

# La bioenergía global: problemas y perspectivas

## Resumen

El presente artículo explora el futuro potencial de la bioenergía. Como criterios de evaluación tomamos el análisis energético y los efectos del cambio climático en términos generales. Probablemente dentro de varias décadas se extenderá el uso de la nueva bioenergía, por ello nuestra evaluación pretende tener en cuenta las posibles condiciones futuras. Las investigaciones previas muestran una gran variedad de estimaciones sobre la ratio energética y el potencial técnico. Consideramos que, desde el punto de vista económico y del cambio climático, en la actualidad algunas materias primas resultan atractivas para la bioenergía. Sin embargo, las plantaciones energéticas se ven limitadas por la disponibilidad de agua, más que por la disponibilidad de tierra, siendo este factor, por lo tanto, una limitación adicional para la bioenergía en general.

Artículo publicado (\*) en Int. J. Global Energy Issues, Vol. 27, No. 2, 2007

## Patrick Moriarty

Investigador del Departamento de Ingeniería Mecánica en la Universidad Monash, Caulfield Campus. Ingeniero civil de formación, su investigación se centra en cuestiones energéticas y combustibles alternativos para el transporte, políticas de uso de la tierra y transporte, así como en los impactos sociales de la nueva tecnología de la información.

## Damon Honnery

Profesor e investigador del Departamento de Ingeniería Mecánica en la Universidad Monash, Clayton Campus, y Vice-Director del Laboratorio del Departamento para la Investigación de Turbulencias y Combustión Aeronáutica. Es ingeniero mecánico y su investigación se centra en combustibles, pirólisis, motores, emisiones y futuras tecnologías de transporte.

## 1. Introducción

La energía primaria consumida a nivel mundial durante el año 2002 ascendió a 427 exajulios (EJ) o alrededor de 68 gigajulios (GJ) per cápita. En 2002, la biomasa aportó probablemente el 11% de la energía primaria global o 46 EJ (7.4 GJ/capita). No se cuenta con el valor exacto ya que la mayoría procede de leña no comercial de países en desarrollo. Aunque sólo en torno al 1% de la electricidad mundial se generó a partir de la bioenergía, todas las fuentes de energía renovables (ER), incluyendo la bioenergía, energía geotérmica, eólica, mareomotriz y solar aportaron sólo el 2% de la generación de electricidad en el mundo entero. En la Tabla 1 se muestra la caída del uso de la bioenergía en la producción eléctrica dentro de los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE). El mayor uso

(\*) Traducción de Francisca Ferre.

de bioenergía para la generación de electricidad se produjo en la UE, especialmente en Finlandia, donde la bioenergía representó el 13,3% del total en el 2002, seguido por Austria y Suecia, con un 3,4% y 3,3% respectivamente (AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA, 2003; BP, 2005).

El principal uso actual de la biomasa se destina a la producción de combustibles líquidos para transporte. En la actualidad, la biomasa no tiene rivales en los sectores del transporte aéreo o rodado. La producción global de etanol en 2004 fue de casi 40 GL, experimentando un aumento con respecto a los 38 GL de 2003. En torno al 73% de esta producción se destina a combustible para el transporte por carretera. Actualmente la producción de etanol se concentra en Brasil y EEUU pero se ha empezado a producir también en otros países como Australia, Canadá, India, Sudáfrica y Tailandia (RENEWABLE COMBUSTIBLES ASSOCIATION, 2005); además de las pequeñas cantidades de bio-diesel de plantas oleaginosas que se producen en la UE. Como contrapartida, el consumo mundial de gasolina en la actualidad es de aproximadamente 1500 GL (BP, 2005). Resumiendo, los usos modernos de la biomasa en todo el mundo ascienden a aproximadamente 7 EJ de la energía primaria.

Tabla 1. Producción de electricidad bruta a partir de la bioenergía en UE, Japón, EEUU y países de la OCDE, 2002

Materia prima de bioenergía	Producción de electricidad, bruta (TWh)			
	UE	Japón*	EEUU	OCDE total
Bioenergía total	47,8	16,5	60,5	131,4
Biomasa sólida	29,3	11,3	40,1	84,6
Residuos sólidos municip. (renov.)	10,7	5,2	15,2	32,4
Gas de biomasa	7,8	0,0	5,2	14,4
% bioenergía en producción eléctrica total	1,8	1,5	1,5	1,4

\*Datos del año 2000.

