

## **VII. BIOENERGÍA CON BASE EN LA BIOMASA**

*Daysi Rojas y Mireya R. Goldwasser*

Un gran número de países especialmente los países desarrollados y grandes economías emergentes como Brasil, China e India, están buscando la manera de hacer frente a los retos de la energía, el medio ambiente y el cambio climático con diferentes estrategias. Una opción frecuentemente discutida es el desarrollo de la bioenergía con base en la biomasa.

La biomasa se define como todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización (IDAE, 2007). Los combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural son excluidos de esta definición de biomasa renovable por razones de tiempo: ellos absorbieron dióxido de carbono de la atmósfera hace millones de años.

Mientras que tales combustibles fósiles ofrecen alta densidad energética, la combustión requerida para liberar su energía descarga a la atmósfera carbono secuestrado hace millones de años y por lo tanto contribuye al cambio climático. Los patrocinadores de la biomasa argumentan que la biomasa se puede manejar sobre una base sostenible de modo que se mantenga un ciclo de carbono cerrado sin incrementos netos en los niveles de dióxido de carbono atmosférico (BEC, pag. Web).

La energía que contiene la biomasa puede ser considerada como energía solar captada y almacenada en enlaces químicos carbono-hidrógeno resultado de la fotosíntesis.

Mediante este proceso, el  $\text{CO}_2$ , agua y algunos nutrientes se transforman en hidratos de carbono, grasas, proteínas y minerales, que son incorporados y transformados por el reino animal, incluyendo al ser humano el cual invierte la transformación para obtener bienes de consumo.

La combustión de biomasa, en principio no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el que absorbe y liberan continuamente las plantas durante su crecimiento) y no del subsuelo, capturado en épocas remotas, como para los casos del gas natural o el petróleo. Mientras que en teoría esto significa que la biomasa puede ser carbono neutral, si se usan fertilizantes para cultivar y combustibles fósiles para transportar el material, el balance neto de carbono, puede no ser completamente neutral, y este es uno de los problemas con la biomasa; la identificación y medición de los beneficios ambientales.

La obtención de energía de la biomasa en forma de calor, por aprovechamiento del carácter exotérmico de las reacciones de combustión, fue probablemente el primer recurso energético del hombre. En 2010, el empleo de este recurso con fines energéticos representó el 12,4% del uso global de energía primaria (74% de toda la energía renovable), como se muestra en la Figura 1 (GENI, 2012). La biomasa se usa de forma distinta por países con diferente desarrollo, en muchos hogares de África, Asia y América Latina, la biomasa es el único recurso energético disponible y se usa ineficiente y rudimentariamente causando contaminación y deforestación; por otro lado, los países desarrollados, emplean modernas y más eficientes tecnologías para aprovechar esta fuente de energía.

Hay dos categorías generales de biomasa que se utilizan en los procesos de producción de bioenergía: (i) los cultivos tales como maíz, sorgo, caña de azúcar, semillas de colza y soja; y los dedicados para producir energía como por ejemplo micro algas, pasto tipo varilla y ála-

