

2. Biocombustibles y agricultura: panorama técnico

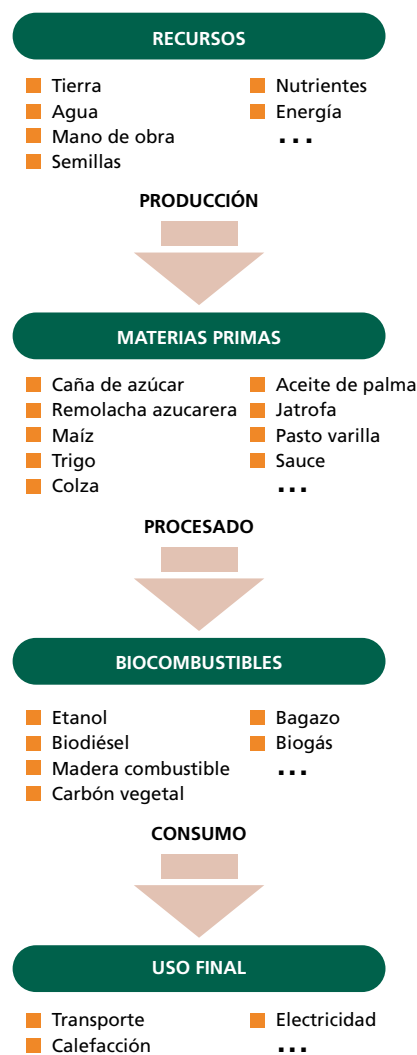
En muchas partes del mundo la leña, el carbón vegetal y el estiércol, entre otras formas tradicionales de biomasa, siguen siendo importantes fuentes de energía. La bioenergía es la fuente predominante de energía para la mayoría de los habitantes del mundo que viven en situación de extrema pobreza y usan ese tipo de energía principalmente para cocinar. Gracias a la existencia de tecnologías de conversión más avanzadas y eficientes, actualmente es posible extraer biocombustibles, en forma sólida, líquida y gaseosa, de materiales como la madera, los cultivos y los desechos. En el presente capítulo se ofrece un panorama general de los biocombustibles. ¿Qué son, cuáles son sus posibilidades y qué consecuencias tienen para la agricultura? La atención se centrará, no obstante, en los biocombustibles líquidos para el transporte, que cada día adquieren mayor importancia debido a la rapidez con que se expande su uso.

Tipos de biocombustibles

Los biocombustibles son portadores de energía que almacenan la energía derivada de la biomasa². Se puede utilizar una amplia gama de fuentes de biomasa para producir bioenergía en diversas formas. Por ejemplo, los alimentos, las fibras y los residuos de madera elaborada provenientes del sector industrial; los cultivos energéticos, los cultivos de rotación breve y los desechos agrícolas provenientes del sector de la agricultura, tanto como los residuos provenientes del sector forestal, se pueden usar para generar electricidad, calor, calor y energía combinados y otras formas de bioenergía. De los biocombustibles se puede decir que son una fuente de energía renovable, ya que son una forma de energía solar transformada.

Los biocombustibles se pueden clasificar según la fuente y el tipo. Se derivan de productos forestales, agrícolas y pesqueros o desechos municipales, así como de subproductos y desechos de la

FIGURA 4
Biocombustibles: desde la materia prima hasta el uso final



² Para un examen de la terminología relacionada con los biocombustibles, véase FAO (2004a).

RECUADRO 1

Otros tipos de biomasa para la generación de calor y energía y para el transporte

Biomasa para la generación de calor y energía

Una serie de recursos de biomasa se utilizan para generar electricidad y calor mediante la combustión. Entre esos recursos figuran diversas formas de residuos, como los residuos de las agroindustrias, los residuos que quedan en los campos de cultivo tras las cosechas, el estiércol, los residuos madereros de origen forestal o industrial, los residuos de la industria alimentaria y del papel, los residuos sólidos urbanos, los fangos cloacales y el biogás proveniente de la digestión de residuos agrícolas u otros residuos orgánicos. También se usan cultivos propiamente energéticos, como plantas perennes de corta rotación (eucalipto, álamo y sauce) y gramíneas (miscanto y pasto varilla).

Se pueden emplear diferentes procesos para generar energía. La mayor parte de la electricidad derivada de la biomasa se genera mediante un proceso de ciclo de vapor: se quema la biomasa en una caldera con el fin de generar vapor de alta presión que, al fluir por una serie de cuchillas aerodinámicas, hace girar una turbina, que a su vez pone en marcha

un generador eléctrico conectado para producir electricidad. También se pueden usar como combustible formas compactas de biomasa como los gránulos de madera y los aglomerados, mientras que la biomasa también se puede quemar con carbón en la caldera de una central eléctrica convencional para generar vapor y electricidad. Este último es actualmente el método más eficiente en función de los costos para incorporar tecnologías renovables en la producción de energía por métodos convencionales, ya que, en su mayor parte, es posible usar la infraestructura de las centrales eléctricas sin necesidad de mayores modificaciones.

Biogás para la generación de calor y energía y para el transporte**Digestión anaeróbica**

Se puede producir biogás mediante la digestión anaeróbica de alimentos o residuos animales por bacterias en entornos con muy baja concentración de oxígeno. El biogás resultante contiene un alto volumen de metano al igual que de dióxido de carbono, que se puede usar para generar calor o electricidad en un motor modificado de combustión interna.

agroindustria, la industria alimentaria y los servicios alimentarios. Pueden ser *sólidos*, como la leña, el carbón vegetal y los gránulos de madera; *líquidos*, como el etanol, el biodiésel y el aceite de pirólisis, o *gaseosos*, como el biogás.

También se hace una distinción elemental entre biocombustibles *primarios* (sin elaborar) y *secundarios* (elaborados):

- **Los biocombustibles primarios**, como la leña, las astillas y los gránulos de madera son aquellos en los que el material orgánico se usa esencialmente en su forma natural (tal como se han recogido). Este tipo de biocombustible es de combustión directa y en general se usa para satisfacer la demanda de combustible para cocinar o generar calefacción o electricidad en aplicaciones industriales en pequeña y gran escala.

- **Los biocombustibles secundarios** en forma sólida (por ejemplo, el carbón vegetal), líquida (por ejemplo, el etanol, el biodiésel y el biopetróleo), o gaseosa (por ejemplo, el biogás, el gas de síntesis y el hidrógeno) pueden usarse en un número mayor de aplicaciones, como el transporte y procesos industriales a altas temperaturas.

Biocombustibles líquidos para el transporte³

A pesar de su volumen general limitado (véase la Figura 5), en años recientes han sido los biocombustibles líquidos para el

³ Esta sección se basa en GBEP (2007, págs. 2-10) y AIE (2004).