Fuente: IEA (2003).

La bioenergía puede ofrecer una serie de posibles beneficios si se utiliza en sustitución de los combustibles fósiles. Se argumentan los siguientes beneficios:

- Reducción de las emisiones de gases invernadero.
- Reducción de las partículas contaminantes en el aire.
- Ahorro de los gastos en residuos (p.ej.: gastos en vertederos).
- Mejora del medioambiente para tierras de cultivo inproductivas.
- Mejora de las tierras con degradación medioambiental (p.ej.: de la minería).
- Reducción de la dependencia del petróleo importado.
- Mejora de los ingresos y bienestar rurales.

Todos estos potenciales beneficios han servido de justificación para varios programas de bioenergía. Es obvio que el uso de cada materia prima aportará sólo algunos de estos beneficios. Aun así, comparado con otras fuentes de energía renovable, esta lista de beneficios es grande. Por ejemplo, con el uso de la electricidad fotovoltaica sólo se consigue reducir las partículas contaminantes del aire a nivel local y global.

En Australia, la electricidad procedente de la biomasa supuso el 0,8% de la electricidad total generada en 1998-1999; oficialmente se ha proyectado un incremento para 2019-2020 de hasta sólo el 2,6% (DICKSON *et al.*, 2002). En general, se planea para este periodo un crecimiento de la bioenergía del 4,7% al 5,2% de la energía primaria total. El último programa de apoyo del Gobierno Federal a las energías renovables para el transporte incluye la *Iniciativa de bio-combustibles \$A50* que pretende alcanzar un 2 por ciento de combustibles renovables para el transporte. En EEUU, la previsión de referencia aportada por la *Energy Information Administration* (EIA) estima un crecimiento de energía procedente de biomasa sólida del 0,75% en 2002 y de tan sólo un 1,0% para 2025. Se estima un descenso relativo del porcentaje de electricidad entre las nuevas fuentes de energía renovable (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2004). Las estimaciones de la EIA asumen que la elección de los combustibles para la generación de electricidad se basará exclusivamente en criterios del mínimo coste. Chow *et al.* (2003) también prevén una reducida transición a las energías renovables en todo el mundo para los próximos 25-50 años, un punto de vista que coincide con las previsiones de la EIA.

Se pueden criticar las previsiones estadounidenses y australianas ya que reflejan un acercamiento desde el punto de vista económico para los países con buenas reservas de combustibles fósiles (y son los que no han ratificado el Protocolo de Kyoto). Otros escenarios se muestran más optimistas en cuanto a las perspectivas de la bioenergía. En concreto, el *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) y la *World Energy Commission* prevén que la bioenergía proporcionará 153 EJ de energía primaria en 2050. Otros investigadores presentan escenarios con proyecciones de hasta 330 EJ de uso de bioenergía para 2100 (FISCHER y SCHRATTENHOLZER, 2001).

En este estudio, asumimos que el cambio climático y el agotamiento del petróleo a nivel mundial suponen unos retos serios para los patrones actuales de consumo energético y requerirán grandes cambios a corto plazo. Si estos problemas resultan ser menores o si se dispone de sencillos «arreglos técnicos» (como la fijación del CO<sub>2</sub> en el océano, vehículos con células fotovoltaicas de combustible de hidrógeno o electricidad procedente de la energía eólica), las perspectivas de la bioenergía moderna no serán muy halagüeñas. En ese caso, será cierto el futuro que prevén las instituciones oficiales de EEUU y Australia basadas en un punto de vista comercial tradicional. Sin embargo, creemos que hacer frente al cambio climático y al agotamiento del petróleo no será una tarea fácil (MORIARTY and HONNERY, 2003, 2005). Si el calentamiento global no supone un problema, hacer frente al agotamiento del petróleo tampoco representa un problema insuperable en sí mismo; se pueden producir combustibles sintéticos a partir del carbón como en las plantas SASOL de Sudáfrica, a partir de arenas de alquitrán o bitúmenes pesados.