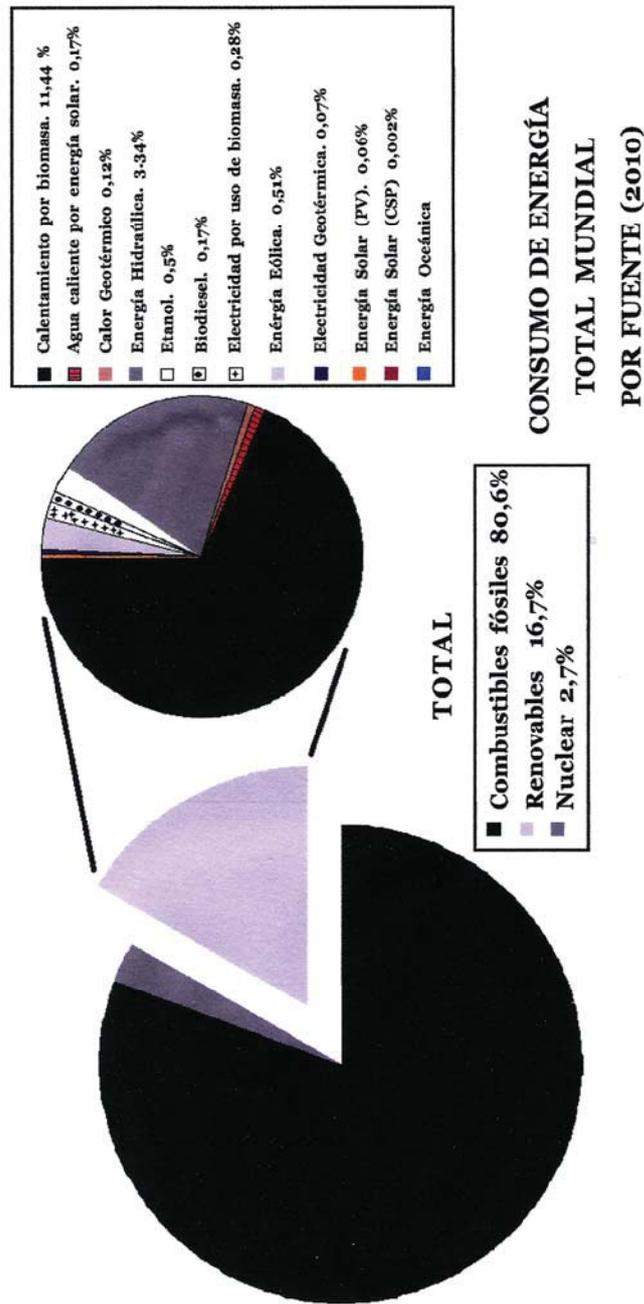


Figura 1. Consumo total mundial de energía (GENI, 2012)

mos; y (ii) los desechos y residuos, llamados combustibles de oportunidad, porque de otra forma no se utilizarían; ejemplos de estos son el biogás, que es fundamentalmente metano producido por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, de fuentes tales como plantas de tratamiento de aguas residuales, estiércol animal producto de su cría intensiva y rellenos sanitarios, y de bio sólidos como los lodos de las plantas de tratamientos de aguas residuales, residuos de cosechas y forestales, y desechos de procesamiento de alimentos.

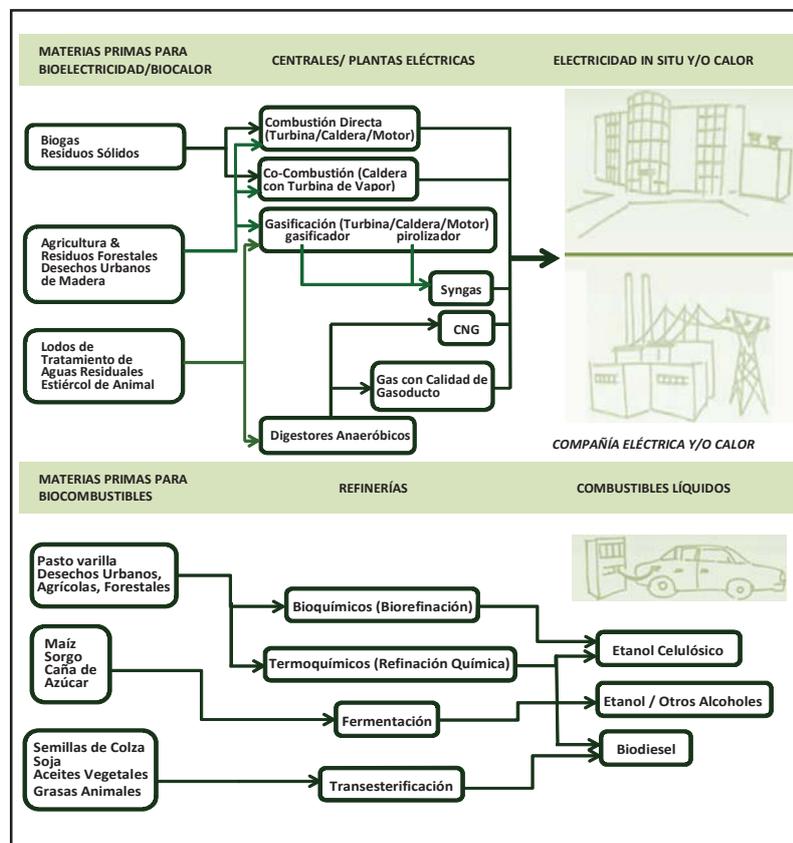
Las materias primas señaladas se convierten en bioenergía mediante diferentes procesos de conversión. La Figura 2 ilustra cómo la biomasa sólida, líquida o gaseosa se convierte en electricidad, calor y combustibles líquidos (los procesos de conversión se presentan en la columna central de la figura).

Los procesos de conversión, para los casos de producción de bioelectricidad y biocalor son básicamente la combustión directa, la co-combustión y la gasificación. Otra tecnología de conversión de menor escala, pero importante es la digestión anaeróbica. El mayor consumo de biomasa a nivel mundial es como fuente de calor; en Venezuela la leña y el carbón vegetal son de producción y uso marginal y no se incluyen en las estadísticas (Fig. 3) (EIA, 2012). La biomasa es fundamentalmente de uso doméstico por combustión directa, en sencillos fogones a fuego abierto.