La conversión de residuos animales y estiércol en metano/biogás reporta considerables beneficios ambientales y para la salud. El metano es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global de 22 a 24 veces más elevado que el del dióxido de carbono. Al atrapar y utilizar el metano, se evita su efecto invernadero. Además, el calor generado durante el proceso de biodigestión mata los patógenos presentes en el estiércol, mientras que el material que queda al final del proceso constituye un valioso fertilizante.

Gasificación

La biomasa sólida puede convertirse en gas combustible o biogás mediante el proceso de gasificación. Los gasógenos de biomasa actúan mediante el calentamiento de la biomasa en un medio con una baja concentración de oxígeno y altas temperaturas, en que la biomasa se descompone y emite un gas de síntesis inflamable y rico en energía o «singás». Este gas se puede quemar en una caldera convencional o utilizarse en lugar de gas natural en una turbina de gas para poner en marcha generadores eléctricos.

El biogás que se forma mediante la gasificación se puede filtrar para eliminar compuestos químicos no deseados y se puede usar en sistemas eficientes de generación de energía de «ciclo combinado» que generan electricidad mediante la combinación de turbinas de vapor y de gas.

Biogás para el transporte

El biogás no tratado es inutilizable como combustible para el transporte debido a su bajo contenido de metano (60-70 por ciento) y elevada concentración de contaminantes. No obstante, se puede tratar para eliminar el dióxido de carbono, el agua y el sulfuro de hidrógeno corrosivo y aumentar su contenido de metano (hasta más del 95 por ciento). Cuando es sometido a compresión, el biogás tratado posee propiedades similares a las del gas natural comprimido, lo que lo hace apto para su uso en el transporte.

Fuente: basado en GBEP, 2007.

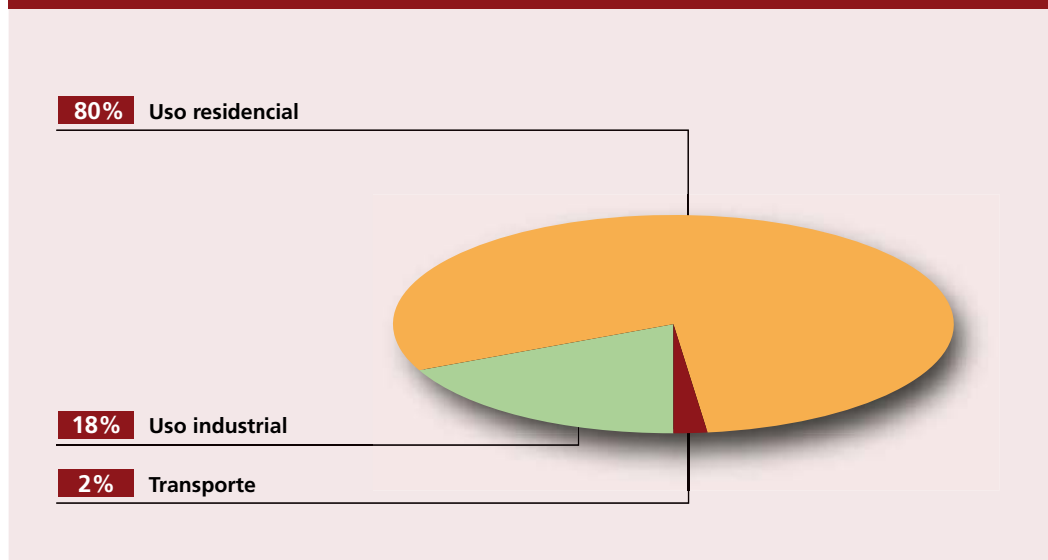
transporte, producidos mayormente a partir de productos agrícolas y alimenticios básicos como materia prima, los que han conocido un crecimiento más rápido. Los casos más significativos son los del etanol y el biodiésel.

Etanol

Cualquier materia prima con un alto contenido de azúcar, o de ingredientes que se convierten en azúcar como el almidón o la celulosa, se puede usar para producir etanol. El etanol actualmente disponible en el mercado de biocombustibles se produce a partir de azúcar o de almidón. Los cultivos de azúcar comúnmente usados como materia prima son la caña de azúcar, la remolacha azucarera y el sorgo azucarado. Entre las féculas que se usan comúnmente como materia prima se encuentran el maíz, el trigo y la yuca. La manera más

simple de producir etanol es mediante la fermentación de biomasa con contenido de azúcar directamente convertible en etanol. En el Brasil y otros países tropicales que actualmente producen etanol, la materia prima más ampliamente usada con ese fin es la caña de azúcar. En los países de la OCDE la mayor parte del etanol se produce a partir del componente feculento de los cereales (aunque también se usa la remolacha azucarera), bastante fácilmente convertible en azúcar. Sin embargo, estos productos feculentos representan solo un pequeño porcentaje de la masa vegetal total. En la mayoría de los casos, la materia vegetal se compone de celulosa, hemicelulosa y lignina; las dos primeras se pueden convertir en alcohol una vez convertidas en azúcar, aunque este procedimiento es más difícil que el de convertir almidón en azúcar.

FIGURA 5
Usos de la biomasa para la energía



Fuente: AIE, 2007.

En la actualidad, no existe prácticamente producción comercial de etanol a partir de biomasa celulósica, pero se siguen realizando investigaciones importantes en ese ámbito (véase la sección sobre los biocombustibles de segunda generación, en las páginas 20 y 21).

El etanol puede mezclarse con gasolina o quemarse puro en motores de encendido por chispa ligeramente modificados. Un litro de etanol contiene aproximadamente el 66 por ciento de la energía suministrada por un litro de petróleo, pero posee un nivel más elevado de octano y, mezclado con gasolina para el transporte, mejora el rendimiento de esta última. Mejora además el consumo de combustible de los vehículos, con lo que se reduce la emisión de monóxido de carbono, hidrocarburos sin quemar y carcinógenos. No obstante, la combustión de etanol también provoca una reacción más fuerte con el nitrógeno de la atmósfera, lo que puede resultar en un aumento marginal de los gases de óxido de nitrógeno. En comparación con la gasolina, el etanol contiene solo una cantidad ínfima de azufre. Por tanto, la mezcla de etanol con gasolina ayuda a reducir el contenido de azufre del combustible y, consiguientemente, reduce también las emisiones de óxido de azufre, componente de la lluvia ácida y carcinógeno.

Biodiésel

El biodiésel se produce a partir de la combinación de aceite vegetal o grasa animal con un alcohol y un catalizador por medio de un proceso químico conocido como *transesterificación*.

Se puede extraer aceite para producir biodiésel de casi cualquier cultivo oleaginoso; a nivel mundial las fuentes más populares de biodiésel son, en Europa, la colza, y en el Brasil y los Estados Unidos de América, la soja. En los países tropicales y subtropicales se produce biodiésel a partir de aceite de palma, coco o jatrofa. En la producción de biodiésel también se utilizan pequeñas cantidades de grasa animal extraída del procesamiento del pescado y otros animales. Comúnmente, del proceso de producción se derivan subproductos tales como la «torta» de frijoles aplastados (un tipo de pienso) y la glicerina. Como el biodiésel se puede producir a partir de una amplia gama de aceites, los combustibles resultantes exhiben una mayor variedad de propiedades físicas, como viscosidad y combustibilidad, que el etanol.

