
3.4. Aspectos normativos y legislativos	24
4. Experiencias concretas en México	26
4.1. Líneas de Investigación	26
4.2. Proyectos recientes sobre biocombustibles avanzados	27
4.3. Estudios y proyectos	27
5. Conclusiones: retos para México	29
6. Bibliografía	30
7. Agradecimientos	31

RESUMEN EJECUTIVO

Una gran parte de los gases de efecto invernadero y de otros contaminantes ambientales provienen del sector transporte, el cual será uno de los principales afectados por el alza de precios de los combustibles derivados del petróleo. Los biocombustibles líquidos representan una opción a corto plazo para complementar la transición de combustibles derivados del petróleo a combustibles renovables. Sin embargo, la sustentabilidad de la producción y el uso de biocombustibles líquidos derivados de cultivos alimenticios generan mucha controversia.

Estudios recientes indican que, en efecto, para lograr beneficios ambientales más significativos, los biocombustibles deberán provenir de otro tipo de cultivos y materias primas, como residuos agroindustriales y bosques manejados sustentablemente. Varios autores denominan “biocombustibles de segunda generación” a los que utilizan este tipo de materias primas y de “tercera generación” a otros desarrollos recientes, como los biocombustibles producidos a partir de microalgas y microorganismos. Para evitar confusiones por el tipo de “generación” o tecnología referido en cada caso, denominamos “biocombustibles avanzados” a los que presentan alta mitigación de emisiones, utilizando materias primas no alimenticias y nuevas tecnologías para su producción.

En este documento se tratan: el etanol de lignocelulósicos; el biodiesel de aceites de desechos, algas y microorganismos, y el diésel verde, también llamado diésel Fischer-Tropsch o BTL (*Biomass To Liquid*). También se describe el panorama internacional de tecnologías y proyectos demostrativos o comerciales de biocombustibles avanzados. En lo referente a México, se analizan las materias primas y las tecnologías con que contamos, los aspectos normativos y sociales, y las líneas de investigación vigentes. Finalmente, se presentan tres ejemplos de proyectos y estudios propuestos en México: **1)** etanol de bagazo de agave; **2)** aceite de algas (con el cual se puede posteriormente producir biodiesel), y **3)** gasificación de biomasa.

Los retos y las recomendaciones para que México pueda desarrollar biocombustibles avanzados son:

MATERIAS PRIMAS

- Disponer de un inventario nacional de recursos biomásicos disponibles y potenciales (plantas, micro-organismos y residuos).
- Retomar o implementar modelos de explotación forestal sustentable que maximicen la cosecha y el uso de residuos y madera para producir energía.
- Aprovechar el recurso humano y la experiencia con que se cuenta para el desarrollo de variedades mejoradas de plantas (con mayores rendimientos y consumos del CO₂, menor consumo de agua y fertilizantes, etc.) tomando en todo momento las precauciones necesarias para que no causen riesgos al ambiente (RSB, 2009; UNEP, 2009a; UNEP, 2009b).
- Realizar una reconversión hacia la agricultura sustentable, evitando el despilfarro de agua (aplicando riego por goteo y otras técnicas) mejorando la eficiencia y reduciendo el uso de fertilizantes nitrogenados (p.e. con biofertilizantes) y maximizando la conservación de los recursos existentes, como suelos y biodiversidad.

TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN QUE DEN RESPUESTA A LOS RETOS EXISTENTES

- Explorar la biodiversidad en busca de microorganismos útiles en la producción de biocombustibles avanzados (productores de enzimas, de aceites, de alcoholes, de hidrógeno, etc.).
- Desarrollar nuevas cepas microbianas por ingeniería genética, más eficientes en la producción de biocombustibles (alcohol, aceite) y resistentes a inhibidores.
- Desarrollar catalizadores y biocatalizadores eficientes y de bajo costo.

POLÍTICAS E INCENTIVOS

- Actualizar la legislación, incluyendo en las leyes y reglamentos a los biocombustibles avanzados.
- Fomentar la producción y el uso de biocombustibles avanzados mediante incentivos fiscales, créditos, bonos y otros mecanismos.
- Incentivar y favorecer que en las mezclas se utilicen biocombustibles avanzados.
- Apoyar la investigación y desarrollo tecnológico de los nuevos biocombustibles de vanguardia en lugar de esperar a que nos lleguen con retraso tecnologías ya desarrolladas en otros países y seamos vistos sólo como proveedores de materia prima y maquiladores.
- Favorecer modelos de producción de insumos agrícolas para la fabricación de biocombustibles avanzados, en condiciones sociales y ambientales de respeto a las comunidades y regiones donde se produzcan.

Si bien la producción y utilización masiva de los biocombustibles avanzados genera un mejor balance energético y de gases de efecto invernadero, todavía quedan por superar algunos retos, como mejorar los rendimientos y procesos, para lograr que estos biocombustibles sean costeables. Igualmente, existe ya una preocupación por validar su sostenibilidad a mediano y largo plazo (ver referencias 20 y 21).



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Desarrollo sustentable o sostenible

El término *sustainable development* fue creado en 1987, en un informe socio-económico internacional elaborado para la ONU por una comisión que encabezaba la Dra. Brundtland, el cual fue titulado *Our Common Future* (Nuestro futuro común). Este término puede traducirse al castellano como “desarrollo sustentable”, “perdurable” o “sostenible”. La definición definitiva fue adoptada por la ONU en el tercer principio de la “Declaración de Río”,¹ e implica satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, tomando en cuenta los aspectos sociales, económicos y ecológicos.

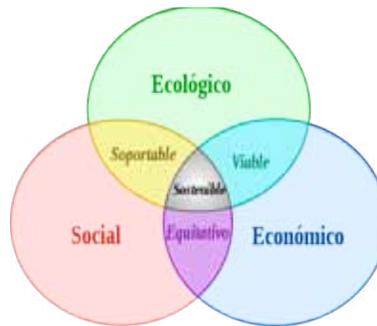


Figura 1. Esquema del desarrollo sostenible (Dreo, 2006).

En este documento se utilizan tres indicadores de sostenibilidad:

- 1) **Balance energético:** es la cantidad de energía contenida en el biocombustible respecto a la energía consumida en su fabricación. Sus resultados generan Índices Energéticos (IE) que pueden variar de acuerdo a las diversas metodologías utilizadas. Por lo mismo puede haber diferencias de un estudio a otro y es siempre recomendable comparar el mayor número posible de estudios.
- 2) **Emisión de gases de efecto invernadero (GEI o “huella de carbono”):** sumatoria de los equivalentes de CO₂ emitidos durante todas las fases de producción y distribución del biocombustible (incluyendo el cambio de uso de suelo y otros).
- 3) **Rendimiento unitario:** cantidad de biocombustible obtenido (en volumen, en peso, en energía) por unidad de superficie utilizada (generalmente se mide por hectárea) o unidad de volumen del reactor.

1.2. Biocombustibles líquidos avanzados: hacia la búsqueda de la sustentabilidad

Los biocombustibles líquidos se han perfilado como candidatos potenciales para sustituir a los combustibles derivados del petróleo, principalmente en el sector transporte. Sin embargo, existe controversia porque las tecnologías establecidas actualmente para la fabricación de biocombustibles (también llamadas “de primera generación”), implican el uso de alimentos o tierras e insumos (agua, fertilizantes, etc.), que eventualmente pudieran dedicarse a cultivos alimenticios o que, en muchos casos, no producen ganancias significativas por ahorro de petróleo o mitigación de emisiones de GEI. Por ello, se ha propuesto el uso de “biocombustibles avanzados” (término actualmente preferido al de “biocombustibles de segunda generación”), los cuales utilizan materias primas que no compiten con los alimentos y que pueden tener mejores indicadores ambientales. Sin embargo, como se verá lo largo de este documento, todavía no se ha logrado la eficiencia y reducción de costos necesarias para su implementación masiva.

¹ Conferencia de la ONU sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Segunda “Cumbre de la Tierra”), Agenda 21 (1982). Se aprueba el Convenio sobre el Cambio Climático y el Convenio sobre la Diversidad Biológica (Declaración de Río).

Entre los biocombustibles líquidos avanzados tenemos:

	<p>ETANOL CARBURANTE / OXIGENANTE: Alcohol de dos carbonos; es el mismo que bebemos, proveniente de la fermentación de azúcares. El alcohol hidratado contiene agua (4% en el caso del alcohol de 96°) y requiere una mayor purificación para cumplir las especificaciones de alcohol anhidro (98.7-99.8%) y permitir su mezcla con gasolinas. Para ser considerado como biocombustible avanzado, los azúcares deben provenir de una fuente no alimenticia; por ejemplo, polímeros como la celulosa (de madera, bagazos, rastrojos, etc.), los cuales requieren ser hidrolizados a azúcares fermentables, mediante alguna de las tecnologías que se mencionan en este cuaderno.</p>
	<p>BIODIESEL: Aceites o grasas que han reaccionado con un alcohol de cadena corta (1-4 carbonos), para formar "mono-acil ésteres de ácidos grasos", y que cumplen con las especificaciones para ser utilizados en motores diésel (puros o mezclados con diésel convencional). Para ser considerado un biocombustible avanzado, la materia prima debe provenir de una fuente no alimenticia, tener alta mitigación de GEI y no producir contaminantes en su fabricación.</p>
	<p>DIÉSEL VERDE: Mezcla de hidrocarburos; similar al diésel proveniente de petróleo en su composición global, pero sin algunos de sus contaminantes (como óxidos de azufre). Proviene de materia orgánica transformada mediante alguna de las tecnologías, que serán descritas a detalle en este cuaderno, como el proceso Fischer-Tropsch.</p>

Además de los mencionados anteriormente, se están estudiando otros biocombustibles, como por ejemplo: alcoholes de cadenas mayores que el etanol, como el butanol, que también sería derivado de materiales residuales o lignocelulósicos; el biodiesel obtenido de la transformación de azúcares por microorganismos modificados genéticamente; el biohidrógeno producido por algunas bacterias a partir de residuos es otro biocombustible para el que se vislumbra mucho futuro, aunque las tecnologías para su producción están todavía poco desarrolladas. Recientemente se han estudiado también biocombustibles para aviación derivados de aceites y el "bio"-dimetil éter (DME) que puede ser usado también en motores diésel.

En este cuaderno se da un panorama del estado del arte de los biocombustibles en el mundo y de las experiencias relacionadas con su producción y uso, haciendo énfasis en las materias primas y las tecnologías necesarias para la producción de biocombustibles avanzados. Posteriormente, se tratará el estado actual de estas tecnologías en México; asimismo, se darán ejemplos de proyectos y estudios propuestos en nuestro país. El documento concluye con una reflexión sobre los retos y directrices que nos dejan estas experiencias.

2. PANORAMA INTERNACIONAL

En Europa se tienen ya aproximadamente 30 años de experiencia en la producción y uso de biodiesel, y en Brasil llevan también más de 30 años de investigación y uso del etanol como carburante. En EE.UU., aunque comenzaron después, la producción se acerca a la de Europa y han superado a Brasil en etanol. Tales experiencias han permitido a estos países evaluar ventajas, desventajas, rendimientos, emisiones, etc., concluyendo la conveniencia de avanzar hacia biocombustibles que no utilicen cultivos alimenticios y tengan mejores indicadores de sustentabilidad (ver Figura 2). En el siguiente apartado definimos dichos indicadores.

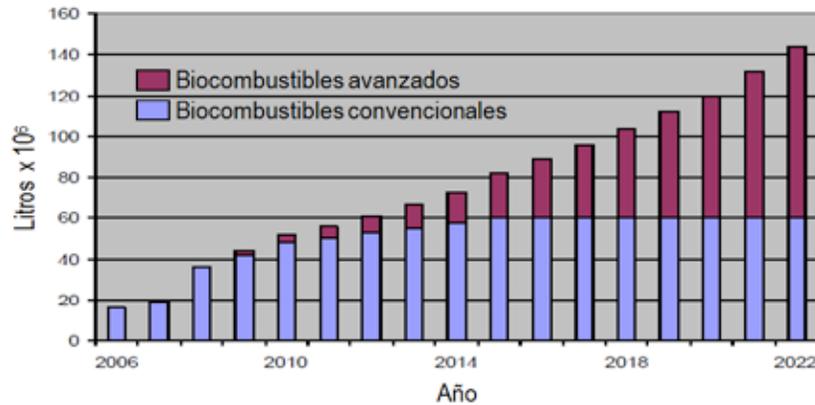


Figura 2. Metas de producción de biocombustibles en EE. UU. (Sims et al., 2008).

