



Jorge Islas Sampeiro y Alfredo Martínez Jiménez

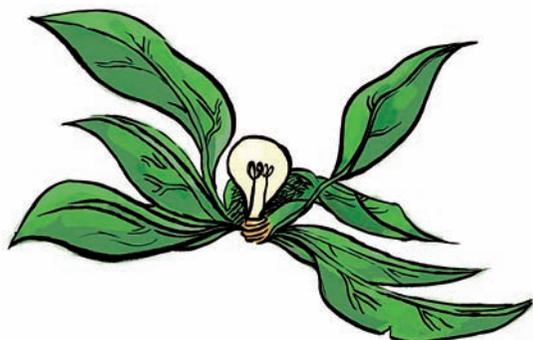
La bioenergía puede contribuir de manera importante a sustituir las fuentes de energía fósil y nuclear sin provocar aumento en las emisiones que producen el cambio climático. Permite la eliminación de buena parte de los desechos orgánicos rurales y urbanos, y es la única fuente energética capaz de sustituir al petróleo en el sector del autotransporte.

Se define como bioenergía a la energía que se obtiene de la biomasa. La biomasa, a su vez, es el material orgánico que más ha sido utilizado como combustible a lo largo de toda la historia de la humanidad. Es producida por las plantas al fijar luz, agua y dióxido de carbono mediante el proceso de fotosíntesis. En este proceso la energía solar queda almacenada en enlaces químicos, y puede ser liberada mediante procesos como la combustión, la digestión, la descomposición o bien mediante su hidrólisis y fermentación a combustibles líquidos o gaseosos.

Otras fuentes de materiales orgánicos de origen biológico igualmente importantes han sido los residuos de animales, particularmente el estiércol y los desechos de las sociedades humanas, como la basura en su componente orgánica. En la actualidad, si bien la biomasa y los residuos animales mantienen su importancia como combustibles tradicionales en comunidades rurales y urbanas, principalmente de los países en desarrollo, todos estos materiales orgánicos se revelan como combustibles alternativos de uso comercial e industrial, que producidos bajo criterios de sustentabilidad pueden ofrecer importantes cantidades de energía renovable, con la ventaja de que sus emisiones de cambio climático son neutras (es decir, no contribuyen en forma neta a aumentar la cantidad de gases de invernadero que existen en la atmósfera).

Dos de las más importantes ventajas que tiene el uso de la bioenergía son que puede sustituir a los combustibles fósiles sin provocar aumento de emisiones que producen el cambio climático, y que es la única fuente energética capaz de retar al petróleo en el mercado de los combustibles líquidos para el sector transporte





### Tipos de bioenergía

La biomasa proporciona, según su origen y procesamiento, energía útil y factible de aprovechar desde el punto de vista económico en las tres formas físicas: sólida, líquida y gaseosa. Esto le confiere a la bioenergía características de recurso energético universal, limpio y de gran alcance, si se aprovecha su capacidad de regeneración y si se explota con criterios de sustentabilidad. La bioenergía puede contribuir de manera importante a sustituir las fuentes de energía fósil y nuclear, y da lugar a los siguientes energéticos útiles para los seres humanos, los cuales se obtienen sometiendo a la biomasa a procesos de transformación desarrollados *ex profeso* por el ser humano:

- **Biocombustibles**, por ejemplo leña, residuos forestales, carbón vegetal, y desechos agrícolas como la paja, bagazo y otros sólidos. Tienen amplio uso en la cocción de alimentos, calentamiento de agua, producción de electricidad en turbinas de vapor, producción de calor industrial y electricidad. Además, se puede obtener de ellos gas de pirólisis, que se usa como energético en motores de combustión interna.
- **Biocarburentes** como alcohol (bioetanol), aceites vegetales puros, aceites vegetales y

residuos de aceite de cocina convertidos en biodiesel, los cuales se emplean en motores diesel o de gasolina, autobuses, camiones de carga, o bien para producir electricidad y calor en generadores y trabajo mecánico, proveniente de su uso en motores industriales. Estos energéticos líquidos actualmente provienen de una amplia variedad de cultivos como caña de azúcar, maíz, betabel, colza, soya y palma de aceite, entre otros, pero en un futuro próximo provenirán de otros cultivos no comestibles como la higuera, la *jatropha*, así como de residuos agroindustriales y de material lignocelulósico de plantaciones energéticas forestales.