Por lo tanto, el siguiente análisis asume que se introducirá la nueva bioenergía como consecuencia de estos dos retos conjuntos. Presentan oportunidades para la bioenergía, pero también exigen que la bioenergía pueda contribuir a la mitigación del cambio climático y a la sustitución del combustible de transporte. En general, la mitigación del cambio climático es la tarea más difícil para la bioenergía. Aunque, la bioenergía cuenta con una serie de beneficios potenciales, como hemos visto anteriormente, en este estudio nos centraremos en su potencial para la mitigación del cambio climático. El objetivo principal de este artículo consiste en explorar el potencial técnico de la bioenergía como fuente de energía primaria neta, asumiendo que la principal razón para su introducción es hacer frente al cambio climático global.

## 2. Análisis energético de los biocombustibles

Para aceptar la bioenergía como un combustible alternativo, ésta debe contar con menos emisiones de gases efecto invernadero (equivalente a  $\text{CO}_2$ ) o, en un sentido más amplio, tener un menor impacto sobre el cambio climático que los combustibles fósiles que pretende reemplazar. Para evaluar el impacto sobre el cambio climático será necesario comenzar con un análisis energético. Por ejemplo, suelen ser bastante constantes los costes energéticos del funcionamiento de una maquinaria determinada en una granja o la destinada a la producción de fertilizantes-N, y ésta debe variar poco según el país. Sin embargo, el equivalente de emisiones GEI cambiará según la mezcla energética del país en cuestión. En general, la ratio de la producción bruta de energía en función del aporte energético, conocido como ratio energética, es un indicador importante del posible ahorro de GEI e incluso del coste económico de la bioenergía y de otros combustibles renovables.

### 2.1. Estudios anteriores

Los métodos para el análisis energético se formalizaron a mediados de la década de los 70 y pronto se aplicaron a la bioenergía. En esta publicación (*Special Issue*), Mardon (2007) aborda con detalle esta cuestión presentando el análisis energético neto y su aplicación a la bioenergía. Recientemente un gran número de estudios han analizado el equilibrio energético de los sistemas de biomasa en las plantaciones agrarias y energéticas (GIAMPIETRO *et al.*, 1997; ERCOLI *et al.*, 1999; WEISS *et al.*, 2000; MATTHEWS, 2001; NONHEBEL, 2002; SHAPOURI *et al.*, 2002; LAL, 2004a). Sin embargo, los investigadores obtienen resultados muy diferentes de la ratio energética (producción energética bruta/*input* energético), a pesar de que sean muy similares los *inputs*, el tipo de biomasa producida y las condiciones de crecimiento.

Recientemente se han publicado en la revista *Biomass and Bioenergy* dos estudios que analizan en detalle las plantaciones energéticas ejemplificando esta variación. El primero, elaborado por Matthews (2001), se basó en los cultivos energéticos leñosos (SRC) de álamos y sauces en el Reino Unido. El segundo estudio elaborado por Nonhebel (2002), examinó el SRC de álamos en una serie de ubicaciones de la UE, incluyendo una producción intensiva en el noroeste de Europa, con una cosecha anual media similar (216 GJ/ha) si se compara a la de Matthews (188 GJ/ha). Sólo Matthews ha incluido entre los costes energéticos el vallado, almacenamiento y secado de la biomasa, así como el transporte local; estos puntos se han

omitido en los demás cálculos. Ninguna ubicación precisa de riego. Los ratios energéticos obtenidos son 64,8 en el primer estudio y 14,4 en el segundo. Puesto que se analizan cosechas similares, las diferencias proceden de las diferentes evaluaciones de los inputs necesarios. La diferencia principal de inputs, además de los ítems excluidos, se encuentra en los fertilizantes que suponen el mayor coste energético en la producción, recogida y corte de la cosecha.