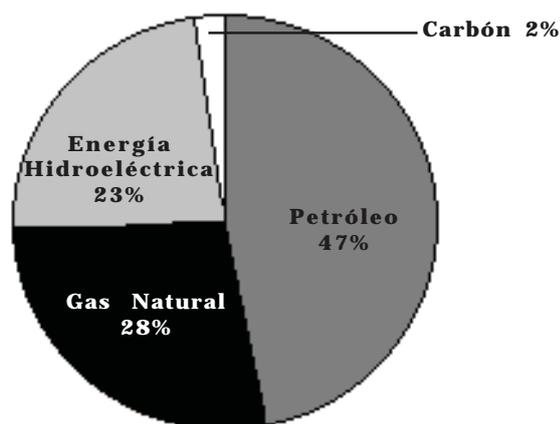
Mención aparte requieren los procesos de conversión para la producción de biocombustibles, que se utilizan fundamentalmente en el sector transporte, y que conviene clasificar en convencionales y avanzados. A continuación nos referimos muy brevemente a estas dos categorías:

(a) Convencionales, son aquellos que en la actualidad se producen comercialmente. En general, proceden de cosechas cultivadas con técnicas similares a las cosechas agrícolas alimentarias, y son principalmente el bioetanol

y el biodiesel, siendo prácticamente toda la producción mundial atribuible a estos dos biocombustibles. Estos combustibles representaron en 2010 un 0,7% de la energía primaria suministrada a nivel mundial.



**Figura 2.** Procesos de conversión de la biomasa (EPA, 2009).



**Figura 3.** Consumo total de energía primaria por fuente en Venezuela. **Fuente:** U. S. Energy Information Administration (EIA).

En un resumen con respecto a los procesos de producción de estos combustibles, se puede señalar que: (i) incorporan tecnologías relativamente simples y bien conocidas; (ii) relativamente de bajas inversiones; (iii) se pueden usar bajas capacidades de producción; (iv) compiten directamente con la producción de alimentos; (v) materia prima optimizada para su uso como alimento y no para la producción de energía; y (vi) uso solo de una porción de la cantidad total de biomasa. (b) Avanzados son aquellos cuyas tecnologías de conversión están todavía en la etapa de investigación y desarrollo (I&D), fase piloto o de demostración comercial (comúnmente conocidos como de segunda y tercera generación).

El debate del uso de las fuentes de alimentación en la producción de combustibles, ha acelerado la I&D y escalamiento de las tecnologías de producción de estos biocombustibles avanzados, las cuales permiten producir combustibles de transporte a partir de entre otras materias primas, de biomasa ligno celulósica. Otra característica de estos procesos de conversión es que la materia prima puede cultivarse exclusivamente para producir

energía o pueden ser desechos tales como el bagazo de la caña de azúcar o los residuos madereros. Los combustibles avanzados en general requieren con respecto a los convencionales de:

- (i) equipos de proceso más complejos;
- (ii) mayor inversión por unidad de capacidad de producción; y
- (iii) de instalaciones de mayor tamaño para beneficiarse de la economía de escala.

Esta categoría incluye:

- o aceite vegetal tratado con hidrógeno (HVO) que se produce mediante la hidro-genación de aceites vegetales o grasas animales;
- o el diesel BTL (biomasa en líquidos) con base en la síntesis Fischer-Tropsch (FT), obtenido en un proceso de dos etapas en el que la biomasa se convierte en gas de síntesis ( $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ ) que se limpia y acondiciona, y seguidamente se convierte catalíticamente a través de la síntesis FT, en una amplia gama de hidrocarburos tales como el bio-diesel (más importante) y biokerosene;
- o el bioetanol que puede producirse a partir de materias primas ligno celulósicas, a través de la conversión bioquímica de los componentes de celulosa y la hemicelulosa de la biomasa en azúcares fermentables. Estos azúcares siguen posteriormente los mismos procesos de conversión de los biocombustibles convencionales;
- o el biogás sintético (bio-SG) obtenido mediante procesos térmicos como la gasificación, que podría usarse por ejemplo como gas natural vehicular;
- o bio-crudo de pirólisis, dimetileter ( DME );
- o la producción de los biocombustibles con base en algas, que prometen: un alto potencial de productividad por hectárea, que podrían cultivarse en tie-

rras no cultivables, utilizar una amplia variedad de fuentes de agua (agua dulce, salina e incluso aguas residuales), y potencialmente reciclar CO<sub>2</sub> y corrientes residuales de nutrientes. Sin embargo, esta tecnología es actualmente costosa, y se encuentra en estado de I&D; y

o el hidrógeno.