- **Biogás o metano**, producto de la fermentación de residuos orgánicos de bosques, campos agrícolas y de desechos de animales de crianza como vacas, cerdos, borregos, cabras, caballos y aves. Este producto energético se puede obtener igualmente a partir de la basura en rellenos sanitarios; el metano extraído se emplea para producir energía térmica, mecánica o eléctrica. Por otro lado, el hidrógeno, combustible gaseoso, también puede ser obtenido transformando residuos orgánicos o bien mediante procesos fotobiológicos.

Dos de las más importantes ventajas que tiene el uso de la bioenergía son que puede sustituir a los combustibles fósiles sin provocar aumento de emisiones que producen el cambio climático, y que es la única fuente energética capaz de retar al petróleo en el mercado de los combustibles líquidos para el sector transporte. Cabe destacar que la bioenergía es la única fuente de energía renovable que se puede almacenar tan fácilmente como el petróleo y el gas, lo cual es una ventaja económica para establecer el equilibrio entre la oferta y la demanda de energía.

En el sector eléctrico, esta misma cualidad hace que la bioenergía para la producción de electricidad sea completamente despachable, ya que las plantas de bioenergía constituyen capacidades “firmes” de potencia eléctrica. A largo plazo, la transición energética puede llevar al empleo de diferentes tipos de combustibles para automotores. No obstante, los pronósticos indican que en el sector transporte, durante al menos otros treinta años, seguiremos usando preferentemente combustibles líquidos. En dicho sector se consumen en México más de 100 millones de litros diarios de gasolina y alrededor de 50 millones de litros de diesel por día. La utilización de gas para el transporte es de magnitud menor.

La bioenergía sustentable ofrece nuevas oportunidades a la agricultura, fomenta la propagación de vegetación, permite un mejor equilibrio entre desarrollo urbano y rural, y propicia un

mejor manejo de espacios, bosques, reservas naturales, asentamientos humanos y actividades productivas. Permite también la eliminación de los desechos orgánicos rurales y urbanos, por lo que contribuye a la higiene y al desarrollo de materiales y sustancias de origen orgánico para la industria de la construcción y del papel.

Desde los puntos de vista social y económico, la bioenergía tiene un potencial amplio para el desarrollo de pequeñas y medianas industrias que pueden representar cientos de miles de empleos. Es importante recalcar que el logro de la bioenergía debe realizarse alejándose de los sistemas de producción agrícola intensiva, a gran escala y basados en monocultivos, ya que con frecuencia llevan a la deforestación y la pérdida de biodiversidad.

### Categorías de material orgánico para la producción energética

La bioenergía por sí sola no puede desplazar el patrón actual de producción de energía basado fundamentalmente en las energías fósiles y nucleares. Sin embargo, puede contribuir a desplazarlas junto con la amplia variedad de energías renovables que se discuten en este número de la revista *Ciencia*. De manera genérica, se pueden distinguir dos categorías de material orgánico para la producción energética:

- *Residuos orgánicos*, naturales y de origen antropogénico, que sin otra utilización liberan energía en el proceso de su descomposición y

La bioenergía tiene un potencial amplio para el desarrollo de pequeñas y medianas industrias que pueden representar cientos de miles de empleos



dan como resultado dióxido de carbono y metano. Los residuos orgánicos naturales son todos aquellos que se generan anualmente en los bosques. Su cantidad es enorme, y es factible usarlos para fines energéticos. Sin embargo, a fin de preservar la existencia de los bosques, su aprovechamiento exige que se realice en el marco de un manejo sustentable, que conserve los equilibrios de los nutrientes de los suelos y los ecosistemas. Los residuos de origen antropogénico son los residuos orgánicos que se generan en el sistema económico y en la sociedad en general. Estos residuos se generan en grandes cantidades y están constituidos por desperdicios provenientes del estiércol de animales y humanos, desechos agrícolas, rastros municipales, basura orgánica, lodos de depuradoras, paja, bagazos de caña y agave, cascarilla de trigo y arroz, rastrojo de maíz, virutas y desechos de madera y papel, entre otros.