2.1. Beneficios ambientales de los “biocombustibles avanzados”

Respecto a los indicadores ambientales y al concepto de sustentabilidad, el consenso actual (Tilman *et al.*, 2009) es que para que los biocombustibles sean realmente sustentables deben ser “biocombustibles avanzados”, provenientes de:

- Residuos agrícolas, municipales e industriales (como residuos lignocelulósicos, rastrojos, bagazos, etc.).
- Bosques manejados sustentablemente.
- Plantas perennes cultivadas en tierras degradadas (especialmente si consumen grandes cantidades de CO₂ y presentan altos rendimientos).
- Microorganismos (algas, hongos, levaduras, bacterias).

Además, deben utilizar procesos sustentables (preferentemente biotecnológicos o agroecológicos; es decir, aquellos procesos que minimizan el uso de compuestos químicos provenientes de combustibles fósiles).

En cuanto al balance de GEI, la mayoría de estudios muestra que los biocombustibles avanzados realmente tienen menores emisiones que los combustibles derivados del petróleo y los derivados de cultivos alimenticios (ver Figura 3).

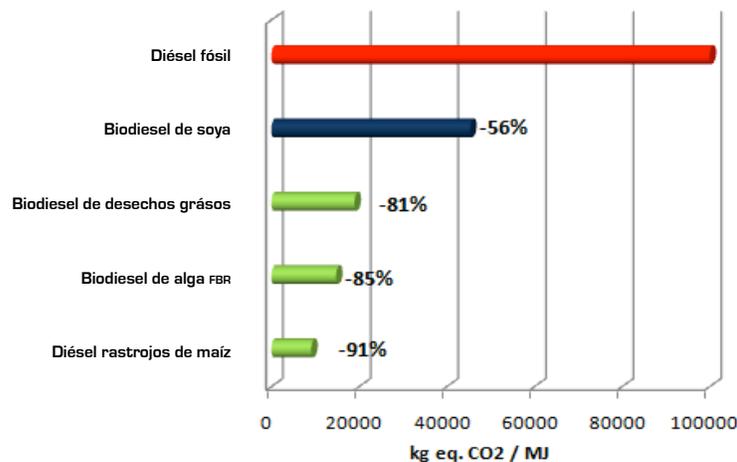


Figura 3a. Comparación de emisiones de GEI de diferentes biocombustibles líquidos (EPA, 2010).

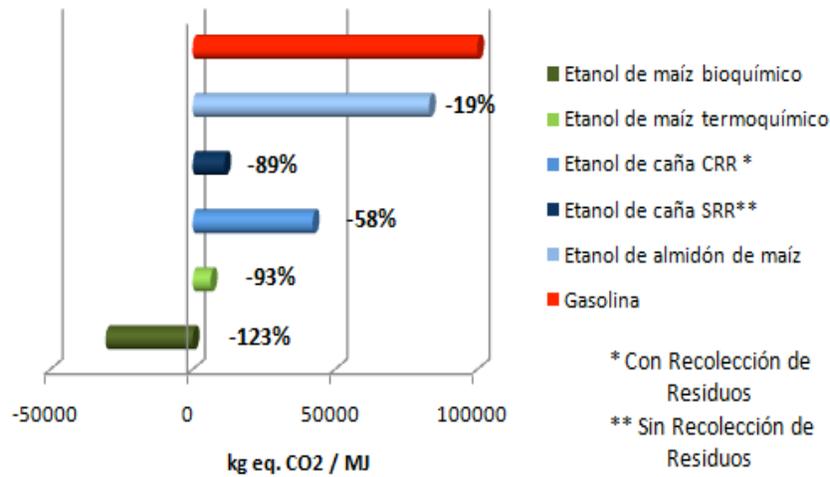


Figura 3b. Comparación de emisiones de GEI de diferentes biocombustibles líquidos (EPA, 2010).

Los balances de energía para los combustibles avanzados muestran en general un mejor balance que los biocombustibles derivados de fuentes alimenticias, aunque por lo novedoso del tema hay muchos menos estudios que para los “biocombustibles de primera generación”. Por ejemplo, el etanol carburante “avanzado”, derivado de material lignocelulósico, tendría un balance energético de 4.4 MJ/L a 6.6 MJ/L (ver Figura 4), mucho mayor que el etanol derivado de maíz, que tiene un balance de 1.3 MJ/L a 1.65 MJ/L (Sims *et al.*, 2008).

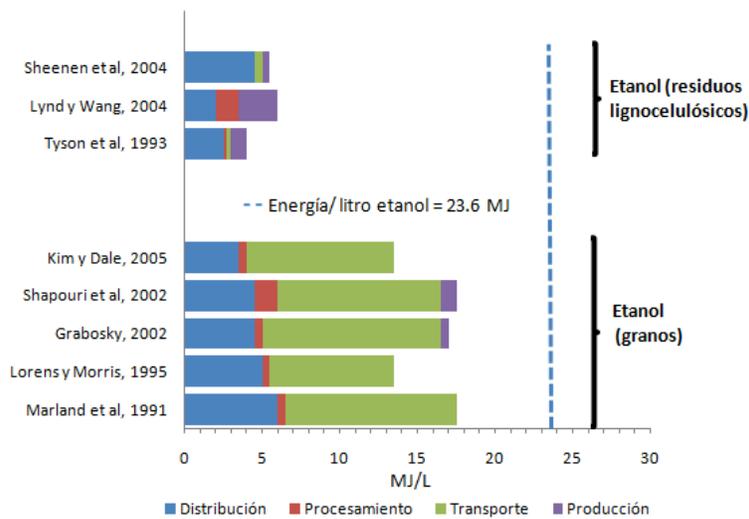


Figura 4. Comparación de balance de energía para etanol derivado de maíz y de materiales ligno-celulósicos. La unidad de energía considerada es el Mega-Joule (MJ) por litro (Sims *et al.*, 2008).

Adicionalmente a mejores balances de GEI e IE, los biocombustibles avanzados pueden tener otros beneficios ambientales, al aprovechar varios residuos agroindustriales que de otra manera serían contaminantes a eliminar. Igualmente, se elimina una parte de la necesidad de tierras de cultivo pues los residuos están ya disponibles (ver Figura 5).

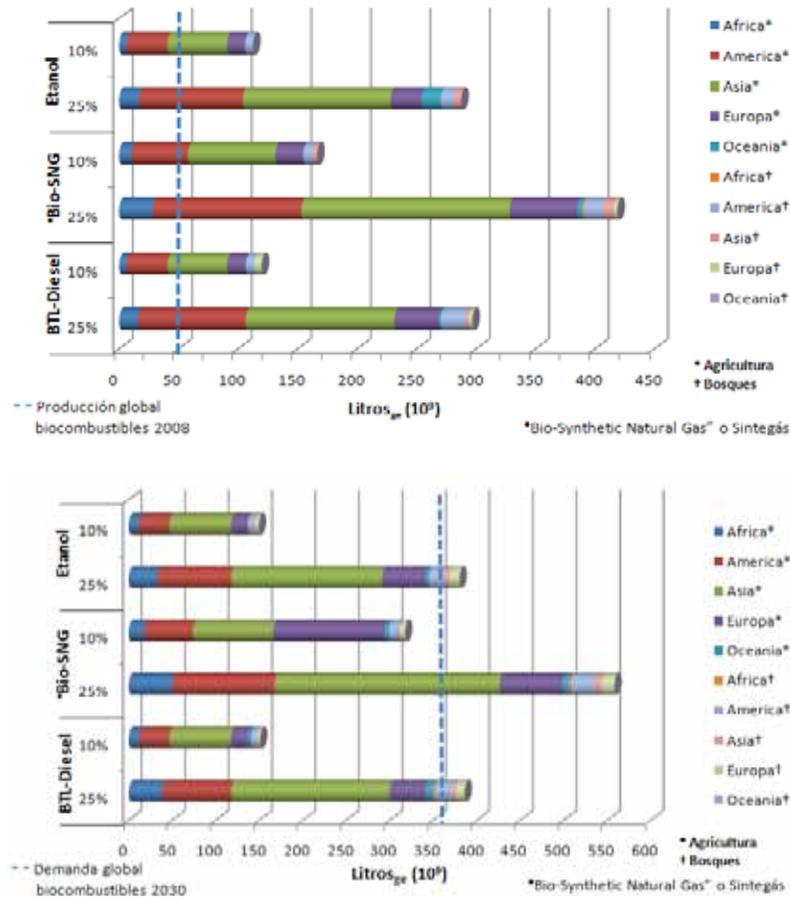


Figura 5. Producción teórica posible de biocombustibles de residuos disponibles en 2007 (arriba) y 2030 (abajo) en litros equivalente de gasolina (ge). El 10% y 25% indican la producción posible si se dedicara ese porcentaje de residuos de agricultura y forestales (Eisentraut, 2010).

En la actualidad se están estudiando diversas metodologías de certificación de la sustentabilidad de los biocombustibles. Respecto a las emisiones de GEI, los biocombustibles avanzados tendrían una mejor calificación. Por otro lado, algunas cuestiones no están todavía claras y requieren mayor estudio, como la "huella de agua" (UNEP, 2009a) o los detalles de las emisiones derivadas de su combustión –se ha observado que se producen más compuestos orgánicos con los biocombustibles que con los combustibles fósiles– (Kohse-Höinghaus et al., 2010). Esto se debe a que existe todavía poca experiencia con los biocombustibles avanzados y algunos se encuentran aún en etapa de investigación.

2.2. Costos y viabilidad económica de los "biocombustibles avanzados"

El costo de producción es un factor clave en la implementación de los biocombustibles. Aquéllos derivados de cultivos alimenticios (con excepción de la caña de azúcar en Brasil) han enfrentado una limitación por los altos costos de la materia prima utilizada (Figura 6).

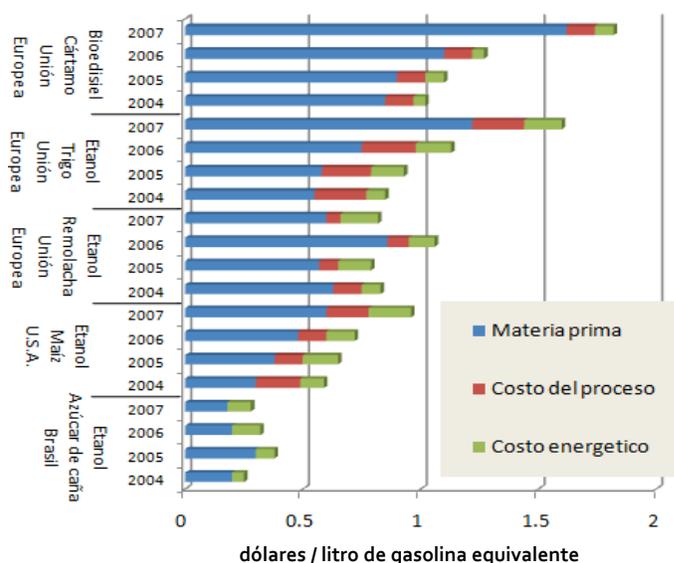


Figura 6. Costos de producción de los biocombustibles de cultivos alimenticios (Sims et al., 2008).

En ese sentido, dado que los biocombustibles avanzados pueden utilizar residuos, los costos de la materia prima bajan sensiblemente, aunque los costos de procesamiento son mayores. En las tablas 1 y 2 se presentan los costos estimados de algunos biocombustibles derivados de materiales lignocelulósicos. Actualmente se estiman costos de entre 0.6 y 1 dólares por litro equivalente de gasolina (lge) y se espera que para el año 2050 se reduzcan a 0.55-0.65 dólares/lge (OECD/IEA, 2009). Para este cálculo se usaron los costos actuales de los materiales lignocelulósicos. El abaratamiento del costo de producción del biocombustible en la proyección futura se debe a que se espera tener mejores rendimientos y procesos más eficientes, pero hay que considerar que en el futuro, conforme se incrementa la demanda, el precio de los materiales lignocelulósicos puede aumentar también.

En lo que respecta a la fabricación del etanol a partir de caña de azúcar en Brasil, el uso del bagazo de caña como combustible renovable para producir la energía de la fábrica de azúcar y de etanol, además de excedentes de este bagazo para producir electricidad, le da una amplia sustentabilidad energética, de reducción de GEI e impacta positivamente la factibilidad económica de la producción de este biocombustible. Aunque en EE.UU. los índices de reducción de emisiones de CO₂ y la eficiencia energética son marginales en la producción de etanol a partir de maíz, la sustentabilidad económica de este proceso está fundamentada por los subsidios que se aplican a la producción de maíz y de etanol carburante en ese país. También incide fuertemente el hecho de que los co-productos permiten la recuperación económica de lo que se invierte para el abasto de materia prima (maíz).