En cambio, esta gran variación de la evaluación de la ratio energética no produce grandes diferencias en la energía *neta* (es decir, producción energética bruta menos el *input* energético), como se demuestra en la Figura 1. También se muestran en la Figura 1 como puntos de referencia el gas natural y el petróleo convencional (Weiss *et al.*, 2000). Debido a que la ratio energética desciende de 100 a 10, la producción energética neta sólo desciende un 10%, pero para los valores inferiores de la ratio energética, la caída de la energía neta es considerable. Por lo tanto, si la ratio energética es superior a 10, después del transporte de la bioenergía a la planta de conversión, no es relevante la distinción entre producción energética bruta y neta.

Se han registrado ratios inferiores a diez. Matthews (2001) obtuvo ratios energéticas de 2-57 en una serie de estudios en árboles de SRC destinados a la bioenergía en Europa y EEUU, aunque estos estudios no sean siempre comparables. Su propia ratio de 64,8 desciende a 28,7, si se incluye el vallado, almacenamiento, secado y transporte local. La caída de la ratio llega a ser de 2-5, si se aplica un «secado activo». Es evidente que los análisis energéticos de las plantaciones de bioenergía

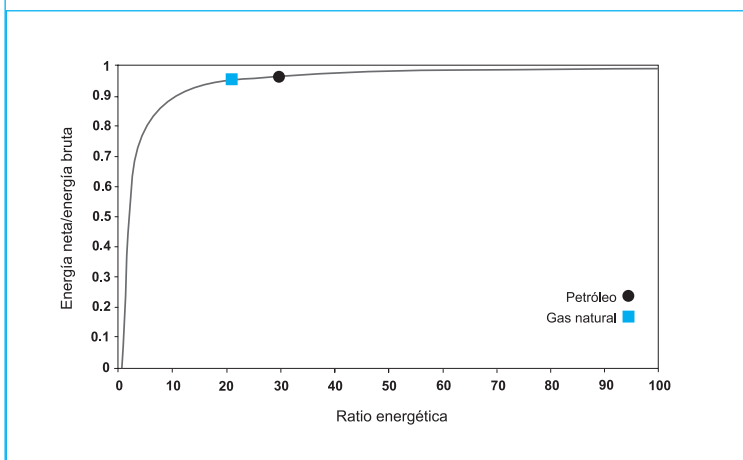


Figura 1. Producción energética neta normalizada por la producción bruta vs. ratio energética. También aparecen los valores del gas y petróleo

deben crear estándares para el cálculo de *inputs* energéticos y las unidades que se deben incluir como costes energéticos. Además, surgen dudas sobre la estimación del *output*; casi todos los estudios se basan en modelos de crecimiento o en modelos experimentales para el cálculo del *output*. Falta la experiencia de campo de plantaciones energéticas grandes.

## 2.2. Discusión

En un primer acercamiento, y desde el punto de vista agrícola, los principales *inputs* de la producción de cosechas para la bioenergía son proporcionales al *output*. Mayores cosechas de biomasa exigen, por ejemplo, mayores *inputs* de fertilizantes, agua y un mayor esfuerzo de transporte de la biomasa. Sin embargo, aun cuando las toneladas de fertilizantes *N* y la biomasa cortada se traducen directamente en un uso energético de *inputs*, no ocurre lo mismo con el agua. Las exigencias de agua pueden variar desde cero, para las cosechas regadas por el agua de lluvia, hasta alcanzar niveles muy altos (en relación a la energía del *output*), si se precisa de grandes cantidades de riego procedente del agua subterránea. (Una situación similar se observa para la energía necesaria de secado, que puede variar de cero en lugares donde el clima es seco, a altos valores en zonas muy húmedas donde es necesario el secado artificial. La energía de secado será por lo tanto, *grosso modo*, inversamente proporcional a la necesidad de agua para el riego.) Se recomienda examinar los *inputs* por tonelada de producción de biomasa secada artificialmente. Los costes de energía para el riego se utilizarán para ilustrar cómo los costes energéticos del *input* pueden variar enormemente por unidad de *output*, en función de las condiciones.