- *Plantaciones o cultivos agroenergéticos* inducidos por el ser humano con vistas a su utilización energética o como materias primas para otras industrias. Van desde plantaciones forestales de aprovechamiento rápido,

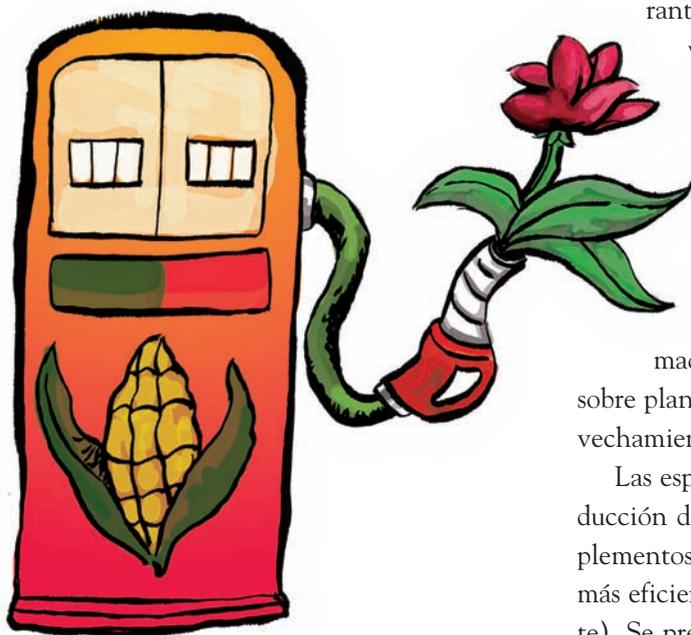
pasando por plantaciones de palmeras, pastos de crecimiento rápido, y cultivos de caña de azúcar y de colza, entre otros. El empleo y la selección de plantas para producción de energía puede llevar consigo problemas comparables a los que se dan en la agricultura intensiva de alimentos, con el empleo de grandes cantidades de fertilizantes y plaguicidas nocivos para la naturaleza, lo cual exige el desarrollo y el uso de biofertilizantes y métodos biológicos para controlar las plagas. De no estar bien regulado el uso de suelo, puede llevar también a la deforestación y a la pérdida de biodiversidad; asimismo, de no establecerse las políticas públicas adecuadas en la repartición de la renta agrícola-energética, estos aprovechamientos pudieran no contribuir a mejorar la equidad en las zonas agrícolas. Aún más conciliadoras con la biodiversidad y la producción de alimentos resultan las plantaciones agroforestales y las de aprovechamiento múltiple, pequeñas y medianas, en las que los trabajadores del campo se pueden asociar para ser los dueños de la producción.

### Plantaciones energéticas

La silvicultura ofrece alternativas para la producción de biomasa para la bioenergía mediante plantaciones con especies perennes leñosas, conocidas como plantaciones energéticas o *dendroenergéticas*.

Con las nuevas tecnologías, toda la biomasa –sea de plantaciones forestales (tipo celulósico) o de cultivos agrícolas (tipo almidones)– puede aprovecharse para convertirla en biocarburantes, en biogás y en biocombustibles para producir calor y electricidad. Sin embargo, se estima que una hectárea de tierra puede producir más biomasa de tipo forestal que de tipo agrícola. Los resultados muestran que en los cultivos anuales (incluyendo las oleaginosas y los cereales) la ganancia energética puede ser de 1 a 5, mientras que en las plantaciones forestales es de 10 a 25; esto es incluyendo los fertilizantes, pesticidas, herbicidas, fuerza de trabajo y gasolina o diesel de la maquinaria. Estos resultados motivan mayor investigación sobre plantaciones energéticas forestales y su conversión y aprovechamiento.

Las especies perennes leñosas son más adecuadas para la producción de bioenergía porque requieren menor cantidad de suplementos para su crecimiento y porque aprovechan de forma más eficiente los recursos naturales (suelo y agua, principalmente). Se prefiere utilizar las especies de mayor productividad pri-



maria neta en rotaciones cortas, y cuyos co-productos puedan aprovecharse económicamente, mejorando la rentabilidad de los sistemas silvícolas. Este tipo de plantaciones puede ser mucho más productivo que la mayoría de los bosques naturales, y ofrece además servicios ambientales para contrarrestar la erosión y la contaminación del suelo, mitigar el daño a los mantos acuíferos y otros efectos adversos de la agricultura y la forestería convencionales. Ante las expectativas de producción que se esperan de la silvicultura intensiva para la bioenergía, es necesario que junto con la demanda de mayor productividad se asegure la sustentabilidad de los sistemas productivos.