Precio del petróleo 60 dólares/barril		dólares/GJ	dólares/lge	
			Diésel verde	Etanol lignocelulósico
Bagazos / Rastrojos	Global	5.4	0.84	0.91
	China	1.9 - 3.7	0.66 - 0.79	0.68 - 0.85
	India	1.2 - 4.3	0.62 - 0.80	0.63 - 0.86
	México	3.1	0.74	0.79
	Sudáfrica	0.8 - 3.1	0.60 - 0.74	0.60 - 0.79
	Tailandia	2.0 - 2.8	0.67 - 0.72	0.67 - 0.77

Tabla 1. Costo teórico de producción de biocombustibles lignocelulósicos en países seleccionados en dólares estadounidenses por litro equivalente de gasolina (lge) (OECD/IEA, 2009).

Biocombustible	Escenario	Costo de producción (USD/lge)		
		2010	2030	2050
Etanol	Optimista	0.80	0.55	0.55
	Pesimista	0.90	0.65	0.60
Gasolina	México*	0.66	*	*
	Europa	0.96-1.66	**	**
Diésel verde	Optimista	1.00	0.60	0.55
	Pesimista	1.20	0.70	0.65
Diésel	México*	0.68	*	*
	Europa	0.98-1.69	**	**

Tabla 2. Estimación de costos de producción de biocombustibles celulósicos en 2010, 2030 y 2050 (Sims et al., 2008).

* En México la gasolina y el diésel son subsidiados. Sin embargo es recomendación de la OECD aumentar su precio progresivamente hasta alcanzar su precio real como en Europa.

** Puede llegar a duplicarse o triplicarse en función del precio del petróleo.

2.3. Etanol carburante

Los beneficios ambientales del etanol carburante avanzado han sido ya señalados en la sección anterior. Como la biomasa de las plantas se compone mayormente de materiales lignocelulósicos, el rendimiento por hectárea es prácticamente el doble de lo que proporcionaría el azúcar del cultivo. Sin embargo, el proceso para liberar los azúcares contenidos en los materiales lignocelulósicos y convertirlos en etanol es mucho más complicado. En la Figura 7 se presenta un esquema de producción del etanol derivado de materiales lignocelulósicos.

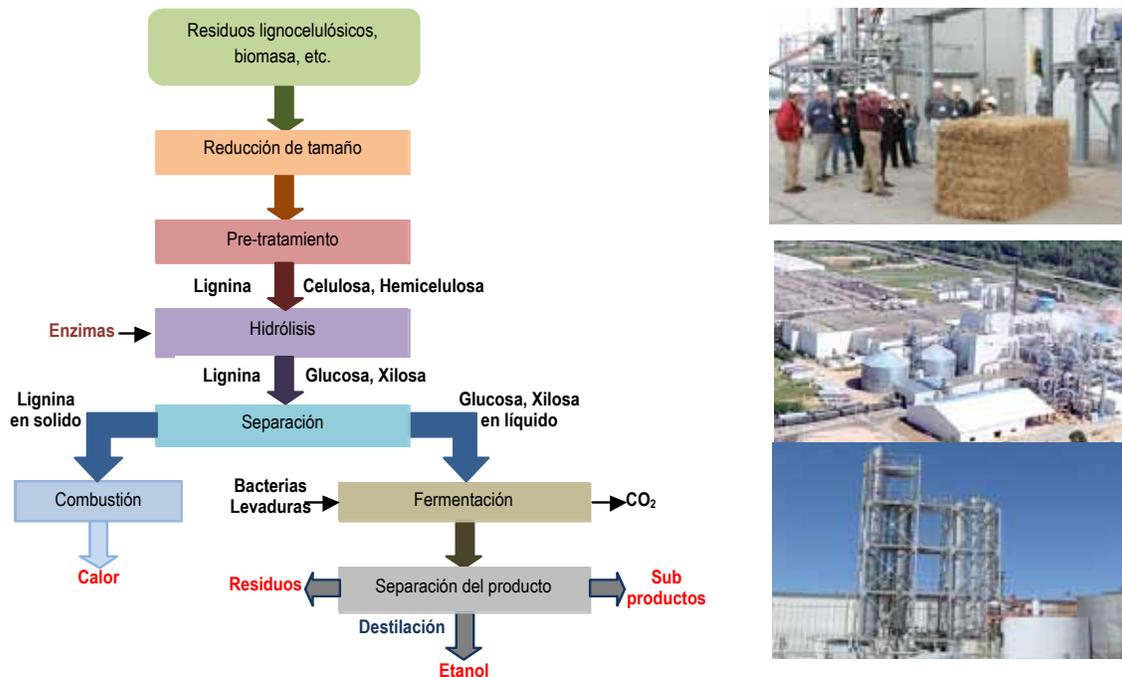


Figura 7. Esquema de producción del etanol derivado de materiales lignocelulósicos (izquierda) y fotografías de plantas productoras de etanol (derecha).

Materias primas

El componente mayoritario en los materiales lignocelulósicos es la **celulosa**, un material no fermentable que es el polímero más abundante en la naturaleza; en esto radica la importancia de aprovechar estos materiales. La celulosa se compone de cadenas de glucosa altamente estructuradas y difíciles de hidrolizar, pero al generar azúcar de 6 carbonos es fácilmente fermentable por levaduras. El papel y algodón son ejemplos fácilmente identificables de este material.

El segundo componente de los materiales lignocelulósicos es la **hemicelulosa**, que consiste en polímeros lineales o ramificados de diferentes azúcares de 5 carbonos (pentosas), como xilosa y arabinosa (las cuales no pueden ser fermentadas por las levaduras que normalmente se utilizan para la producción de etanol). Ejemplos de hemicelulosas que encontramos en la vida diaria son las "pectinas", que le dan su consistencia gelatinosa a las frutas y mermeladas.

Las cadenas de celulosa y hemicelulosa están entrelazadas mediante la "lignina", polímeros de ciertos compuestos denominados "fenilpropanoides" que le dan la característica "leñosa" a algunos de estos materiales, como la madera dura. En la Tabla 3 se presenta la composición general de algunos de materiales lignocelulósicos y en la Figura 8 su estructura general, así como algunas fotografías de materias primas. En la Tabla 4 se presentan ejemplos de materiales lignocelulósicos utilizados en la producción de etanol carburante avanzado, así como sus rendimientos teóricos.

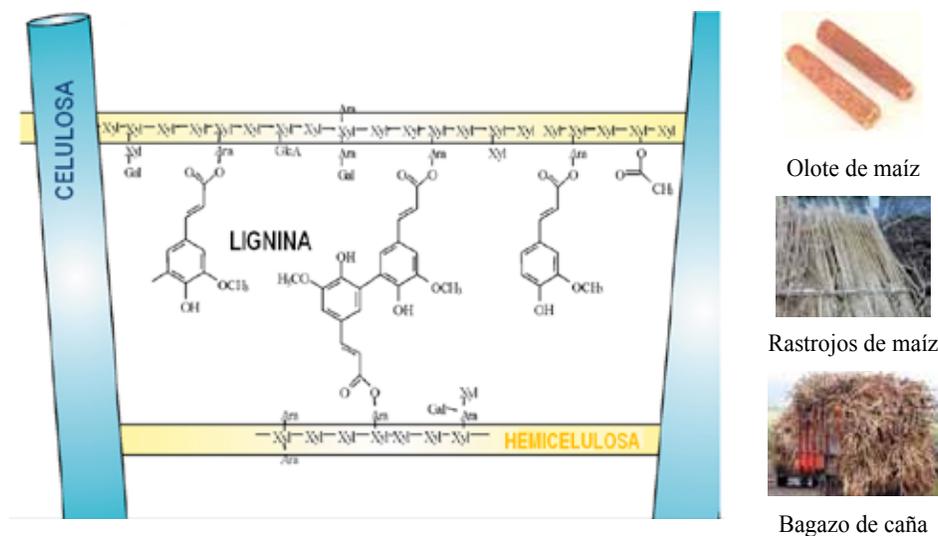


Figura 8. Esquema de un material lignocelulósico (izquierda) y fotografías de materias primas (derecha) (Hermoso et al. 2004). En el esquema se muestran en azul las fibras de celulosa; en amarillo, las cadenas de hemicelulosa con los azúcares que las forman (Xyl, xilosa; Ara, arabinosa; Gal, galacturonanos) y en negro algunas moléculas que forman la lignina y entrelazan las fibras de celulosa y las cadenas de hemicelulosa.

Material	% Celulosa	% Hemicelulosa	% Lignina
Maderas duras	45-55	24-40	18-25
Maderas blandas	45-50	25-35	25-35
Pastos	25-40	25-50	10-30

Tabla 3. Composición de algunos materiales lignocelulósicos (Betts et al. 1991).

Materia prima	Etanol (L/TMS)	Materia prima	Etanol (L/TMS)
Maíz (grano) *	471	Virutas de madera	309
Maíz (rastrajos)	428	Aserrín	382
Arroz (rastrajos)	416	Caña (bagazo)	422
Algodón (rastrajos)	215	Papel	440

Tabla 4. Rendimientos teóricos de etanol carburante de primera generación y avanzado, por tonelada de materia seca (TMS) (USDE, 2010).

* Correspondería a mata prima para etanol de primera generación

Pretratamientos del material lignocelulósico

A diferencia del etanol derivado de mostos ricos en azúcares fermentables, el etanol avanzado requiere que los azúcares contenidos en los materiales lignocelulósicos sean liberados, lo cual implica más de un paso debido a la complejidad de estos materiales, ya ilustrada en la Figura 8. Este tema está siendo investigado actualmente en todo el mundo.

Generalmente se necesita dar a las materias primas pretratamientos que hagan más fácil el paso de hidrólisis o rompimiento de las cadenas poliméricas en azúcares libres que puedan ser fermentados. Diversos pretratamientos han sido estudiados; sus ventajas y desventajas se presentan en la Tabla 5.

Nombre	Agente físico / químico	Ventajas	Desventajas
Ácido diluido	Ácido sulfúrico 0.5% y calor	Buena hidrólisis de hemicelulosa y se mejora la etapa posterior de hidrólisis de celulosa.	Equipos caros (resistentes a la corrosión). Degradación y pérdida de azúcares. Formación de inhibidores de fermentación.
Ácido concentrado	Ácido sulfúrico concentrado y calor	Permite disminuir la temperatura del proceso y gastar menos energía, además de reducirse la degradación de azúcares. Hidrólisis de hemicelulosa y celulosa.	Costo extra por el ácido y porque se requiere recuperarlo y disponerlo. Además, conlleva las mismas desventajas que el ácido diluido.
<i>Steam-explosion</i> (Explosión de vapor)	Vapor sobrecalentado (descompresión rápida) y ácido	Abre las fibras y permite una mejor hidrólisis en la etapa posterior. Especialmente adecuado para madera. Se hidroliza parcial o totalmente la hemicelulosa.	Equipo costoso. Se requiere un lavado posterior donde se pueden perder azúcares. Posible formación de inhibidores de fermentación.
AFEX (<i>ammonia fiber explosion</i>)	Vapor sobrecalentado (descompresión rápida) y amonio anhidro	Mismas ventajas que para el <i>Steam-explosion</i> y adicionalmente se evita la formación de inhibidores de fermentación.	Costo extra por el amoníaco y porque se requiere recuperarlo y disponerlo. No hidroliza la hemicelulosa.
Organosolv	Etanol u otros solventes y calor	Permite la extracción y el fraccionamiento de la lignina. Se incrementan los rendimientos de hidrólisis en la etapa posterior.	Costo extra por el etanol y porque se requiere recuperarlo y disponerlo. Formación de inhibidores de fermentación. No hidroliza la hemicelulosa.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de los diferentes pretratamientos utilizados en la fabricación del etanol carburante avanzado (basada en datos propios).

Hidrólisis del material lignocelulósico

Una vez realizado el pretratamiento que permite que el material lignocelulósico pueda ser más fácilmente digerible, el siguiente paso es romper (hidrolizar) las cadenas poliméricas para liberar los azúcares contenidos en estos materiales. La hidrólisis puede realizarse por medios químicos (usando ácidos fuertes) o por medios bioquímicos (usando enzimas, que son las proteínas que usa la naturaleza para este fin). En la Tabla 6 se presentan las ventajas, desventajas y retos de ambos sistemas.

Parámetro	Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Costo	Ácido	Bajo costo de operación	Alto costo de inversión (se requieren equipos de acero cerámico altamente resistente a la corrosión).
	Enzimático	Bajo costo de inversión	Alto costo de operación
Rendimiento / Tiempo de reacción	Ácido	Tiempos cortos de reacción	Degradación y pérdida de azúcares
	Enzimático	Mejores rendimientos al evitarse la degradación de azúcares	Se requiere largo tiempo de reacción y puede haber contaminaciones que bajen el rendimiento.
Formación de inhibidores de fermentación	Ácido	-	Se producen inhibidores de la fermentación
	Enzimático	Se evita la formación de inhibidores de fermentación	-
Seguridad	Ácido	-	Es corrosivo y puede haber accidentes. Se requiere recuperarlo y tratarlo.
	Enzimático	Más inocuo y biodegradable	Raramente puede producir alergias a personas sensibles.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de la hidrólisis ácida o enzimática. (basada en datos propios).

