



LA BIOENERGÍA EN MÉXICO

Situación actual y perspectivas





Título del cuaderno:
LA BIOENERGÍA EN MÉXICO
Situación actual y perspectivas

Cuaderno Temático No. 4, 2011

Edición: Agosto 2011

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

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



MESA DIRECTIVA REMBIO 2011

Dr. Omar Masera Cerutti
PRESIDENTE

Julián Vega Gregg
SECRETARIO GENERAL

M en C. René Martínez Bravo
TESORERO

Coordinación general de la obra: Omar Masera Cerutti

Coordinación editorial: Fabio Coralli

Diseño editorial: Imagia Comunicación

Revisión técnica: Gustavo Best

Corrección de estilo: Imagia Comunicación

Autores:

Omar Masera Cerutti
Fabio Coralli
Carlos García Bustamante
Enrique Riegelhaupt
Teresita Arias Chalico
Julián Vega Gregg
Rodolfo Díaz Jiménez
Gabriela Guerrero Pacheco
Laura Cecotti

Esta publicación ha sido co-financiada por la Unión Europea en el marco del proyecto "Bioenergy, sustainability and trade-offs: Can we avoid deforestation while promoting bioenergy?", gestionado por el Center for International Forestry Research (CIFOR). Este proyecto ha generado información que sustenta algunos de los análisis y conclusiones del presente cuaderno.



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.

ISBN en trámite.

Este cuaderno se terminó de imprimir en el mes de agosto de 2011 por Imagia Comunicación, con un tiraje de 500 ejemplares.

Impreso en México Printed in Mexico

PRESENTACIÓN

Estimados lectores:

Tengo el gusto de poner a su consideración el Cuaderno Temático (CT) *La bioenergía en México*, redactado por varios miembros de la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO): Fabio Coralli, Carlos García, Enrique Riegelhaupt, Teresita Arias, Rodolfo Díaz, Julián Vega, Gabriela Guerrero, Laura Cecotti y un servidor.

La bioenergía es una fuente estratégica para promover la transición hacia un patrón energético más sustentable, dominado por las energías renovables, y que promueva un uso eficiente, descentralizado y equitativo de la energía. En el ámbito internacional la bioenergía está teniendo un desarrollo muy acelerado, que va desde iniciativas globales para promover el uso de estufas eficientes y limpias de leña a gran escala, hasta el desarrollo de sistemas masivos de producción, distribución, uso y certificación de biodiesel y bioetanol. Varias de las aplicaciones bioenergéticas son totalmente competitivas y ya constituyen complementos necesarios y estratégicos de los combustibles fósiles. De hecho, en la actualidad la bioenergía constituye el 77% del consumo de los recursos energéticos renovables en el mundo.

El panorama de la bioenergía en nuestro país también ha cambiado significativamente en los últimos 5 años, hecho que nos motivó como organización a actualizar el análisis que llevamos a cabo en el libro *La bioenergía en México: un catalizador del desarrollo sustentable*, publicado en el año 2006. En el presente CT buscamos cumplir este objetivo al presentar una perspectiva sintética y crítica de lo que en la actualidad está ocurriendo en el campo de la bioenergía. Se trata a la bioenergía de manera integral al revisar el potencial del recurso biomásico, el estatus de las distintas aplicaciones, el marco normativo y escenarios futuros. Más que dar una cobertura extensa a cada tema, que los lectores pueden encontrar en otros CT de esta colección¹, con este documento se pretende brindar una visión global que nos permita entender tanto el potencial y oportunidades de la bioenergía en nuestro país, los avances y experiencias en los distintos campos, como los retos que enfrenta para convertirse en un futuro próximo en un pilar importante del patrón de consumo energético de México.

El presente volumen forma parte de la colección de CT, que es un componente medular del proyecto editorial de la REMBIO, el cual busca brindar materiales de calidad sobre los distintos aspectos de la problemática en torno a la bioenergía, tanto a nivel internacional como de nuestro país. Con este esfuerzo, también procuramos difundir las actividades de la REMBIO y ofrecer herramientas útiles a los socios y al público en general. La colección de CT 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.

¹ CT REMBIO: [1] *La bioenergía en México: estudios de caso*, 2010 (Prehn y Cumana, 2010); [2] *Biocombustibles avanzados* (Sandoval, 2010); [3] *Estufas de leña* (Díaz et al., 2011).



ÍNDICE

PRESENTACIÓN	1
RESUMEN EJECUTIVO	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. ¿Qué es la bioenergía?	5
1.2. Características de la bioenergía	6
1.3. Bondades de la bioenergía	6
1.4. Cuestiones en debate sobre la sustentabilidad de la bioenergía	7
2. CONTEXTO INTERNACIONAL	9
2.1. El consumo mundial de energía	9
2.2. Escenarios mundiales de la bioenergía	9
3. PANORAMA EN MÉXICO	10
3.1. Uso actual	10
3.2. Potenciales	11
4. APLICACIONES DE LA BIOENERGÍA	13
4.1. Biocombustibles líquidos para el transporte (bioetanol y biodiesel)	14
4.1.1. Bioetanol	15
4.1.2. Biodiesel	16
4.1.3. Certificación de la sustentabilidad de los biocombustibles líquidos	18
4.2. Biocombustibles gaseosos	18
4.2.1. Biogás	19
4.2.2. Gas de síntesis	21
4.3. Biocombustibles sólidos para aplicaciones residenciales y comerciales	22
4.3.1. Carbón vegetal	22
4.3.2. Leña para uso residencial	25
4.4. Biocombustibles sólidos para aplicaciones industriales	29
5. ESCENARIOS DE BIOENERGÍA EN MÉXICO	32
6. HACIA UNA ESTRATEGIA NACIONAL PARA LA PROMOCIÓN DE LA BIOENERGÍA	35
6.1. Marco regulatorio	35
6.2. Fomento a la investigación y desarrollo	36
6.3. Programas específicos de financiamiento para bioenergía	37
6.3.1. Programa para la producción de insumos para biodiesel	37
6.3.2. Programa Nacional de Estufas Ahorradoras de Leña	37
6.3.3. Promoción a la producción sustentable de carbón vegetal	37
6.3.4. Promoción al biogás	37
7. LISTA DE UNIDADES	38
8. LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	38
9. BIBLIOGRAFÍA	39

RESUMEN EJECUTIVO

La biomasa es una fuente de energía renovable y limpia, con un portafolio extenso de tecnologías maduras para la mayoría de sus distintas aplicaciones. A nivel internacional, la bioenergía, o energía obtenida de la biomasa, representa el 10% del consumo total de energía y 77% de las energías renovables. Se estima que para el año 2035 podría contribuir con cerca del 25% de la energía requerida en el mundo, y constituir así uno de los pilares de la transición a fuentes renovables de energía. La bioenergía en nuestro país abastece el 5% (432 PJ en el 2008) del consumo de energía primaria. Se utilizan principalmente la leña, el bagazo de caña y el carbón vegetal.

En México existe una experiencia importante en el área de biodigestores, captura de metano y generación de electricidad en rellenos sanitarios, así como en estufas eficientes de leña para la cocción en zonas rurales. Además, se cuenta con iniciativas incipientes en biocombustibles líquidos, particularmente biodiesel, y con grupos de investigación en insumos y procesos para biocombustibles de primera y segunda generación.

Manejada de manera sustentable, la bioenergía presenta numerosas ventajas desde la óptica socioeconómica y ambiental: es versátil; escalable; brinda aplicaciones para los principales usos finales de la energía (calor, electricidad, combustibles para el transporte); permite crear sinergias importantes entre los sectores agrícola-forestal, energético, industrial, ambiental y social; puede promover el desarrollo rural sustentable a través de la creación de fuentes de trabajo e inversiones en ese medio y puede transferir importantes recursos económicos desde las áreas urbanas hacia las áreas rurales. Además, la producción sustentable de biomasa brinda numerosos servicios ambientales de tipo local y global, lo que incluye la transformación de residuos en recursos económicos, control de la erosión del suelo, regulación del ciclo hidrológico y preservación del hábitat para la fauna silvestre.

Sin embargo, el uso no sustentable de la bioenergía puede producir efectos negativos importantes, como la competencia por la producción de alimentos, el desplazamiento de pequeños productores, o incluso la deforestación para el establecimiento de plantaciones de monocultivo; por estas razones, es indispensable que, como en el caso de todas las fuentes de energía, los diferentes proyectos se desarrollen con apego a criterios estrictos de sustentabilidad.

Este documento confirma las conclusiones más importantes del estudio *La bioenergía en México*, producido por la REMBIO en el año 2006, sobre las grandes posibilidades de desarrollo de la bioenergía en México, por cuanto:

Existe un gran potencial energético del recurso biomásico. Los recursos bioenergéticos en México pueden producir sosteniblemente 3,569 PJ, el equivalente al 46% de la oferta interna bruta de energía primaria en el año 2008, y 10 veces más que su uso actual.

Puede contribuir a la diversificación energética y reducir las emisiones de CO₂, así como la contaminación local. En el año 2030, la bioenergía podría abastecer hasta un 16% del consumo de energía en México y permitir una reducción anual de emisiones de 110 Mt de CO₂ a la atmósfera o 23% de la mitigación total estimada en este año. A las ventajas globales del uso de la bioenergía, se sumarían numerosos beneficios tangibles en lo local. Por ejemplo, el aprovechamiento de desechos urbanos y agrícolas, reducción de los riesgos sanitarios y la contaminación del agua y el aire; por su parte, las estufas eficientes de leña y biogás permiten reducir la contaminación intramuros en las viviendas rurales.

Existe un conjunto de experiencias interesantes en México. En el país se ha desarrollado y adaptado tecnología eficiente para la cocción doméstica, generación de biogás en rellenos sanitarios y en aplicaciones agroindustriales, entre otros ejemplos. Existen grupos de investigación consolidados en biocombustibles de segunda generación y en la adaptación de paquetes agronómicos para el establecimiento de cultivos bioenergéticos. Algunos ingenios azucareros

están iniciando la cogeneración ampliada y eficiente de electricidad con bagazo. Se cuenta también con experiencias en la producción de biodiesel a partir de residuos.

Sin embargo, en México todavía se dista mucho de poder hacer realidad estas oportunidades. Aunque hay avances en cuestiones regulatorias y de incentivos a tecnologías específicas o a la investigación y desarrollo, se carece todavía de un marco regulatorio y de política pública propicio al desarrollo en gran escala de la bioenergía. De hecho –como lo muestra la experiencia de Brasil, Europa y otros países–, para esta última tarea se requiere de una serie de acciones estratégicas con visión de largo plazo, y del apoyo de un amplio conjunto de políticas y de recursos públicos. Cinco ejes son fundamentales y deben trabajarse en México:

- **Partir de un enfoque integrado** orientado a la producción y al uso sustentable de la bioenergía en sus diferentes aplicaciones y dimensiones (social, económica y ambiental).
- **Desarrollar un marco regulatorio que incluya metas claras y todo un conjunto de incentivos** fiscales y de otro tipo para la producción sustentable y el uso de los bioenergéticos, así como facilidades para realizar inversiones.
- **Impulsar el desarrollo de mercados** de productos y tecnologías asociados a la bioenergía, así como elaborar normas técnicas para asegurar la calidad de los productos y los procesos.
- **Fomentar la investigación y el desarrollo tecnológico** al apoyar el desarrollo de grupos de investigación en temas clave, el desarrollo de proyectos piloto y demostrativos, entre otras acciones.
- **Promover el fortalecimiento institucional**, especialmente establecer programas intersectoriales claramente coordinados (salud, energía, ambiente, desarrollo social, agropecuario y forestal) y campañas de información pública que conduzcan a una mejor valoración social de la bioenergía.

1. INTRODUCCIÓN

La biomasa fue la primera fuente de energía no animada utilizada por el hombre, y se mantuvo como la más importante hasta el comienzo de la revolución industrial. Desde el siglo XIX, nuevas tecnologías, como las máquinas de vapor y los motores de combustión interna, la desplazaron parcialmente al utilizar combustibles de mayor densidad energética como el carbón y posteriormente los hidrocarburos. Sin embargo, desde finales del siglo XX la bioenergía ha vuelto a ser considerada como una opción clave en la transición energética, en vista de la inseguridad y altos costos del abastecimiento de petróleo, los riesgos asociados a la energía nuclear y los impactos ambientales negativos del uso de fuentes fósiles. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) afirma que actualmente cerca del 10% de la oferta total de energía final global y 77% de la energía derivada de fuentes renovables proviene de la biomasa (Chum et al., 2011).

TRANSICIÓN ENERGÉTICA

A nivel mundial se postula que por razones ambientales, sociales y económicas es necesaria una transición energética, entendida como un proceso de cambio en los modelos de producción y utilización de energía, hacia sistemas más equitativos, mejor distribuidos geográficamente, y menos contaminantes.

La transición energética implica cambios radicales: se necesitan grandes esfuerzos para aumentar la eficiencia de uso final, lograr ahorros de energía primaria, desarrollar un portafolio amplio de sustitutos a los combustibles fósiles con las correspondientes tecnologías de producción y uso final, así como impulsar la descentralización de los sistemas energéticos.

Las fuentes de energía renovables se han reconocido como algunas de las alternativas más prometedoras para superar los problemas del presente sistema energético basado en combustibles fósiles. Entre ellas están la solar, eólica, hidráulica, geotérmica y la bioenergía, que en su conjunto pueden tener un rol importante en la transición energética, tanto por su capacidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como por ser aplicables a una gran diversidad de usos finales. En particular, la biomasa puede procesarse para obtener biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos renovables y de bajas emisiones que pueden reemplazar a los combustibles fósiles.

1.1. ¿Qué es la bioenergía?

La **bioenergía** es la energía obtenida de la **biomasa**. La biomasa es la materia constitutiva de los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos. Los biocombustibles son los obtenidos a partir de la biomasa y pueden ser o no transformados o procesados. Se distingue a los:

- **Biocombustibles sólidos** (leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, residuos forestales, pellets, briquetas): que pueden quemarse directamente o previa gasificación o pirólisis, para producir calor y electricidad.
- **Biocombustibles líquidos** (bioetanol y biodiesel): obtenidos de cultivos energéticos como caña de azúcar y oleaginosas o aceite vegetal usado.
- **Biocombustibles gaseosos** (biogás, biometano): obtenidos de los residuos municipales y estiércol.

Los bioenergéticos (o biocombustibles) también pueden ser clasificados de acuerdo a las tecnologías empleadas en su obtención:

Bioenergéticos	Sólidos	Líquidos	Gaseosos
1ª generación	Leña, carbón vegetal, bagazo, pellets	Bioetanol, biodiesel, licor negro	Biogás, gas de síntesis
2ª generación	Biochar, torrefactos, torpellets	Etanol celulósico, syndiésel, aceite de pirólisis	
3ª generación	—	Diésel de algas, etanol de algas	Biohidrógeno

Tabla 1. Clasificación de los bioenergéticos con base en sus diferentes generaciones tecnológicas.

1.2. Características de la bioenergía

La bioenergía presenta varias ventajas con respecto a otras fuentes de energía:

Es almacenable: la energía de la biomasa está almacenada en la materia orgánica. Por este motivo es una forma de energía que no tiene la intermitencia de otras renovables como la solar y la eólica, lo que le da ventajas para la generación de calor o electricidad.

Permite satisfacer la mayor parte de los usos finales: es la única energía renovable que puede sustituir a los combustibles fósiles en todas las aplicaciones y finalidades, porque permite producir calor, fuerza motriz, electricidad y biocarburantes líquidos.

Es ubicua: la biomasa se puede encontrar o cultivar en casi todas partes, y está disponible en forma concentrada como subproducto de procesos agroindustriales, residuos de actividades humanas y como estiércol de animales.

Es escalable: hay sistemas de aprovechamiento de biomasa y producción de bioenergía desde muy bajas (< 1 kW) hasta grandes potencias (> 300,000 kW); esto permite una amplia versatilidad para el desarrollo de sistemas de suministro energético a escalas locales y mayores.

Es comercialmente madura: muchas de las tecnologías para el uso energético de biomasa son rentables y están ampliamente desarrolladas a nivel comercial.

1.3. Bondades de la bioenergía

Si se aprovecha de manera sustentable, la bioenergía presenta numerosas ventajas sociales, económicas y ambientales:

Permite crear sinergias positivas por la interacción entre el sector agrícola-forestal (donde se produce la biomasa), el sector industrial que la transforma y los sectores que la utilizan (energético, transportes, residencial, etc). Estas sinergias crean empleo local y agregan valor a los productos, al mismo tiempo que reducen la dependencia de recursos fósiles.