En la *silvicultura intensiva industrial* se prefieren las especies de crecimiento rápido, como eucaliptos, pinos, acacias y leucaenas en las zonas tropical y subtropical, mientras que en las zonas templadas y boreales se utilizan principalmente álamos, sauces y coníferas. El uso de especies exóticas ofrece ventajas que han incentivado su introducción en diferentes países; sin embargo, su introducción se ha criticado porque puede representar diferentes riesgos (especialmente en monocultivos extensos): inducir la pérdida de biodiversidad y fomentar el desarrollo de plagas y enfermedades. Para el sector de la bioenergía se recomienda apoyar el uso de especies nativas y evitar así el uso de pesticidas.

Si se considera que es necesario minimizar riesgos ambientales, preservar la biodiversidad, fortalecer la autonomía por contar con las fuentes originales de germoplasma y el conocimiento de su manejo, debiera ser una prioridad para el progreso de la bioenergía —especialmente en los países tropicales en desarrollo— el avance en las técnicas para domesticar, mejorar y propagar especies nativas para su uso en plantaciones energéticas.

La sustentabilidad social en la producción de biomasa a partir de plantaciones y cultivos energéticos se plantea como un reto de mayor complejidad, ya que implica el acuerdo de intereses entre diferentes actores sociales en temas como la distribución de los beneficios, los cambios o el mantenimiento de los derechos de propiedad de la tierra, la competencia y las consecuencias de la bioenergía con otros usos del suelo (por ejemplo, alimentos) y los programas de extensión rural (agrícolas y forestales) (como la transferencia de tecnología y la minimización de riesgos de inversión por factores económicos y ambientales). Otros aspectos, como la preservación de la biodiversidad y los ecosistemas, así como el cuidado del paisaje y la hidrografía, merecen también atención pertinente.

Ya que la preocupación por la producción de alimentos es uno de los aspectos de mayor peso en el debate de la competencia por el uso del suelo, la oposición social al uso de especies alimentici-



as en la bioenergía exige que se dedique mayor investigación para mejorar la producción y conversión de biomasa no involucrada en las cadenas alimenticias humanas.

Una alternativa para reducir la competencia por el uso del suelo consiste en recuperar suelos degradados que no son de interés para la producción de alimentos o la conservación natural. La producción de biomasa en plantaciones forestales puede contribuir significativamente en la reducción de la erosión, ya que después del segundo año de establecimiento aportan cantidades significativas de cobertura vegetal. Desde 1996 la Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoció que esta alternativa ofrecería efectos ambientales positivos, ya que en los países tropicales hay extensas zonas deforestadas y degradadas que pueden ser utilizadas para establecer plantaciones energéticas.

El potencial de plantaciones energéticas en suelos degradados, aun con bajos rendimientos, ofrece satisfacer hasta 25 por ciento de la energía global primaria que se consume actualmente, con oportunidades de restauración ambiental e impulso a la economía de las comunidades rurales con escasos recursos. Por ello, se deben establecer políticas gubernamentales que obliguen al uso de tierras degradadas.

### Biocombustibles de primera generación

En la Figura 1 se presenta un esquema de la evolución de los bioenergéticos líquidos para clasificarlos por generaciones tecnológicas.

Los biocombustibles de primera generación, como el bioetanol (etanol carburante o etanol anhidro) y el biodiesel, basan su producción en granos y semillas, respectivamente, que son con frecuencia materias primas usadas como alimentos de consumo humano o animal. Los de

segunda generación se obtienen a partir de la lignocelulosa proveniente de la biomasa leñosa y de los residuos agroindustriales. Y los de tercera generación, a partir de una captura y almacenamiento directo de dióxido de carbono y energía solar.