Desarrollo de cepas productoras de etanol carburante

Adicionalmente a los azúcares en forma de celulosa o hemicelulosa, los materiales lignocelulósicos pueden contener sustancias que inhiben el crecimiento de los microorganismos tradicionalmente utilizados en las fermentaciones de producción de etanol, así como azúcares de 5 carbonos (pentosas) usualmente no consumidos por estos microorganismos. En consecuencia, el desarrollo de cepas de microorganismos que produzcan gran cantidad de etanol a pesar de esos inhibidores y aprovechen las pentosas es otro reto que se trata de superar actualmente (Abril y Abril, 2009).

Destilación y secado del etanol

Los procesos de destilación y secado para el etanol carburante son similares a los ya utilizados en la producción del etanol industrial, requiriéndose un mínimo de 99.0 a 99.8% (etanol anhidro). Es crucial mantener los costos de estos procesos lo más bajo posible. Para ello, pueden usarse una o dos etapas de destilación hasta llegar a 95-96% de alcohol (alcohol de 96 grados o 96° GL), más otra etapa de eliminación del agua residual por medio de algún adsorbente.

Subproductos de la fabricación de etanol carburante

De la etapa de hidrólisis normalmente quedan como residuos los polímeros de lignina. Es común que sean quemados para co-producir energía, pero se espera que en un futuro puedan servir para producir una serie de químicos valiosos que actualmente se obtienen del petróleo. De la etapa de destilación queda un subproducto líquido llamado "vinazas", compuesto de materia orgánica como alcoholes, ácidos orgánicos y otros compuestos que no son fácilmente degradables. Las vinazas son muy ácidas (pH entre 3 y 4) y dado que por cada litro de etanol se producen 13 o más litros de vinazas, su tratamiento es un tema relevante para la sustentabilidad de este biocombustible. Los tratamientos actualmente

usados para las vinazas son: diluirla y aplicarla en ferti-irrigación, o concentrarla y calcinar los sólidos. Otra opción que se está explorando actualmente consiste en biotratamientos para obtener algún otro producto de valor como biogás.

Costos y viabilidad económica del etanol carburante lignocelulósico

El costo de la materia prima de los biocombustibles lignocelulósicos es menor, por lo que nos concentraremos en los costos del proceso. Hasta hace algunos años la mayor limitante en este sentido era el precio de las enzimas utilizadas en la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa. Sin embargo, los avances realizados por algunos investigadores y los principales fabricantes de enzimas, condujeron a una reducción de 90% en su precio, por lo que ahora el costo estimado para el etanol lignocelulósico es apenas un poco más caro que el del etanol de almidón de maíz (Figura 9). El costo del pretratamiento también puede tener impacto en el costo final del etanol lignocelulósico. En la Figura 10 se ejemplifican los costos de diferentes pretratamientos del rastrojo de maíz. En este caso, el pretratamiento con ácido diluido es el que redundará en menores costos de producción. Sin embargo, el pre-tratamiento óptimo dependerá de la materia prima.

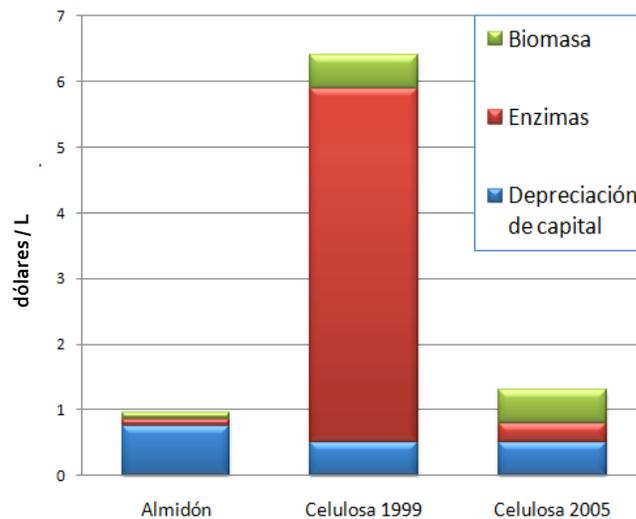


Figura 9. Costos de producción de etanol (Sims et al., 2008).

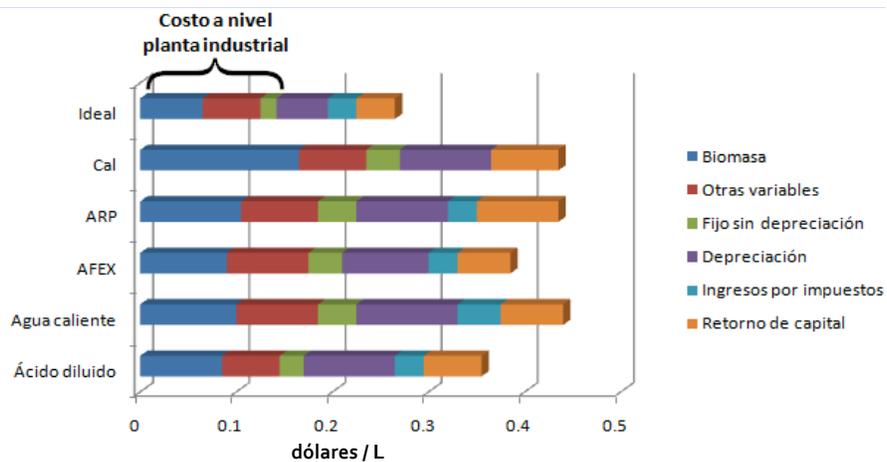


Figura 10. Costos de producción para el etanol de rastrojo de maíz en función del pre-tratamiento (Sims et al., 2008).

Proyectos demostrativos o comerciales de etanol lignocelulósico.

En la Tabla 7 se listan algunos proyectos demostrativos o comerciales (en proceso de implementación) en EE.UU. Es importante notar que todavía no hay procesos a nivel comercial operando. En la misma tabla destacan también algunos proyectos de **bio-refinerías**, donde se obtendrá etanol además de otros químicos valiosos, con la flexibilidad adicional de aceptar varias materias primas. El establecimiento de bio-refinerías donde se aprovechen al máximo las materias primas y se reduzcan o eliminen los subproductos es la tendencia aceptada como el camino más viable hacia la sustentabilidad.

Empresa	Producción (litros x 10 ⁶ /año)	Materias primas	Inversión total / Financiamiento US-DOE (Millones de dólares)
Abengoa Bioenergy LLC	43	Rastrojos y olote de maíz, pasto varilla (<i>Panicum virgatum</i>)	190 / 76
Bluefire etanol	65	Residuos sólidos municipales	100 / 40
Iogen Biorefinery Partners LLC	70	Paja de trigo	200 / 76
Poet	120	Rastrojo de maíz	200 / 80
Lignol innovations (*)	9.5	Madera y sus residuos, agro-residuos	88 / 30
Pacific etanol (*)	10.2	Paja de trigo, rastrojos, residuos de álamo	73 / 24

Tabla 7. Proyectos demostrativos de producción de etanol lignocelulósico o biorrefinerías () en EE. UU., financiados por el departamento de energía de ese país (USDOE) (Sims et al., 2008).*

2.4. Biodiesel

En 1895 el Dr. Rudolf Diesel desarrolló un motor capaz de funcionar con aceites vegetales como combustible. En 1900 el motor Diesel fue presentado en la Feria Mundial de París operando con aceite de cacahuate. En 1912 el Dr. Rudolf Diesel dijo: "el uso de aceites vegetales como combustibles para motores puede parecer insignificante hoy, pero con el tiempo llegarán a ser tan importantes como lo son el petróleo y el carbón actualmente".

Beneficios ambientales del biodiesel

Además de los beneficios ambientales mencionados para los biocombustibles avanzados, el biodiesel tiene la ventaja de ser mucho más biodegradable que el diésel fósil, por lo que se ha propuesto como combustible para barcos. Otra ventaja es su escasa volatilidad e inflamabilidad. Adicionalmente, los motores diésel son más eficientes que los motores a gasolina debido a su alto grado de compresión y mayor temperatura de combustión, que permite una mayor eficiencia de transformación de la energía térmica en trabajo. El biodiesel tiene una mayor eficiencia de uso final y mejores balances de ciclo de vida total, debidos al menor consumo de combustible por unidad de potencia lograda o de trabajo realizado por el motor. Respecto al diésel de petróleo, en las emisiones de la combustión de biodiésel no se producen óxidos de azufre, y se reduce hasta 90% de hidrocarburos aromáticos poli-cíclicos (PAHs), que son cancerígenos.

Materias primas y costos para el biodiésel avanzado

En la Figura 11 se presenta un esquema con las materias primas utilizadas para la producción de biodiesel. El biodiesel derivado de aceites vegetales de cultivos oleaginosos comestibles ha recibido severas críticas debido al incremento de precio que estos aceites han venido sufriendo en los últimos años (atribuido a la desviación de los aceites a la fa-

bricación de biodiesel). Para el biodiesel de primera generación, el costo del aceite vegetal representa del 75% al 88% del costo de producción (Haas et al., 2006). Igualmente, se ha argumentado que aumentan las emisiones de GEI con la fabricación del biodiesel de aceites vegetales, ya que en algunos países los cultivos de oleaginosas han desplazado a los bosques. Para evitar estos problemas, las materias primas que se han propuesto para generar biodiesel avanzado son:

	<p>ACEITES DE CULTIVOS NO ALIMENTICIOS: (como <i>Jatrofa</i>, <i>Higuerilla</i>, <i>Camelina</i>, <i>Salicornia</i>, etc.), cultivados en tierras degradadas o regadas con agua marina (en el caso de la <i>Salicornia</i>). Aunque estos cultivos se han planteado como posibles alternativas a los cultivos oleaginosos tradicionales, hasta la fecha no se han obtenido los rendimientos de aceite esperados cuando las plantas crecen en tierras degradadas o con poca agua y existe todavía una preocupación por la gran extensión de tierra, agua y otros insumos que se requerirían para satisfacer las demandas previstas de biodiesel. La investigación para encontrar nuevas variedades con alto rendimiento de aceite o modificar genéticamente los cultivos existentes para darles estas características está en curso en diversos países. Un enfoque de bio-refinería donde se aprovechen todas las fracciones de la semilla y la planta puede resultar en mejores balances de costos y GEI.</p>
	<p>ACEITES Y GRASAS DE DESECHO: (provenientes de trampas de grasas en restaurantes, de los sobrantes de frituras, etc.). El costo de estas materias primas va de un costo negativo (ya que quienes las generan deben pagar por disponer del residuo) hasta aproximadamente la mitad del costo de los aceites vegetales. Debido a lo degradada que se encuentra esta materia prima (exceso de acidez, humedad, etc.), la tecnología de producción del biodiésel de primera generación resulta inadecuada y los rendimientos disminuyen. Para evitar pérdidas y maximizar rendimientos cuando se usan aceites y grasas degradados, se han desarrollado o están en estudio otras tecnologías que se describen en el apartado siguiente.</p>
	<p>GRASAS DE LODOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: Además de la ventaja de utilizar un residuo altamente contaminante, un estudio reciente a nivel laboratorio mostró que de esta fuente de grasas se obtiene el biodiésel con el costo más competitivo hasta la fecha y muy cerca del costo objetivo para ser económicamente rentable (Kargbo, 2010).</p>
	<p>ACEITES DERIVADOS DE ALGAS: Tienen las ventajas adicionales de consumir CO₂ como fuente de carbono y de poder usarse para limpiar aguas residuales. Sin embargo, hay muchos retos por superar antes de que el biodiésel generado a partir de algas resulte viable. La falta de conocimiento sobre la genética de las algas es uno de ellos, así como la resistencia de su pared celular, que complica la extracción del aceite. Igualmente, para su uso como combustible, es un problema la composición del aceite de algas, rico en ácidos grasos poli-insaturados que se pueden oxidar muy fácilmente (lo que comúnmente se conoce como "enranciamiento" del aceite). Se ha estimado que para que el biodiésel de algas sea competitivo en costos y producción por hectárea, tendrían que incrementarse 300 veces los rendimientos (Schill, 2009). Se prevé que cuando se logren superar estos retos, las algas serán una fuente sustentable, no sólo de biodiésel sino de otros combustibles, así como de alimentos y químicos.</p>
	<p>ACEITES DERIVADOS DE OTROS MICROORGANISMOS (bacterias, hongos y levaduras): Algunos microorganismos tienen buenos niveles de producción de aceite (Li et al., 2008) y pueden ser alimentados con residuos. Existe un amplio conocimiento sobre la genética y fisiología de la mayoría de ellos, por lo que se espera lograr a corto plazo un biodiésel competitivo en costos, mediante manipulaciones genéticas y operativas.</p>