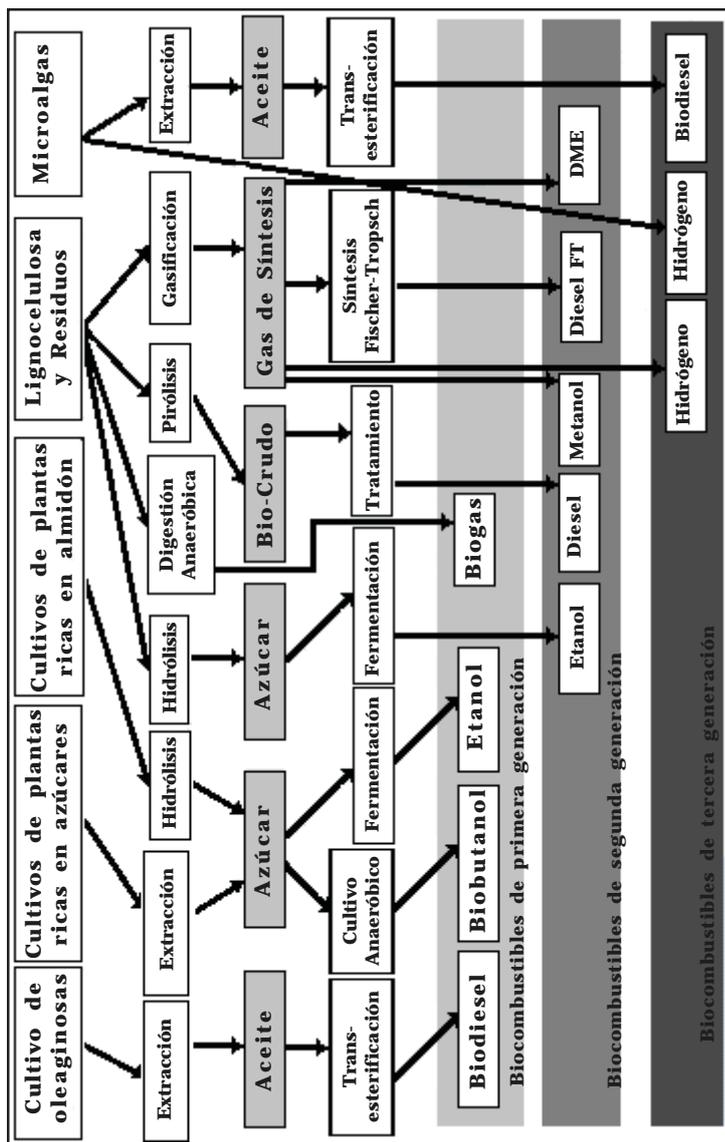
En las figuras 4 y 5 se presentan respectivamente, las fuentes y los procesos para la producción de la primera, segunda y tercera generación de biocombustibles, y el grado de desarrollo de las tecnologías más importantes para estos procesos de producción.

Los mayores esfuerzos en actividades de I&D y escalamiento sobre los procesos de producción de biocombustibles avanzados se realizan sólo en algunos países desarrollados y grandes economías emergentes como Brasil, China e India.

En Venezuela, a pesar del anuncio por parte de PDVSA agrícola de numerosos proyectos, no se producen ni usan estos combustibles, sin embargo, en el 2012 notificaron que:

*“Con el desarrollo del proyecto de Complejos Agroindustriales de Derivados de la Caña de Azúcar (Cadca), PDVSA Agrícola estima lograr para 2015 una producción de 6,5 millones de barriles de etanol anhidro al año, para lo cual, se construyen en diferentes localidades del país 11 complejos agroindustriales de derivados de la caña, destinados, entre otros objetivos, a impulsar la producción de etanol, aditivo que se utiliza en la gasolina ecológica en una proporción del 8%, es decir, 8 litros de etanol por cada 92 litros de gasolina premium.”* (EL MUNDO, 2012).

En los reportes internacionales, se indica que el objetivo era utilizar una proporción de 10 % de bioetanol en los combustibles del sector transporte del país (E10) (IEA, 2011).