Debido a que la producción de biomasa es descentralizada, se puede producir bioenergéticos en pequeñas y medianas empresas y facilitar así el desarrollo local en zonas rurales. Se estima que la biomasa crea 135 puestos de trabajo directos por cada 10,000 usuarios, frente a los 9 que se crean utilizando petróleo o gas natural (Drigo y Trossero, 2005). Es decir, la capacidad de generación de empleo de la bioenergía es 14 veces mayor a los combustibles fósiles. Asimismo, el uso ampliado de bioenergía puede transferir importantes ingresos de las áreas urbanas consumidoras hacia las áreas rurales productoras de estos energéticos.

La producción de biomasa puede brindar numerosos servicios ambientales de tipo local y global que incluyen el control de la erosión del suelo, la regulación del ciclo hídrico y la protección de hábitats de fauna silvestre. Si las plantaciones energéticas se establecen en tierras degradadas, es posible rehabilitarlas y ponerlas a producir. La conversión de

desechos orgánicos en combustible, además de proporcionar energía, reduce los daños ambientales asociados a su inadecuada disposición (por ejemplo, la contaminación del aire y el agua, aumento de plagas y enfermedades, deterioro del paisaje y calidad de vida de las poblaciones humanas). Producida y utilizada sustentablemente, la bioenergía contribuye a la mitigación del cambio climático, porque sustituye a los combustibles fósiles, mantiene o incrementa almacenes de carbono y evita la deforestación. Cuando se utilizan residuos, se evita también la emisión de metano, que es un potente GEI.

1.4. Cuestiones en debate sobre la sustentabilidad de la bioenergía

Si la producción de bioenergía no se lleva a cabo con los debidos cuidados, y su uso es ineficiente, se pueden tener impactos negativos. En general, las aplicaciones energéticas que implican un uso más eficiente de los recursos o brindan la posibilidad de recuperar residuos –como las estufas eficientes de leña, los biodigestores o la generación de electricidad y calor mediante el aprovechamiento de desechos biomásicos agroindustriales– presentan pocos cuestionamientos desde el ámbito de la sustentabilidad. Por el contrario, la posibilidad de expansión en gran escala del área dedicada a la producción de biocombustibles líquidos de primera generación ha suscitado un intenso debate sobre su sostenibilidad ambiental, económica y social.

La **sustentabilidad ambiental** se cuestiona por los posibles impactos negativos de la expansión de cultivos energéticos sobre los bosques, la mitigación de emisiones que efectivamente se puede lograr en cada caso, y otras consideraciones que necesitan aún ser más estudiadas como impactos en la biodiversidad y el uso del agua. Si no se hace una buena planeación existe el riesgo de que la bioenergía pueda ocasionar destrucción o degradación de recursos naturales, como deforestación, sobreexplotación y contaminación de recursos hídricos, degradación del suelo, entre otras.

Limite de las tierras potencialmente utilizables para la bioenergía. Las tierras aptas para la agricultura se dedican casi todas a la producción de alimentos y fibras; actualmente menos del 1% se dedica a la producción de insumos para biocombustibles líquidos. Se estima que la superficie necesaria para reemplazar el consumo actual de combustibles derivados del petróleo por biocombustibles de primera generación (bioetanol y biodiesel) supera ampliamente a la superficie que hoy se cultiva para alimentos en todo el mundo. Por lo tanto, los biocombustibles no pueden reemplazar a todos los derivados del petróleo, aunque este límite depende en gran parte de los tipos de biocombustible que se consideren y del desarrollo tecnológico de la bioenergía. En otras palabras, los biocombustibles líquidos de primera generación son una opción limitada y de transición. Como tales no son entonces una solución definitiva a la sustitución de gasolina o diésel en el sector transporte.

Mitigación efectiva. A diferencia de otras fuentes de energía, la biomasa tiene la posibilidad de absorber las emisiones de CO₂ que se generan durante su procesamiento y uso final, mediante la fotosíntesis. Esto la hace, en principio, una fuente neutral en términos de las emisiones de CO₂. Sin embargo, hay emisiones adicionales de CO₂ y de otros GEI (CH₄, N₂O) a lo largo del ciclo de vida de la producción de bioenergéticos, debidas al uso de fertilizantes, pesticidas y combustibles fósiles durante el cultivo, la cosecha, el transporte, la conversión del insumo, y también emisiones de CO₂ por la liberación de carbono cuando ocurren cambios de uso de suelo directos o indirectos para establecer cultivos bioenergéticos. En otras palabras, existe un balance entre los GEI emitidos en el ciclo de vida del biocombustible y los ahorrados por los energéticos o combustibles fósiles sustituidos. De acuerdo a las circunstancias, este balance puede ser positivo o negativo, lo que determina el impacto de los bioenergéticos como mitigadores de emisiones con respecto a las fuentes fósiles. Diferentes tecnologías de transformación, el uso de coproductos y residuos, el consumo de fertilizantes, el uso de agua de riego y el manejo de los suelos pueden determinar grandes diferencias en los resultados de este balance.

Presión sobre los bosques. Debido a que la mayor parte de las tierras productivas disponibles se dedican a la producción de alimentos, los nuevos cultivos para biocombustibles podrían imponer presiones adicionales sobre bosques y selvas. A menos de que sean establecidos en tierras abandonadas o degradadas, esto producirá emisiones de CO₂ por defo-

restación y efectos negativos sobre la biodiversidad. Aumentar la movilización de biomasa de los bosques nativos para generar energía renovable sin deforestar ni afectar la biodiversidad es una alternativa para paliar este problema.

La **sustentabilidad social** está cuestionada porque el uso de la bioenergía en gran escala requiere de grandes extensiones, lo cual puede significar: una competencia con la tierra dedicada a la producción de alimentos; el desplazamiento de los pequeños productores; potenciales conflictos entre grupos sociales o condiciones de trabajo no óptimas. Esto es particularmente cierto para el caso de los biocombustibles líquidos de primera generación que se obtienen de cultivos como la caña de azúcar, la soya y la palma aceitera. Por esta razón es importante hacer viables en lo económico las tecnologías de segunda generación que pueden producir biocombustibles a partir de biomasa no alimentaria y de residuos.

Mejores condiciones para las poblaciones rurales. En sistemas de producción de gran escala sólo una parte pequeña de los beneficios de la producción de biocombustibles son captados por los productores rurales. La retribución al trabajo es un componente menor de los costos en sistemas de producción y cultivos muy mecanizados –como los de Estados Unidos, Europa o Argentina–; pero los sistemas que requieren cosecha manual –como los de *Jatropha*, higuera o palma aceitera– actualmente sólo son viables en lo económico si el precio de la mano de obra agrícola es bajo, lo que va en contra de los objetivos de desarrollo y mejora de ingresos de las poblaciones rurales. Existen también casos de trabajo forzado y de menores, que necesariamente deben corregirse.

Seguridad alimentaria. El uso creciente de cultivos alimentarios, como el maíz, la soya o la palma aceitera, para producir biocombustibles líquidos, ha desatado un gran debate internacional sobre los posibles efectos negativos en la seguridad alimentaria, particularmente de los países en desarrollo. Para evitar estos efectos negativos es esencial que se continúen los esfuerzos para desarrollar los biocombustibles de segunda generación, a partir de residuos y sustancias no alimenticias. Asimismo, bajo esquemas adecuados, la competencia con los alimentos puede reducirse a un mínimo, por ejemplo, con cultivos o plantaciones multipropósito (que permitan producir al mismo tiempo alimentos, fibras, forrajes y energía), utilizando tierras degradadas (lo que ayudaría a restaurarlas) o con el aprovechamiento de los residuos agrícolas, pecuarios y forestales que no tengan uso como alimento o forraje. Para que estos objetivos se cumplan, es importante que las metas de producción de biocombustibles sean realistas y adecuadas a las condiciones de cada país.

La **sustentabilidad económica** se pone en duda en particular porque el costo actual de la mayoría de los biocombustibles líquidos es mayor que el de los fósiles, y las perspectivas de reducirlo no son muy claras (mucho depende de las nuevas tecnologías en desarrollo). Como estos costos dependen en gran medida del costo de la materia prima –que representa del 40% al 70% del costo final–, sólo los países con bajos costos o con rendimientos agrícolas muy altos pueden competir en la actualidad contra los petroderivados en los mercados internacionales (por ejemplo, Brasil con etanol de caña de azúcar, Argentina con biodiesel de soya, o Malasia con biodiesel de palma). Vale destacar que varias aplicaciones tecnológicas de la bioenergía son costo-eficientes y competitivas en el mercado, pero en muchos casos se necesitan altas inversiones iniciales (ver capítulo 5), un marco regulatorio favorable y un apoyo decidido del sector público para que tengan preferencia frente a los combustibles fósiles y puedan desplazarlos.

La creciente preocupación acerca de la sustentabilidad de los biocombustibles ha llevado a instituciones científicas, académicas, así como a un número creciente de gobiernos, a trabajar intensamente para procurar que la producción y el uso de los bioenergéticos sean sustentables. En el ámbito internacional existen muchas iniciativas para desarrollar sistemas de certificación de la sustentabilidad de la producción de biocombustibles (van Dam et al., 2010), por ejemplo, la Mesa Redonda sobre Biocombustibles Sustentables (RSB, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo final es definir estándares de producción sustentable de biocombustibles que puedan certificarse. En algunos casos el cumplimiento del estándar podrá ser obligatorio, y en otros será sólo voluntario.

2. CONTEXTO INTERNACIONAL

2.1. El consumo mundial de energía

El consumo de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) contabiliza la mayor proporción de los requerimientos mundiales de energía al sumar 475 EJ en el año 2008 (figura 1). Las energías renovables contribuyen con el 13% del consumo mundial de energía primaria, donde la biomasa y los residuos representan poco más del 10%, la hidroelectricidad el 2.3% y las otras energías renovables contribuyen con el 0.5%. La energía nuclear satisface el 6% del consumo energético global.

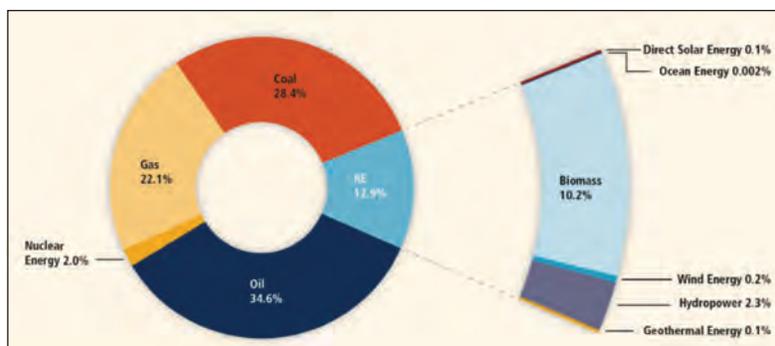


Figura 1. Participación por fuentes en el suministro de energía primaria (Chum et al., 2011).

Como se indicó al inicio del documento, aproximadamente un 77% de toda la energía renovable en el mundo proviene de la biomasa. Alrededor del 77% del consumo total de biomasa se da en los usos tradicionales para cocción de alimentos y calefacción en los países en desarrollo (leña y carbón vegetal), en tanto que los usos modernos de la bioenergía como los biocombustibles líquidos para el sector transporte, la generación eléctrica y la generación de calor en los procesos industriales, consumen poco más del 23% (11.3 EJ) (Chum et al., 2011).

2.2. Escenarios mundiales de la bioenergía

Un escenario tendencial realizado en el 2010 por la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés) estima que el consumo mundial de energía se incrementará en un 47% al año 2035, y de no existir cambios sustanciales de participación de las energías renovables, el consumo de combustibles fósiles representaría el 71% (EIA, 2010). En el sector transporte, un 96% de la oferta provendría del petróleo (IEA, 2009). Este escenario considera que las emisiones de GEI se incrementarían en un 41% para el año 2035, con los consecuentes riesgos asociados al calentamiento global y el cambio climático.

Por el contrario los escenarios dirigidos a la mitigación de emisiones muestran que la bioenergía puede jugar un papel fundamental en el suministro de energía en el mediano y largo plazo. El Consejo Consultivo Alemán para el Cambio Global (WBGU, por sus siglas en alemán) estimó que el potencial de participación de la bioenergía en el sistema energético mundial podría estar entre los 80 y 170 EJ, lo que equivale al 17%–36% del consumo de energía primaria en el mundo en 2008 (Schubert et al., 2009). Por su parte, el IPCC señala que el potencial de la energía primaria que podría obtenerse de la biomasa va de 50 EJ/a a 500 EJ/a, del 10% a casi el 100% del consumo mundial de energía de 2008 (550 EJ).

En un análisis muy detallado sobre las perspectivas futuras de penetración de las fuentes renovables de energía, se estimó que para evitar concentraciones mayores a 440 ppm de CO_2 atmosférico (es decir para evitar un calentamiento mayor a 2 C) en el año 2050, la biomasa debería abastecer el 60% del consumo total de energías renovables al brindar 150 EJ/a (IPCC, 2011).

3. PANORAMA DE MÉXICO

3.1. Uso actual

Según la Secretaría de Energía (SENER), el consumo de energía primaria en México llegó a 8,478 PJ en 2008 (SENER, 2009). La fuente principal de energía fue el petróleo, seguido del gas natural (figura 2). Las energías renovables en México tienen una participación del 10%, en donde la hidroelectricidad representa el 4.5% y la biomasa (leña y bagazo de caña) alcanza el 5%, mientras que la energía eólica y la geotérmica participaron con el resto.

Históricamente, se observa una participación relativa decreciente de la biomasa en el consumo nacional de energía, aunque en términos absolutos el consumo de los bioenergéticos (leña, carbón vegetal y bagazo) permanece más o menos constante. Un estudio reciente señala que el consumo de leña indicado en el Balance Nacional de Energía (BNE) está subestimado debido a dos factores: a) la leña requerida para la producción de carbón vegetal no se contabiliza y b) el consumo real de leña sería un 35% mayor al indicado por el BNE en 2008, para llegar a un total de 334 PJ/a (Masera et al., 2010).

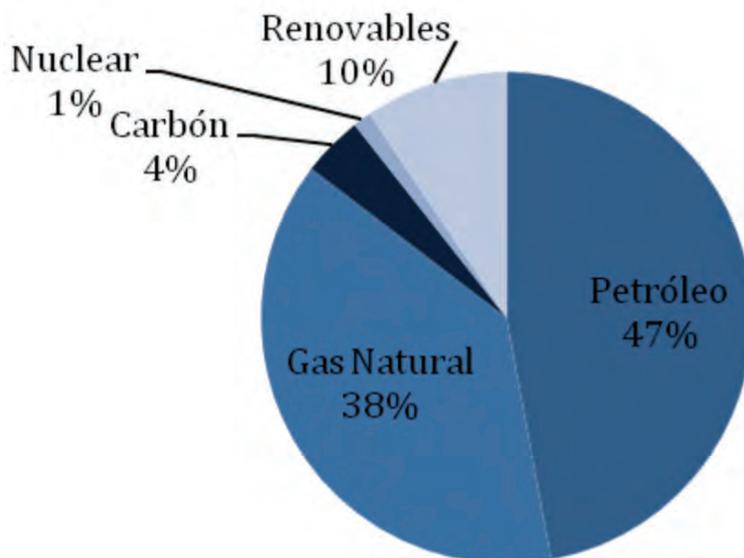


Figura 2. Consumo de energía primaria en México en 2008 (SENER, 2009).

La leña es consumida por alrededor de 28 millones de personas en el medio rural, principalmente para la cocción de alimentos y también para pequeñas industrias como tabiquerías, mezcaleras, panaderías y tortillerías. La figura 3 muestra la distribución geográfica de los usuarios domésticos de leña en México; se observa que la gran mayoría se localiza en el Centro-Sur del país. El carbón vegetal se utiliza principalmente para preparación de alimentos, y en menor proporción en pequeñas industrias. El bagazo de caña se usa como combustible en los ingenios azucareros (Enríquez Poy, 2009).

En la actualidad, la mayoría de las tecnologías utilizadas para el aprovechamiento energético de la biomasa en el país son ineficientes, lo que implica un desperdicio de recursos y de energía, además de generar impactos negativos en el ambiente (Islas et al., 2007).