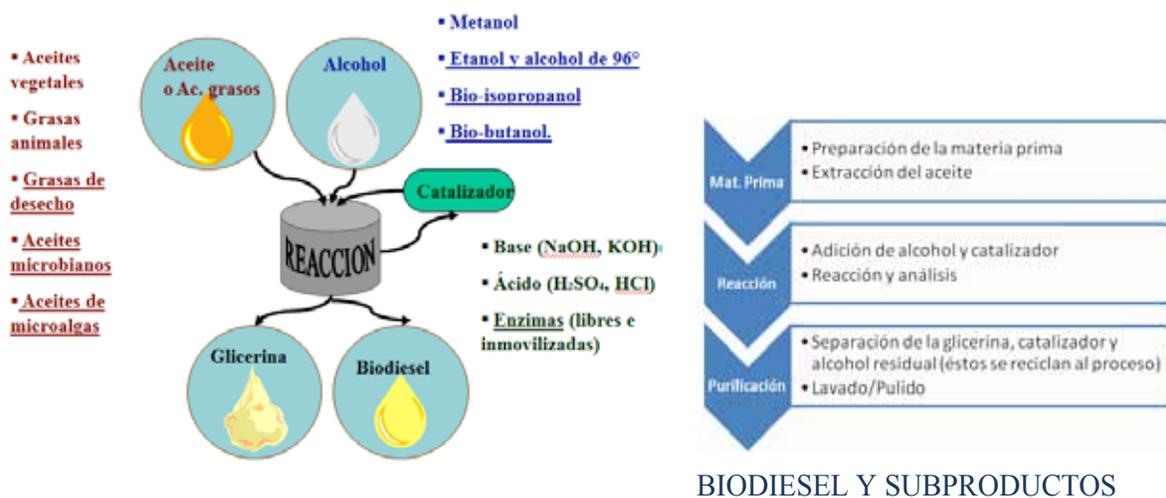


Figura 11. Esquema de producción de biodiesel y las materias primas implicadas. Las materias primas y los catalizadores del biodiesel avanzado aparecen subrayados.

Además del aceite, para la elaboración del biodiesel se requiere un alcohol de cadena corta. En la tecnología establecida actualmente se usa el metanol, que es tóxico y elaborado a partir del petróleo. Estudios recientes han apuntado hacia el uso del etanol (en particular del etanol lignocelulósico); sin embargo, su uso plantea algunos retos, ya que tanto la reacción como la purificación son más complicadas cuando se usan alcoholes mayores que el metanol.

Tecnologías de producción y purificación

El uso de estas materias primas para el biodiesel avanzado implica diversos retos científicos y tecnológicos que pueden ser superados mediante el uso de nuevas tecnologías de producción. Cabe señalar que la tecnología establecida actualmente para realizar la reacción de producción del biodiesel implica el uso de químicos corrosivos y peligrosos (ácidos y bases fuertes), por lo que no es posible obtener la certificación de proyecto MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio). En consecuencia, se han estudiado y desarrollado tecnologías alternativas para la producción de biodiesel (presentadas en la Tabla 8, donde se comparan sus ventajas y desventajas). En la Tabla 9 se resume un comparativo de las tecnologías de purificación, incluyendo algunas desarrolladas recientemente.

Subproductos de la fabricación de biodiesel

Independientemente de la tecnología de producción de biodiesel que se utilice, el subproducto principal es la glicerina. Por cada tonelada de biodiesel se produce un poco más de 100 kilos de glicerina. Sin embargo, el grado de pureza (o los pasos de purificación que se requieren para tener glicerina pura) sí depende de la tecnología empleada. Cuando se usan ácidos o bases fuertes como catalizadores (aceleradores de la reacción), la glicerina requiere una mayor purificación, mientras que la glicerina obtenida cuando se usan enzimas como catalizadores es más pura (Figura 12).



Figura 12. Comparación del aspecto de la fase de glicerina (fase inferior del decantador), del biodiesel obtenido mediante un proceso químico (izquierda) y uno enzimático (derecha).

Catalizador	Sistema	Ventajas	Desventajas
Sosa o potasa	Por lotes	Bajo costo de producción, tiempos cortos de reacción	Químicos tóxicos y corrosivos. Alto costo de infraestructura. Para aceites degradados se requiere una etapa adicional de proceso y bajan los rendimientos.
Ácidos	Por lotes	Transforman también los aceites degradados	Químicos tóxicos y corrosivos. Alto costo de infraestructura (equipos resistentes a la corrosión).
Enzimas	Por lotes o continuo	Seguras, biodegradables, procesan todo tipo de aceites degradados. Reutilizables (o uso en proceso continuo) si están inmovilizadas.	Tiempos más largos de reacción. Costo de las enzimas.
Ácidos y otros catalizadores inmovilizados	Por lotes o continuo	Transforman también aceites degradados. Reutilizables o usables en proceso continuo.	Costo del catalizador, toxicidad.
Varios	Reactor ultrasónico o de micro-ondas	Acelera la reacción al mejorar la mezcla de reactantes y su contacto con el catalizador.	Costo de infraestructura.
Alcohol en estado súper-crítico	Por lotes	No se requiere catalizador.	Costo de infraestructura y alto requerimiento de energía en la operación.

Tabla 8. Tecnologías de producción (etapa de reacción) para el biodiesel.

Sistema	Ventajas	Desventajas
Destilación	Se obtiene alta pureza y se recuperan los subproductos.	Costo energético y de infraestructura. Se puede degradar un poco el biodiesel por la alta temperatura utilizada.
Adsorción (resinas y otros adsorbentes)	Bajo Costo energético y de infraestructura. Algunos adsorbentes son renovables y biodegradables.	Costo de las resinas o adsorbente. Un paso adicional para recuperar el subproducto (como glicerol). Se requiere limpieza y regeneración de las resinas o adsorbentes.

Tabla 9. Tecnologías de purificación del biodiesel.

La glicerina puede aplicarse como ingrediente en cosméticos, medicamentos y productos alimenticios, así como en la síntesis de diversos químicos, polímeros, anticongelantes, lubricantes y como solvente "verde" (ya que la glicerina es biodegradable y no tóxica). También se propuso recientemente su aplicación para absorber derrames de petróleo con la ventaja de poder reutilizar el petróleo absorbido (Mendes, 2010). Por otro lado, dependiendo de la materia prima que se utilice, pueden resultar otros subproductos de la extracción del aceite. Por ejemplo, de las algas quedan proteínas, carbohidratos y pigmentos (clorofila, astaxanina, etc.), que pueden utilizarse en la alimentación humana y animal.

Normatividad para el biodiesel

Existen normas de calidad para el biodiesel en EE.UU. (ASTM D 6751), Europa (EN 12214) y Brasil (ANP Act 7/08), que establecen parámetros para las impurezas que pudieran quedar después de la reacción (alcohol, glicerina y otros subproductos); para la composición de ácidos grasos, estabilidad oxidativa y filtrabilidad, entre otras. Las tres normas difieren un poco en los valores permitidos, siendo más permisiva la que aplica en EE.UU. (que no establece una pureza mínima) y más exigente la europea (que establece una pureza mínima de 96.5 %).

Asociaciones, instituciones e industrias relacionadas con el biodiesel

Debido a la importancia del uso y producción de biodiesel en el mundo, existen diversas asociaciones de industrias que informan y proponen regulaciones sobre los asuntos relacionados con este biocombustible:

En EE.UU. el "National Biodiesel Board" (<http://www.biodiesel.org/>)

En Europa el "European Biodiesel Board" (<http://www.ebb-eu.org/>)

En Argentina el "Portal de información y noticias sobre biodiesel y energías renovables" (<http://biodiesel.com.ar/>)

Hay muchas fábricas en operación y producción comercial dedicadas al biodiesel de primera generación. Sin embargo, sólo existen proyectos demostrativos o pre-comerciales que utilizan materias primas o tecnologías novedosas. Los desarrollos con algas se han multiplicado especialmente en los últimos tres años. Algunos sitios que recopilan información al respecto son <http://www.algalbiomass.org> y <http://www.oilgae.com/>. Se recomienda prudencia con las noticias de fuentes comerciales, ya que las compañías que tienen desarrollos con algunos de los nuevos insumos tienden a ser sobre-optimistas con los rendimientos y otros criterios económicos.

2.5. Diésel verde

Consideraciones ambientales

El balance de GEI del diésel verde es favorable (ver Figura 2). Estudios comparativos con diésel de bajo azufre e inclusive biodiesel, han mostrado que el diésel verde produce menores emisiones de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas pesadas, pero puede llegar a producir mayores emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos (Bisio y Atkinson, 2002). Aunque en general es un combustible más limpio respecto al diésel de petróleo, hay que considerar que diésel verde tiene globalmente la misma composición química, por lo que su toxicidad (hacia el sistema nervioso, principalmente) e inflamabilidad son similares y se deben tomar las medidas de seguridad necesarias para su manejo.

Materias primas

Una de las grandes ventajas del diésel verde es su capacidad de aceptar diversas materias primas, desde materiales lignocelulósicos hasta residuos agroindustriales y municipales. Por esta razón, sus tecnologías de producción también han sido llamadas BTL (del inglés *Biomass To Liquid*, "biomasa a líquido"). Mientras que para el etanol se usa sólo la parte de una planta que contiene azúcares y para biodiesel la parte que contiene grasas, en el diésel verde se puede utilizar toda la planta, por lo que se logran mayores rendimientos por hectárea.

Tecnologías de producción

El proceso general para la producción del diésel verde se esquematiza en la Figura 13. Existen algunas variantes en el proceso, que se describen a continuación.

Opcionalmente, puede haber un pre-tratamiento de la materia prima (como una molienda), pero este paso incrementa los costos monetarios y energéticos. El primer paso normalmente consiste en convertir el material orgánico en un "gas de síntesis", compuesto por CO e hidrógeno. A este paso se le llama "gasificación de la biomasa". El segundo paso es sintetizar alcanos (hidrocarburos similares a los derivados del petróleo) a partir de los componentes de este "gas de síntesis", también llamado "sintegás" (syngas en inglés) previamente purificado. Posteriormente se hace una purificación del diésel.

El proceso de síntesis del diésel verde a partir del "sintegás" es el proceso conocido como Fischer-Tropsch o FT (en honor a sus inventores). Aunque este proceso se conoce desde 1920 utilizando gas natural o carbón mineral, hasta hace poco se empezó a aplicar utilizando biomasa como materia prima.

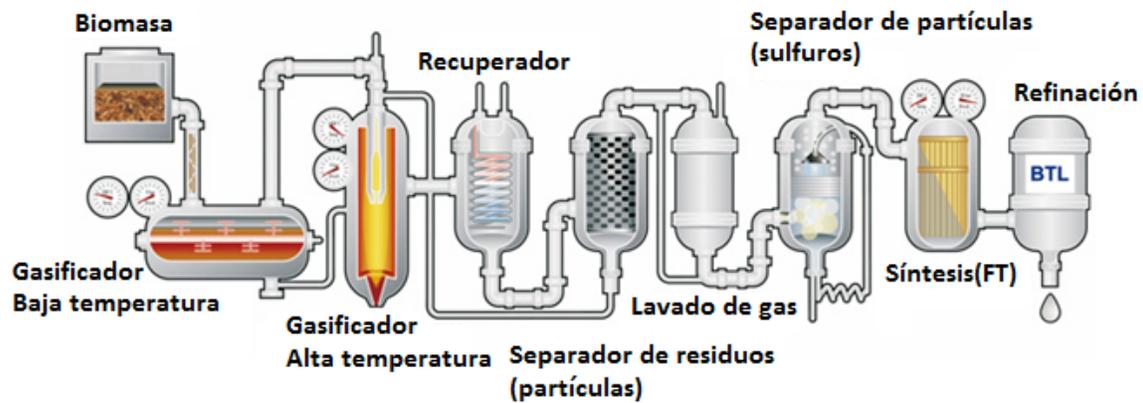


Figura 13. Ejemplo de producción del diésel verde con el proceso Fisher-Tropsch, de la empresa Choren (también llamado proceso Carbo-V).

Los principales retos tecnológicos se presentan en la gasificación de la biomasa ya que, por un lado, puede haber gran diversidad de materias primas con diferentes propiedades y, por otro, éstas son más complicadas que el carbón o el gas natural, que eran los sustratos conocidos para este proceso. Otro problema posible es que la materia orgánica se agrega o “apelmaza”, llegando a obstruir las tuberías de los equipos utilizados. También se requiere optimizar las condiciones de proceso para tener mejores rendimientos.

Existen algunas alternativas de síntesis de diésel verde que no usan el proceso FT y se describen en la Tabla 10.