El biodiésel puede mezclarse con combustible diésel tradicional o quemarse puro en motores de encendido por compresión. Su contenido de energía oscila entre el 85 por ciento y el 95 por ciento del contenido de energía del diésel, pero mejora la lubricidad de este último y aumenta el

índice de cetano, con lo que, en términos generales, uno y otro poseen un rendimiento análogo. El mayor contenido de oxígeno del biodiésel facilita la combustión y reduce así las emisiones de contaminantes del aire en partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos. Al igual que el etanol, el biodiésel contiene solo una cantidad insignificante de azufre y reduce, por tanto, las emisiones de óxido de azufre de los vehículos.

Aceite vegetal no modificado

El aceite vegetal no modificado⁴ es un combustible potencial para motores diésel que se puede producir a partir de diversas fuentes, entre ellas los cultivos oleaginosos, como la colza, el girasol, la soja y la palma. También se pueden usar como combustible de vehículos diésel el aceite de cocinar usado de los restaurantes y la grasa animal de desecho de las industrias de elaboración de carne.

Materias primas para biocombustibles

Existen muchas fuentes de suministro de biomasa para la producción de energía, repartidas entre amplias y diversas zonas geográficas. Todavía hoy, la mayor parte de la energía obtenida a partir de biomasa y usada como combustible se deriva de subproductos o coproductos de la elaboración de alimentos, forrajes y fibras. Por ejemplo, los principales subproductos de las industrias forestales se emplean para producir leña y carbón vegetal, a la vez que el licor negro (subproducto del pulpeo) es una fuente importante de combustible para la generación de bioelectricidad en países como Brasil, Canadá, Estados Unidos de América, Finlandia y Suecia. Una cantidad considerable de calor y energía se deriva de la biomasa forestal recuperada o reciclada y de la biomasa derivada de tierras de cultivo (paja y tallos de algodón) y tierra forestal (astillas y gránulos) se recuperan cantidades cada vez mayores de energía. En los países productores de azúcar o café, el bagazo de caña y la cáscara del café se utilizan para la combustión directa y para producir calor, energía y vapor.

En términos de bioenergía, sin embargo, el ámbito de mayor crecimiento durante los últimos años ha sido el de la producción de combustibles líquidos para el transporte a partir de cultivos agrícolas como materia prima. En su mayor parte, han adquirido la forma de etanol, producido a partir de cultivos de azúcar o almidón, o de biodiésel derivado de cultivos oleaginosos.

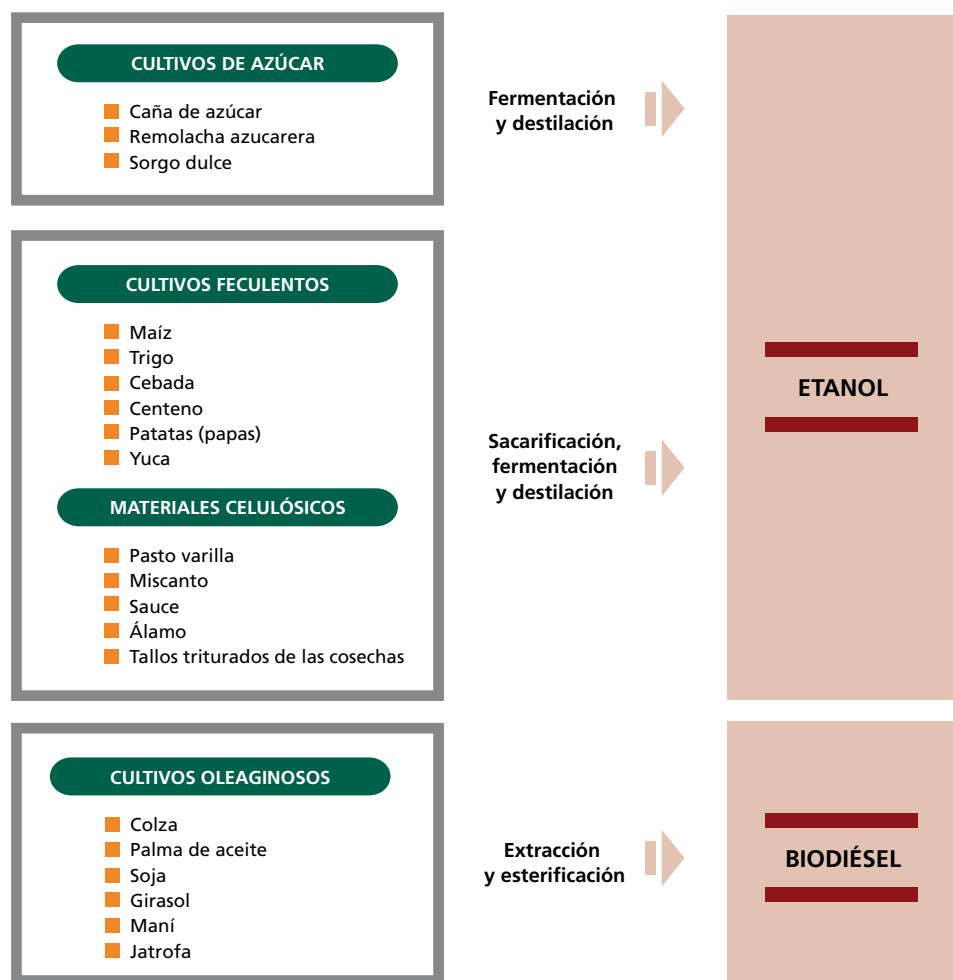
Como se muestra en la Figura 6, se puede usar toda una gama de cultivos como materia prima para producir etanol y biodiésel. No obstante, en su mayor parte, la producción mundial de etanol se deriva de la caña de azúcar o el maíz; en el Brasil, el mayor porcentaje de la producción de etanol se deriva de la caña de azúcar, y en los Estados Unidos de América, del maíz. Entre otros cultivos importantes se cuentan la yuca, el arroz, la remolacha azucarera y el trigo. En el caso del biodiésel, las materias primas de mayor popularidad son la colza en la Unión Europea, la soja en los Estados Unidos de América y el Brasil, y los aceites de palma y coco en los países tropicales y subtropicales.

Biocombustibles y agricultura

La expansión y el crecimiento actuales de los mercados energéticos, como resultado de la aplicación en el pasado decenio en la mayoría de los países desarrollados y varios países en desarrollo de nuevas políticas energéticas y ambientales, están reconfigurando el papel de la agricultura. Más importante aún es el papel cada vez mayor de ese sector como proveedor de materia prima para la producción de biocombustibles líquidos para el transporte, en particular etanol y biodiésel. La bioenergía moderna constituye una nueva fuente de demanda de productos agrícolas, por lo que abre perspectivas de generación de ingresos y creación de empleos. Al mismo tiempo, genera una competencia cada vez más fuerte por los recursos naturales, particularmente la tierra y el agua, sobre todo a corto plazo, si bien a la larga el aumento de los rendimientos podría mitigar dicha competencia. La competencia por la tierra se convierte en un problema sobre todo cuando algunos de los cultivos (por ejemplo, el maíz, el aceite de palma y la soja), que actualmente se cosechan para

⁴ También conocido como aceite vegetal puro.