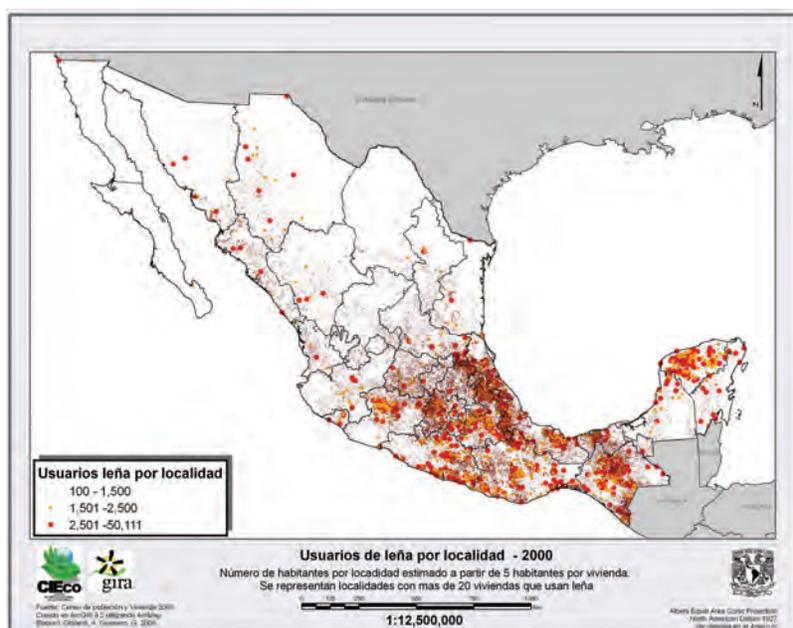


Figura 3. Usuarios de leña por localidad.

3.2. Potenciales

En México existe un gran potencial de recursos biomásicos para producir biocombustibles líquidos, biocombustibles sólidos y biogás (Figura 4). En un estudio detallado sobre la disminución de emisiones de carbono en México financiado por el Banco Mundial, donde participaron miembros de la REMBIO, se evaluó el potencial energético de las principales fuentes de bioenergía disponibles en el país (Johnson et al., 2009). Se estimó que el potencial técnico de la bioenergía equivale a 3,569 PJ/a, o el 42% del consumo de energía primaria en 2008.

Tipo y origen	Unidades	Cantidad	PJ/a	%
Madera de manejo de bosques nativos	MtMS/a	101	1,515	42%
Madera de plantaciones de <i>Eucalyptus</i>	MtMS/a	26	345	10%
Residuos industriales de cultivos dedicados ² (bagazo y otros)	MtMS/a	29	431	12%
Residuos agrícolas de cosechas (RAC)	Mt/a	13	227	6%
Residuos de cultivos alimenticios y forrajeros	MtMS/a	15	114	3%
Residuos agrícolas de cosechas de cultivos dedicados	MtMS/a	8	86	2%
Residuos industriales de la industria forestal	MtMS/a	3	63	2%
Caña de azúcar para etanol	Mt/a	206	338	9%
Sorgo grano para etanol	Mt/a	—	202	6%
Aceite de palma aceitera para biodiesel	Mt/a	13	121	3%
<i>Jatropha curcas</i> para biodiesel	Mt/a	4	57	2%
Residuos del ganado para biogás	Mt/a	35	35	1%
Residuos sólidos municipales para biogás	—	—	35	1%
Total			3,569	100%

Tabla 2. Potenciales de producción sostenible de biomasa para energía.

² Los cultivos dedicados considerados en el estudio son: *Jatropha curcas*, palma aceitera, caña de azúcar, sorgo grano y plantaciones de *Eucalyptus*.

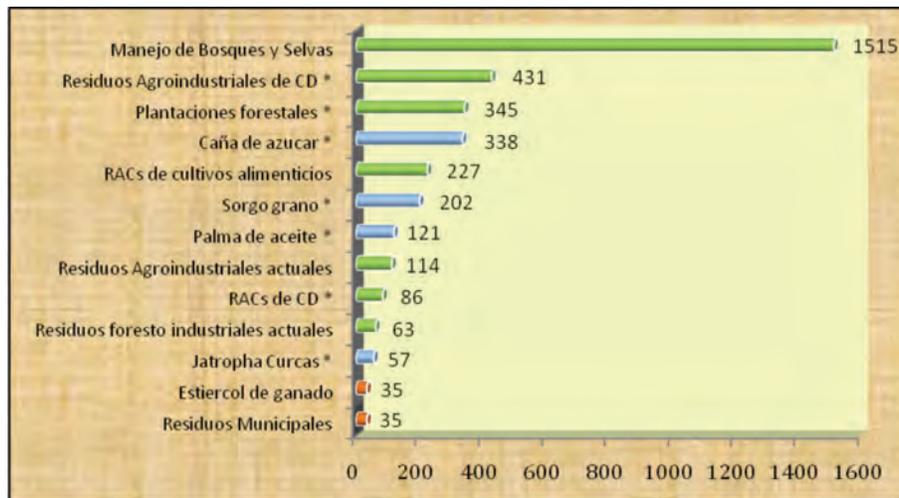


Figura 4. Potenciales de producción sostenible de bioenergía en México, en PJ/a de energía final.

Las barras en verde corresponden a biomazas sólidas, las azules a bioenergéticos líquidos y la naranja a biogás.

* Potencial técnico posible de desarrollar; CD: cultivos dedicados; RAC: residuos agrícolas de cosechas.

La madera representa el 54% del potencial total con 1,923 PJ/a, de los cuales 1,515 PJ/a provienen del manejo de los bosques nativos, mientras que 345 PJ/a podrían obtenerse si se establecen 2.9 Mha de plantaciones forestales (eucaliptos). Para cultivos dedicados destinados a biocombustibles líquidos de primera generación el total del potencial técnico es de 718 PJ/a, de los cuales 540 PJ/a son de etanol y 178 de biodiesel. El total del potencial de los residuos actualmente disponibles es de 341 PJ/a. Existe además un potencial de 35 PJ/a de estiércol de ganado y 35 PJ/a de residuos municipales aptos para producir biogás. Aunque es un potencial menor, su desarrollo es muy importante porque está inmediatamente disponible y su aprovechamiento ayuda a reducir la contaminación de las aguas y la atmósfera.



Figura 5. Potencial de producción sostenible de cultivos dedicados en México.

Es importante destacar que para estimar el potencial de cultivos dedicados, se incluyeron sólo las tierras aptas para cada cultivo en particular, pero se excluyeron todas las tierras que a) actualmente se utilizan para la agricultura, b) están cubiertas por bosques, selvas y otras coberturas naturales, c) pertenecen a áreas de conservación, d) son no cultivables por tener pendientes superiores del 4 al 12%, dependiendo del cultivo, y e) necesitan riego. La figura 5 muestra que la mayor parte de las áreas con potencial para establecer cultivos dedicados se encuentra en las tierras bajas y planas de la vertiente del golfo de México, donde la precipitación es media o alta, no es necesario el riego y hay tierras no ocupadas por la agricultura.

Para estimar el potencial de madera de manejo sostenible, sólo se contabilizó el incremento medio anual (IMA) de los bosques y selvas nativos, fuera de áreas de conservación, con pendientes menores al 30% y a distancias de hasta 3 km de caminos existentes. Para esta opción existe potencial en todo el país, pero está más concentrado en las tierras altas de la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental y las tierras bajas de la península de Yucatán (Figura 6). Las productividades estimadas varían entre 1 y 4 tMS/ha/a, y para usos energéticos se consideran solamente las especies y partes de árboles no utilizables para madera de aserrío, postes y celulosa.

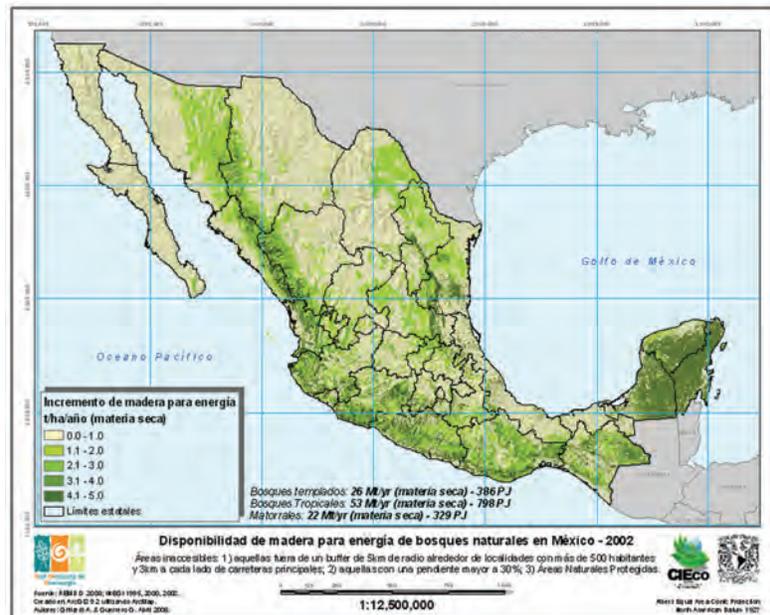


Figura 6. Potencial sostenible de madera para bioenergía en bosques y selvas nativas.

4. APLICACIONES DE LA BIOENERGÍA

La figura 7 esquematiza las rutas o vías de conversión de la biomasa a bioenergéticos. Se observa que diferentes rutas permiten satisfacer múltiples aplicaciones y diferentes usos finales, a partir de cualquier tipo o fuente de biomasa. Los recuadros de la parte superior del gráfico representan las principales tecnologías de conversión actualmente maduras. Otras tecnologías en desarrollo son: torrefacción, síntesis Fischer-Tropsch (FT), hidrólisis enzimática de lignocelulosa (para más detalles sobre estos aspectos consultar el CT₂ *Biocombustibles Avanzados* [Sandoval, 2010]).

Los cultivos ricos en azúcares y almidones pueden ser utilizados como materia prima para producir etanol vía fermentación. Los cultivos ricos en aceites y las grasas de origen animal pueden utilizarse como materia prima para producir biodiesel. El etanol y el biodiesel se utilizan para la sustitución parcial o total de gasolina y diésel en los vehículos automotores.

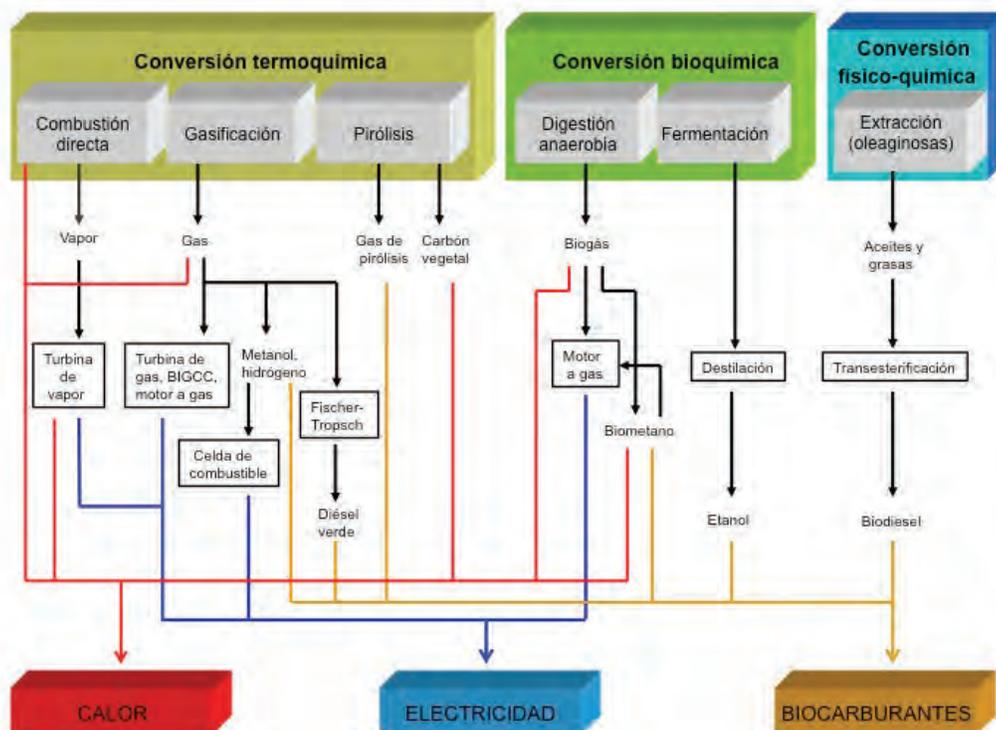


Figura 7. Principales rutas y tecnologías de conversión de la biomasa a energía útil.

De la biodigestión anaeróbica de residuos orgánicos se puede obtener biogás, y gas de síntesis por medio de la gasificación térmica de biomasa. Ambos pueden generar calor, electricidad o cogenerar calor y electricidad a la vez. Además, del gas de síntesis puede obtenerse gasolina o diésel mediante el proceso FT.

Existen también aplicaciones rurales para la biomasa, como la leña que se utiliza principalmente en la generación de calor para la cocción de alimentos. La forma tradicional de hacerlo se basa en tecnologías rudimentarias como el fogón de tres piedras, por lo que se han desarrollado tecnologías que mejoran la eficiencia de su uso, llevando a mejoras en la calidad de vida de los habitantes rurales. En el sector rural también se usa la leña para producir carbón vegetal a partir de un proceso de pirólisis que genera un combustible de menor peso y mayor contenido energético.

La leña, los residuos agrícolas y algunos residuos sólidos municipales pueden utilizarse con la tecnología de combustión directa para la generación de calor, electricidad o cogeneración a mediana y gran escala. Algunas de estas materias primas requieren tratamientos previos como reducción de tamaño, secado o transformación a pellets. A continuación se detallan las aplicaciones más relevantes en el contexto de México.

4.1. Biocombustibles líquidos para el transporte (bioetanol y biodiesel)

Se espera que el sector transporte aumente su demanda en un 60% a nivel global en el año 2030. Como sustitutos de la gasolina y el diésel están el bioetanol y el biodiesel, que pueden mitigar las emisiones de GEI y contribuir a la creación de empleos y al desarrollo del sector rural. Estos biocombustibles podrían alcanzar el 12% de la demanda energética del sector transporte en los países desarrollados y el 8% en los países en desarrollo (Fischer et al., 2009).

4.1.1. Bioetanol

El alcohol etílico o etanol puede obtenerse químicamente a partir del etileno, un producto de la refinación del petróleo y del etano, un constituyente del gas natural; o bioquímicamente a través de azúcares fermentables, derivados del azúcar, almidón, celulosa y polisacáridos; este último es etanol de origen biológico o bioetanol (Figura 8). Se utiliza el etanol hidratado en automóviles flex-fuel y el etanol anhidro en mezclas del 5% al 85% en volumen con gasolina, en motores convencionales. En mezclas E5 y E10 substituye a oxigenantes y antidetonantes como el MTBE y el TAME.



Figura 8. Materias primas para bioetanol.

Situación mundial

Datos de la Asociación de Combustibles Renovables (RFA, por sus siglas en inglés) señalan que la producción mundial de etanol se incrementó de 17,000 MI en el año 2000 a 65,614 MI en 2008 (RFA, 2009). Las dos materias primas más utilizadas son el maíz y la caña de azúcar (alrededor del 90% del total); Estados Unidos y Brasil son los mayores productores. El resto proviene de China y Europa, donde se obtiene de trigo, maíz y remolacha azucarera.

Situación en México

Al año 2011, México no produce etanol anhidro para combustible, a pesar de que el potencial técnico es de 20,000 MI/a a partir de caña y de 3,740 MI/a a partir de sorgo grano (ver Capítulo 3). El etanol hidratado (96°) para bebidas, cosméticos y medicamentos se obtiene de la melaza de caña de azúcar. Según la Unión Nacional de Cañeros (UNC), en la zafra 2008/2009 se obtuvieron 1.49 Mt de melaza, de las cuales el 3.6% se destinó a la fabricación de 14.5 MI de etanol (UNC, 2009) y el resto se exportó principalmente a los EE.UU. Con la melaza exportada se podrían producir 399 MI de etanol/a. En México hay una planta de etanol de maíz (Destilmex), que no opera porque no hay excedentes nacionales de maíz –como es requerido por la ley– y porque el precio fijado por Petróleos Mexicanos (PEMEX) no compensa el costo de producción.