Tecnología	Empresa	Materias primas	Proceso	Tipo de diésel obtenido
NExBTL	Neste oil	Aceites y grasas	Hidrogenación catalítica	Cumple con la norma EN 590
H-Bio	PetroBras	Aceites y grasas	Hidrogenación catalítica	Mayor índice de cetano (mejor encendido en el motor)
Pirólisis (“Bio-oil”)	Varias	Varias (finamente molidas)	Pirólisis <i>flash</i> (alta temperatura por 2 segundos)	Diésel “crudo”, que requiere refinación

Tabla 10. Variantes de producción del diésel verde.

Subproductos

Dependiendo del catalizador utilizado, algunos procesos tienden a formar más metano (componente principal del gas natural) en lugar de hidrocarburos más largos. Este gas, que también puede formar parte de los productos de la gasificación de biomasa, puede usarse como combustible o someterse de nuevo a un proceso FT para formar diésel verde. En ese caso, el proceso se conoce como GTL (del inglés *Gas To Liquid*, o “gas a líquido”).

Puede resultar cera como subproducto de la destilación del diésel verde. Esta cera puede someterse a un proceso de “craqueo”, también conocido como “termo-despolimerización catalítica” para convertirla en hidrocarburos que formarán parte del diésel verde, aumentando así los rendimientos.

Costos y viabilidad económica

La eficiencia de conversión de biomasa a sintegás y de sintegás a diésel verde es crucial para tener costos competitivos de producción. A pesar de eso, la proyección de costo de producción del diésel verde a gran escala está estimada entre en 5 y 11 dólares de EE.UU. (Boerrigter, 2002).

Normas

Aunque no existe una norma específica para el diésel verde, se espera que cumpla con las normas establecidas para el diésel. En la Tabla 11 se presentan las propiedades y la composición general del diésel FT.

Propiedad /compuesto	Valor
Tamaño de los hidrocarburos	10-24
Compuestos diferentes (parafinas)	500
Alcoholes, aromáticos, cíclicos	ausentes
Hidrocarburos de C16	variable
Punto de ebullición	200-350 °C

Tabla 11. Propiedades y composición general del diésel FT (Boerrigter, 2002).

Proyectos demostrativos de diésel verde

Dadas las ventajas ambientales y económicas del diésel verde, existe un gran interés por llevarlo a nivel industrial. Actualmente existen proyectos demostrativos y comerciales en varios países (ver Tabla 12).

Empresa / Institución	País	Capacidad (m³/d)
Syntroleum	Rusia, Perú, Bolivia	62,898- 754,779
SASOL	Venezuela, Irán, Qatar	213,854 - 817,677
SASOL-Chevron-Texaco	Australia, Nigeria	213,854
Statoil	Qatar	459,157
Shell	Irán, Indonesia, Egipto, Qatar, Australia	471,737
Conoco Phillips	Qatar	1,006,372
Exxon Mobil	Qatar	628,982
Choren	Alemania	No revelada
Neste Oil	Finlandia	No revelada
ICRC y la Universidad de Alaska-Fairbanks	EE. UU.	No revelada
Petrobrás	Brasil	No revelada

Tabla 12. Proyectos comerciales de diésel Fischer-Tropsch y demostrativos de diésel verde.

2.6. Alcances y Retos a futuro

Los retos tecnológicos de cada biocombustible fueron comentados en la sección 2.6. En general, los retos siguen siendo bajar los costos de la materia prima y los costos de producción. Otro tema que se ve como un reto es la logística de recolección (la de distribución y venta sería similar a la de los combustibles del petróleo). El abastecimiento de materias primas en plantas grandes será más caro por las mayores distancias de transporte y se generarán efectos de competencia en el mercado.

También se ha buscado estudiar la sustentabilidad de estos biocombustibles a largo plazo (RSB, 2009). Algunos estudios recientes indican que no devolver a la tierra los nutrientes de los residuos lignocelulósicos que tradicionalmente se utilizan como composta o fertilizante, tendrá como consecuencia un empobrecimiento del suelo y la necesidad de usar fertilizantes químicos (Gelfand et al., 2010; Blanco-Canqui, 2010). Como se mencionó en la introducción, ese concepto de sustentabilidad también implica que los beneficios ambientales de los biocombustibles traigan a su vez mejoras en lo social y lo económico.

3. ESTADO DEL ARTE EN MÉXICO

3.1. Materias primas y tecnologías

En 2005, un anexo a la prospectiva sobre las energías renovables en México, realizada por la SENER, contemplaba también una estimación preliminar de la disponibilidad de subproductos agrícolas o agroindustriales (Masera *et al.*, 2005). Aunque en esta publicación se consideraban solamente para la generación de energía por combustión o gasificación y no como materias primas para biocombustibles avanzados, ese inventario preliminar de residuos sirvió como base para la estimación del potencial nacional de este tipo de materias primas. Una actualización de dicho inventario se muestra en la Figura 15 (BioTop, 2010). Los materiales provenientes de residuos agroindustriales son los más disponibles actualmente y lo seguirán siendo en el futuro. Asimismo, se reconoce un gran potencial en la biomasa forestal.

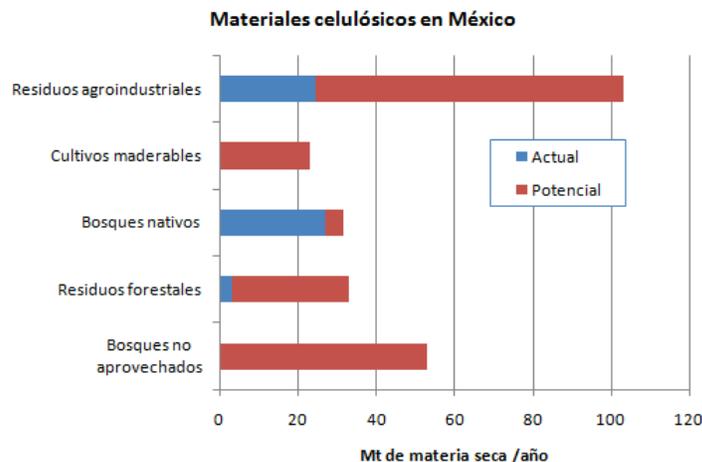


Figura 14. Producción de materiales lignocelulósicos en México. La producción "actual" está basada en cifras del 2004 al 2007 (BioTop, 2010).

Sólo para grasas animales de desecho se tiene en 2006 una estimación de 0.02 Mt/año, basada en el número de bovinos sacrificados (BioTop, 2010). Para otro tipo de materias grasas (como las grasas de desecho de restaurantes y las algas) no existe un inventario formal. Este sería uno de los puntos a atender dentro de las perspectivas.

En cuanto a las tecnologías para la producción de biocombustibles avanzados, existe una intensa investigación al respecto en varias instituciones educativas y centros de investigación en México, con buenas posibilidades de llegar a desarrollos competitivos y adaptados a la situación particular del país, ya que se están realizando con materias primas e insumos (incluyendo microorganismos) locales (ver sección 4).

3.2. Aspectos ambientales

Los beneficios generales de los biocombustibles avanzados y sus posibles desventajas ambientales han sido ya comentados en la sección del panorama internacional y son igualmente válidos para el caso de México. Adicionalmente, habría que cuidar las afectaciones a ecosistemas y la biodiversidad, sobre todo considerando que se trata de un país mega-diverso. Un estudio interesante al respecto ha sido emitido por la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), para el caso de especies invasoras (que se convierten en "plaga") (UNEP, 2009b).

3.3. Aspectos sociales y políticos

Este es posiblemente el aspecto más complicado de los biocombustibles avanzados en nuestro país. Los retrasos y problemas del campo mexicano ocasionaron que los biocombustibles fueran vistos como la "panacea" o remedio a todos los males; que diversas organizaciones y confederaciones empresariales y campesinas hicieran presión política para que sus respectivos cultivos fueran favorecidos para la producción de biocombustibles de primera generación, sin contar con los estudios técnicos, sociales y económicos que avalaran estas propuestas, y ocasionando que se dejara de lado en las políticas e incentivos a los biocombustibles avanzados. Se prevé, sin embargo, la inclusión de investigación y desarrollo sobre biocombustibles avanzados dentro de las "demandas específicas" de los fondos sectoriales del CONACYT.

Por otra parte, el desconocimiento del tema por parte de la sociedad satanizó a los biocombustibles de primera generación por su competencia con alimentos, afectando así la aceptación de los biocombustibles avanzados. También por parte de los industriales y gobiernos locales y estatales, el desconocimiento del tema (y en ocasiones la falta de confianza en los recursos humanos e instituciones de investigación locales) ocasionó la importación de materias primas y tecnologías de primera generación que no siempre están dando buenos resultados una vez implementadas en nuestro país. Esperamos que con los esfuerzos de divulgación que están realizando diferentes instituciones y asociaciones (incluido este documento), se contribuya a resolver los mitos y dudas sobre el tema y a crear conciencia sobre los enormes beneficios (ambientales, sociales y económicos) que pueden traer los biocombustibles avanzados en nuestro país.

3.4. Aspectos normativos y legislativos

En el año 2009 fue publicado el Reglamento correspondiente a la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos publicada en el año 2008 (Cámara de Diputados, 2008), el cual establece las dependencias encargadas de su aplicación y regulación (la SENER, la SAGARPA y la SEMARNAT), así como una comisión intersecretarial, que involucra además a la Secretaría de Economía y a la de Hacienda. En este reglamento del año 2009, se establecen las regulaciones de materias primas, permisos y avisos requeridos, recomendaciones para el cuidado del ambiente, etc. Desafortunadamente, no se mencionan los biocombustibles avanzados, y los residuos municipales y agroindustriales no están contemplados como bioenergéticos.

Derivadas de esas leyes y programas sobre bioenergéticos, se realizarán (o se están realizando ya) pruebas de mezclas de biocombustibles (etanol con gasolina y biodiesel con diésel fósil) en las principales ciudades de México (Distrito Federal, Guadalajara y Monterrey). Desafortunadamente, los biocombustibles que se están o estarán agregando serán mayoritariamente de primera generación con tecnologías ya superadas, a pesar del consenso de que el camino más sustentable es por la vía de los biocombustibles avanzados.

Por otro lado, algunos proyectos de normas de calidad para etanol carburante y para biodiesel están en desarrollo. Se prevé que sean similares a las internacionales (más apegadas a las normas europeas que a las de EE.UU.). Aunque estas normas no se refieren específicamente al origen del biocombustible o la tecnología empleada para su obtención, algunos de los aspectos que contemplan pueden ser difíciles de cumplir para ciertas materias primas usadas en los biocombustibles avanzados. Por ejemplo, la norma europea para biodiesel establece una cantidad máxima de 1% (y 12% en la de EE.UU.) de ésteres derivados de grasas poli-insaturadas. Como ese porcentaje es mucho mayor para los aceites derivados de Jatrofa y algas, habría que implementar un paso adicional de purificación o hidrogenación de ese tipo de grasas para cumplir con la norma.

Para la certificación de la sustentabilidad de los bioenergéticos provenientes de biomasa vegetal está también en curso un proyecto de norma. Los biocombustibles avanzados tendrían mayores calificaciones en este tipo de certificación. Además de las dependencias gubernamentales mencionadas anteriormente y de la Red Mexicana de Bioenergía (www.rembio.org.mx), que edita este documento, existen algunas asociaciones de carácter más científico o social que están directa o indirectamente relacionadas con el estudio o promoción de los biocombustibles avanzados:

Sistema Nacional de Investigación y Transferencia Tecnológica para el Desarrollo Rural Sustentable (SNITT). Es un órgano consultivo de la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo Rural Sustentable (CIDRS).
<http://www.snitt.org.mx/>

Instituto Nacional de Ecología (INE). Depende de la SEMARNAT y se dedica a investigar y difundir diversos temas ambientales, como el ordenamiento ecológico y el cambio climático, entre otros. <http://www.ine.gob.mx/>

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Tiene varios proyectos sobre materias primas para biocombustibles. <http://www.inifap.gob.mx/>

Coordinadora Nacional de Fundaciones Produce (COFUPRO). Representa a las Fundaciones Produce (producción agrícola y forestal) ante instituciones públicas y privadas. <http://www.cofupro.org.mx/>

Instituto de Bioenergéticos y Energías Alternativas del Estado de Chiapas. Creado en el 2007 con el objetivo de coadyuvar al desarrollo de la Entidad y del País, mediante la producción y uso de los productos bioenergéticos, energías alternativas y renovables.