FIGURA 6
Conversión de materias primas agrícolas en biocombustibles líquidos



Fuente: FAO.

producir alimentos y pienso, se destinan a la producción de biocombustibles, o cuando se convierten tierras agrícolas orientadas hacia la producción de alimentos en tierras para producir biocombustibles.

Actualmente, cerca del 85 por ciento de la producción mundial de biocombustibles líquidos está representada por el etanol (Cuadro 1). Los dos mayores productores de etanol, Brasil y Estados Unidos de América, dan cuenta de casi el 90 por ciento de la producción mundial, cuyo 10 por ciento restante se reparte entre Canadá, China, la Unión Europea (principalmente Francia y Alemania) y la India. La producción de biodiésel se concentra principalmente en la Unión Europea (a la que corresponde cerca

del 60 por ciento del total), mientras que los Estados Unidos de América aportan una contribución considerablemente menor. En el Brasil, la producción de biodiésel es un fenómeno más reciente y el volumen de la producción sigue siendo limitado. Entre otros productores importantes de biodiésel cabe mencionar China, la India, Indonesia y Malasia.

Existen amplias diferencias entre los cultivos en lo que respecta al rendimiento de biocombustible por hectárea, en dependencia tanto de la materia prima y el país como del sistema de producción, tal como se ilustra en el Cuadro 2. Estas variaciones se deben lo mismo a diferencias en los rendimientos por hectárea de cultivos y países que a diferencias entre los

CUADRO 1
Producción de biocombustibles por países, 2007

PAÍS/GRUPO DE PAÍSES	ETANOL		BIODIÉSEL		TOTAL	
	(Millones de litros)	(emtp)	(Millones de litros)	(emtp)	(Millones de litros)	(emtp)
Brasil	19 000	10,44	227	0,17	19 227	10,60
Canadá	1 000	0,55	97	0,07	1 097	0,62
China	1 840	1,01	114	0,08	1 954	1,09
India	400	0,22	45	0,03	445	0,25
Indonesia	0	0,00	409	0,30	409	0,30
Malasia	0	0,00	330	0,24	330	0,24
Estados Unidos de América	26 500	14,55	1 688	1,25	28 188	15,80
Unión Europea	2 253	1,24	6 109	4,52	8 361	5,76
Otros	1 017	0,56	1 186	0,88	2 203	1,44
Mundo	52 009	28,57	10 204	7,56	62 213	36,12

Nota: Los datos presentados pueden haber sido redondeados.

Fuente: Basado en F.O. Licht, 2007, datos provenientes de la base de datos OCDE-FAO AgLink-Cosimo.

cultivos en cuanto a su eficiencia en materia de conversión. Ello supone diferencias considerables respecto de las necesidades de tierra para aumentar la producción de biocombustibles en dependencia del cultivo y el lugar. Actualmente, la producción de etanol a partir de la caña de azúcar o la remolacha azucarera exhibe los rendimientos más altos, con Brasil a la cabeza de los países que producen etanol a partir de la caña de azúcar en lo que se refiere al rendimiento de biocombustible por hectárea, seguido de cerca por la India. Los rendimientos por hectárea son algo más bajos en el caso del maíz, aunque con marcadas diferencias entre éstos; por ejemplo, en China y los Estados Unidos de América. Los datos que se muestran en el Cuadro 2 reflejan solamente los rendimientos técnicos. Lo que cuesta producir biocombustibles a partir de diferentes cultivos en diferentes países puede seguir patrones muy diferentes. Este aspecto se examina más adelante en el Capítulo 3.

Ciclo de vida de los biocombustibles: balances energéticos y emisiones de gases de efecto invernadero

Dos de las principales fuerzas impulsoras de las políticas encaminadas a promover el desarrollo de los biocombustibles han

sido las preocupaciones sobre la seguridad energética y el deseo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Como mismo diferentes cultivos muestran diferentes rendimientos en términos de biocombustible por hectárea, existen grandes variaciones en términos de balance de energía y emisión de gases de efecto invernadero entre materias primas, lugares y tecnologías.

La contribución de cada biocombustible al suministro de energía depende tanto del contenido energético del combustible como de la energía que se gasta en producirlo. Esta última comprende la energía necesaria para cultivar y cosechar la materia prima, convertirla en biocombustible y transportarla junto con el biocombustible derivado de ella en las diversas fases de su producción y distribución. El balance de energía fósil expresa la proporción entre la energía contenida en el biocombustible y la energía fósil empleada en su producción. Un balance de energía fósil de 1,0 significa que se necesita tanta energía para producir un litro de biocombustible como energía contenga éste; en otras palabras, el biocombustible en cuestión no supone ni ganancias ni pérdidas netas de energía. Un balance de energía de combustible fósil de 2,0 significa que un litro de biocombustible contiene el doble de la energía que se necesita para producirlo. Los problemas con que tropieza la evaluación

CUADRO 2
Rendimientos de los biocombustibles para diferentes materias primas y países

CULTIVO	ESTIMACIONES MUNDIALES/NACIONALES	BIOCOMBUSTIBLE	RENDIMIENTO DEL CULTIVO	EFICIENCIA DE LA CONVERSIÓN	RENDIMIENTO DEL BIOCOMBUSTIBLE
			(Toneladas/ha)	(Litros/tonelada)	(Litros/ha)
Remolacha azucarera	Mundial	Etanol	46,0	110	5 060
Caña de azúcar	Mundial	Etanol	65,0	70	4 550
Yuca	Mundial	Etanol	12,0	180	2 070
Maíz	Mundial	Etanol	4,9	400	1 960
Arroz	Mundial	Etanol	4,2	430	1 806
Trigo	Mundial	Etanol	2,8	340	952
Sorgo	Mundial	Etanol	1,3	380	494
Caña de azúcar	Brasil	Etanol	73,5	74,5	5 476
Caña de azúcar	India	Etanol	60,7	74,5	4 522
Palma de aceite	Malasia	Biodiésel	20,6	230	4 736
Palma de aceite	Indonesia	Biodiésel	17,8	230	4 092
Maíz	Estados Unidos de América	Etanol	9,4	399	3 751
Maíz	China	Etanol	5,0	399	1 995
Yuca	Brasil	Etanol	13,6	137	1 863
Yuca	Nigeria	Etanol	10,8	137	1 480
Soja	Estados Unidos de América	Biodiésel	2,7	205	552
Soja	Brasil	Biodiésel	2,4	205	491

Fuentes: Rajagopal et al., 2007, para los datos mundiales; Naylor et al., 2007, para los datos nacionales.