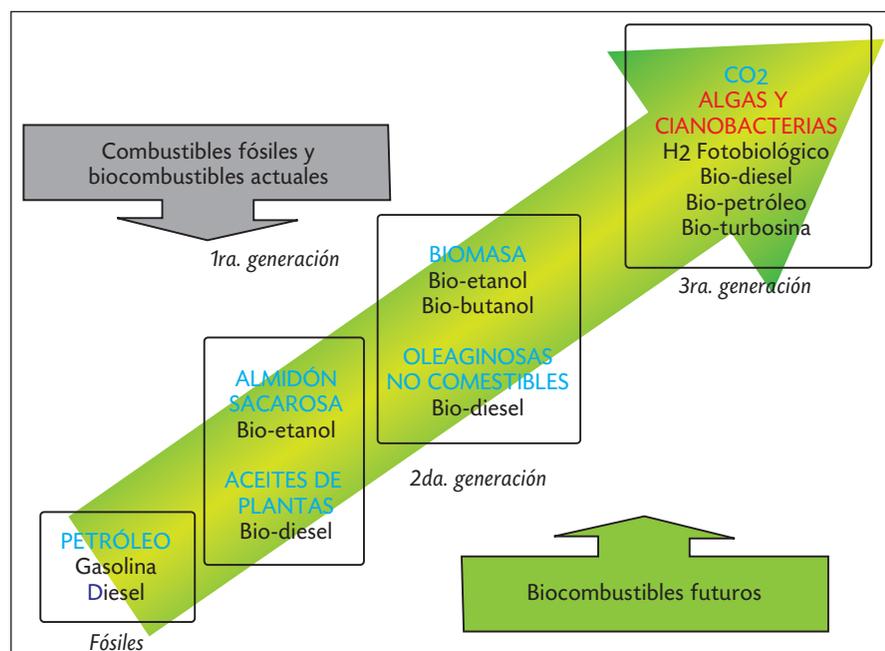
Los procesos de conversión de la primera generación han sido probados a escala comercial y son tecnologías maduras. Para el etanol se tienen dos grandes sectores: el proveniente de la *sacarosa*, azúcar obtenida de la caña de azúcar, sorgo dulce y de la remolacha principalmente, y el de la *glucosa*, azúcar obtenida principalmente de almidones de maíz, trigo, arroz y yuca, entre otros.

La sacarosa es fermentada por levaduras en reactores de cientos de miles de litros, en procesos continuos, en los cuales la corriente de fermentación rica en etanol es destilada para obtener alcohol con una pureza del 96 por ciento. Posteriormente, se elimina una mayor cantidad de agua, hasta llegar a un grado alcohólico de más del 99 por ciento, para que pueda ser considerado carburante. Brasil es el mayor productor de etanol a partir de caña de azúcar: llega actualmente a más de 50 millones de litros diarios de bioetanol, con precios de venta 40 por ciento menores que los de la gasolina, y esperan triplicar su producción en diez años. El costo de producción de bioetanol en Brasil es de 23 centavos de dólar por cada litro.