Comisión Intersecretarial de Energía de Guanajuato (CIE-GTO). Tiene varios grupos de trabajo para promover y financiar proyectos de energía renovable (incluida la bioenergía).
<http://energia.guanajuato.gob.mx/siegconcyteg/>

Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería (SMBB). Alberga en su biblioteca diferentes trabajos de científicos mexicanos sobre biocombustibles, presentados en los congresos nacionales bianuales o en la revista que edita la propia Sociedad. <http://www.smbb.com.mx/>

Sociedad Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal (SOLABIAA). Fundada en Xalapa, Veracruz en 2008, promueve entre otros aspectos ambientales el uso de biocombustibles avanzados. Alberga en su sitio los trabajos sobre el tema presentado en el congreso de 2008 (y próximamente los trabajos que se presentarán en el congreso de diciembre de 2010) y los artículos científicos de la revista que edita (RELBAA).
<http://www3.inecol.edu.mx/solabiaa/>

4. EXPERIENCIAS CONCRETAS EN MÉXICO

4.1. Líneas de Investigación

En la Tabla 13 se presenta un compendio de las investigaciones que se están llevando a cabo en México y sus principales logros. En un estudio reciente de la IEA sobre biocombustibles avanzados en los países desarrollados y en desarrollo, se señaló que México cuenta con recursos humanos altamente capacitados en este tema (IEA, 2010), de lo cual se puede concluir que estas investigaciones han llegado al resto de la comunidad científica mundial y su calidad ha sido reconocida. Igualmente, en el sitio web de la REMBIO se puede consultar un mapa de trabajos de bioenergía en México (<http://www.rembio.org.mx/MapaSocios>).

Biocombustible	Líneas de investigación	Principales logros	Instituciones
Etanol lignocelulósico	Pre-tratamiento de materias primas	Establecimiento de condiciones de proceso para materias primas modelo.	UdG, UNAM, CIATEJ
	Desarrollo de cepas	Establecimiento de colecciones de cepas nativas productoras de enzimas y de etanol. Construcción de cepas resistentes a inhibidores, que asimilen pentosas y con mayor producción de etanol.	UNAM, UG, CIATEJ, UAM, UIA
	Hidrólisis	Establecimiento de condiciones de hidrólisis enzimática con enzimas comerciales y propias.	UdGto, CIATEJ, UAM, UIA
	Destilación y secado	Diseño de equipos y procesos.	CIATEJ, UIA
	Mezclas y formulación con gasolinas	Establecimiento de los porcentajes de etanol a usar en las mezclas en las ciudades piloto (Guadalajara, DF y Monterrey)	IMP, ITESM
	Emisiones	Evaluación de los beneficios ambientales (en cuanto a emisiones) de las mezclas etanol-gasolina en condiciones reales en nuestro país.	IMP
	Simulación de procesos	Modelo para estimar la viabilidad económica de plantas de etanol lignocelulósico.	CINVESTAV (Guadalajara), UIA
Biosiesel avanzado	Aceites y grasas usados o de desecho	Pretratamientos y procesos químicos (varias etapas) o enzimáticos para su transformación a biodiesel.	CIATEC, CIATEJ, UAG
	Aceite de microalgas	Aislamiento de cepas nativas y establecimiento de colecciones. Evaluación de la productividad de aceite. Desarrollo de cepas sobreproductoras (en curso).	UABC, CIBNOR, CICY, UNAM, INECOL, CICESE, CINVESTAV, CIATEJ
	Aceites microbianos	Aislamiento y caracterización de cepas.	CICESE, UADEC, CIATEJ
	Nuevas tecnologías de producción	Procesos biotecnológicos (con enzimas), en continuo y evaluación de procesos asistidos por ultrasonido y microondas.	CIATEJ
Diésel verde	Gasificación de biomasa	Construcción de un piloto de gasificación de biomasa. Modelos en diferentes configuraciones de reactor.	UNAM, ITESO
	Síntesis FT	Modelos cinéticos, Catalizadores	UNAM, UANL

Tabla 13. Líneas de investigación sobre biocombustibles avanzados en México.

4.2. Proyectos recientes sobre biocombustibles avanzados

En la Tabla 14 se presentan algunos proyectos de investigación y desarrollo representativos sobre biocombustibles avanzados que se identificaron durante el "Inventario de Programas y Proyectos de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Tecnologías en Insumos para Bioenergéticos", realizado por la REMBIO a solicitud del SNITT y la SAGARPA.

Título o tema del proyecto	Financiamiento	Responsable / Institución
Utilización de los residuos sólidos agrícolas del estado de Guanajuato para producir bioetanol	MADISA-U. de Guanajuato	Hernández Galván Guillermo, MADISA Carlos Alberto Leal Morales. U. de Gto.
Estudio de factibilidad técnica y económica para la producción de etanol utilizando materiales lignocelulósicos de desecho agro-industrial	FOMIX CONACYT- Gobierno de Jalisco	Arturo Sánchez Carmona. CINVESTAV
Obtención de un extracto enzimático lignocelulósico de interés biotecnológico a partir de hongos termófilos nativos del Estado de Jalisco	FOMIX CONACYT- Gobierno de Jalisco	Lorena Amaya Delgado. CIATEJ
Elaboración de biodiesel a partir de lípidos de desperdicios marinos.	PROMEPE- U. de Colima	Manuel Patiño Barragán. U. de Colima
Nuevos biocatalizadores para la producción de biodiesel	SEP-CONACYT	Georgina Sandoval. CIATEJ
Biodiesel de salicornia	Seawater Foundation, Banco Mundial, CONAPESCA y Gob. de Sonora	Ted Circuit y Carl Hodges. Seawater Foundation
Estudio de la producción de biocombustibles con catalizadores base Co y Fe vía la reacción de Fischer-Tropsch	SEP-CONACYT	Ángel Martínez Hernández, UANL

Tabla 14. Algunos proyectos en México sobre biocombustibles avanzados (2010).

4.3. Estudios y proyectos

En este apartado presentamos tres ejemplos de proyectos que se están investigando o implementando en México. La información fue proporcionada por los responsables de los proyectos que se mencionan. Aunque los resultados estén a nivel de investigación básica, piloto o iniciando la implementación, cabe recordar que actualmente en ninguna parte del mundo se tiene todavía una planta comercial costeable operando y que, al igual que en México, la investigación en el mundo sigue a todos los niveles (básica, aplicada, tecnológica y pre-comercial).

  	<p>ETANOL DE BAGAZO DE AGAVE: Como se mencionó antes, la producción de etanol avanzado derivado de materiales lignocelulósicos es todavía un reto a nivel mundial, habiendo hasta la fecha sólo proyectos demostrativos o pre-comerciales (ver Tabla 7). En México, este reto ha sido aceptado por la empresa Blue Fuel SAPI de C. V.¹ Esta empresa tiene en curso la construcción de una planta donde estima producir 126 millones de litros por año, el equivalente al 72% de la demanda que PEMEX tiene para surtir etanol carburante en la ciudad de Guadalajara. Tendrá una capacidad de transformación de materia prima de 2,200 toneladas de agaváceas por día. Una vez extraído el jugo para la producción de etanol de primera generación, el bagazo residual (300 toneladas por día), será pretratado con enzimas para su hidrólisis. Posteriormente, el jugo rico en azúcares será fermentado para obtener el etanol lignocelulósico o "avanzado". El residuo sólido será enviado a una caldera para la cogeneración de vapor de proceso y energía eléctrica, utilizados en los procesos de producción de la planta. Las vinazas, desecho líquido del proceso de destilación, serán tratadas para separar los sólidos, las mieles, y el agua. El sólido se usará como alimento para ganado y las mieles se reprocessarán por fermentación.</p> <p>¹ Comunicación personal con el LAE Jorge Eduardo López Nava. El objeto social de Blue Fuel SAPI de C.V. es la producción y venta de etanol carburante al 99% para uso industrial. Se trata de una empresa 100% mexicana creada por jaliscienses emprendedores para contribuir a los desarrollos sustentables de su estado y del país. Es altamente responsable y sustentable, se preocupa por la ecología y cuenta con tecnología de punta, la cual emitirá cero descargas al medio ambiente en cada uno de sus procesos. Para mayor información, contactar al LAE Jorge Eduardo López Nava (elopez10j@megared.net.mx)</p>
	<p>ACEITE DE ALGAS: Las microalgas se perfilan como una alternativa interesante para obtener materia prima para biodiesel, ya que su productividad en teoría superaría la del mejor cultivo agrícola y además no competiría con la producción de alimentos. El trabajo del grupo de la Dra. Virginia Herrera y el Dr. Felipe Barahona en el CICY,² caracteriza la producción de lípidos de microalgas verdes e incluye organismos considerados modelos de estudio (<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> y <i>Scenedesmus obliquus</i>, por ejemplo) y especies nativas de la Península de Yucatán. Además, se está estudiando el perfil y la acumulación de lípidos de estas microalgas en respuesta a diversas condiciones de estrés, como cambios en el pH, disminución de la fuente de nitrógeno y estrés osmótico. Por ejemplo, la I.Q. Patricia Contreras (estudiante de la Maestría en Energía Renovable del CICY) realizó el estudio del perfil y acumulación de lípidos de <i>C. reinhardtii</i> y <i>Chlorella saccharophila</i>. <i>C. reinhardtii</i> fue proporcionada por la Dra. Elizabeth H. Harris (<i>Chlamydomonas Center</i>, EE.UU.); <i>C. saccharophila</i> fue donada por la Q.F.B. Silvia López (Universidad Autónoma de Yucatán), quien la aisló de un cuerpo de agua dulce de la ciudad de Mérida, Yucatán. Se obtuvieron las curvas de crecimiento para cada microalga y se determinó el día de mayor acumulación de biomasa. A continuación se realizaron experimentos donde se evaluó el perfil y la acumulación de lípidos bajo condiciones de cultivo con: pH alcalino, baja concentración de N₂ y estrés osmótico por NaCl. Los cultivos de <i>C. reinhardtii</i> y <i>C. saccharophila</i> presentaron una disminución de extracto obtenido en condiciones de estrés por pH y baja concentración de N₂, aunque resultaron contener más triglicéridos con respecto al control.</p> <p>² Comunicación personal con el Dr. Felipe Barahona (barahona@cicy.mx) y la Dra. Virginia Herrera (vicky@cicy.mx) del CICY (Centro CONACyT con sede en Mérida, Yucatán).</p>
	<p>GASIFICADOR DE BIOMASA: Como paso previo a una síntesis de diésel verde por el proceso Fischer-Tropsch, la biomasa debe gasificarse para generar el sintegás. Realizar este proceso a partir de biomasa presenta retos tecnológicos a nivel de equipos y de la composición del sintegás resultante. La técnica consiste en utilizar un gasificador de flujos concurrentes, con lecho móvil, donde la biomasa y los gases se mueven hacia abajo en flujos paralelos. Se obtiene un gas que contiene 30% CO y 18% H₂. Mientras la temperatura en la zona de combustión generalmente es de 900 a 1200°C, la temperatura del sintegás que sale del gasificador se mantiene entre 300-500°C. Aunque este gas contiene niveles significativamente bajos de aceites y alquitrán, requiere una limpieza para retirar las partículas sólidas y el aceite remanente. En el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se ha construido un gasificador de biomasa a nivel piloto bajo la responsabilidad del Dr. Javier Aguillón,³ con el fin de aprovechar residuos orgánicos forestales, agrícolas y municipales para la producción de sintegás, que puede tener diversos fines, entre ellos la producción de diésel verde.</p> <p>³ Comunicación personal con el Dr. Javier Aguillón (jea@pumas.ii.unam.mx) del Instituto de Ingeniería de la UNAM.</p>

5. CONCLUSIONES: retos para México

Como país mega-diverso, México tiene mucho potencial en cuanto a materias primas para biocombustibles avanzados. Igualmente, como país industrializado genera muchos residuos susceptibles de ser convertidos en biocombustibles avanzados. La investigación y desarrollo en este tema, si bien comenzó con retardo respecto a otros países, está siendo desarrollada por recursos humanos de alta calidad reconocidos internacionalmente. Por este potencial de recursos naturales y humanos se han atraído inversiones tanto nacionales como extranjeras que favorecerán un rápido desarrollo de las tecnologías requeridas para la producción sustentable de biocombustibles avanzados en nuestro país. Desafortunadamente, en los aspectos políticos y sociales es donde hay más retraso, puesto que ni siquiera se mencionan los biocombustibles avanzados en la legislación relacionada (mucho menos existen incentivos para su implementación) y se contemplan escasos proyectos de desarrollo regional basados en biocombustibles avanzados.