Para aguas superficiales, Pimentel *et al.* (2004) estima unas necesidades de energía primaria para el riego de aproximadamente 0,3 MJ/m<sup>3</sup>, pero, en el caso de aguas subterráneas a una profundidad media de 100 m, se necesitan 10,3 MJ/m<sup>3</sup> de energía. Lal (2004a) aporta valores similares en cuanto al uso de energía primaria, según la siguiente ecuación:

$$\text{Agua de riego (en MJ/m}^3\text{)} = 0,32 + 0,106 H, \text{ donde } H \text{ representa el agua extraída en metros}$$

El siguiente ejemplo numérico ilustra la importancia de la energía utilizada para el riego. Se asume que el *output* de una tonelada seca de biomasa requiere la transpiración de 500 toneladas de agua, o un *input* de 1.000 toneladas de absorción

de agua con una eficacia del 50% (BERNDES, 2002) proporcionando el riego todo el agua. Una tonelada de biomasa leñosa tiene un valor calorífico menor de aproximadamente 18 GJ (MATTHEWS, 2001; FAAIJ, 2006). La profundidad rentable para la extracción del agua para regar es la profundidad cuya energía de extracción (ignorando para una mayor sencillez todos los demás *inputs* energéticos) equivale al *output* energético de la biomasa. Se puede calcular utilizando la ecuación anterior, siendo 167 m. Estos cálculos exploratorios demuestran que las ratios energéticas serán bajas y hasta negativas si se requiere mucho riego y si el agua tiene que ser extraída de una capa freática profunda.

El último avance para el agua de riego es la desalinización. ¿Podría proporcionarnos agua de forma ilimitada? El proceso de desalinización con la mejor eficacia energética, ósmosis inversa, requiere normalmente un *input* de energía eléctrica de 21,6 MJ/m<sup>3</sup> de agua dulce, pero puede reducirse hasta 7,2 MJ/m<sup>3</sup> (BUSCH y MICKOLS, 2004), o en términos de energía primaria aproximadamente 22 MJ/m<sup>3</sup>. Esta cifra representa un mínimo, el producto residual del agua rica en salmuera debe depositarse sin dañar los ecosistemas próximos. Por otro lado, contamos con costes energéticos para la construcción y el mantenimiento de la planta. Si una tonelada de biomasa seca (con un contenido energético de 18 GJ) requiere 1.000 toneladas de agua de riego, los costes energéticos del abastecimiento del agua serán de al menos de 22 GJ por tonelada de biomasa seca. La desalinización no es una solución para las cosechas energéticas.

Desde un punto de vista más general, surge una gran incertidumbre en los análisis energéticos de los biocombustibles si se incluye el impacto de la expansión de la bioenergía en la agricultura. Como se argumenta más adelante, el potencial técnico de la biomasa depende en gran medida de las demandas futuras de la agricultura y los rendimientos de las cosechas (HOOGWIJK *et al.*, 2003). La agricultura y bioenergía compiten en accesibilidad, es decir, por una tierra fértil y con buen riego. Si se produce una gran expansión de la bioenergía, los *inputs* energéticos necesarios en la agricultura (o silvicultura) se pueden ver considerablemente afectados, y viceversa. Para ilustrar este punto, consideremos una producción agrícola anual determinada, en 10 años, producida en dos escenarios distintos. En el primer escenario, la producción de bioenergía procedente de residuos agrarios o de plantaciones energéticas permanece invariable. En el segundo escenario, la producción de bioenergía aumenta considerablemente. Si los *inputs* energéticos totales para agricultura difieren según estos dos escenarios, la producción adicional de bioenergía se puede conocer por la variación, ya sea para bien o para mal.



Para crear espacio para la biomasa, se pueden producir cambios en la agricultura y en sus *inputs* energéticos en dos modos distintos. Primero, se puede producir una conversión del bosque u otra tierra a la explotación agrícola ya que en la actualidad las plantaciones de bioenergía, ya sea en regiones tropicales o cálidas, se apropian de la tierra destinada a la agricultura. El segundo modo consistiría en una mayor intensificación de la agricultura en la tierra existente (NONHEBEL, 2002), aunque esto acarrea algunos costes, como se defenderá más adelante. Resumiendo, los límites del análisis energético de la bioenergía tienen que ampliarse para incluir también a la agricultura y silvicultura. El uso de tierra de uso agrario, en vez de otro tipo de tierra, reducirá los *inputs* energéticos por tonelada de biomasa seca para la bioenergía, pero a costa del aumento de los *inputs* energéticos de otros usos de la biomasa como la agricultura.