**Figura 4.** Fuentes y procesos para la producción de la primera, segunda y tercera generación de biocombustibles

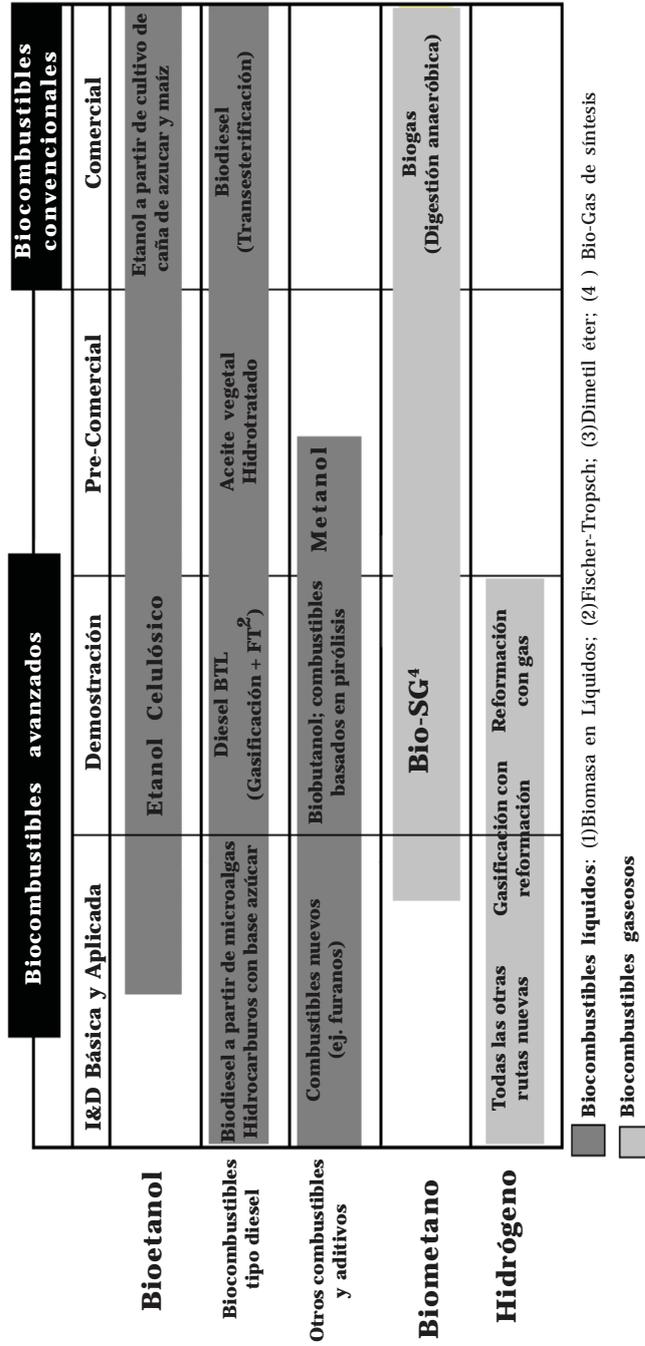


Figura 5. Estatus de comercialización de las principales tecnologías de producción de biocombustibles (IEA, 2011).

A nivel mundial, la revolución en tecnología energética está en marcha, y las inversiones en energías renovables, encabezadas por la solar y la eólica, están aumentando de manera considerable. La mejora en la tasa de eficiencia energética en los países de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) ha empezado a acelerarse, tras muchos años de aumentos moderados, y la inversión pública está aumentando para la I&D y la demostración de tecnologías con bajas emisiones de carbono. En el transporte, las grandes empresas de automóviles están ampliando sus líneas de productos con vehículos híbridos y totalmente eléctricos; además, muchos gobiernos dan facilidades para impulsar a los consumidores a comprar estos vehículos. A pesar de estos esfuerzos, la tendencia es al aumento acelerado de la demanda energética y de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionadas con el cambio climático.

Las tendencias actuales en energía y CO<sub>2</sub> son contrarias a las advertencias del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas, que concluye que para el año 2050 se necesita una reducción de por lo menos 50% en las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> comparadas con los niveles del año 2000, que permitan estabilizar los gases de efecto invernadero alrededor de 450 partes por millón (ppm) y de esta manera limitar el aumento en las temperaturas medias mundiales entre 2,0 °C y 2,4 °C.

La preocupación por la seguridad energética, la amenaza del cambio climático y la necesidad de satisfacer la creciente demanda de energía (especialmente en el mundo en desarrollo) plantean, en conjunto, importantes desafíos a los gobiernos, las industrias y el mundo académico. Es necesario que todos estos actores trabajen en equipo e incluso propicien la colaboración tecnológica internacional.

Se necesitará una cartera de tecnologías nuevas y existentes para encarar estos problemas, y a su vez con-

siderar que todos los biocombustibles están sujetos a la competencia de nuevos sustitutos a medio/largo plazo, donde emergen como paradigmas potencialmente dominantes la electricidad y el hidrógeno.

Muchas de las tecnologías con baja emisión de carbono más prometedoras en este momento tienen costos más altos que las actuales de combustibles fósiles. Es sólo mediante la I&D, la demostración y la puesta en práctica, que estos costos pueden reducirse y las tecnologías volverse económicamente factibles.

En los últimos años, se ha dado mucha atención a la importancia de las políticas que ponen un precio a las emisiones de carbono, como una forma de estimular el desarrollo y el despliegue de tecnologías no contaminantes necesarias para generar una revolución energética. Sin embargo, es poco probable que políticas de este tipo favorezcan las inversiones a corto plazo en las tecnologías más costosas, cuyos beneficios en reducción de emisiones son a un plazo más largo.