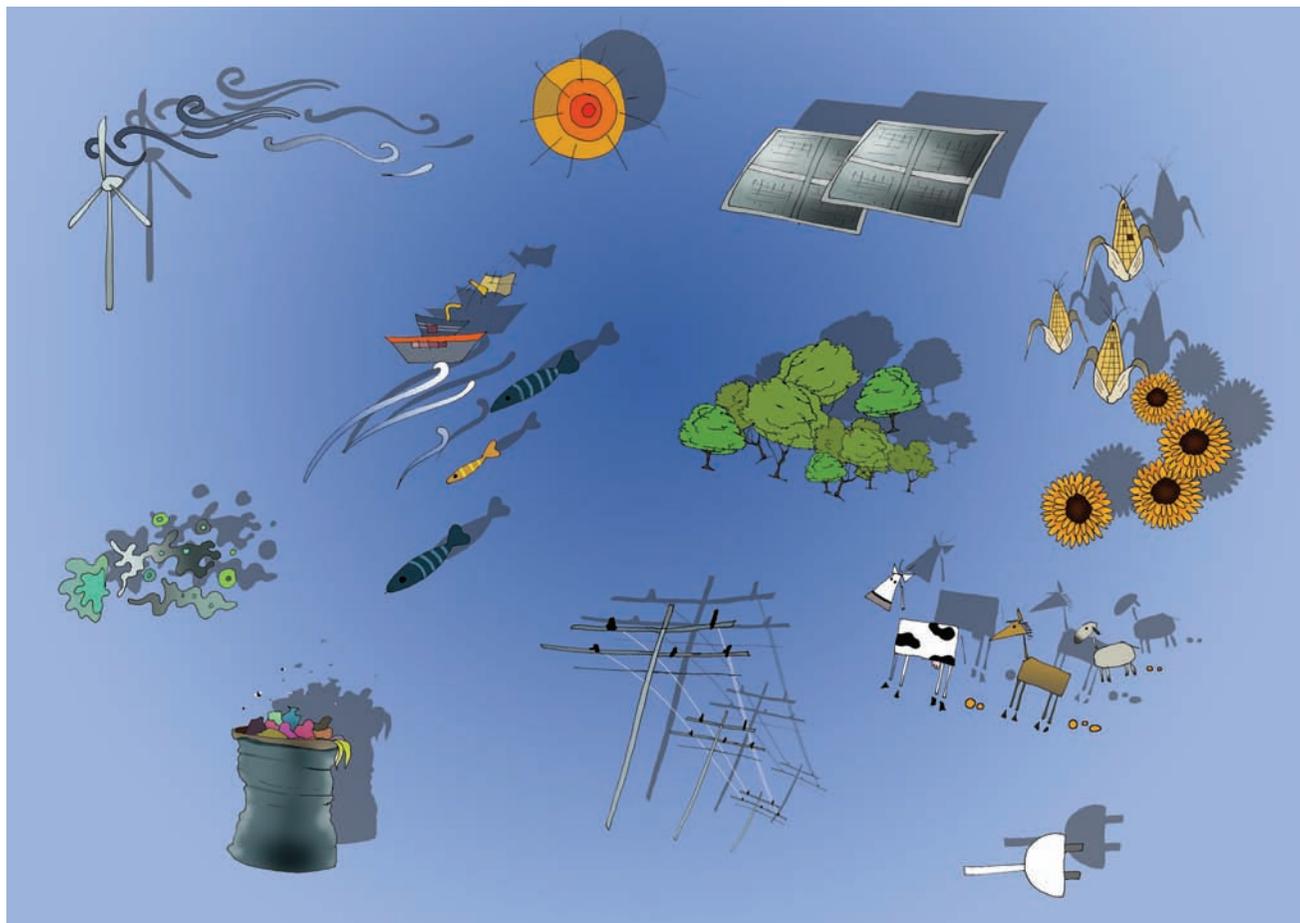
En el caso de los almidones, éstos son convertidos en glucosa

con la ayuda de un proceso de dos etapas, con enzimas degradantes hasta obtener glucosa, la cual es fermentada por levaduras para convertirse en etanol. Los Estados Unidos son los principales productores de etanol a partir de maíz, con un costo de producción de 39 centavos de dólar por litro. Actualmente producen más de 150 millones de litros diarios de bioetanol.

Aunque el contenido energético del etanol es sólo del 70 por ciento en relación con el de la gasolina, el volumen total producido por los Estados Unidos y Brasil alcanzaría para satisfacer toda la energía utilizada en combustibles líquidos en el sector transporte de México. Cabe aclarar que la situación agropecuaria, de tenencia de la tierra, de incentivos para la pro-



**Figura 1.** Clasificación de combustibles líquidos y evolución de los biocombustibles. Las palabras en cursivas indican la generación; en azul y mayúsculas, la materia prima o fuente de carbono; en negro el combustible; y en rojo con mayúsculas, los sistemas biológicos para la obtención de biocombustibles de tercera generación.



ducción de bioenergéticos, así como de políticas públicas es muy diferente entre los Estados Unidos, Brasil y México, lo cual hace muy difícil aplicar los mismos esquemas para la producción de bioetanol en nuestro país. Además, México no es autosuficiente en la producción de maíz, que constituye el principal insumo de alimentación de su población y es utilizado también para alimentación de ganado. Por ello, no es conveniente utilizar el maíz para la producción de biocombustibles, ya que establece una competencia directa con la producción de alimentos para la población.