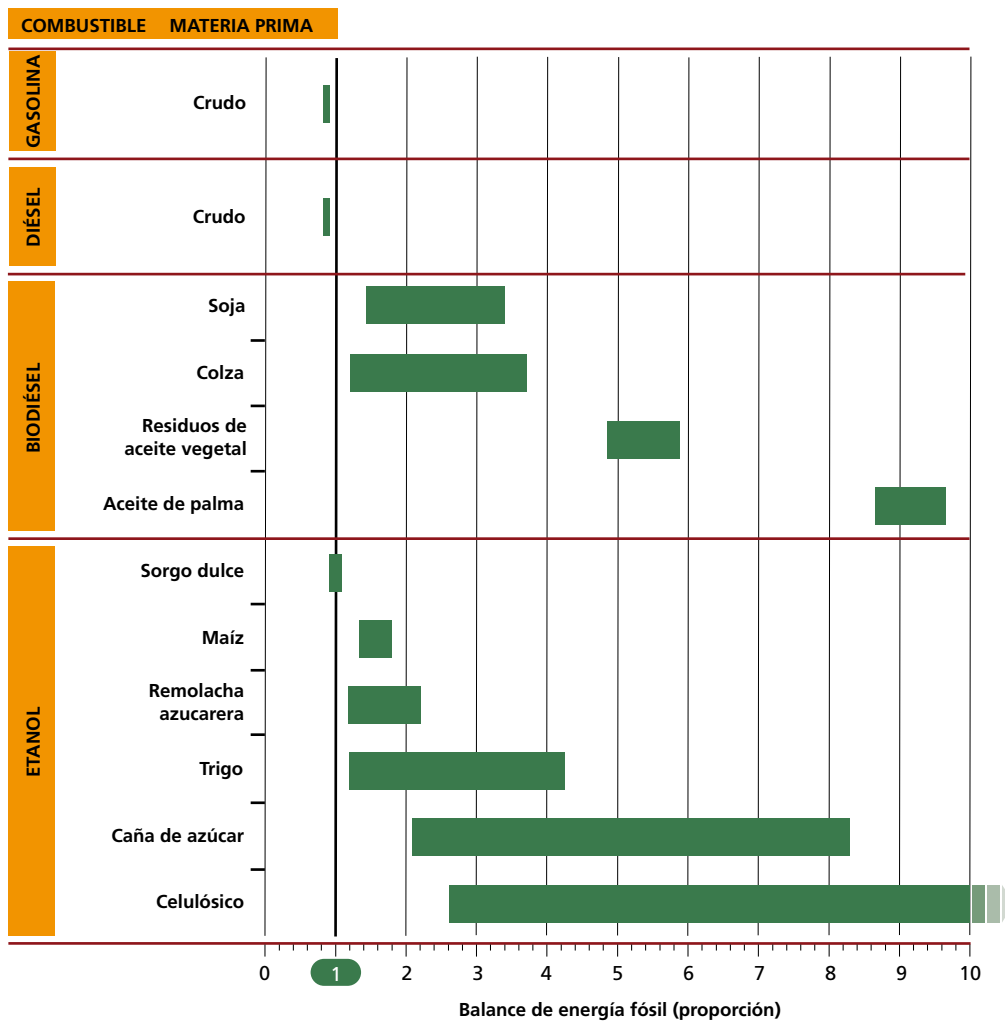
precisa de los balances de energía se derivan de la dificultad de definir claramente los límites del sistema para el análisis.

En la Figura 7 se resumen los resultados de varios estudios sobre balances de energía fósil de diferentes tipos de combustible, de acuerdo con la información proporcionada por el Instituto de la Vigilancia Mundial (2006). En ella se revelan amplias variaciones entre los balances estimados de energía fósil de materias primas y combustibles y, a veces, entre combinaciones de materias primas y combustibles, en función de factores como la productividad de la materia prima, las prácticas agrícolas y las tecnologías de conversión.

La gasolina y el diésel convencionales poseen balances de energía fósil de aproximadamente 0,8-0,9, por cuanto una parte de la energía se consume en refinar el crudo para convertirlo en combustible

utilizable y transportarlo a los mercados. Los biocombustibles con un balance de energía fósil superior a esos valores contribuyen a reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Al parecer, todos los combustibles fósiles aportan una contribución positiva a ese respecto, si bien en grados que varían considerablemente. Los balances estimados de combustible fósil del biodiésel oscilan entre 1 y 4 para la colza y la soja. Los balances estimados para el aceite de palma, de alrededor de 9, son más elevados, ya que otras semillas oleaginosas deben ser trituradas para extraer el aceite, fase adicional de conversión que requiere energía. En el caso del etanol elaborado a base de cultivos, los balances estimados oscilan entre menos de 2,0 para el maíz y 2 a 8 para la caña de azúcar. El balance favorable de energía fósil del etanol elaborado a partir de la caña de azúcar, como es el caso en el

FIGURA 7
Gamas estimadas de balances de energía fósil de determinados tipos de combustible



Nota: Las proporciones de los biocombustibles celulósicos son teóricas.

Fuentes: Basado en Instituto de la Vigilancia Mundial, 2006, Cuadro 10.1; Rajagopal y Zilberman, 2007.

Brasil, depende no solo de la productividad de la materia prima, sino también del hecho de que su elaboración supone el uso de residuos de biomasa de la caña de azúcar (bagazo) como aporte energético. La variedad de los balances estimados de combustible fósil de las materias primas celulósicas es más amplia aún, lo que es reflejo de la incertidumbre en relación con esta tecnología y la diversidad de materias primas y sistemas de producción posibles.

De manera similar, el efecto neto de los biocombustibles para las emisiones de

gases de efecto invernadero puede variar considerablemente. Los biocombustibles se elaboran a partir de biomasa; en teoría, por tanto, deben ser neutrales por lo que se refiere a las emisiones de dióxido de carbono, ya que durante su combustión se libera de nuevo a la atmósfera solo el carbono captado por la planta durante su crecimiento, a diferencia de los combustibles fósiles, que liberan el carbono almacenado durante millones de años debajo de la superficie de la tierra. Sin embargo, al evaluar el efecto neto de un determinado

biocombustible para las emisiones de gases de efecto invernadero es menester analizar las emisiones a lo largo del ciclo de vida del biocombustible: sembrar y cosechar el cultivo; convertir la materia prima en biocombustible; transportar la materia prima y el combustible final, y almacenar, distribuir y vender al por menor el combustible, incluidos los efectos de alimentar con combustible un vehículo y las emisiones causadas por la combustión. Además, es necesario tener en cuenta cualquier posible coproducto que pueda reducir las emisiones. Es evidente, por tanto, que los balances de energía fósil son solo uno de los varios factores que determinan el efecto de los biocombustibles para las emisiones. Entre los factores decisivos relacionados con el proceso de producción agrícola figuran el uso de fertilizantes y plaguicidas, la tecnología de riego y el tratamiento de los suelos. Los cambios en el uso de la tierra asociados con el auge de la producción de biocombustibles pueden tener repercusiones considerables. Por ejemplo, la conversión de terrenos forestales en tierras de cultivos destinados a la producción de biocombustibles o de cultivos agrícolas desplazados de otras tierras por materias primas para biocombustibles puede liberar grandes cantidades de carbono que tomaría años recuperar mediante la reducción de las emisiones que resulte de la sustitución de biocombustibles por combustibles fósiles. En el Capítulo 5 se aborda con mayor profundidad la relación entre los biocombustibles y las emisiones de gases de efecto invernadero y se examinan las pruebas de que los efectos de los biocombustibles para el cambio climático pueden variar y no necesariamente ser positivos, o tan positivos como en principio no pocas veces se asume.