Con respecto al sector transporte nos referiremos brevemente, por el uso en este sector de los biocombustibles; actualmente, este sector es responsable del 23% de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía, y debido a que se prevé que este uso se duplicará entre el año 2010 y 2050, también se supone un aumento de las respectivas emisiones de CO<sub>2</sub>. Lograr fuertes recortes en las emisiones de CO<sub>2</sub> para el 2050 dependerá de que el uso de combustibles para el transporte aumente a un menor ritmo, mediante una mayor eficiencia energética e incrementando la proporción de combustibles que emiten poco carbono.

Aunque la reducción absoluta en las emisiones del transporte de los niveles de 2007 es posible en los países de la OCDE, el fuerte crecimiento de la población y del ingreso en los países no pertenecientes a la OCDE hará muy difícil que se logren reducciones absolutas de emisiones en el sector del transporte.

Las perspectivas son buenas para reducir el uso de combustibles y las emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte vehicular, mejorando la eficiencia de los motores de combustión interna, uso de vehículos híbridos, vehículos eléctricos y vehículos con pilas de combustible.

El escenario de una reducción del 50% en las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2050, requiere que los biocombustibles, la electricidad y el hidrógeno representen juntos el 50% del uso total de combustibles para transporte en ese año; sustituyendo a la gasolina y al diesel. La demanda de biocombustibles para vehículos ligeros con motores de combustión interna empezará a disminuir después del 2030, debido a un fuerte cambio hacia la electricidad y el hidrógeno como combustible. En cambio, el uso de biocombustibles aumenta rápidamente para camiones, barcos y aeronaves hasta el 2050, sustituyendo los destilados medios derivados del petróleo.

A pesar de las señales prometedoras de que los gobiernos están proponiendo políticas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por el transporte, es necesario aumentar la coordinación y el financiamiento para la I&D, demostración e implementación especialmente para reducir más rápidamente los costos de tecnologías avanzadas. Además, debe darse mayor atención a incentivar a los consumidores a adoptar tecnologías y estilos de vida que consoliden la transición hacia una movilidad sostenible, apartándose de los sistemas de transporte que consumen mucha energía y usen combustibles fósiles.

Con referencia a la I&D, demostración e implementación de tecnologías de biocombustibles avanzados para el sector transporte, son numerosas las posibilidades de trabajos interdisciplinarios, ejemplos de temas de investigación y desarrollo requeridos en esta materia, se muestran en la Tabla 1 (IEA, 2011).

En este contexto, Venezuela luce rezagada no solamente con respecto a los países desarrollados, sino entre los países de América Latina. Un análisis bibliométrico

de la literatura referida a energías renovables, entre los años 2008 al 2012 muestra que los países de América Latina donde las publicaciones son más importantes son: Brasil > México > Colombia > Argentina > Chile; asimismo, los países con mayor número de publicaciones, Brasil, México y Colombia, muestran una clara tendencia de un incremento lineal o quizás exponencial para los próximos años (ALONZO, D. DE, 2013). Estos países con el mayor número de publicaciones se corresponden, con los que en la región tienen un mayor número de proyectos en el marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), Brasil (42%), México (20%), Chile (8%) y Colombia (7%). América Latina y el Caribe tienen actualmente, 1.003 proyectos en trámite, concentrados (87%) en energías renovables y en reducción de metano (Figura 6) (PNUMA y CEPAL, 2010).

Teniendo en mente lo señalado y considerando que la fuerza impulsora del uso de la bioenergía no es la misma en todos los países, en la Venezuela actual son muy pocos los incentivos para el desarrollo de energías alternativas a los fósiles y más específicamente de la bioenergía, esta situación está relacionada fundamentalmente con la condición histórica de productor (Según Oil and Gas Journal (OGJ), Venezuela tenía 211 mil millones de barriles de reservas probadas de petróleo en 2011 y las primeras del mundo incorporando las reservas de petróleo extrapesado de la Faja del Orinoco; el segundo más grande del mundo y  $195 \times 10^{12}$  pies cúbicos (195 Trillones de pies cúbicos, TCF) de reservas probadas de gas natural en 2012, el segundo más grande en el hemisferio occidental, después de Estados Unidos) y consumidor de combustibles fósiles a muy bajo costo.