Tecnologías de producción y aspectos de sustentabilidad

El etanol de primera generación se obtiene por fermentación de azúcares o almidones (previamente hidrolizados), con un rendimiento máximo del 54% en peso. Esta tecnología está bien establecida pero requiere mucha energía en la etapa de destilación, que en el caso de caña de azúcar se puede obtener del bagazo; pero si se utilizan granos o cultivos azucarados no fibrosos, debe obtenerse de otra fuente. Los costos de producción del etanol de primera generación se encuentran entre 14.8 y 31.8 USD/GJ (tabla 3). El principal componente es el costo de la materia prima (45% al 70% del total). El etanol de caña de azúcar producido en Brasil tiene el costo de producción más competitivo, por el bajo costo de producción de caña, sumado al desarrollo de tecnologías y sistemas de gestión eficientes iniciado en el decenio de 1970, lo que ha permitido reducir los costos de producción industrial.

En cuanto a la mitigación de GEI por el uso de etanol de primera generación como sustituto de la gasolina, se ha tenido un debate muy extenso y se han realizado un gran número de evaluaciones de ciclo de vida. En general los resultados demuestran que el etanol de azúcares puede tener alta mitigación, aunque esto depende mucho de factores como el cambio en el uso de suelo, las prácticas agrícolas y los combustibles empleados en el procesamiento industrial. En cambio, el etanol de almidones (como el maíz) tiene mitigación baja y hasta negativa en algunos casos, por lo cual su uso puede generar más emisiones que las de la gasolina que sustituye (tabla 3).

Las tecnologías de segunda generación, a partir de materiales lignocelulósicos se basan en la conversión de la hemicelulosa y celulosa de la biomasa en azúcares fermentables. Permiten usar una mayor variedad de materias primas no alimenticias como rastrojos, residuos de madera, pastos de crecimiento rápido, etc. El uso de residuos evita el uso de tierras agrícolas, no compite con la producción de alimentos y genera menores emisiones de GEI en su ciclo de vida. Sin embargo, estas tecnologías están todavía en desarrollo y tienen costos altos, no competitivos con los de primera generación, con alta participación (35% a 50%) de costos de capital (IEA, 2011).

Materia prima	Origen	Estatus de la tecnología	Costo de producción (USD/GJ)	Rendimiento (l/ha) ^a	Mitigación de GEI ^{*a}
Biomasa rica en azúcares	Caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha azucarera	Bien establecida	14.8- 31.8 ^b	4,000-4,900	20% a 110%
Biomasa rica en almidones	Maíz, trigo, sorgo grano	Bien establecida	17.5-40.7 ^a	2,600	-(10%) a 80%
Biomasa rica en celulosa y lignocelulosa	Residuos agrícolas, de bosques, de aserradero, de papel; madera y pastos de crecimiento rápido	En desarrollo	76.4 ^a	3,100	50% a 120%

Tabla 3. Recursos, tecnologías, costos (USD/GJ), uso de tierra y mitigación de GEI para la obtención de etanol.

* Mitigación evaluada en el ciclo de vida con respecto a la gasolina (que incluye la producción agrícola, transportes, procesamiento industrial y distribución). Los valores negativos significan que se tienen emisiones en lugar de mitigación. Los valores mayores a 100% indican que además de mitigación hay captación de carbono, ^a (IEA, 2011), ^b (Chum et al, 2011).

4.1.2. Biodiesel

El biodiesel es una mezcla de esteres metílicos de ácidos grasos que puede sustituir al diésel y se obtiene de la reacción de aceites vegetales o grasas con metanol. Como subproducto se obtiene glicerina. El biodiesel es usado principalmente en Europa en mezclas con diésel al 5% o 20% (B5, B20) o como biodiesel puro (B100). En Brasil y Argentina se utiliza el B5 como mezcla obligatoria.

Situación mundial

La producción de biodiesel se incrementó de 1,000 Ml en el año 2000 a 11,000 Ml en 2007. Alrededor de la mitad de la producción global de biodiesel proviene de Europa, mientras que el resto se divide entre Estados Unidos, Brasil, Argentina, Malasia e Indonesia, entre otros. Las materias primas más utilizadas son aceites de colza, soya, girasol y palma aceitera.

Situación en México

En México hay dos experiencias de producción de biodiesel a escala industrial (ver CT1 *La bioenergía en México: estudios de caso* [Prehn y Cumana, 2010]):

Biocombustibles Internacionales SA de CV, en Nuevo León, tuvo durante varios años una planta de 50,000 l/d a partir de sebo de res y aceites vegetales usados. El biodiesel era utilizado por PEMEX Refinación como aditivo para la lubricidad del diésel de ultra bajo azufre. Desafortunadamente la planta fue cerrada en meses recientes debido a que PEMEX Refinación decidió dejar de comprar biodiesel como lubricante. Esto habla de la dificultad de armar proyectos a largo plazo en el país cuando no se tiene un marco institucional sólido o coherente entre las distintas instancias gubernamentales.

Chiapas Bioenergético tiene dos plantas de biodiesel a partir de aceite de palma africana y de aceites vegetales usados (Tuxtla Gutiérrez con 2,000 l/d y Puerto Chiapas con 28,000 l/d), y propone establecer 20,000 ha de *Jatropha curcas* para el año 2012. Ese biodiesel se utiliza en mezclas B5 y B20 en 40 vehículos de transporte público de Tuxtla Gutiérrez y Tapachula.

Recientemente se ha discutido la posibilidad de producir y utilizar bioturbosina en nuestro país. Aeropuertos y Servicios Auxiliares en México (ASA) realizó una serie de talleres llamados "Plan de vuelo hacia los biocombustibles sustentables de aviación en México" para discutir esta posibilidad. En ellos se establecieron las metas de sustituir el 1% de la producción actual de turbosina para 2015 (40 Ml/a) y el 15% para 2020 (más de 700 Ml). Las posibles materias primas serían los aceites de *Jatropha*, higuera y algas, y la bioturbosina se producirá por medio de un proceso llamado "hidro-craqueo" (Figura 9). En abril de 2011 se llevó a cabo el primer vuelo demostrativo con bioturbosina producida a partir de aceite de *Jatropha* cultivada en Chiapas y en julio el primer vuelo comercial (REM, 2011).



Figura 9. Materias primas para biodiesel.

Tecnologías y aspectos de sustentabilidad

La tecnología para producir biodiesel de primera generación está bien establecida. El proceso inicia generalmente con la extracción del aceite por medios mecánicos (prensado), químicos (por solventes) o por una combinación de éstos. Después, el aceite se transesterifica con metanol en presencia de un catalizador para formar biodiesel y glicerina. Las materias primas más empleadas son la soya, colza, girasol, palma aceitera, aceites vegetales usados y grasa animal.

El costo de producción va de 4.2 a 50 USD/GJ, y la materia prima representa el costo principal. La mitigación de GEI con respecto al diésel varía entre 20% y 80%, de acuerdo a las prácticas agrícolas y a los combustibles utilizados en el procesamiento industrial.

El biodiésel de segunda generación es una tecnología en desarrollo que utiliza como materia prima cualquier tipo de biomasa vegetal. El proceso biomasa a líquido (del inglés *biomass to liquid* [BtL]) o FT implica la gasificación para obtener un gas de síntesis rico en hidrógeno y monóxido de carbono que es catalíticamente convertido en una gran variedad de hidrocarburos líquidos, entre ellos el diésel sintético o diésel verde (IEA, 2011). El biodiésel de tercera generación podría obtenerse de microalgas que producen aceite. Estas algas tienen un alto potencial productivo, pueden desarrollarse en tierras no cultivables y crecen en agua fresca, salada y de desecho. Su cultivo requiere alta insolación, disponibilidad de agua y nutrientes (IEA, 2011).

Materia prima	Origen	Estatus de la tecnología	Costo de producción (USD/GJ)	Rendimiento (l/ha) ^a	Mitigación de GEI ^{*a}
Aceites vegetales y grasas	Soya, colza, girasol, palma aceitera, aceites vegetales usados, grasa animal	Bien establecida	4.2-50 ^c	700-3,600	20% a 80%
Biomasa rica en celulosa y lignocelulosa	Residuos agrícolas, de bosques, de aserraderos, de papel; madera y pastos de crecimiento rápido	En desarrollo (BtL)	38.8 ^a	3,100	50% a 120%
Microalgas	Microalgas	En desarrollo	28.8-190 ^b	100,000 ^b	—

Tabla 4. Recursos, tecnologías, uso de tierra, costos (USD/GJ) y mitigación de GEI para la obtención de biodiésel.

* Mitigación evaluada en el ciclo de vida con respecto al diésel de petróleo (que incluye la producción agrícola, transportes, procesamiento industrial y distribución), ^a (IEA, 2011), ^b (Campbell et al., 2011), ^c (Chum et al., 2011).

4.1.3. Certificación de la sustentabilidad de los biocombustibles líquidos

Debido a los riesgos a la sustentabilidad que podría presentar la producción de biocombustibles si no se hace de manera correcta, se han desarrollado diversas iniciativas para certificar los biocombustibles líquidos producidos de manera sustentable; entre ellos el RSB³ y el GBEP⁴, que fijan principios y criterios como: conservación de la biodiversidad, no deforestación, mitigación de GEI, buen uso de los recursos hídricos, respeto a los derechos humanos y de los trabajadores, entre otros. En México la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) está desarrollando la norma voluntaria NMX para la certificación de la producción de biocombustibles líquidos de origen vegetal basada en los principios de RSB.

4.2. Biocombustibles gaseosos

De la biomasa pueden obtenerse mezclas de gases combustibles (CH₄, CO, H) por diferentes vías. Estas mezclas contienen CO₂, que es un gas no combustible, por lo cual su poder calorífico es inferior al del gas natural. Sin embargo, tienen aplicaciones interesantes en la generación de vapor y electricidad, como combustible doméstico, y eliminando el CO₂ pueden substituir directamente al gas natural.

³ <http://rsb.epfl.ch/>

⁴ <http://www.globalbioenergy.org/>

4.2.1. Biogás

El biogás es una mezcla conformada principalmente por CH₄ (50%-70%) y CO₂ (25%-40%), que se genera por el proceso biológico de biodigestión anaerobia, que consta de una serie de reacciones bioquímicas en la que residuos orgánicos son degradados o consumidos por un conjunto de microorganismos. La acción de los microorganismos produce calor, mismo que se usa para mantener el proceso en su temperatura ideal (35 C). En el proceso también se generan efluentes líquidos y sólidos que pueden ser utilizados como fertilizante orgánico.

Componente	Concentración
Metano (CH ₄)	50-75 %(vol)
Dióxido de carbono (CO ₂)	25-45 %(vol)
Vapor de agua (H ₂ O)	2-7 %(vol)
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	20-20.000 ppm
Nitrógeno (N ₂)	< 2 %(vol)
Oxígeno (O ₂)	< 2 %(vol)
Hidrógeno (H ₂)	< 1 %(vol)

Tabla 5. Gases presentes en el biogás.

Situación mundial

Las mayores aplicaciones del biogás se han dado en China, India y Europa. China desarrolló un programa que inició en los años setenta con un resultado de más de 7 millones de digestores, aunque sufrió de varias fallas (Boyle et al., 2004). Una iniciativa posterior con mejor tecnología e infraestructura logró la instalación y operación exitosa de 5 millones de biodigestores domésticos hasta mediados de los años noventa. En India se instalaron 2.8 millones de biodigestores y se identificó un potencial para instalar 12 millones más (Boyle et al., 2004). En Europa en 2010 se tenía una capacidad instalada de 2,300 MWeI en plantas de biogás, mismo que se espera aumente en 1,700 MWeI en los próximos cinco años (Ecoprog/Fraunhofer UMSICHT, 2010).

Situación en México

La SENER considera que existe un potencial de 3,000 MW para generación de energía eléctrica con biogás proveniente de la recuperación y aprovechamiento del metano a partir de residuos animales, residuos sólidos urbanos (RSU) y tratamiento de aguas negras (SENER, 2010). En 2010 existían en México, 721 biodigestores, de los cuales 367 en operación y 354 en construcción (FIRCO, 2011). De éstos, 563 biodigestores son financiados bajo el esquema del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), 154 con apoyo del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) y 4 biodigestores a través de la Iniciativa Metano a Mercados. El 8% de las granjas porcícolas cuentan con biodigestores, de los cuales el 20% dispone de motogeneradores con 70% en funcionamiento. La potencia total instalada es de 5.7 MWeI.

Para el aprovechamiento de biogás obtenido a partir de rellenos sanitarios, una de las experiencias más importantes en México es la de Bioenergía de Nuevo León, la primera a nivel nacional. El sistema está compuesto de 7 motogeneradores de 1 MW cada uno. La planta fue diseñada de manera modular para permitir futuras adiciones de capacidad.

Cualquier biomasa húmeda y desmenuzada se puede degradar anaeróbicamente con facilidad. Las fuentes más comunes de biogás son substratos agropecuarios y rellenos sanitarios.

Biodigestores para sustratos agropecuarios: son depósitos donde se lleva a cabo la biodigestión de biomasa en ausencia de oxígeno. Las materias primas son: excrementos (purín y estiércol) de cerdo y de res, residuos de las cosechas, lodos de estaciones depuradoras de agua, entre otros. Los digestores varían su tamaño en un rango desde 1 a 10 m³ para pequeñas granjas hasta más de 1,000 m³ para grandes instalaciones (Boyle et al., 2004). También existen biodigestores lagunares, que se utilizan ampliamente en granjas.

En un digestor bien manejado se pueden producir de 200 a 400 m³ de biogás por tonelada de materia fresca (tMF), aunque este valor varía mucho de acuerdo con la naturaleza de la materia prima digerida. En Europa se ha probado con múltiples desechos en el mismo digestor (codigestión). La unidad que se utiliza comúnmente es la "unidad ganadera", que equivale a 500 kg de peso vivo del animal y permite comparar los rendimientos de biogás de distintos tipos de animales. Una unidad ganadera produce entre 400 y 500 m³ de biogás al año. El biogás puede ser mejorado a biometano, un gas con calidad equivalente a la del gas natural, que puede ser mezclado con este último y ser usado en vehículos.

Materias primas	Purín cerdo	Purín vacuno	Estiércol cerdo	Estiércol vacuno	Ensilado de maíz
Generación de biogás (m ³ /tMF)	19	22	94	81	240
Energía térmica (kWh/tMF)	94	132	564	486	1,440
Electricidad (kWh/tMF)	38	53	226	194	576

Tabla 6. Productividad de biogás para diferentes materias primas.

Poder calorífico medio = 6 kWh/m³ de biogás; eficiencia de conversión a electricidad = 40%.

Rellenos sanitarios: en este caso el biodigestor es el relleno en sí, donde la extracción del biogás se lleva a cabo mediante la perforación de pozos verticales. El biogás es conducido mediante una red superficial de tuberías. La digestión es más lenta que en los biodigestores agropecuarios y pueden requerirse semanas o hasta años para su degradación completa. Los rendimientos (en toda la vida del relleno) varían de acuerdo a la composición de los desechos, pero teóricamente está en el rango de 150-300 m³ de biogás/t de desecho (Boyle et al., 2004). El gas generado se utiliza para la producción de electricidad por medio de motores de combustión interna y con turbinas de gas.

El biogás puede ser utilizado en celdas de combustible⁵, sin embargo, la tecnología se encuentra aún en desarrollo (Pérez et al., 2008).

Tecnologías y aspectos de sustentabilidad

La biodigestión es una alternativa para disminuir o eliminar flujos de materia orgánica proveniente de establos, granjas y residencias humanas hacia los cuerpos de agua, evitando problemas sanitarios y de contaminación. También representa oportunidades de ahorro económico para los productores agropecuarios, ya que se pueden utilizar los efluentes sólidos y líquidos de la digestión como fertilizantes (Figura 10). Si el biogás se utiliza como energético, se generan calor y electricidad evitando el uso de combustibles fósiles y los costos correspondientes. Además crea empleos, ya que se estima que por cada TWh se generan 560 puestos de trabajo (Lovrencec, 2010).

⁵ Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos capaces de convertir directamente la energía de la oxidación de un combustible por un oxidante, en energía eléctrica, liberando agua y calor.



Figura 10. Relleno sanitario Prados de la Montaña: captación y quema de biogás; modelo de biodigestor.