Biocombustibles líquidos de segunda generación⁵

Los biocombustibles líquidos producidos actualmente a partir de cultivos de azúcar o almidón (en el caso del etanol) y cultivos de semillas oleaginosas (en el caso del biodiésel) generalmente se denominan

biocombustibles de primera generación. Una segunda generación de tecnologías en fase de desarrollo podría permitir utilizar, además, biomasa lignocelulósica. La biomasa celulósica es más resistente a la trituración que el almidón, el azúcar y los aceites. La dificultad de convertir biomasa celulósica en combustibles líquidos encarece la tecnología de conversión, si bien el costo de la materia prima celulósica como tal es inferior al de las materias primas de primera generación actuales. La conversión de la celulosa en etanol supone dos fases: primero los componentes de celulosa y hemicelulosa de la biomasa se descomponen en azúcares y, luego, éstos se fermentan para obtener etanol. La primera fase resulta compleja desde el punto de vista técnico, aunque prosiguen las investigaciones sobre la elaboración de métodos eficientes y rentables de ejecutar el proceso.

Dado que la biomasa celulósica es el material biológico que más abunda en la tierra, el desarrollo exitoso de los biocombustibles de segunda generación comercialmente viables, elaborados a partir de celulosa, podría redundar en un aumento considerable del volumen y la variedad de materias primas factibles de ser usadas en la producción de esos biocombustibles. Los desechos de celulosa, en particular los productos de desecho de la agricultura (paja, escobajos, hojas) y la silvicultura, los desechos de procesos de elaboración (cáscaras de nuez, bagazo de caña de azúcar y aserrín) y las partes orgánicas de los desperdicios municipales) podrían todos convertirse en fuentes posibles de materia prima. No obstante, es importante tener en cuenta la función decisiva que desempeña la descomposición de la biomasa en el mantenimiento de la fertilidad y la textura del suelo; el exceso de extracciones para su uso como fuente de bioenergía podría tener efectos negativos.

Los cultivos celulósicos destinados a la producción de energía ofrecen perspectivas prometedoras como fuente de materia prima para las tecnologías de segunda generación. Entre los cultivos posibles de este tipo figuran las plantas leñosas de rotación breve, como el sauce, los álamos y los eucaliptos híbridos y especies gramíneas como el miscanto, el pasto varilla y el alpiste arundinácea. Estos cultivos poseen ventajas importantes respecto de los

⁵ Esta sección se basa en GBEP (2007), AIE (2004) y Rutz y Janssen (2007).

cultivos de primera generación en cuanto a su sostenibilidad ambiental. Comparados con el almidón convencional y las plantas oleaginosas, pueden producir más biomasa por hectárea de tierra, ya que se pueden usar íntegramente como materia prima para su conversión en biocombustible. Además, algunas perennes de crecimiento rápido, como las plantas leñosas de rotación breve y los pastos altos, crecen a veces en suelos pobres y degradados en los que la producción de cultivos alimentarios no es óptima a causa de la erosión y otras limitaciones. Ambos factores podrían reducir la competencia por la tierra para la producción de alimentos y piensos. En cuanto a las desventajas, varias de estas especies se consideran invasivas o con posibilidades de serlo y podrían tener efectos negativos para los recursos hídricos, la biodiversidad y la agricultura.

Las materias primas y los biocombustibles de segunda generación podrían también ofrecer ventajas en lo que respecta a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La mayoría de los estudios pronostican que los combustibles avanzados que en un futuro se produzcan a partir de cultivos perennes y residuos leñosos y agrícolas podrían reducir espectacularmente el ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles derivados del petróleo y los biocombustibles de primera generación. Ello se debe tanto a los mayores rendimientos de energía por hectárea como al tipo diferente de combustible que se usa en el proceso de conversión. En el actual proceso de producción del etanol, la energía utilizada en su elaboración proviene en casi todos los casos de combustibles fósiles (con la excepción del etanol elaborado a partir de la caña de azúcar en el Brasil, donde la mayor parte de la energía necesaria para la conversión proviene del bagazo de caña). En el caso de los biocombustibles de segunda generación, la energía para su elaboración podría extraerse de los desechos de las plantas (fundamentalmente lignina).

Aunque la biomasa celulósica es más difícil de triturar para convertirla en combustibles líquidos, también es más fácil de manipular, lo que contribuye a reducir sus costos de manipulación y mantener su calidad, en comparación con los cultivos alimentarios. También es más fácil de almacenar,

especialmente en comparación con los cultivos de azúcar, ya que es resistente al deterioro. Por otro lado, en ocasiones la biomasa celulósica puede ser voluminosa, lo que hace necesaria una infraestructura del transporte bien desarrollada para su entrega a las plantas procesadoras tras la cosecha.

Aún será necesario superar algunos retos tecnológicos considerables para hacer comercialmente competitiva la producción de etanol a partir de materias primas lignocelulósicas. Todavía no se sabe cuándo la conversión de biomasa celulósica en combustibles avanzados estará en condiciones de aportar una proporción considerable de los combustibles líquidos del mundo. Existen actualmente en todo el mundo varias plantas procesadoras experimentales o de demostración, que o bien ya funcionan o bien están en fase de desarrollo. La rapidez con que se expandan los métodos bioquímicos y termoquímicos de conversión dependerá del desarrollo y el éxito de los proyectos experimentales actualmente en curso y la financiación sostenida de las investigaciones, así como de los precios mundiales del petróleo y las inversiones en el sector privado.

En resumen, los biocombustibles de segunda generación elaborados a partir de materias primas lignocelulósicas presentan un cuadro completamente diferente en cuanto a sus repercusiones para la agricultura y la seguridad alimentaria. Podría usarse una mayor variedad de materias primas, además de los cultivos agrícolas que se utilizan actualmente con las tecnologías de primera generación, y con mayores rendimientos de energía por hectárea.

También variarán sus efectos para los mercados de productos básicos, los cambios en el uso de la tierra y el medio ambiente, así como su influencia en las futuras tecnologías de producción y conversión (véase el Recuadro 2).