Los retos y las recomendaciones para que México pueda desarrollar biocombustibles avanzados son:

Materias primas

- Disponer de un inventario nacional de los recursos biomásicos disponibles y los potenciales (plantas, microorganismos y residuos).
- Retomar o implementar modelos de explotación forestal sustentable que maximicen la cosecha y el uso de residuos y madera para generar energía.
- Aprovechar el recurso humano y experiencia con que se cuenta para el desarrollo, entre otras áreas, de variedades mejoradas de plantas que proporcionen mayores rendimientos y consumos de CO₂, menor consumo de agua y fertilizantes, etc., tomando en todo momento las precauciones necesarias para no causar riesgos al ambiente (RSB, 2009; UNEP, 2009a; UNEP, 2009b).
- Realizar una reconversión hacia la agricultura sustentable, evitando el despilfarro de agua (p. e., a través del riego por goteo); mejorando la eficiencia y reduciendo el uso de fertilizantes nitrogenados (p. e., con el uso de biofertilizantes), y maximizando la conservación de recursos existentes, como los suelos y la biodiversidad.

Tecnologías de producción que den respuesta a los retos existentes

- Explorar la biodiversidad en busca de microorganismos útiles a la producción de biocombustibles avanzados (productores de enzimas, de aceites, de alcoholes, de hidrógeno, etc.).
- Desarrollar nuevas cepas microbianas por ingeniería genética, más eficientes en la producción de biocombustibles (alcohol, aceite,) y resistentes a inhibidores.
- Desarrollar catalizadores y biocatalizadores eficientes y de bajo costo.
- Estudiar el efecto de las condiciones de proceso y las materias primas en la composición de los biocombustibles, así como las eficiencias resultantes.

Políticas e incentivos

- Actualizar la legislación, incluyendo en las leyes y reglamentos a los biocombustibles avanzados.
- Fomentar la producción y el uso de biocombustibles avanzados mediante incentivos fiscales, créditos, bonos y otros mecanismos.
- Favorecer que en las mezclas se utilicen biocombustibles avanzados.
- Apoyar la investigación y desarrollo tecnológico de los nuevos biocombustibles de vanguardia, en lugar de esperar a que nos lleguen con retraso tecnologías ya desarrolladas en otros países y ser vistos sólo como proveedores de materia prima y maquiladores.
- Favorecer modelos de producción de insumos agrícolas para la fabricación de biocombustibles avanzados en condiciones sociales y ambientales de respeto a las comunidades y las regiones involucradas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abril, D. y Abril, A.** (2009). "Ethanol from lignocellulosic biomass" (Literature review). *Ciencia e Investigación Agraria, Revista Latinoamericana en Ciencias de la Agricultura*, 36(2): 177-190.
- Betts, W.B.; Dart, R.K.; Ball, A.S. y Pedlar, S.L.** (1991). "Biosynthesis and Structure of lignocelluloses", en: Betts (ed.), *Biodegradation: Natural and Synthetic Materials*, Berlín, Alemania: Springer-Verlag. 139-155.
- BioTop** (2010). "Feedstock Production in Latin America. Biofuels Assessment on Technical Opportunities and Research Needs for Latin America". BioTop Project No: FP7-213320, Task 2.1. Feedstock production in Latin America. Consultado Septiembre 13, 2010 de: http://www.top-biofuel.org/images/stories/pr-reports-website/ANNEX-1-4_WP2_D2-1_Feedstock-production.pdf
- Bisio, A. y Atkinson C.** (2002). "Shouldn't we Know The Molecular Composition of Fischer-Tropsch Diesel Fuels?". *Fuel Chemistry Division Preprints*, 47(2): 496-497.
- Blanco-Canqui, H.** (2010). "Energy Crops and their Implications on Soil and Environment". *Agronomy Journal*, 102: 403-419.
- Boerrigter, H.** (2002). "Green Diesel Production with Fischer-Tropsch Synthesis". Presentado en el Business Meeting Bio-Energy, 13 sep. 2002.
- Cámara de Diputados** (2008). "Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos", Diario Oficial de la Federación (DOF). Publicado el 01-02-2008, en: <http://www.cddhcu.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>
- Dréo, J.** (2006). "Développement durable", Desarrollo sostenible. Consultado Agosto 17, 2010 de: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Desarrollo_sostenible.svg
- EPA** (2010). "Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis". Reporte de la United States Environmental Protection Agency (EPA). EPA-420-R-10-006. February 2010
- Eisentraut, A.** (2010). "Sustainable Production of Second-Generation Biofuels: Potential and Perspectives in Major Economies and Developing Countries". Reporte de la IEA (International Energy Agency). Paris, Francia.
- Gelfand, I.; Sieglinde, S y Robertson G.P.** (2010). "Energy Efficiency of Conventional, Organic, and Alternative Cropping Systems for Food and Fuel at a Site in the U.S. Midwest". *Environmental Science and Technology* 44(10): 4006-4011.
- Haas, M.J.; McAloon, A.J.; Yee, W.C.; Foglia T.A.** (2006). "A Process Model to Estimate Biodiesel Production Costs". *Bioresource Technology*, 97: 671-678.
- Hermoso, J. et al.** (2004). "The Crystal Structure of Feruloyl Esterase A from *Aspergillus niger* Suggests Evolutionary Functional Convergence in Feruloyl Esterase Family". *Journal of Molecular Biology*, 338: 495-506.
- Kargbo, D.M.** (2010). "Biodiesel Production from Municipal Sewage Sludges". *Energy & Fuels*, 24(5): 2791.
- Kohse-Höinghaus, K.; Oßwald, P.; Cool, T.A.; Kasper, T.; Hansen, N.; Qi, F.; Westbrook, C.K. y Westmoreland, P.R.** (2010). "Verbrennungsschemie der Biokraftstoffe: von Ethanol bis Biodiesel". *Angewandte Chemie*, 122: 3652-3679.
- Li, Q.; Du, W. y Lui, D.** (2008). "Perspectives of Microbial Oils for Biodiesel Production". *Appl Microbiol Biotechnol*, 80(5): 749-756.
- Masera, O. R.; Aguilón, J. y Gamiño, B.** (2005). "Estimación del Recurso y Prospectiva Tecnológica de la Biomasa como Energético Renovable en México". Estudio Prospectivo del Sector Energético. Secretaría de Energía. Anexo 2.
- Mendes, H.** (2010). "Glicerina, posible vía para remover petróleo derramado". *SciDev Net*, 11 agosto 2010. Consultado Agosto 17, 2010 de: <http://www.scidev.net/es/news/glicerina-posible-v-a-para-remover-petr-leo-derramado.html>
- Sims, R.; Taylor, M.; Saddler, J. y Mabee, W.** (2008). "From 1st- to 2nd-Generation Biofuel Technologies: An Overview of Current Industry and RD&D Activities". Reporte de la IEA (International Energy Agency). Paris, Francia.
- Tilmann, D.; Socolow, R.; Foley, J.A.; Hill, J.; Lynd, L.; Pacala, S.; Reilly, J.; Searchinger, T.; Somerville, C. y Williams, R.** (2009). "Beneficial Biofuels-The Food, Energy, and Environment Trilemma". *Science*, 325 (5938): 270-271.
- RSB** (2009). "Principios y criterios RSB para la producción sostenible de biocombustibles". Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB). RSB-STD-01-001 (versión 1.0).
- Schill, S.R.** (2009). "Algal Biodiesel: The Promise and the Reality". *Biodiesel Magazine*, octubre 2009.
- "Transport, Energy and CO₂. Moving Toward Sustainability"**, Estudio publicado por la Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) y la International Energy Agency (IEA). Paris, Francia. ISBN 978-92-64-07316-6.
- UNEP** (2009a). "Bioenergy Issue Paper Series No. 2: Water and Bioenergy". Bioenergy Issue Paper Series, United Nations Environment Programme (UNEP). Paris, Francia.
- UNEP** (2009b). "Bioenergy Issue Paper Series No. 3: Gain or pain? Biofuels and invasive species". Bioenergy Issue Paper Series, United Nations Environment Programme (UNEP). Paris, Francia.
- USDE** (2010). "Theoretical Ethanol Yield Calculator", Energy Efficiency and Renewable Energy. Biomass Program. Consultado Agosto 17, 2010 de: http://www1.eere.energy.gov/biomass/ethanol_yield_calculator.html



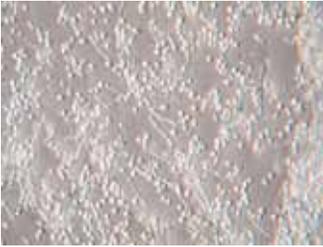


Foto: Ivana Rivera (CIATEJ).

Agradecimientos

Al Dr. Enrique Jaime Herrera López del CIATEJ, por su apoyo en la elaboración de las figuras 3-7, 9-10 y 13-14.

A la M.C. Ivanna Yvonne Rivera Espinosa por el ajuste de la figura 3.

A quienes amablemente dieron su aportación para los estudios de casos en México: el LAE Jorge Eduardo Lopez Nava. BLUE FUEL SAPI DE C V, al Dr. Felipe Barhona del CICY y al Dr. Javier Aguillón, del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Al Dr. Alfredo Martínez del Instituto de Biotecnología de la UNAM, por su valioso tiempo en la revisión general de los aspectos técnicos.

Al Ing. Enrique Riegelhaupt, por la revisión general del texto.

A Fabio Coralli y Omar Masera, de la REMBIO, por su perseverancia, paciencia y apoyo con la edición de este documento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para ésta publicación.



Este cuaderno se terminó de imprimir en el mes de octubre de 2010, en los talleres gráficos de la Imprenta Tavera Hermanos, S.A. de C.V., con un tiraje de 1,000 ejemplares.



Red Mexicana de Bioenergía, A. C.

¿Quiénes somos?

La REMBIO es una organización no gubernamental sin fines de lucro que impulsa el uso sustentable y eficiente de la biomasa con fines energéticos en México.

Se creó en Morelia, Michoacán, en el año 2006. Actualmente incluye a los principales expertos en bioenergía de México y tiene socios en la mayoría de los estados del país.

MISIÓN

Ser líderes en México en la promoción del uso social, económica y ambientalmente sustentable de la biomasa con fines energéticos, mediante la generación y difusión de información calificada, formación de recursos humanos, intercambio de experiencias y fortalecimiento de nexos entre los principales actores sociales interesados en el tema.



Nuestras actividades

- Publicación de **documentos y estudios**
- Difusión de **información actualizada** sobre bioenergía
- Desarrollo de **estudios estratégicos** en las áreas de interés de la REMBIO
- Asesoría especializada para **gestión de proyectos y estudios de factibilidad**
- Análisis y Evaluación de políticas públicas
- Participación en **foros, congresos y seminarios**
- Organización de **cursos y seminarios**, incluyendo una **reunión nacional anual**
- Ejecución de **proyectos**

OBJETIVOS

- **Impulsar el uso integral de la bioenergía** como medio para lograr un desarrollo sustentable.
- **Aportar alternativas** que propicien el uso eficiente de los bioenergéticos, generen empleo e ingresos a nivel local y potencien el desarrollo tecnológico del país.
- **Promover** la investigación, desarrollo tecnológico, capacitación y formación de recursos humanos en el área
- **Difundir información** actualizada y de calidad sobre investigación, desarrollo y aplicaciones de la bioenergía.
- **Colaborar en el diseño de políticas** públicas sobre bioenergía a nivel federal, estatal y municipal.

VENTAJAS DE SER SOCIO

- Acceso a información estratégica del sector: contenido íntegro de ponencias, estudios y bases de datos
- Oportunidad de colaboración en proyectos
- Contacto con expertos del sector y grupos de discusión
- Visibilidad para los socios
- Logo y vínculo a página WEB para socios corporativos.
- Difusión de las actividades, perfil y trayectoria de los socios
- Suscripción gratuita al boletín mensual REMBIO
- Descuento en la Reunión Nacional, en cursos que organice la REMBIO y en publicaciones
- Estudiantes: contacto con investigadores para tesis



MESA DIRECTIVA 2009 - 2011
Dr. Omar Masera Cerutti
PRESIDENTE
Ing. Enrique Riegelhaupt
SECRETARIO GENERAL
M en C. René Martínez Bravo
TESORERO



EN ESTE VOLUMEN:

La sustentabilidad de los biocombustibles líquidos derivados de cultivos alimenticios ha sido puesta en duda, particularmente en cuanto a sus potenciales impactos negativos en términos de seguridad alimentaria, deforestación o mitigación del cambio climático. Este cuaderno analiza críticamente los llamados biocombustibles avanzados como posibles alternativas para aprovechar de manera integral los residuos y materias primas no alimenticias para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir significativamente el consumo de combustibles fósiles en el sector transporte.

LA COLECCIÓN CUADERNOS TEMÁTICOS SOBRE BIOENERGÍA

La colección de Cuadernos Temáticos de la REMBIO busca poner al alcance de lectores especializados en el área de bioenergía y del público en general, materiales novedosos, de calidad y de alta relevancia sobre los aspectos prácticos, metodológicos, económicos, de política pública y de investigación ligados con las distintas aplicaciones de la bioenergía en México.

Consulte nuestro sitio WEB para obtener más detalles sobre los títulos de esta colección y sus contenidos.



www.rembio.org.mx