El uso de biogás para generación eléctrica mitiga emisiones GEI en un rango del 30% al 90% en comparación con una referencia de generación con combustibles fósiles (80% carbón y 20% gas natural) (Schubert et al., 2009). El costo de cogeneración con biogás se encuentra en un rango de 3 a 10 USDcts/kWh (Chum et al., 2011).

4.2.2. Gas de síntesis

El proceso de gasificación convierte materiales que contienen carbono en un gas, llamado gas de síntesis, compuesto principalmente de monóxido de carbono e hidrógeno. Este gas puede utilizarse para la generación de calor o electricidad, la producción de diésel sintético, metanol o hidrógeno que puede ser utilizado en celdas de combustible. Esta es una tecnología dirigida al aprovechamiento de combustibles de desecho con un bajo valor comercial y que además puede funcionar con una amplia gama de materias primas.

Situación mundial

Actualmente la gasificación de biomasa tiene una capacidad instalada de 1.4 GW_{th} en aplicaciones industriales, co-combustión y cogeneración (Chum et al., 2011). Muchos países europeos, Canadá y Nueva Zelanda, han desarrollado plantas comerciales y demostrativas, desde pequeña escala (< 1 MW) hasta media escala (100 MW). En particular destacan países como Alemania, Holanda y Suecia donde se construyen las plantas con las más altas potencias instaladas (eléctricas y térmicas) (Knoef et al., 2007).

Situación en México

En México sólo se tiene documentada una experiencia de gasificación a nivel experimental, la cual se encuentra en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la planta está diseñada para funcionar con diversos tipos de biomasa (Masera et al., 2006).

Tecnologías y aspectos de sustentabilidad

En la gasificación se somete la biomasa a altas temperaturas, con una cantidad limitada de O₂. El resultado es un gas con un alto contenido calorífico, llamado gas de síntesis o syngas (normalmente formado por 20% de CO y 17% de H₂). La eficiencia del proceso varía entre 40 y 70% (porcentaje de la energía que originalmente estaba contenida en la biomasa y que después del proceso está contenida en el gas). En algunos casos se realiza además una limpieza del gas.

Comúnmente en los sistemas de gasificación a pequeña escala (< 300 kW) el gasificador se acopla a motogeneradores eléctricos, motobombas, compresores; mientras que a mediana escala (300-4,000 kW), se hace viable la cogeneración de electricidad y calor. Para emplear el syngas en vehículos se requiere su conversión a combustibles como el metanol, diésel (a partir del proceso FT). El hidrógeno puede ser separado y utilizado en celdas de combustible (Masera et al., 2006).

Una aplicación a gran escala es la gasificación integrada a ciclo combinado (IBGCC, por sus siglas en inglés). Esta tecnología consiste en limpiar el gas que sale del gasificador y quemarlo en una turbina de gas, donde se produce electricidad. El calor de los gases de escape se recupera en una caldera (HRSG, por sus siglas en inglés), donde se genera vapor que se usa en una turbina para la generación de electricidad. Una parte del gas de escape de la turbina se deriva a la unidad de separación de aire (ASU, por sus siglas en inglés), para ser inyectado nuevamente al gasificador.

Tecnología	Materia prima	Costo de producción (USDcts/kWh)
Gasificación, pequeña y mediana escala	Residuos sólidos municipales	3.3-9.4
Gasificación, pequeña escala	Madera/residuos agrícolas	10.0-14.0
Gasificación, pequeña y mediana escala	Pellets de madera	5.0-13.0

Tabla 7. Costos de la generación eléctrica con gasificación. (Chum et al., 2011).

Los sistemas de gasificación para generar energía tienen ventajas ambientales como la mitigación de GEI, principalmente cuando la biomasa utilizada está conformada por residuos. De igual forma, los sistemas de gasificación pueden reducir las emisiones de azufre, ya que es posible retirarlo antes del proceso de combustión. Los costos de producción de electricidad con gasificación se presentan en la tabla 7.

4.3. Biocombustibles sólidos para aplicaciones residenciales y comerciales

En México son dos los biocombustibles sólidos más utilizados en el sector residencial y comercial: el carbón vegetal y la leña. A continuación presentamos un panorama general de cada uno de ellos.

4.3.1. Carbón vegetal

El carbón vegetal se produce con madera proveniente de varias fuentes incluyendo leña de cambios de uso del suelo, del manejo de la regeneración de árboles como el encino y otros en bosques naturales y de plantaciones forestales (Figura 11). Alrededor del 20% del peso original de la madera se convierte en carbón vegetal, mientras que el resto de la masa es liberada en forma de vapor y gases; así el carbón vegetal tiene alrededor del doble del contenido energético y sólo una cuarta parte del peso de la madera original, lo que hace más fácil su transportación y almacenaje.



Figura 11. Horno de tierra tradicional para producir carbón vegetal; producción y almacenamiento de carbón para venta.

Situación mundial

La producción de carbón vegetal se incrementó a nivel global en un 50% entre 1989 y 2008, África y América del Sur son los principales consumidores con alrededor del 50 y 30% del total de la producción respectivamente (FAO, 2010). Debido a que el carbón vegetal se usa principalmente para la cocción de alimentos, la migración del sector rural hacia las zonas urbanas en África ha contribuido al aumento de su uso, ya que es más fácil de transportar que la leña, además de ser una fuente importante de ingresos para poblaciones rurales y periurbanas (FAO, 2010).

Situación en México

En México, el carbón vegetal es un producto de origen rural que se comercializa en los centros urbanos. El uso rural del carbón es casi inexistente. Se estima un consumo anual de 650,000 t, equivalentes a casi 3.2 Mt de leña (4.3 Mm³), colocando al carbón como el segundo producto forestal maderable, sólo después de la leña. Esta estimación del consumo es 10 veces mayor que la producción legal, reportada por la SEMARNAT en el Anuario Forestal Nacional de 2005, lo que indica que el 91% del carbón consumido en México se produce sin autorización de la SEMARNAT (SEMARNAT 2006, tabla 8).

Alrededor del 68% del consumo lo realiza el sector residencial en forma muy esporádica, para la cocción de alimentos asados. El otro sector consumidor es el de venta de alimentos preparados, con 32% de la demanda estimada (tabla 8). Se calcula que alrededor del 70% de las familias urbanas (11 millones de familias) usan carbón. Este energético también se usa en pequeñas industrias, pero su consumo no ha sido cuantificado. El consumo de carbón tendrá un incremento en México debido a que la población urbana sigue creciendo. Se estima que en el año 2024 el consumo anual será de 792,000 t (Maser et al., 2010). La exportación de carbón llega a sólo 29,100 t/a (SEMARNAT, 2006).

Consumo de carbón vegetal por sector	SEMARNAT Anuario Nacional Forestal, 2006	Maser et al., 2010
Sector comercial en 2005 (Mt/a)	Sin datos	0.21
Sector residencial en 2005 (Mt/a)	Sin datos	0.44
Consumo total de carbón en 2005 (Mt/a)	0.06	0.65
Leña equivalente al carbón consumido (MtMS)	0.29	3.19

Tabla 8. Consumo de Carbón Vegetal en México según sectores y fuente.

La demanda de carbón se concentra en las grandes ciudades del norte y centro del país, como la Ciudad de México y Monterrey, con consumos anuales de entre 50 y 130 mil toneladas; así como Mexicali, Tijuana, Ciudad Juárez, Chihuahua, Hermosillo y Guadalajara, con consumos anuales de entre 13 y 55 mil toneladas (figura 12, Maser et al., 2010). La materia prima usada para producir carbón es leña con peso específico medio y alto, que proviene de bosques nativos y desmontes de acahuales para agricultura o ganadería. El Anuario Forestal Nacional reportó para 2005 que el 42% de la leña para carbón provino de especies comunes tropicales, 40% de encinos y 18% de otras latifoliadas. El 85% de la producción legal se concentra en los estados de Tamaulipas, Sonora, Campeche, Durango y Jalisco (SEMARNAT, 2006).

La producción de carbón es muy importante en términos económicos, ya que tiene un valor de casi 5,500 Mdp/a, equivalente a 260 mil salarios mínimos anuales. En las zonas rurales, por producción de carbón se genera el equivalente a 30 mil empleos directos permanentes, y se estima que el empaque y comercialización generan 100 mil empleos permanentes.

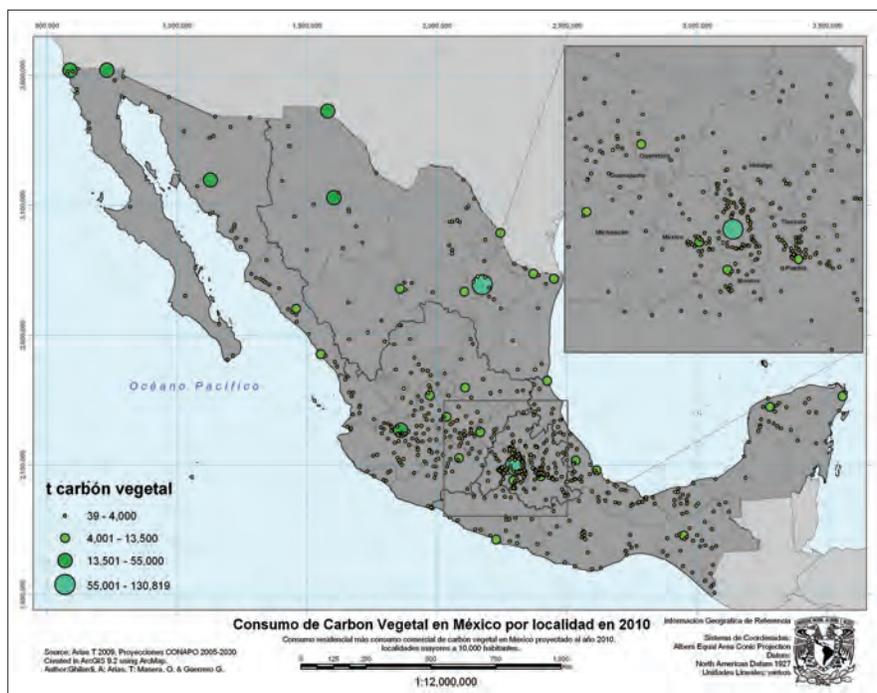


Figura 12. Consumo de carbón vegetal en México por localidad en 2010.

Tecnologías y aspectos de sustentabilidad

El carbón vegetal se produce fundamentalmente en hornos tradicionales de tierra, que tienen eficiencia del 12 al 20% del peso seco de la leña en la transformación de ésta a carbón. Para cubrirlos, se usa hojarasca de vegetación natural, que al quemarse reduce el aporte de nutrientes y materia orgánica a los suelos. Además, se provocan daños a la salud de los productores, por inhalación de gases tóxicos y exposición a altas temperaturas.

Se estima que las emisiones de CO₂e por la producción de carbón en México son de 5.7 Mt/a, sobre la base de que toda la leña proviene de aprovechamiento no renovable. Sin embargo, este valor deberá precisarse con información del origen de la leña con que se produce el carbón. Sobre la base de que el 80% de la leña se extrae de bosques y selvas bajo un esquema de no renovabilidad, las emisiones netas de la producción y uso de carbón serían de 4.6 Mt de CO₂e/a.

El carbón vegetal es un biocombustible de gran importancia por ser el segundo producto forestal en México por su volumen consumido, por la tendencia de aumento en su demanda y por ser generador de empleos rurales. Sin embargo, el hecho de que la mayor parte de la producción nacional no provenga de recursos forestales con programa de aprovechamiento, indica que su renovabilidad podría no estar asegurada. Para evitar este problema se recomienda que se faciliten los procedimientos para formular planes de manejo para aprovechamiento de carbón, así como los trámites para obtener las autorizaciones. Por otra parte, el uso de hornos de tierra tiene impactos negativos en las condiciones de salud y trabajo de al menos 30 mil productores rurales, por lo que se recomienda que las instituciones del sector rural se planteen un programa de fomento del uso de hornos mejorados.

Hornos mejorados

Las tecnologías mejoradas para producir carbón usadas en México son: hornos de ladrillo (Rabo Quente, Media Naranja, Colmena y Colina), hornos metálicos (TPI e INIFAP) y hornos de fosa o trinchera (Figura 13). El uso de hornos Rabo Quente, hornos de Colina y hornos metálicos ha sido promovida por la CONAFOR. Los hornos de fosa han sido adoptados espontáneamente entre productores privados.



Figura 13. Hornos mejorados para producir carbón vegetal.

El uso de hornos mejorados para producir carbón logra ahorros de leña del 25 al 50% con respecto a los hornos tradicionales, debido a que su conversión de leña a carbón en peso va del 25 al 35%. Además, ofrecen otros beneficios a los productores como son menores costos de producción con importantes aumentos en sus ingresos, mejora en las condiciones de salud y trabajo, y se evita la quema de hojarasca.

4.3.2. Leña para uso residencial

Los usos finales más difundidos de la leña dentro del sector residencial son la cocción, la calefacción y el calentamiento de agua. En los países en desarrollo estos usos se satisfacen normalmente mediante fogones abiertos, que aunque versátiles y accesibles a todos los consumidores, tienen una eficiencia energética muy baja y se traducen en altos consumos del recurso. Asimismo, los fogones abiertos causan altos niveles de contaminación en interiores de las viviendas y también emisiones considerables de gases de efecto invernadero. La leña proviene normalmente de árboles y arbustos localizados tanto en bosques naturales como en áreas agrícolas aledañas a los poblados. Adicionalmente a la leña, es común la utilización de residuos agrícolas (como los olotes) e incluso el estiércol. En muchos países industrializados el uso de leña también es muy amplio, particularmente para la calefacción de los hogares; en estos casos se utilizan calentadores y estufas más sofisticadas que cuentan con control de emisiones y otros aditamentos para minimizar la contaminación de interiores. Más adelante se hará el análisis del uso tradicional de la leña, ya que es el más relevante para el caso de México.

Situación mundial

Se estima que aproximadamente 2 mil 500 millones de personas en el mundo, especialmente en los países en desarrollo, requieren de leña para la cocción de alimentos (tabla 9). El mayor número de usuarios de leña se concentra en África y Asia y su uso como porcentaje del consumo de energía total aumenta en los países más pobres (FAO, 2010). Todas las zonas rurales del mundo presentan un uso intensivo de la leña. El consumo global de leña ha aumentado levemente en las últimas 2 décadas, como resultado de un balance entre el aumento de la población consumidora en los países más pobres y la penetración de otros combustibles domésticos como el gas LP y el queroseno en los sectores urbanos de países como India y China.

El uso de fogones tradicionales está asociado a efectos negativos como la contaminación y la no sustentabilidad en el uso de la leña. Debido a que la combustión de la leña es incompleta e incontrolada, se genera una gran cantidad de partículas y gases (entre ellos hidrocarburos aromáticos policíclicos, óxido nitroso y monóxido de carbono) que afectan la salud de los usuarios. Se estima que el uso de fogones resulta en 1.6 millones de muertes prematuras cada año, inclu-

yendo 900 mil niños menores de 5 años (ver CT3 *Estufas de leña*, Díaz et al., 2011). La sustentabilidad del uso de la leña puede verse afectada cuando la extracción de madera es mayor que la regeneración natural, lo que puede contribuir a la deforestación.

Región/país	N. de personas (millones)	Población (%)
África Subsahariana	575	76
Norte de África	4	3
India	740	69
China	480	37
Indonesia	156	72
Resto de Asia	489	65
Brasil	23	13
Resto de Latinoamérica	60	23
Mundo	2,528	52

Tabla 9. Número estimado de personas que dependen de la biomasa para la cocción de alimentos en países seleccionados (FAO, 2010).

Para reducir los impactos asociados al uso tradicional de la biomasa se han desarrollado estufas de leña (Díaz et al., 2011) que pueden entregar la misma cantidad de energía térmica pero con mucha menor demanda de leña que con los fogones tradicionales. Estas tecnologías además permiten reducir las emisiones de gases contaminantes, disminuir la presión sobre los recursos leñosos y contribuir al mejoramiento económico de los usuarios.