■ Posibilidades en materia de bioenergía

¿Cuáles son las posibilidades en materia de producción de bioenergía? Las posibilidades técnicas y económicas de la bioenergía deben examinarse en el contexto de las crisis y las tensiones cada vez más pronunciadas que

RECUADRO 2

Aplicaciones biotecnológicas en el campo de los biocombustibles

Muchas de las biotecnologías existentes se pueden aplicar para mejorar la producción de bioenergía; por ejemplo, mediante el desarrollo de mejores materias primas para la producción de biomasa y el aumento de la eficiencia de la conversión de biomasa en biocombustibles.

Biotecnologías para biocombustibles de primera generación

Las variedades de plantas que se utilizan actualmente para producir biocombustibles de primera generación han sido seleccionadas teniendo en cuenta rasgos agronómicos importantes para la producción de alimentos o pienso y no características que favorezcan su uso como materia prima para la producción de biocombustibles. La biotecnología puede ayudar a acelerar la selección de variedades que sean más aptas para la producción de biocombustibles, es decir, con una mayor cantidad de biomasa por hectárea, un mayor contenido de aceites (cultivos de biodiésel) o azúcares fermentables (cultivos de etanol), o mejores características de procesamiento que faciliten su conversión en biocombustibles. El campo de la genómica, el estudio de todo el material genético de un organismo (su genoma) deberá con

toda probabilidad desempeñar un papel cada vez más importante. Están previstas o se han publicado ya las secuencias del genoma de varias materias primas de primera generación, como el maíz, el sorgo y la soja. Entre otras biotecnologías aplicables, además de la genómica, figura la selección con ayuda de marcadores y la modificación genética.

La fermentación de azúcares es esencial para la producción de etanol a partir de biomasa. Sin embargo, el microorganismo de fermentación industrial más comúnmente usado, la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, no sirve para fermentar directamente material feculento, como el almidón de maíz. La biomasa debe primero descomponerse (hidrolizarse) en azúcares fermentables mediante el uso de unas enzimas llamadas amilasas. Muchas de las enzimas comercialmente disponibles en la actualidad, incluidas las amilasas, se producen con la ayuda de microorganismos modificados genéticamente. Se siguen realizando investigaciones sobre la posibilidad de elaborar cepas genéticas de levadura capaces de producir amilasas por sí solas, de modo que se puedan combinar en un solo paso la hidrólisis y la fermentación.

afectan al sector de la agricultura mundial y la demanda cada vez mayor de alimentos y productos agrícolas como consecuencia del aumento constante de la población y los ingresos a nivel mundial. Se puede dar el caso de que algo, cuya producción sea factible en el plano técnico, no sea en cambio factible económicamente ni sostenible desde el punto de vista ambiental. En la presente sección se examinan más detalladamente las posibilidades técnicas y económicas de la bioenergía.

Por cuanto la bioenergía se deriva de la biomasa, sus posibilidades a nivel mundial se ven reducidas en última instancia por la cantidad de energía producida como resultado de la fotosíntesis total. Las plantas captan una energía total equivalente a

75 000 emtp (3 150 exajulios) al año (Kapur, 2004), o entre seis y siete veces la demanda total actual de energía. No obstante, a ello hay que añadir cantidades enormes de biomasa que no es posible cosechar. En términos puramente físicos, la biomasa constituye un medio relativamente pobre de aprovechar la energía solar, sobre todo si se la compara con los paneles solares, cada vez más eficientes (FAO, 2006).

Varios estudios han determinado el volumen de biomasa que técnicamente puede contribuir al suministro mundial de energía. Sus estimaciones varían considerablemente debido a las diferencias de alcance, hipótesis y metodologías, lo que pone de relieve el alto grado de incertidumbre que rodea la posible

Aplicación de biotecnologías para biocombustibles de segunda generación

La biomasa lignocelulósica consiste principalmente de lignina y celulosa de polisacáridos (compuesta por azúcares de hexosa) y hemicelulosa (que contiene una mezcla de azúcares de hexosa y pentosa). En comparación con la producción de etanol a partir de materias primas de primera generación, la utilización de biomasa lignocelulósica es un proceso más complicado, debido a que los polisacáridos son más estables y a que los azúcares de pentosa no son fácilmente fermentables con la ayuda de *Saccharomyces cerevisiae*. Para convertir biomasa lignocelulósica en biocombustibles, primero hay que hidrolizar, o descomponer, los polisacáridos en azúcares simples, usando para ello ácido o enzimas. Se están aplicando diversos enfoques basados en la biotecnología para superar tales problemas, en particular mediante el desarrollo de cepas de *Saccharomyces cerevisiae* que puedan fermentar los azúcares de pentosa, el uso de especies alternativas de levadura que fermentan de manera natural los azúcares de pentosa y la creación de enzimas que puedan descomponer la celulosa y la hemicelulosa en azúcares simples.

Además de subproductos agrícolas y forestales y otros subproductos, es probable que la biomasa lignocelulósica para biocombustibles de segunda generación tenga como fuente principal materias primas dedicadas a la producción de biomasa, como ciertas especies de perennes y árboles del bosque. Se llevan a cabo investigaciones para determinar en qué medida la genómica, la modificación genética y otras biotecnologías podrían servir de instrumento para producir plantas con las características deseables desde el punto de vista de la producción de biocombustibles de segunda generación; por ejemplo, que produzcan menos lignina (compuesto que no se puede fermentar en biocombustible líquido), que produzcan por sí solas enzimas para la degradación de celulosa o lignina, o produzcan rendimientos cada vez mayores de lignina o biomasa total.

Fuentes: Basado en FAO, 2007a, y The Royal Society, 2008.

contribución de la bioenergía al suministro mundial de energía en los años venideros. En el último estudio importante en materia de bioenergía realizado por la Agencia Internacional de Energía (AIE) se hizo una evaluación, sobre la base de los estudios existentes, del alcance del posible suministro mundial de energía en 2050, entre un mínimo de 1 000 emtp y un máximo de 26 200 emtp (AIE, 2006, págs. 412-416). Esta última cifra se basó en la hipótesis de un crecimiento tecnológico muy rápido; sin embargo, según señala el AIE, una evaluación más realista, basada en mejoras más graduales del rendimiento, arrojaría un alcance de entre 6 000 y 12 000 emtp. Una estimación intermedia de alrededor de las 9 500 emtp requeriría, según la AIE,

destinar a la producción de biomasa cerca de una quinta parte de las tierras agrícolas del mundo.

Más importante que la viabilidad puramente técnica es la cuestión de qué porcentaje de la bioenergía potencial técnicamente disponible sería económicamente viable. Las posibilidades económicas a largo plazo dependen en un grado decisivo de las hipótesis relativas a los precios de la energía fósil, el desarrollo de las materias primas agrícolas y las innovaciones tecnológicas que tengan lugar en la cosecha, la conversión y la utilización de los biocombustibles. Estos aspectos se examinan con más detalle en el Capítulo 3.