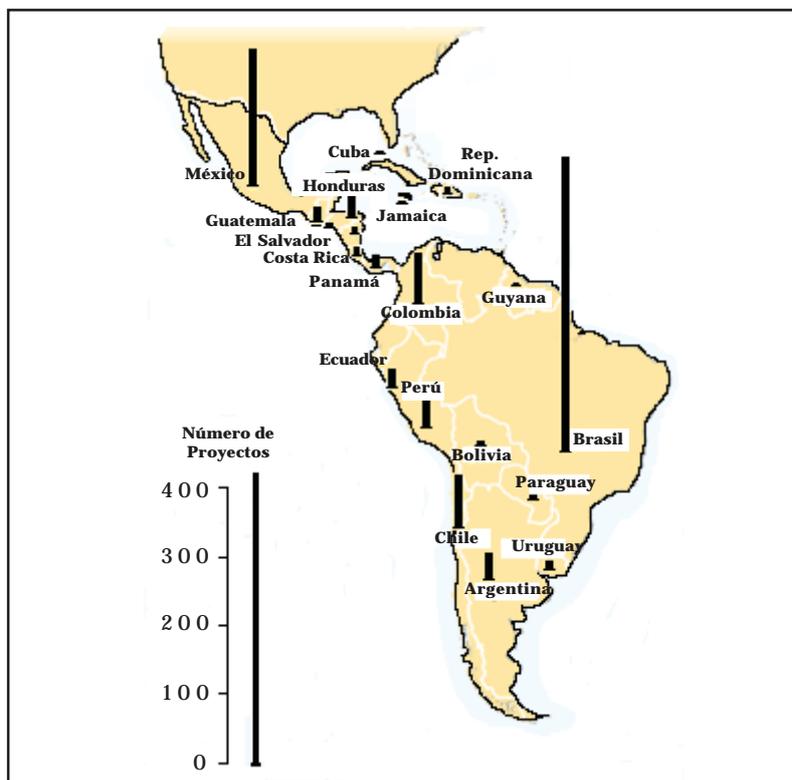
Adicionalmente, las características del Estado, impiden prever una política de aumento de los costos de la energía aún a corto plazo, y aunque se conoce del aumento de la demanda, no pareciera existir una política establecida inclinada para cubrir esta demanda potencial (y no hay ningún incentivo) con fuentes de energía renovables,

**Tabla 1.** Temas claves de I&D para el desarrollo de algunas tecnologías de biocombustibles avanzados

Tecnología	Temas claves
Etanol Celulósico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora de enzimas y microorganismos</li> <li>• Uso de azúcares C5, sea para fermentación o para su mejorar a otros productos de mayor valor</li> <li>• Uso de la lignina para añadir valor como portador de energía, o materia prima</li> </ul>
HVO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilizar la materia prima</li> <li>• Uso de hidrógeno de fuente renovable para mejorar el equilibrio de GEI (gases de efecto invernadero)</li> </ul>
Diesel BTL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabilidad del catalizador</li> <li>• Reducción de los costos de limpieza del gas de síntesis</li> <li>• Uso eficiente del calor de baja-temperatura</li> </ul>
Otros combustibles diésel/kerosene a partir de biomasa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesos de conversión a nivel piloto y plantas de demostración comercial confiables y estables</li> </ul>
Biocombustibles a partir de algas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiencia energética y de costos del cultivo, cosecha y extracción de aceite</li> <li>• Reciclaje del agua y los nutrientes</li> <li>• Valorización de corrientes de sub-productos</li> </ul>
Bio-SNG (Gas Natural Sintético)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilizar el uso de materia prima</li> <li>• Producción y limpieza del gas de síntesis</li> </ul>
Biocrudo (Pyrolysis oil)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Catalizadores para mejorar la estabilidad del biocrudo</li> <li>• Mejoramiento a biocombustibles fungibles</li> </ul>

cuya producción y consumo permitirían un ciclo de energía con muy poca huella de carbono. Lo único que parece haberse establecido (2005) como un objetivo y el cual se mencionó previamente, fue la utilización de una mezcla de 10% de etanol y gasolina (IEA, 2011) con importación del etanol desde Brasil.

Sin embargo, las presiones ambientales y el cambio climático, que constituye una amenaza fundamental para el desarrollo económico y la lucha contra la pobreza, y que según el Banco Mundial, un planeta sujeto a un proceso de calentamiento amenaza con hacer de la prosperidad un objetivo inaccesible para millones de personas y que se reviertan los logros de décadas de desarrollo; prácticamente obligarán a Venezuela al uso de



**Figura 6.** Proyectos de mecanismo de desarrollo limpio, América Latina y el Caribe. **Fuente:** CEPAL. Sobre la base del PNUMA; *UNEP Risoe CMD/J/pipeline Analysis and database*. Base de datos en línea, actualización hasta el 1 de octubre de 2010.

fuentes de energía cuya producción y consumo permitan un ciclo prácticamente libre de CO<sub>2</sub> desde la generación hasta su uso final. Si bien esto a primera vista puede parecer un esfuerzo técnico, esta transformación requiere de un cambio de la cultura en el desarrollo tecnológico.