La tecnología y enfoques de difusión y monitoreo de las estufas de leña han tenido un desarrollo muy importante en estos últimos 10 años, en los que se han generado o creado nuevos diseños basados en optimización del proceso de combustión y transferencia de calor, gasificación en pequeña escala e incluso aplicaciones que utilizan el efecto termoeléctrico para generar electricidad y calor simultáneamente (Díaz et al., 2011). Algunas estufas que ya se difunden comercialmente, como las Turbococinas, reportan emisiones de contaminantes menores a las estufas de gas LP. El enfoque de los programas de estufas eficientes también ha cambiado, de estar centrados en evitar la deforestación, ahora se concentran en reducir los efectos en la salud y emisiones de GEI (García-Frapolli et al., 2010). Existe actualmente una iniciativa global⁶ para instalar 100 millones de estufas eficientes (mayormente de leña) de aquí al año 2020, más una serie de programas nacionales sobre el mismo tema.

Situación en México

Se estima que en México alrededor de 28 millones de personas dependen de la leña para satisfacer sus requerimientos energéticos para cocción, calefacción y otras necesidades (Masera et al., 2006). La leña también se usa en pequeñas industrias rurales como tabiquerías, panaderías, talleres alfareros, entre otras. En México se consumen alrededor de 18 millones de toneladas de materia seca de leña (tMSL) (Masera et al., 2010). Se estima que la demanda de leña disminuirá muy ligeramente en el país entre el presente y el año 2024 (Masera et al., 2010). La mayor parte de los usuarios se

⁶ www.cleancookstoves.org

concentran en las zonas indígenas y en los municipios que corresponden a las zonas Centro y Sur de México. En estas zonas el consumo total de leña continúa aumentando. En un análisis espacial, utilizando el modelo WISDOM (Ghilardi et al., 2007), se ubican 18 regiones críticas por el consumo de leña en México, en la que deberían concentrarse los esfuerzos de restauración y de difusión de estufas eficientes (figura 14).

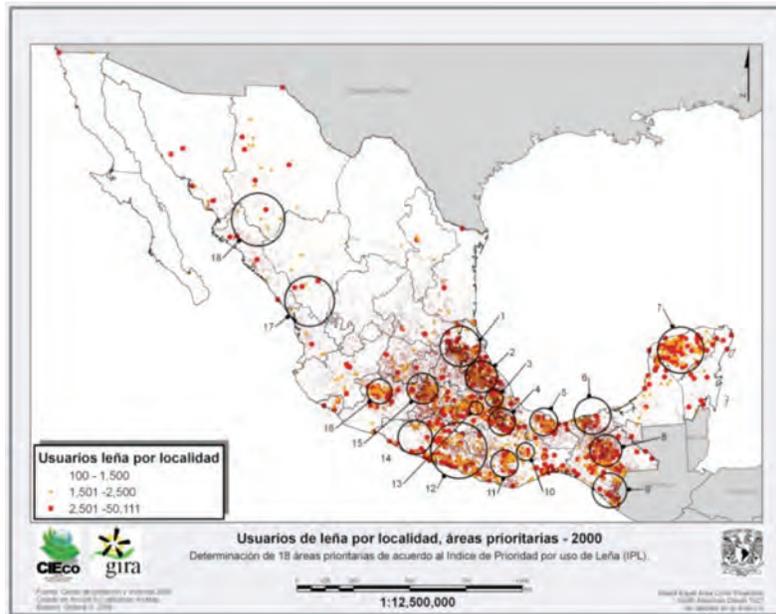


Figura 14. Zonas prioritarias por consumo de leña en México.

La derrama económica y el impacto social del uso de leña son también significativos, pues se calcula que el mercado actual de este combustible asciende a los 12,500 Mdp/a y genera 104 millones de jornales anuales, lo que representa 417 mil empleos (Riegelhaupt, 2009).

Aspectos de sustentabilidad y experiencias en México

Asegurar la sustentabilidad del uso de leña es clave para hacer de ella un recurso realmente renovable. Si bien se puede afirmar que su extracción no es responsable de la deforestación en nuestro país (Maser et al., 2006), existen regiones con una gran demanda de leña que podrían contribuir a la degradación y pérdida de los recursos forestales. Se requiere entonces combinar acciones dirigidas a mejorar el abasto y a disminuir la demanda del energético, priorizando las zonas en donde actualmente se ha ya detectado un alto impacto. Para aumentar la oferta de leña deben diseñarse programas de manejo forestal y agroforestal multipropósito que incluyan la dimensión energética y sean apropiados a las condiciones de los pequeños productores campesinos.

Para reducir la demanda, desde hace varios años se han ejecutado programas de estufas eficientes de leña. Como ya mencionamos, en la actualidad se vive una revolución tecnológica a nivel internacional, por lo que se espera tener en el futuro próximo modelos que permitan hacer de la leña un combustible compatible con un ambiente sano y limpio en las cocinas.

En México ya se difunden estufas de leña surgidas de procesos de innovación y desarrollo tecnológico que han incluido aspectos de diseño, durabilidad, eficiencia y aceptabilidad de los usuarios, de igual manera han considerado temas como la difusión y monitoreo. En general, cuentan con una cámara de combustión diseñada exprofeso, con hornillas secundarias (o área adicional de cocinado), y con una chimenea que conduce el humo y las emisiones nocivas hacia

fuera de la casa. Se cuenta con información técnica amplia y confiable de 2 modelos de estufa, datos obtenidos tanto en condiciones de laboratorio como en condiciones de uso (en viviendas): la estufa Patsari y la estufa ONIL (Díaz et al., 2011) (Figura 15). Estos estudios han establecido que las estufas eficientes de leña permiten reducir más del 50% del consumo de leña, 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero, 80% de la contaminación en interiores y 30% del riesgo de contraer una enfermedad respiratoria con respecto a los hogares que utilizan fogones tradicionales (para más detalles sobre estos aspectos consultar el CT3 *Estufas de leña*, Díaz et al., 2011).



Figura 15. Diversos modelos de estufas de leña.

Los precios de estas nuevas estufas varían en función del modelo, pero se encuentran generalmente entre 1,000 y 2,000 pesos, lo que implica tiempos de retorno de la inversión aproximadamente de 6 meses a un año para las familias que compran el combustible. Sin embargo los precios de las estufas son altos para la mayoría de las familias rurales, por lo que se necesitan esquemas de financiamiento o incentivos. Desde el punto de vista económico, y tomando en cuenta los distintos cobeneficios ambientales y a la salud mencionados anteriormente, estas estufas representan una intervención extremadamente costo efectiva, con relaciones beneficio/costo de 10/1 hasta 25/1 (García-Frapolli et al., 2010).

A pesar de todas estas ventajas, los impactos de los programas de difusión de estufas de leña son todavía muy limitados en nuestro país, debido a la baja prioridad que ha recibido el tema. Es hasta el año 2006 cuando el Gobierno Federal lanza un Programa Nacional de Estufas Rurales con la meta explícita de mitigar los gases de efecto invernadero, y se decide instalar 600 mil estufas en todo el país, como parte de los compromisos del Programa Especial sobre el cambio climático (PECC). De esta cantidad, el PECC especifica que 500 mil son responsabilidad de la SEDESOL y las 100 mil restantes de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). A la fecha, la SEDESOL reporta poco más de 297,000 estufas instaladas, la SAGARPA 41,000 y la CONAFOR cerca de 60,000.

Actualmente decenas de organizaciones realizan la difusión de las estufas, de las cuales se han podido documentar alrededor de 30 experiencias (Díaz et al., 2011). Dentro de los programas oficiales ha prevalecido el criterio de financiar exclusivamente la instalación de estufas, y no ha existido un criterio estricto para regular los dispositivos que se adquieren, por lo que las cifras indicadas sobreestiman considerablemente las estufas que actualmente se encuentran en uso. De hecho, como expresó la REMBIO públicamente hace 2 años, es urgente entender la difusión de estufas de una manera mucho más integral, estableciendo una norma o certificación para las estufas que se adquieran con fondos de gobierno, brindando recursos para capacitar y sensibilizar a los usuarios e incluyendo en los programas acciones de seguimiento y evaluación para asegurar el buen funcionamiento y adopción de las estufas a largo plazo.

4.4. Biocombustibles sólidos para aplicaciones industriales

Para utilizar la biomasa en aplicaciones industriales de generación de calor y electricidad a gran escala se requiere su combustión o gasificación para producir fluidos calientes (gases, aire, agua o vapor). Así, se puede sustituir gas natural, petróleo o carbón por combustión directa y co-combustión en la generación eléctrica, y sustituir al coque de carbón en la siderurgia. Estas son aplicaciones que van en aumento en el mundo y permiten una significativa mitigación de GEI. La viabilidad de producción de biocombustibles sólidos depende del costo, la disponibilidad y transportabilidad de la biomasa, y en muchos casos de un procesamiento previo como molienda, compresión o secado, para hacerla más homogénea, de mayor contenido energético y más fácil manejo, almacenamiento y transporte.

Situación mundial

En la actualidad los biocombustibles sólidos tienen muchos usos finales: la generación de electricidad por co-combustión directa y gasificación en centrales carboeléctricas; cogeneración de electricidad, vapor y agua caliente en plantas industriales y plantas de calefacción distritales; calefacción y refrigeración en edificios y viviendas uni o multifamiliares. Industrias menores como ladrilleras, caleras, panaderías, etc. usan biomasa sólida procesada para hornos, calcinadoras y otros equipos. Siderúrgicas y plantas de silicio los utilizan como combustibles/reductores, con lo que sustituyen al coque de carbón. Hay una decena de plantas piloto y demostrativas que gasifican *pellets* y otras biomásas sólidas para producir gas de síntesis y transformarlo en productos químicos y biocombustibles sintéticos (Figura 16). Se espera que la biomasa sólida procesada –particularmente la lignocelulósica– sea en el futuro próximo la materia prima principal para los biocombustibles de segunda generación.

El uso de biomasa sólida para producir electricidad creció en 13 TWh/a desde el año 2000 hasta el 2008. Existe un total de 62 países productores de electricidad a partir de biomasa, siendo Estados Unidos el de mayor participación (26%), seguido de Alemania (15%), Brasil y Japón (ambos con 7%) (Evans et al., 2010). Se espera que la participación de la biomasa para la generación eléctrica mundial aumente en un 175% de 2007 a 2030 (FAO, 2010). Los factores principales de este crecimiento son: a) el desarrollo de la tecnología de producción de *pellets* y la conformación de un mercado internacional, b) los incentivos a la reducción de emisiones de GEI, c) los avances en las tecnologías de co-combustión, d) la volatilidad de precios e inseguridad del abastecimiento de gas y petróleo. Bioenergy International (2011) identificó 650 plantas de *pellets* en 48 países (32 de Europa, 8 de Eurasia, 6 de América Latina, 2 de América del Norte y uno de África). La capacidad de producción es de 31 Mt/a, de la cual 13 Mt/a están en plantas grandes (mas de 100 mil t/a). El consumo en Europa fue de 9 Mt/a en 2010, y se prevé que llegue a 15 Mt/a en 2015 y a 30 Mt/a en 2020, para cumplir con los objetivos de la Directiva Europea de Energía Renovable.



Figura 16. Pellets de madera: de residuos a energía limpia y renovable.

Situación en México

En México, a pesar de que los precios nacionales de combustóleo y gas natural están en continuo aumento, aproximándose a los internacionales, y de que existe una amplia disponibilidad de biomasa sólida, aún no se cuenta con experiencia de uso de la biomasa para generación de calor y electricidad, ni para la sustitución de combustóleo, gas natural o coque en gran escala.

Como se discutió en el capítulo 3, en México existe un potencial de producción de biomasa forestal sostenible para energía de 1,923 PJ/a. De esta cantidad, entre 1,080 y 1,800 PJ/a –de 60 a 100 MtMS/a–, pueden provenir del aprovechamiento de residuos de maderero, aclareos y cortas sanitarias en bosques y selvas nativas. Otros 180 PJ/a –10 MtMS/a– están disponibles como residuos de las industrias forestales y sistemas agroforestales tradicionales de roza-tumba-quema (“huamiles” o “acahuales”). Chips y *pellets* de este origen tienen muy alta relación entre energía renovable obtenida por unidad de energía fósil consumida (CIFOR, 2009). El potencial de los residuos agrícolas también es alto (ver capítulo 3), aún si un 50% de los rastrojos queda en el sitio para reciclar materia orgánica y nutrientes en el suelo. Algunas limitaciones a su uso son la disponibilidad estacional y dispersa, el alto contenido de cenizas y la competencia por otros usos (forrajes).

La competitividad de los combustibles sólidos se muestra en la figura 15. Aunque su poder calorífico es relativamente bajo, su costo por unidad de energía útil entregada es mucho menor que el de coque, combustóleo, GLP y diésel, y resulta competitivo con el carbón mineral (figura 17).

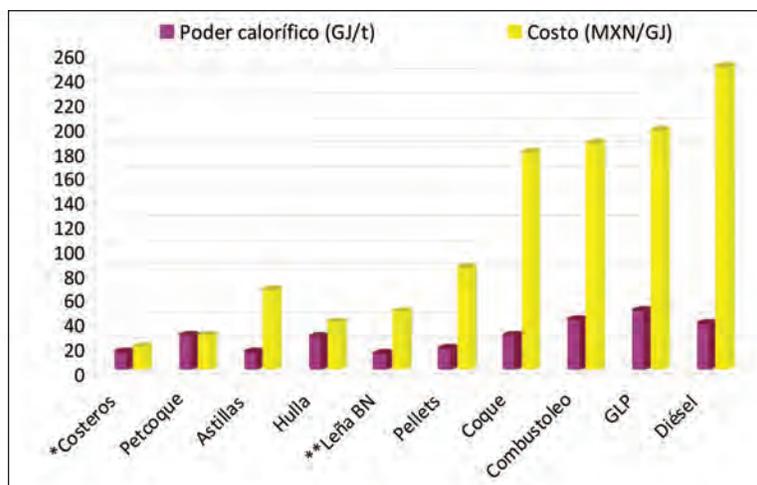


Figura 17. Poder calorífico y costos de biocombustibles sólidos y combustibles fósiles.

* Residuos del aserrado de tabla y tablonés: son las secciones que quedan a los costados del tronco después del corte longitudinal.
 ** Leña de bosques naturales.

Hay varias barreras que dificultan el uso de biocombustibles sólidos en México:

- Complejidad de la tramitación de autorizaciones de aprovechamiento de recursos forestales y la falta de un marco legal para el uso de los residuos de sistemas agroforestales, agravada por la poca agilidad y carencia de recursos de las dependencias responsables de la emisión de las autorizaciones (aunque esto no aplica para los residuos foresto-industriales ni RAC).
- Bajo nivel de organización y capacitación de muchos de los propietarios y poseedores de los recursos forestales (ejidos y comunidades) que dependen de los prestadores de servicios técnicos forestales para los estudios y trámites requeridos para el aprovechamiento legal y necesitan financiamiento de intermediarios.

- Escasos programas de apoyo financiero para las inversiones en adaptación de tecnologías.
- Falta de formas organizativas o empresas que garanticen un suministro confiable.
- Regulaciones que desalientan la generación o cogeneración de electricidad o la limitan a bajas potencias.

Tecnologías y aspectos de sustentabilidad

Las materias primas para producir biocombustibles sólidos procesados son básicamente residuos forestales, agroindustriales, y agropecuarios. También pueden utilizarse residuos sólidos de biodigestores y de plantas de tratamiento de efluentes orgánicos o cloacales.⁷ Esta biomasa no es aprovechada actualmente, por falta de mercados para biocombustibles sólidos procesados en el país.

La biomasa sólida puede ser utilizada sin procesamiento previo, como leña, aserrín o bagazo. Sin embargo, en su estado natural tiene **alto contenido de humedad** (50% en el bagazo, 20% a 50% en el aserrín, 20% a 45% en la leña), es de **baja densidad** (0.15 t/m³ en bagazo, 0.12 t/m³ en aserrín, 0.3 a 0.5 t/m³ en la leña, 0.20 t/m³ en las pacas de paja), de **bajo contenido calórico** (9 a 12 GJ/t de material húmedo), y se descompone o degrada con relativa facilidad. En este estado, su aplicación para medias y altas potencias se limita a las propias industrias que la generan como desperdicio o residuo (ingenios azucareros y etanoleros, procesadoras de madera, plantas de celulosa) o aquellas que la tengan disponible a bajo costo y poca distancia. No es económicamente atractivo para los grandes consumidores el transportar, almacenar y manejar un gran volumen y peso de un combustible perecedero, heterogéneo y de bajo contenido calórico como es la biomasa no procesada.