Otra manera de abordar las posibilidades de la producción de biocombustibles es

CUADRO 3
Rendimiento potencial hipotético para el etanol procedente de los principales cultivos de cereales y de azúcar

CULTIVO	SUPERFICIE MUNDIAL	PRODUCCIÓN MUNDIAL	RENDIMIENTO DEL BIOCOMBUSTIBLE	MÁXIMO DE ETANOL	EQUIVALENTE DE GASOLINA	SUMINISTRO COMO CUOTA DEL TOTAL MUNDIAL DE UTILIZACIÓN DE GASOLINA EN 2003 ¹
	(Millones de ha)	(Millones de toneladas)	(Litros/ha)	(Miles de millones de litros)	(Miles de millones de litros)	(Porcentaje)
Trigo	215	602	952	205	137	12
Arroz	150	630	1 806	271	182	16
Maíz	145	711	1 960	284	190	17
Sorgho	45	59	494	22	15	1
Caña de azúcar	20	1 300	4 550	91	61	6
Yuca	19	219	2 070	39	26	2
Remolacha azucarera	5.4	248	5 060	27	18	2
Total	599	940	630	57

Nota: ... = no aplicable. Los datos presentados pueden haber sido redondeados.

¹ Utilización mundial de gasolina en 2003 = 1,1 billones de litros (Kim y Dale, 2004).

Fuente: Rajagopal et al., 2007.

mediante el examen de las necesidades relativas al uso de la tierra. En el «escenario de referencia» en 2030 del *World Energy Outlook 2006* de la AIE, se pronostica un aumento de la proporción de la tierra cultivable a nivel mundial dedicada a cultivar biomasa para combustibles líquidos del 1 por ciento en 2004 al 2,5 por ciento en 2030. Según el «escenario de política alternativa», para 2030 esa proporción habrá aumentado el 3,8 por ciento. En ambos casos, los pronósticos se basan en la hipótesis de que los combustibles líquidos se producirán a partir de cultivos convencionales. En caso de que los biocombustibles líquidos de segunda generación conozcan una comercialización amplia antes de 2030, la AIE pronostica que la proporción mundial de biocombustibles de la demanda de transporte aumentará el 10 por ciento en lugar del 3 por ciento de que se habla en el escenario de referencia, y del 5 por ciento que se menciona en el escenario de política alternativa. Las necesidades del uso de la tierra aumentarán solo ligeramente, al 4,2 por ciento de la tierra cultivable, debido a rendimientos más altos de energía por hectárea y al uso de residuos de biomasa para producir combustibles. Así y todo, ello ilustra cómo, incluso en el caso de los combustibles de segunda generación, la sustitución hipotética en gran escala de gasolina basada en combustibles fósiles por

combustibles líquidos requerirá un alto grado de conversión de tierras. Véase también el Capítulo 4 para una discusión más detallada, entre otros, de los efectos regionales.

Las perspectivas de que las actuales tecnologías de biocombustibles sustituyan a los combustibles fósiles se ilustran, además, a través de un cálculo hipotético realizado por Rajagopal et al. (2007). Los autores hacen estimaciones teóricas de la producción mundial de etanol a partir de los principales cultivos de azúcar y cereales, sobre la base de los rendimientos medios a nivel mundial y la eficiencia en materia de conversión más comúnmente citada. En el Cuadro 3 se resumen los resultados de esas estimaciones. Los cultivos a que se hace referencia representan el 42 por ciento de toda la tierra cultivable actualmente disponible. La conversión de toda la producción de cultivos en etanol correspondería al 57 por ciento del consumo total de gasolina. De acuerdo con una hipótesis más realista, según la cual se destinaría a la producción de etanol el 25 por ciento de cada uno de estos cultivos, solo el 14 por ciento del consumo de gasolina podría sustituirse por etanol.

Estos cálculos hipotéticos ponen de relieve que, dadas las necesidades considerables de tierra asociadas con la producción de biocombustibles, es de esperar que éstos sustituyan solo de manera muy limitada

los combustibles fósiles. Sin embargo, por muy limitada que sea su contribución al suministro total de energía, los biocombustibles podrían tener un efecto considerable para la agricultura y los mercados agrícolas.

Mensajes fundamentales del capítulo

- La bioenergía proporciona aproximadamente el 10 por ciento del suministro mundial de energía. La mayor parte de ese porcentaje corresponde a la biomasa tradicional sin elaborar, pero la bioenergía comercial adquiere una importancia cada vez mayor.
- Los biocombustibles líquidos para el transporte son objeto de la mayor atención y su producción ha experimentado un rápido crecimiento. Sin embargo, desde el punto de vista cuantitativo, desempeñan solo una función marginal: proporcionan el 1 por ciento del consumo total de combustible para el transporte y el 0,2-0,3 por ciento del consumo total de energía a nivel mundial.
- Los principales biocombustibles líquidos son el etanol y el biodiésel. Ambos se pueden producir a partir de una amplia gama de materias primas. Los principales productores son el Brasil y los Estados Unidos de América, en el caso del etanol, y la Unión Europea, en el caso del biodiésel.
- Las tecnologías actuales de producción de biocombustibles líquidos utilizan como materia prima productos agrícolas básicos. El etanol se produce a partir de cultivos de azúcar o almidón, entre los cuales los más importantes, en cuanto a su volumen, son la caña de azúcar en el Brasil y el maíz en los Estados Unidos de América. La producción de biodiésel se basa en varios cultivos oleaginosos.
- La producción en gran escala de biocombustibles supone necesidades considerables de tierra para la producción de materias primas. Es por tanto de esperar que los combustibles líquidos desplacen a los combustibles fósiles para el transporte solo en un grado muy reducido.
- A pesar de que los biocombustibles líquidos satisfacen solamente una pequeña parte de las necesidades mundiales de energía, todavía podrían tener efectos considerables para la agricultura global y los mercados agrícolas, dado el volumen de materias primas y las necesidades conexas de tierra para su producción.
- La contribución de los diferentes biocombustibles a la reducción del consumo de combustible fósil varía considerablemente si se tiene en cuenta la energía fósil usada como insumo en su producción. El balance de energía fósil de un biocombustible depende de factores como las características de la materia prima, el lugar de producción, las prácticas agrícolas y la fuente de energía usada para el proceso de conversión. Diferentes combustibles fósiles rinden también de manera muy diferente en lo que respecta a su contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Los biocombustibles de segunda generación actualmente en vías de desarrollo se producirían a partir de materias primas lignocelulósicas como la madera, los pastos altos y los residuos leñosos y agrícolas. Ello se traduciría en un aumento de las posibilidades cuantitativas de producción de biocombustibles por hectárea de tierra, así como en un mejoramiento de los balances de energía fósil y de gases de efecto invernadero de los biocombustibles. No obstante, no se sabe cuándo entrarán en producción esas tecnologías en una escala comercial significativa.