No obstante que México es autosuficiente en la producción de azúcar a partir de caña, los excedentes son muy pequeños como para ser tomados en cuenta en la producción de bioetanol. Asimismo, este azúcar es usado en una amplia variedad de bebidas que constituyen un aporte energético para un gran sector de la población de escasos recursos, tanto en zonas urbanas como rurales. Además, la producción de caña de azúcar en México es tres veces más costosa que en Brasil, lo cual hace que este esquema sea inviable. Se considera que la caña podría ser utilizada para

la producción de bioetanol, siempre y cuando se usen otras fracciones de tierra y esquemas diferentes a los usados para producir azúcar. Y aunque técnica y económicamente pudiera ser factible, aun en este sistema se establece una competencia con la producción de alimentos a través del uso de tierras aptas para cultivo. Por ello, es claro que en México no es atractivo desde muchos puntos de vista producir etanol carburante mediante tecnologías e insumos de primera generación.

### Bioenergéticos de segunda generación

El aprovechamiento de la lignocelulosa, principalmente la proveniente de los desechos de bosques y de los residuos agroindustriales, parece ser una buena alternativa

para la producción de etanol, ya que dichos materiales son relativamente baratos, abundantes, en ocasiones representan un problema para ser eliminados, pero sobre todo porque no compiten con la cadena de producción de alimentos.

La lignocelulosa es un polímero natural que representa cerca del 50 por ciento de la biomasa del planeta, y se encuentra en residuos agrícolas (bagazo de caña, rastrojo de maíz, paja de trigo, olotes de maíz, residuos de soya, cascarrilla de arroz, entre otros), en desperdicios industriales (papel, viruta, aserrín, etcétera), en desechos forestales y municipales, así como en muchos pastos de crecimiento rápido, que en ocasiones representan un problema para el manejo de malezas.

Al contrario de la producción de etanol a partir de sacarosa o almidón, la complejidad y el grado de estructuración molecular de la lignocelulosa hacen más difícil su degradación a azúcares, ya sea por acción enzimática o química. Aunado a esto, los microorganismos etanológicos silvestres, como las levaduras, no tienen la capacidad de metabolizar todos los azúcares obtenidos de la biomasa. Estas complejidades han impulsado el desarrollo de tecnologías más sofisticadas para obtener azúcares fermentables y para diseñar y construir microorganismos, por métodos biotecnológicos, que puedan convertir todos estos azúcares en etanol. A la fecha no existen tecnologías maduras ni económicamente viables para convertir la biomasa lignocelulósica en bioetanol. Se espera, sin embargo, que los avances biotecnológicos logren romper las barreras que limitan la introducción en el mercado del etanol de segunda generación en los próximos cinco años.

Por otra parte, el etanol como carburante tiene varias limitantes, y dista mucho de ser un biocarburante ideal. Su contenido energético es bajo, su presión de vapor favorece una mayor evaporación que la gasolina, y es higroscópico (absorbe humedad), lo cual lo hace incompatible con la mayor parte de la infraestructura que

tiene PEMEX, ya que a mediano plazo ocasionaría un deterioro importante en tanques de almacenamiento, ductos, pipas y sistemas de confinamiento. Por tal razón, el etanol se plantea principalmente como oxigenante de la gasolina, lo cual además de reducir el uso de otros tipos de oxigenantes sintéticos, permite disminuir la emisión de una amplia gama de contaminantes.

Existen otros alcoholes de cadena más larga que tienen mejores propiedades, como el bio-butanol, que no es afín al agua y presenta un contenido energético, presión de vapor y otras propiedades similares a la gasolina, por lo cual es totalmente compatible con la infraestructura de PEMEX y la de los motores de combustión interna de los que se dispone actualmente. La investigación relacionada con la producción de bio-butanol a partir de biomasa es incipiente, pero se espera que en unos diez años constituya un biocombustible con un amplio mercado.

### **Bioenergéticos de tercera generación**

El petróleo se formó hace cientos de millones de años por medio de la transformación de una inmensa cantidad de materia orgánica proveniente de animales y principalmente de plantas y algas (macro o microalgas).