El procesamiento de la biomasa sólida incluye: secado, reducción de tamaño, y densificación. Con ello se aumenta su poder calorífico, densidad energética y eficiencia de combustión; se facilita su almacenamiento y manejo –que pueden ser totalmente mecanizados– y se hace viable su transporte a muy largas distancias (incluso transcontinentales)⁸. El crecimiento del mercado mundial de biocombustibles sólidos procesados ha llevado a los fabricantes de equipos de molienda, secado y pelletizado a ofrecer equipos y plantas completas, con capacidades desde 0.1 hasta 50 t/h, que son aptos para las más diversas escalas de producción y materias primas. La tecnología de procesamiento está madura y comercialmente disponible, y la capacidad de producción instalada crece muy rápidamente.

En cuanto a la sustentabilidad, la generación de calor y electricidad a partir de biomasa puede contribuir a la mitigación de GEI y a la generación de empleos (Cap.1)(Wei et al., 2010). Pero existen riesgos a la sustentabilidad, como las emisiones de gases y partículas contaminantes, mayores emisiones de GEI en caso de que la madera no provenga de bosques manejados sustentablemente, lo cual además conlleva el riesgo de pérdida de la biodiversidad. Los costos para diferentes aplicaciones se muestran en la tabla 10.

Tecnología	Materia prima	Costo de producción USDcts/kWh	Mitigación en el ciclo de vida (%)
Co-combustión con carbón	Madera, RAC	2.9-5.3 *	—
Combustión directa	Madera, RAC	7.2-9.2 *	~ 90 **
Co-combustión con carbón	Pellets de madera	5.0-13.0 *	—

Tabla 10. Costos de generación eléctrica y mitigación de los biocombustibles sólidos a gran escala (% contra referencia fósil)

* (Chum et al., 2011). ** (Schubert et al., 2009).

⁷ Se ha propuesto –y desarrollado en unos pocos casos– la utilización de cultivos dedicados como árboles de crecimiento rápido y gramíneas, pero su costo es mucho mayor que el de los residuos. El “bagazo” proveniente de caña de azúcar, agave, palma aceitera, etc. es un residuo fibroso y muy húmedo; su procesamiento es costoso por la alta demanda de energía para secado. Representa de 25% a 50% de la biomasa cosechada e industrializada de caña de azúcar y agaves.

⁸ El secado combina por lo general un presecado al aire libre y un secado artificial. La disminución de tamaño se logra por desmenuzado, astillado y molienda. La densificación se inicia por el empacado en origen (hasta 0.3-0.4 t/m³) y se completa con el pelletizado o briquetado en plantas industriales (hasta 0.8 t/m³). Una tecnología nueva es la torrefacción, donde por calentamiento a 240 C se elimina la humedad y parte del agua químicamente ligada a la biomasa y se la hace imputrescible, hidrófoba y fácilmente pulverizable, aumentando su poder calórico a unos 24 GJ/t.

5. ESCENARIOS DE BIOENERGÍA EN MÉXICO

Existen por lo menos 2 estudios recientes que presentan escenarios en los que se examina el rol futuro de la bioenergía en detalle en México. El primero de ellos (Islas et al., 2007) establece que la bioenergía podría representar el 16% del total de la energía consumida en el país en 2030, y podría mitigar el 18% de las emisiones de CO₂ en ese año. Los detalles del estudio se presentan en Masera et al. (2006).

El segundo estudio “México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono” (MEDEC), coordinado por el Banco Mundial, evaluó el potencial para reducir emisiones de GEI en México en el período 2008-2030 (Johnson et al., 2009). En éste se contemplaron intervenciones en 5 sectores clave: electricidad, petróleo y gas, uso final estacionario de energía, transporte, y agrícola/forestal. Se utilizó una metodología común para permitir la comparación entre todas las intervenciones. Los criterios para la selección de las intervenciones viables fueron: 1) potencial importante de mitigación de GEI; 2) costos económicos y financieros bajos; 3) factibilidad tecnológica en el corto y mediano plazo (mediante el uso de tecnologías maduras).

El estudio estimó que las emisiones del escenario base alcanzarán 1,137 MtCO₂e en 2030 partiendo de 659 MtCO₂e en 2008. En contraste, las 40 intervenciones viables que componen el escenario alternativo reducirían las emisiones en 477 MtCO₂e para 2030 con respecto a la línea base. En otras palabras, según este escenario, México podría estabilizar sus emisiones de GEI en el año 2030 con estas opciones, pero las aumentaría en un 72% si no lo hace.

Las intervenciones en bioenergía son fundamentales para lograr la mitigación esperada por el escenario MEDEC y contribuyen con el 9.6% del total de la mitigación en 2030. Las opciones consideradas incluyen hacer más eficiente y sostenible la producción y uso de leña y carbón vegetal, generar electricidad en gran escala y producir combustibles líquidos para el transporte, entre otras (Figura 18). Se basan en un estudio detallado del potencial de tierras cultivables y recursos forestales, que excluyó a las tierras hoy dedicadas al cultivo de alimentos, las áreas naturales protegidas (ver capítulo 3) y las áreas que necesitan riego. Se les resume así:

- *Estufas eficientes de leña*: supone el reemplazo de fogones tradicionales de leña por estufas eficientes. La penetración total alcanza alrededor del 70% de los hogares rurales, totalizando 3.2 millones de estufas en 2030.
- *Hornos eficientes para la producción de carbón vegetal*: propone el remplazo de hornos tradicionales de tierra para la producción de carbón vegetal por hornos de ladrillo más eficientes. La hipótesis de penetración supone un total de casi 9,000 hornos eficientes en el periodo de estudio. También considera satisfacer el 75% de la demanda de coque industrial.
- *Generación eléctrica con leña*: implica la construcción de 200 plantas de generación eléctrica, cada una con potencia de 25 MW. El combustible sería leña proveniente de bosques manejados de manera sustentable.
- *Co-combustión con leña para generación de electricidad*: propone sustituir 20% del carbón mineral por leña proveniente de manejo forestal sustentable en la central carboeléctrica de Petacalco.
- *Cogeneración con bagazo*: supone aumentar la cogeneración de electricidad y vapor de proceso en ingenios azucareros, con capacidad instalada de 2 MW al 2020.
- *Biodiesel de palma aceitera*: supone la construcción y operación de 21 plantas de biodiesel de aceite de palma, con capacidad de 39 Ml/a por planta. Para esto se requiere plantar 9,000 ha/a con un total acumulado de 189,000 ha al 2030.
- *Etanol de sorgo*: establece la construcción y operación de 27 plantas con capacidad de 165 Ml/a por planta. Cada una consume la producción de 115,000 ha de sorgo granífero, con un total acumulado de 3.1 Mha al 2030.
- *Etanol de caña de azúcar*: incluye la construcción y operación de 116 plantas de etanol de caña de azúcar con capacidad de 85 Ml/a cada una. Cada planta requiere 15,000 ha de cultivo, totalizando 1.74 Mha al 2030.



Figura 18. Algunas de las opciones consideradas en el estudio MEDEC.

En la tabla 11 se muestran las mitigaciones anuales máximas de cada intervención y sus costos o beneficios. Las intervenciones más importantes son: generación eléctrica con leña, hornos eficientes para carbón vegetal, estufas eficientes de leña y etanol de caña de azúcar; todas ellas con mitigaciones anuales máximas mayores a 15 MtCO₂e/a. Tres de estas cuatro intervenciones tienen beneficios económicos netos, y solamente la caña de azúcar implicaría costos netos. Las otras intervenciones de bioenergía tienen costos menores a 8 USD/tCO₂e. La inversión total para todas las intervenciones asciende a 9,519 MUSD.

Intervención	Mitigación anual máxima (MtCO ₂ e/a)	Mitigación acumulada (MtCO ₂ e)	Inversión nueva (MUSD)	Costo neto de mitigación (USD/tCO ₂ e)
1. Estufas eficientes de leña	19.4	222	434	-2.3
2. Generación eléctrica con leña	35.1	376	4254	-2.4
3. Hornos eficientes de carbón vegetal para usos domésticos e industriales	22.6	248	416	-19.6
4. Cogeneración con bagazo	6.0	59	1860	-4.9
5. Etanol de sorgo	5.1	62	991	5.3
6. Biodiesel de palma aceitera	2.4	24	99	6.4
7. Co-combustión con leña	2.4	43	454	7.3
8. Etanol de caña de azúcar	16.8	150	1011	11.3
Total de intervenciones en bioenergía	109.8	1,184	9519	

Tabla 11. Opciones de mitigación⁹ de bioenergía consideradas en el proyecto MEDEC. (Johnson et al., 2009).

Nota: los valores negativos representan beneficios netos.

⁹ Las opciones de biocombustibles líquidos no contabilizan las emisiones de CO₂e en el ciclo de vida, por lo que la mitigación está sobreestimada. En el caso de la caña de azúcar hay estudios que señalan que para México las emisiones del ciclo de vida podrían llegar a 36 kgCO₂e/GJ con etanol a partir de jugo directo (García et al., 2011) lo que para el caso del escenario analizado limitaría la mitigación a la mitad (75 MtCO₂e).

La figura 19 compara el consumo de bioenergía en México en los años 2008 y 2030, este último en caso de cumplirse el escenario MEDEC. Se incluyen aquí las opciones de biogás y reemplazo de coque por carbón vegetal para la industria siderúrgica. Es interesante observar que el consumo de bioenergía aumentaría sustancialmente en el país, a la par de diversificarse entre los distintos usos finales: térmicos, de producción de electricidad y de combustibles líquidos para el transporte.

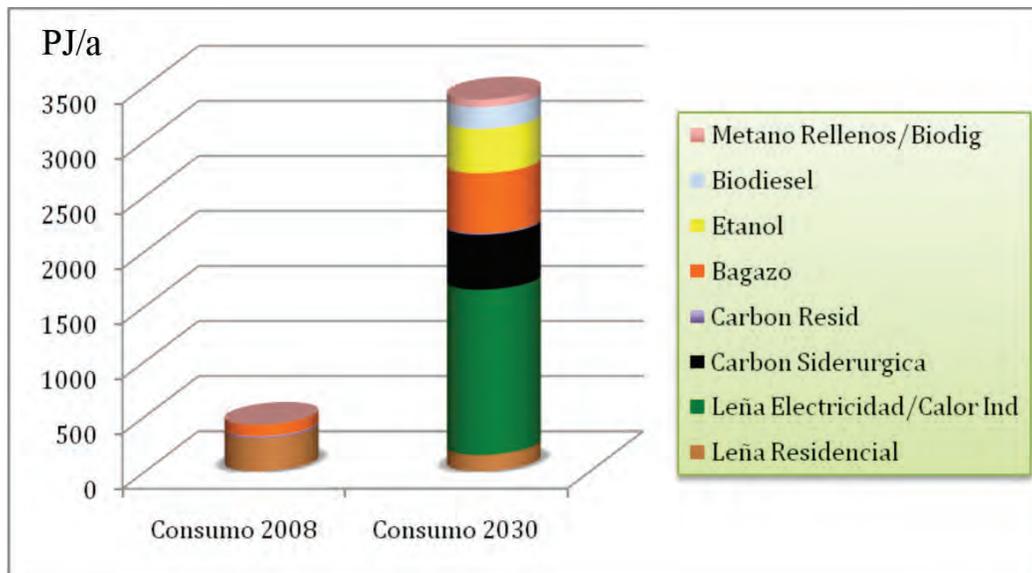


Figura 19. Contribución actual y futura de las opciones bioenergéticas a la generación de energía en México.

Elaboración propia con base en los datos del estudio MEDEC (Johnson et al., 2009).

6. HACIA UNA ESTRATEGIA NACIONAL PARA LA PROMOCIÓN DE LA BIOENERGÍA

Como se ha indicado en el libro *La bioenergía en México* (Maserá et al., 2006) la posibilidad de ampliar el portafolio de fuentes de energía, proteger al medio ambiente y apoyar el desarrollo económico y social del país, particularmente en las zonas rurales, justifican desarrollar una iniciativa pública para el fomento de la bioenergía en México. Se requiere –como lo muestra la experiencia de Brasil, Europa y otros países– de una serie de acciones estratégicas con visión de largo plazo y del apoyo de un amplio conjunto de políticas y de recursos públicos. Cinco ejes son fundamentales para este propósito:

Partir de un enfoque integrado orientado al uso sustentable de la bioenergía. Se debe dar prioridad al aprovechamiento de desechos o subproductos de otras actividades, a fin de diversificar la oferta biomásica y aumentar la eficiencia de las tecnologías y sistemas de producción. Se debe buscar el aprovechamiento de la bioenergía mediante esquemas de manejo sustentable de bosques y paquetes agroecológicos para las zonas agrícolas, orientados a complementar más que a competir con otros usos del suelo. La generación y difusión de tecnología deben asegurar una adecuada participación y beneficios de las poblaciones locales. La bioenergía debe ser considerada un recurso estratégico y complementario de las otras fuentes de energía renovable en la búsqueda de la transición energética.

Desarrollar un marco regulatorio. En el corto plazo, es imprescindible contar con un marco jurídico y legal apropiado que fomente el uso sustentable de la bioenergía en gran escala en nuestro país. Dicho marco debe incluir todo un conjunto de incentivos fiscales y de otro tipo a los bioenergéticos así como facilidades y seguridad para realizar inversiones a largo plazo en este campo, esquemas para la participación de pequeños productores, normas para la certificación desde el punto de vista de la sustentabilidad de los bioenergéticos, y otras acciones.

Impulsar el desarrollo de mercados. Es importante promover el desarrollo de redes de producción y de mercado de productos y tecnologías asociados a la bioenergía, así como elaborar normas técnicas para asegurar la calidad de los productos y los procesos.

Fomentar la investigación y el desarrollo tecnológico. Se debe incentivar el desarrollo, adaptación y aplicación de tecnología apropiada. En este sentido, el apoyo a grupos de investigación y al desarrollo de proyectos piloto y demostrativos son acciones prioritarias, así como el fomento de redes y proyectos de colaboración internacionales.

Fortalecimiento institucional. Dada la naturaleza multidimensional de la bioenergía es crítico establecer programas intersectoriales claramente coordinados (salud, energía, ambiente, desarrollo social, agropecuario y forestal), así como campañas de información pública que conduzcan a una mejor valoración social de la bioenergía.

En los últimos cinco años se ha avanzado parcialmente en varios de estos frentes. Específicamente, detallamos los avances logrados en el marco regulatorio, el fomento a la investigación y desarrollo, y los programas de financiación pública.

6.1. Marco regulatorio

Se cuenta actualmente con dos leyes que permiten el desarrollo específico de bioenergéticos para fines diferentes en el territorio mexicano: Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB, 2008) y Ley para Aprovechamiento de las Energías Renovables y Financiamiento para la Transición Energética (LAERFTE, 2008).

La LPDB se concentra en la promoción del etanol y biodiesel, como sustitutos a la gasolina y el diésel de petróleo y de ella se derivan dos programas: El Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico (2009, SAGARPA) que pretende fomentar la producción sustentable de insumos para bioenergéticos y su comercialización, y el Programa de Introducción de Bioenergéticos (2009, SENER), que tiene como objetivo brindar certidumbre para el desarrollo de la cadena de producción y consumo de biocombustibles en la mezcla de combustibles para el transporte. Las metas a alcanzar por el programa son la producción de 200 MI para la mezcla de etanol anhidro en gasolina en Guadalajara, Monterrey y DF para el 2012. No existen metas cuantitativas para el biodiesel. En la práctica no se han logrado todavía avances sustantivos en la producción ni comercialización de los insumos.

La LAERFTE tiene el objetivo de “regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética”. Define entre las fuentes de energías renovables a “los bioenergéticos que determine la LPDB así como las que determine la SENER”. La meta de participación de todo este grupo de fuentes de energía limpias al 2024 es del 35%. (SENER, 2011). Derivado de la LAERFTE, se crea el Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables (agosto del 2009), que tiene como objetivo promover aprovechamiento de las energías renovables para generación de electricidad. En él se detallan los mecanismos para el pago de las contraprestaciones que se otorgarán a los generadores de electricidad a partir de energías renovables.