Con respecto a las presiones ambientales, tanto la industria automotriz como la petrolera han desarrollado tecnologías o tienen iniciativas para atender esta prioridad, pero estos desarrollos no son suficientes y será casi obligatorio el uso de combustibles y en general de fuentes de energía con una huella de carbono muy baja.

Para Venezuela, una de las opciones podría ser la incorporación en su matriz energética, entre otras energías renovables de la biomasa, la cual es una materia prima con potencial de estar fácilmente disponible, y no solo mediante los cultivos dedicados a energía, sino en forma de residuos que pueden ser de procesamiento de alimentos, industriales, aguas residuales municipales y la basura doméstica; estos residuos y desechos representan actualmente y en algunos casos altos costos de disposición, pasivos ambientales y un grave obstáculo para el crecimiento industrial.

A pesar que, la evaluación de los costos de oportunidad para los residuos es difícil debido a la ausencia de mercados ya establecidos. La exactitud de los datos sobre los costos es generalmente mejor cuando los residuos se utilizan comercialmente (por ejemplo, bagazo que se quema para producir calor y electricidad), que si se utilizan en el sector informal (por ejemplo, como combustible domésticos para cocinar, fertilizantes orgánicos o alimentos preparados para animales); estos costos son en general menores en comparación con los cultivos energéticos. Por lo tanto, para el caso de Venezuela, se debe evaluar los residuos como una materia prima económicamente atractiva para la producción de los biocombustibles avanzados, además que no implica la transformación de hábitats naturales en tierras agrícolas

Mención aparte por su efecto sobre la industria energética nacional, es el caso del hidrógeno, porque en la actualidad parte de los combustibles fósiles, se dirigen a cubrir la creciente demanda de  $H_2$  sea para el mejoramiento de crudos pesados, la desulfuración y la mejora del petróleo convencional, para la producción de productos petroquímicos y, además se debe prever la posible demanda del  $H_2$  como combustible para el sector transporte, lo cual requeriría su producción masiva. El aumento de la producción de  $H_2$  por las tecnologías actuales implicaría el consumo de hidrocarburos conven-

cionales (principalmente gas natural), que a su vez generan emisiones de gases de efecto invernadero.

La producción de H<sub>2</sub> a partir de fuentes renovables tales como las mencionadas, o en general cualquier corriente de desechos industriales con carga orgánica, ofrecen la posibilidad de contribuir al aumento de su producción con un balance de baja o ninguna emisión neta de gases de efecto invernadero (sin las tecnologías de secuestro de carbono). Sin embargo, estas tecnologías de producción de H<sub>2</sub> enfrentan retos técnicos, tales como la eficiencia de conversión, el tipo de materia prima, y la necesidad de integrar de forma segura los sistemas de producción, purificación y almacenamiento. La producción de bio-hidrógeno en la actualidad no es económicamente competitiva con la reformación con vapor del gas natural, excepto se considere la valorización de algunos co-productos, o que la materia prima resuelva un importante problema de disposición de desechos o residuos. Como en cualquier proyecto de bioenergía se debe asegurar la disposición en cantidad y tiempo de las posibles fuentes de biomasa, y considerar las preocupaciones con respecto a la neutralidad de CO<sub>2</sub> desde su producción al uso final.

Finalmente y a manera de conclusión, se considera que el papel de los gobiernos es imprescindible (y casi obligatoria) para el desarrollo de las tecnologías con bajas emisiones de carbono, sea mediante el uso de fuentes de energía renovables; el uso de tecnologías con base en combustión, pero que emitan menos CO<sub>2</sub>; y/o desarrollando tecnologías que permitan el retiro de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Adicionalmente, los gobiernos necesitarán intervenir para evitar que se instalen y usen tecnologías ineficientes, productoras de emisiones altas.

Se debe considerar, como un área importante de aplicación de tecnologías de energías alternativas, el sector del transporte, que en gran medida se basa en la com-

bustión de combustibles fósiles y por lo tanto contribuyen con una gran parte de las emisiones.

Las tecnologías de energía que se deben desarrollar, son aquellas en las cuales se da la combinación de fuentes renovables de la energía, y que proporcionen un ciclo de energía libre de CO<sub>2</sub> desde la generación hasta su uso final. Si bien esto a primera vista puede parecer un esfuerzo técnico, esta transformación del uso de los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables no puede alcanzarse solo con la participación de los investigadores básicos y los tecnólogos, sino que es importante establecerla cultura de una economía con bajas emisiones de carbono. De hecho, la colaboración interdisciplinaria es necesaria con el fin de hacer frente a este cambio en el paradigma energético.

Con la continua aparición de nuevas reservas de energía fósil, no parece probable la total sustitución de los combustibles fósiles aún a largo plazo, excepto se produzcan avances muy importantes tanto técnicos como económicos en las energías libres de CO<sub>2</sub>.