Las microalgas presentan una amplia variedad, y pueden crecer en aguas salobres, dulces y de desecho, con alta cantidad de materia orgánica. Presentan propiedades muy variadas y existen



algunas que acumulan una alta cantidad de carbohidratos. Otras acumulan proteínas, algunas aceites y otras hasta hidrocarburos lineales, como alcanos y alquenos, o aromáticos, que pueden ser usados para obtener materias primas para la manufactura de etanol o butanol, alimento para ganado, biodiesel y hasta los denominados bioturbosina y biopetróleo, respectivamente.

Algunas microalgas acumulan grandes cantidades de compuestos similares a los que constituyen el petróleo, y no es descabellado plantear el cultivo de estas variedades para ser sometidas después a un proceso de “craqueo” (proceso químico que “quiebra” las moléculas de un compuesto y produce así compuestos más simples) y obtener productos similares a los que actualmente se procesan en las refinerías. Algunas variedades de microalgas están siendo estudiadas para producir hidrógeno por medio de procesos fotobiológicos. Esto muestra el amplio potencial que tienen las microalgas para obtener biocombustibles. Como ejemplo, a continuación se describen algunos de sus potenciales para producir biodiesel.

### **Biodiesel de algas**

La tecnología de obtención de biodiesel, aunque prometedora, tiene límites en su potencial para desplazar al diesel de petróleo: la gran superficie de cultivo que requiere, su tiempo de producción (meses) y el bajo rendimiento de lípidos (aceites) obtenido con las plantas oleaginosas (menos de 20 por ciento). Una alternativa que promete satisfacer la demanda para el transporte es la producción de biodiesel a partir de lípidos procedentes de microalgas.

Las microalgas presentan una capacidad fotosintética distinta a la de las plantas: por su crecimiento en medio acuoso, son más eficaces para asimilar dióxido de carbono y otros nutrientes. Ofrecen beneficios, como el elevado contenido lipídico de algunas especies (más del 40 por ciento), periodos cortos de producción (días) y menor superficie equivalente de cultivo requerida. La tecnología con microalgas posee la ventaja adicional de que puede acoplarse al reciclaje del dióxido de carbono liberado por las industrias.

El potencial de obtención de biodiesel con microalgas es limitado. Las tecnologías desarrolladas más de dos décadas atrás, hacen económicamente factible su cultivo y utilización para obtener biodiesel cuando el precio del petróleo rebase los sesenta dólares americanos por barril. El reto será reducir a la mitad el costo de producción de este biocombustibles, mediante el uso de microalgas.

### **Conclusiones**

La bioenergía y las tecnologías que hacen posible su aprovechamiento tienen un gran potencial para satisfacer las necesidades energéticas humanas y contribuir a la sustitución de las fuentes energéticas fósiles y nucleares. Se requiere que su explotación se haga en términos sustentables, aprovechando su carácter renovable y generando energía con un balance neutro de emisiones de cambio climático.

Su desarrollo debe realizarse conciliando los conflictos de uso del suelo y de la producción de alimentos, rehabilitando suelos, y propiciando el desarrollo y la equidad social. El desarrollo tecnológico de la segunda y tercera generaciones de bioenergéticos, aunado al uso eficiente de leña en zonas rurales y de plantaciones energéticas sustentables, es condición indispensable para que la bioenergía logre plenamente su potencial, contribuya al desarrollo sustentable y facilite la transición hacia una matriz basada en energías renovables.

**Jorge Islas Sampeiro** es doctor en economía de la energía por la Université Pierre Mendès, en Francia, y físico y maestro en ingeniería energética por la Universidad Nacional Autónoma de México. Es investigador titular del Departamento de Sistemas Energéticos del Centro de Investigación en Energía de la UNAM y coordinador del Grupo de Planeación Energética. Sus principales líneas de investigación son la simulación y prospectiva de sistemas energéticos, la mitigación del cambio climático y la economía de las plantaciones energéticas.

[jis@cie.unam.mx](mailto:jis@cie.unam.mx),

**Alfredo Martínez Jiménez** es doctor en biotecnología por la UNAM. Es investigador titular del Departamento de Ingeniería Celular y Biocatálisis del Instituto de Biotecnología de la misma universidad. Sus principales líneas de investigación son la ingeniería metabólica y los bioprocesos para el desarrollo de tecnologías sustentables en la producción de biocombustibles de segunda generación y plásticos biodegradables.

[alfredo@ibt.unam.mx](mailto:alfredo@ibt.unam.mx)