6.2. Fomento a la investigación y desarrollo

El Sistema Nacional de Investigación y Transferencia Tecnológica para el Desarrollo Rural Sustentable (SNITT) elaboró el Programa Nacional de Investigación Científica y Tecnológica en Materia de Insumos para Bioenergéticos que brinda recursos para fortalecer los programas de biocombustibles (Figura 20). Asimismo, algunas temáticas o articulaciones específicas para investigación en bioenergéticos se han fomentado desde el Fondo Sectorial SAGARPA-CONACYT y SAGARPA-SENER, y han sido incorporadas también a algunas convocatorias de Fondos Mixtos Estatales.



Figura 20. Capacitación y difusión.

6.3. Programas específicos de financiamiento para bioenergía

6.3.1. Programas para la producción de insumos para biodiesel

La *Jatropha curcas* (piñón, piñoncillo, xuta) está siendo promocionada ampliamente en México como insumo industrial para la producción de biodiesel. Además, la CONAFOR la incluyó en el programa ProÁrbol como una de las especies para reforestación. Distintas instituciones de investigación están desarrollando tecnologías para este cultivo (INIFAP, universidades, institutos de investigación, CONAFUPRO).

6.3.2. Programa Nacional de Estufas Ahorradoras de Leña

La SEDESOL estableció en el año 2006 el Programa Nacional de Estufas Ahorradoras de Leña, que entrega estufas de manera gratuita. La meta es cubrir el 10% de la demanda objetivo, es decir 500 mil familias con estufas eficientes para el año 2012.

6.3.3. Promoción a la producción sustentable de carbón vegetal

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable y su Reglamento, regulan la producción y comercialización del carbón vegetal en México como un producto maderable. La Comisión Nacional Forestal, a través del programa ProÁrbol apoya con subsidios la producción de carbón vegetal a través de capacitaciones para mejorar las prácticas productivas, adquisición de equipos, apoyo a cadenas productivas en la formulación de estudios de factibilidad, planes de negocio, comercialización y adquisición de equipos. Además, existen apoyos que no se dirigen específicamente al carbón, pero que se pueden usar para el desarrollo de empresas rurales, a cargo de instituciones como la Secretaría de la Reforma Agraria, la SAGARPA, Secretaría de Economía y los gobiernos estatales y municipales.

6.3.4. 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), para apoyar a las empresas y personas en la construcción de biodigestores hasta con un millón de pesos o hasta 250 mil pesos para quienes generen electricidad, con un aporte del 50% o más de los beneficiarios. Este apoyo es para productores primarios y empresarios del sector rural, con unidades productivas lecheras (al menos 300 vientres en producción) o porcinas (con al menos 200 vientres porcinos en sistemas de ciclo completo), cuyo estiércol pueda ser utilizado para la producción de biogás para la generación de energía térmica o eléctrica.

Si bien todos estos elementos constituyen un avance para la estructuración de una política consolidada relativa a bioenergéticos en México, todavía requieren de mayor maduración, coherencia y, sobre todo, de eficacia. Las políticas efectivas para desarrollar la bioenergía en Europa, Estados Unidos y otros países como Brasil, se han basado en una combinación de: a) marcos regulatorios favorables y preferenciales, con visión de largo plazo, b) subsidios o exenciones fiscales para los bioenergéticos, c) cargas impositivas altas aplicadas a los energéticos fósiles, d) capacitación en varios niveles. Ninguno de estos elementos se ha aplicado plenamente en México, donde existen muchas políticas contrarias, como subsidios a la electricidad de fuentes no renovables y los combustibles derivados del petróleo, tratamiento no preferencial a la electricidad de fuentes renovables, un marco regulatorio complejo y no favorable a los bioenergéticos e incluso descoordinación e inconsistencia entre las instituciones supuestamente encargadas de promoverlos. La ausencia de compensaciones efectivas por la reducción de emisiones de CO₂ en México es otro factor negativo. Es importante trabajar para eliminar estas barreras a la brevedad a fin de hacer realidad el alto potencial de desarrollo de la bioenergía en México.

7. LISTA DE UNIDADES

a	año	Mm ³	millón de metros cúbicos
d	día	mm	milímetro = 10 ⁻³ metros
EJ	exajulio = 10 ¹⁸ julios	Mt	megatonelada = 10 ¹² gramos
GJ	gigajulio = 10 ⁹ julios	MtMS	megatonelada de materia seca = 10 ¹² gramos
GW _{th}	gigavatio térmico	MUSD	millón de dólares estadounidenses
h	hora	MW	megavatio = 10 ⁶ vatios
ha	hectárea	MW _{el}	megavatio eléctrico
kg	kilogramo = 10 ³ gramos	MWh	megavatio hora
km	kilómetro = 10 ³ metros	MXN	pesos mexicanos
kW	kilovatio = 10 ³ vatios	PJ	petajulio = 10 ¹⁵ julios
kWh	kilovatio hora	ppm	partes por millón
l	litro	t	tonelada = 10 ⁶ gramos
m	metro	tMF	tonelada de materia fresca
m ³	metro cúbico	tMS	tonelada de materia seca
Mdp	millones de pesos	TWh	teravatio hora = 10 ¹² vatios hora
Mha	millón de hectáreas = 10 ⁶ hectáreas	USD	dólar estadounidense
MI	millón de litros = 10 ⁶ litros	USDcts	centavos de dólar estadounidense

8. LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

B10	mezcla de diésel de petróleo con 10% de biodiesel	INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
B100	biodiesel puro, al 100%	IPCC	Panel Intergubernamental para el Cambio Climático
B20	mezcla de diésel de petróleo con 20% de biodiesel	ISO	International Organization for Standardization
B5	mezcla de diésel de petróleo con 5% de biodiesel	MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
BNE	Balance Nacional de Energía	MEDEC	México: Estudio sobre la Disminución de Emisiones de Carbon
CD	cultivos dedicados	MOPESA	Motores Perkins de México, S.A.
CFE	Comisión Federal de Electricidad	MTBE	methyl tertiary butyl ether
CH ₄	metano	N ₂ O	óxido nitroso
CIEco	Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM	NaOH	hidróxido de sodio
CIFOR	Center for International Forestry Research	O ₂	oxígeno
CO	monóxido de carbono	PECC	Programa especial de cambio climático
CO ₂	dióxido de carbono	PEMEX	Petróleos Mexicanos
CO _{2e}	dióxido de carbono equivalente	pH	medida de la acidez o alcalinidad de una solución
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal	PM _{2.5}	Particulate Matter 2.5
DBO	demanda biológica de oxígeno	RAC	residuos agrícolas de cosechas
E10	mezcla de gasolina con 10% de etanol	RFA	Renewable Fuels Association
E5	mezcla de gasolina con 5% de etanol	RSU	residuos sólidos urbanos
EE.UU.	Estados Unidos	SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	SAYERCEN	Servicios Ambientales y de Energías Renovables del Centro S.A. de C.V.
FIRCO	Fideicomiso de Riesgo Compartido	SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
FT	Fischer Tropsch	SEISA	Sistemas de Energía Internacional S.A. de C.V
GEI	gases de efecto invernadero	SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
GIRA	Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Aplicada A.C.	SENER	Secretaría de Energía
GLP	gas licuado de petróleo	TAME	ter amil metil eter
H	Hidrogeno	UNC	Unión Nacional de Cañeros
HRSG	heat recovery steam generator	WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
IMA	incremento medio anual		

9. BIBLIOGRAFÍA

- Boyle, G.** et al. (2004). "Renewable Energy". Oxford University Press. Segunda Edición.
- Campbell, P.K.;** Beer, T.; Batten, D. (2011). "Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds". *Biore-source Technology*, Volume 102, Issue 1, January 2011, Pages 50-56.
- Chum, H.;** Faaij, A.; Moreira, J.; Berndes, G.; Dhamija, P.; Dong, H.; Gabrielle, B.; Goss Eng, A.; Lucht, W.; Mapako, M.; Masera Cerutti, O.; McIntyre, T.; Minowa, T. y Pingoud, K. (2011). "Bioenergy". In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- CIFOR** (2009). "Oportunidades y desafíos para la producción de biocombustibles en América Latina". Boletín ambiental CIFOR. Septiembre 2009.
- Concha, A.;** Andalaft, A. y Farías, O. (2009). "Gasificación de carbón para generación de energía eléctrica: análisis con valoración de opciones reales". *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 17 N° 3, 2009, pp. 347-359.
- Díaz, R.,** et al. (2011). "Estufas de leña". Cuaderno Temático sobre Bioenergía n°3. Red Mexicana de Bioenergía A.C. Morelia, Michoacán, México.
- Drigo, R.** y Trossero, M. (2005). "Interactive Wood Energy Statistics i-WESTAT, Update 2004", FAO Forestry Department, Rome, 69.
- Ecoprogram/Fraunhofer UMSICHT** (2010). "The Market for Biogas Plants in Europe": Market volumes – Projects – Strategies – Trends; Extract. 2010.
- EIA** (2010). "International Energy Outlook 2010", EIA/DOE, Estados Unidos.
- Enriquez Poy, M.** (2009). "Prospectiva de la cogeneración de la agroindustria de la caña de azúcar en México". Presentación en: VI Reunión Nacional Red Mexicana de Bioenergía y Simposio Internacional de Proyectos Bioenergéticos, México.
- Escobar, J.;** Lora, E.S.; Venturini, O.J.; Yáñez, E.E.; Castillo, E.F.; Almazan, O.; et al. (2009). "Biofuels: environment, technology and food security". *Renew Sust Energy Rev* 13:1275–87.
- Evans, A.;** Strezov, V. y Evans, T.J. (2010). "Sustainability considerations for electricity generation from biomass". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 1419–1427.
- FAO** (2010). "What woodfuels can do to mitigate climate change". FAO Forestry Paper 162. Rome, Italy.
- FIRCO** (2011). "Diagnóstico general de la situación actual de los sistemas de biodigestión en México".
- Fischer, G.;** Hiznyik, E.; Prieler, S.; Shah, M. y van Velthuizen, H. (2009) "Biofuels and Food Security". OPEC Fund for International Development (OFID) and International Institute for Applied Systems Analysis, Vienna.
- García, C.A.;** Fuentes, A.; Hennecke, A.; Riegelhaupt, E.; Manzini, F. y Masera, O. (2011). "Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico". *Applied Energy*, Volume 88, Issue 6, June 2011, Pages 2088-2097.
- García-Frapolli, E.** (2010). "Beyond fuelwood savings: Valuing the economic benefits of introducing improved biomass cookstoves in the Purépecha region of Mexico". Volume 69, Issue 12, Pages 2598-2605.
- Ghilardi, A.;** Guerrero, G. y Masera, O. (2007). "Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach". *Biomass and Bioenergy* 31, Pp 475-491.
- IEA** (2009). "Transport, Energy and CO₂: Moving Toward Sustainability".
- IEA** (2011). "Technology Roadmaps - Biofuels for Transport-". ISBN: N/A : pp. 56.
- IPCC** (2011). "Special Report Renewable Energy Sources: Summary for Policy Makers".
- Islas, J.;** Manzini, F. y Masera, O. (2007). "A prospective study of bioenergy use in Mexico Energy", Volume 32, Issue 12, December 2007, Pages 2306-2320.

- Johnson, T.M.;** Alatorre, C.; Romo, Z. y Liu, F. (2009). "México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbón (MEDEC)". México, Banco Mundial-Eds. MAYOL.
- Knoef, HAM.;** Buhler, R. y Babu, S. (2007). "Summary of Discussion on Situation Analysis and Role of Biomass Gasification Technologies in Future Energy Needs". Agencia Internacional de Energía.
- Lovrencic, L.** (2010). "Highlights of socio-economic impacts from biogas in 28 target regions". (D.2.4., WP2), Sinergija-Intel-ligent Energy Europe.
- Masera, O.** et al. (2006). "La bioenergía en México: un catalizador del desarrollo sustentable". Comisión Nacional Forestal.
- Masera, O.;** Arias, T.; Ghilardi, A.; Guerrero, G. y Patiño, P. (2010). "Estudio sobre la evolución nacional del consumo de leña y carbón vegetal en México 1990-2024". Tercer informe: Estimación de los consumos nacionales de leña y carbón vegetal para el periodo 2009-2024 (Incluyendo la metodología de cálculo). Documento para la SENER.
- Pérez, M.;** Cuesta, M.J.; Núñez, S. y Cabrera, J.A. (2008). "Utilización de biogás en pilas de combustible". CIEMAT. Pp. 68.
- Prehn, M.** y Cumana I. (2010). "La bioenergía en México: estudios de caso No. 1, 2010". Cuaderno Temático sobre Bioenergía n°1. Red Mexicana de Bioenergía A.C. Morelia, Michoacán, México.
- Riegelhaupt, E.** (2009). "Viabilidad económica de algunas opciones de uso de combustibles forestales en industrias de México". Simposio: Combustibles de madera para uso industrial y de electricidad. Sexta Reunión Nacional de la REMBIO. Querétaro.
- Rufus, E.** y Masera, O. (2010). "Quantification of CO₂e savings from improved cookstoves in El Salvador. Report for Tecnologías Ecológicas Centroamericanas TECSA S.A. de C.V." Department of Epidemiology University of California Irvine y Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma De México.
- Sandoval, G.** (2010). "Biocombustibles avanzados". Cuaderno Temático sobre Bioenergía n°2. Red Mexicana de Bioenergía A.C. Morelia, Michoacán, México.
- SEMARNAT** (2006). "Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2005". México. SEMARNAT. 234 pp.
- SENER** (2009). "Balance Nacional de Energía 2008". Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, 2009. México, D.F.
- SENER** (2010). "Estrategia Nacional de Energía". México, SENER. Pp. 72
- Van Dam, J.;** Junginger, M. y Faaij, A.P.C. (2010) "From the global efforts on certification of bioenergy towards an integrated approach based on sustainable land use planning". Renewable and Sustainable Energy Reviews 14. Pp. 2445-2472.
- Schubert, R.,** et al. (2009) "Future Bioenergy and sustainable Land Use". Earthscan.
- Wei, M.;** Patadia, S. y Kammen, D. (2010). "Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US?" Energy Policy, Volume 38, Issue 2, Pp. 919-931.

Referencias electrónicas:

- Bioenergy International. Recuperado de: www.bioenergyinternational.es/revistas-monograficos/Catalog/show/mapa-de-pellets-en-el-mundo-2011-papel-92
- REM (Renewable Energy Magazine). Recuperado de: www.energias-renovables.com/energias/renovables/index/pag/biocarburantes/colleft/colright/biocarburantes/tip/articulo/pagid/16489/botid/103
- RFA (Renewable Fuels Association). Recuperado de: www.ethanolrfa.org
- SAGARPA. Recuperado de: www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/cambioclimatico/MetasMitigacion2025-01-11.pdf
- UNC (Unión Nacional de Cañeros). Recuperado de: www.caneros.org.mx



Red Mexicana de Bioenergía, A. C.

¿Quiénes somos?

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.

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

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**

MESA DIRECTIVA 2009 - 2011

Dr. Omar Masera Cerutti

PRESIDENTE

Julián Vega

SECRETARIO GENERAL

M en C. René Martínez Bravo

TESORERO



EN ESTE VOLUMEN:

La bioenergía es una fuente energética versátil, renovable y estratégica para promover la transición hacia un patrón de desarrollo más sustentable en nuestro país. Con este CT la REMBIO busca brindar una referencia informada, sintética y actualizada sobre la diversidad de alternativas que ofrece el aprovechamiento de esta fuente de energía, sus perspectivas de desarrollo en México y sus retos y oportunidades en términos de sustentabilidad.

LA COLECCIÓN CUADERNOS TEMÁTICOS SOBRE BIOENERGÍA

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.

OTROS CUADERNOS TEMÁTICOS



Este cuaderno –el primero de una serie específica sobre estudios de caso– presenta experiencias que ilustran desde temáticas, escalas y metodologías de implementación contrastantes el desarrollo práctico de la bioenergía en México. Se incluyen aplicaciones para la producción y recuperación de biogás, desarrollo y difusión de estufas de leña, fabricación de hornos mejorados de carbón vegetal, producción de biodiesel, y una experiencia pedagógica.



En este cuaderno se analizan 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 GEI y así reducir el consumo de combustibles fósiles en el sector transporte.



Se presenta una revisión actualizada de lo que está ocurriendo tanto a nivel internacional como en nuestro país en el campo de estufas eficientes de leña. Se examina de manera general los avances tecnológicos, los impactos documentados de la nueva generación de estufas, así como las características de los programas de difusión que garantizan una mayor adopción en impacto a largo plazo de las estufas de leña.



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

www.rembio.org.mx