### 3. Implicaciones del uso de la bioenergía en el cambio climático

Aunque se disponen de muchos análisis sobre las emisiones de gases con efecto invernadero en la producción de bioenergía, la mayoría se han centrado en las emisiones procedentes de los *inputs* de combustible fósil (REIJNDERS y HUIJBREGTS, 2003). Pocos estudios han considerado los posibles cambios de carbono en el suelo o su transformación a albedo como resultado del incremento del uso de la bioenergía. En el presente artículo pretendemos evaluar las implicaciones totales del uso de la bioenergía en el cambio climático. Como punto de partida resulta útil considerar el ciclo del carbono que presentamos en la siguiente sección.

#### 3.1. La bioenergía y el ciclo global del carbono

La Figura 2 muestra las diferentes existencias de carbono (en Gt) y las corrientes anuales entre estos almacenamientos de carbono en Gt/año. La atmósfera recibe alrededor de 3,3 Gt/año de carbono de la combustión del combustible fósil, deforestación y conversión a CO<sub>2</sub> del carbono del suelo por la erosión del mismo (LAL, 2004b).

Los niveles actuales de CO<sub>2</sub> se encuentran en aproximadamente 380 ppm, a partir de la estimación de 280 ppm de mediados de los 80. Este nivel está creciendo a un ritmo de 3 ppm/año, comparado con la media de 1,8 ppm/año en la década de los 90. Ya se ha superado con creces el margen de 180-280 ppm que caracteriza los ciclos glacial/interglacial en los pasados 400.000 años (FALKOWSKI *et al.*, 2000).

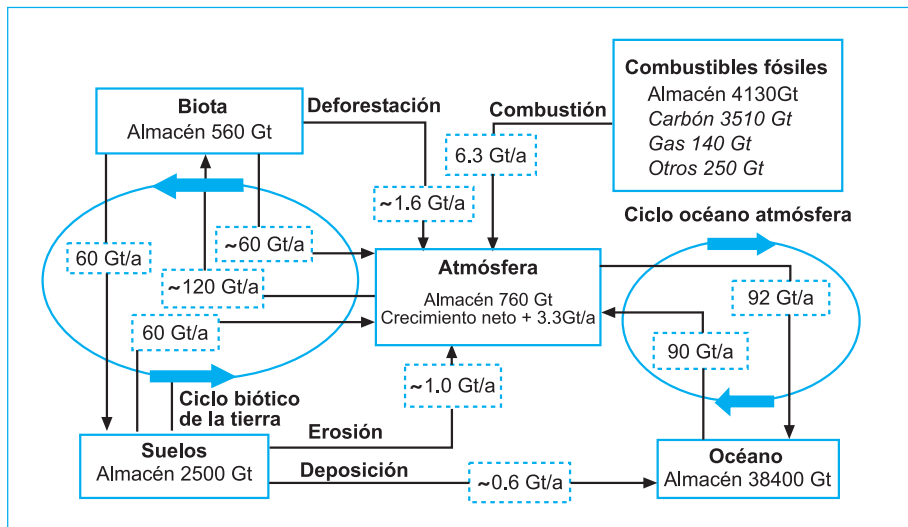


Figura 2. Ciclo simplificado del carbono (unidades de carbono en Gt)

Fuente: Falkowski et al. (2000) y Lal (2004b)

En una conferencia celebrada reciente en el Reino Unido sobre el cambio climático «muchos investigadores concluyeron que el mundo debería perseguir mantener la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera por debajo de 400 ppm» (PEARCE, 2005a). Una razón para este ajustado techo reside en el miedo de que el límite superior de la sensibilidad climática (el aumento de la temperatura al doblar la concentración equivalente de CO<sub>2</sub> en la atmósfera) podría ser casi el doble de la estimación del 5,8 °C del límite superior del IPCC (PEARCE, 2005a).

El aumento del carbono atmosférico sólo se puede reducir aumentando las demás concentraciones de carbono o, al menos, reduciendo su descenso en el caso de los combustibles fósiles. Para la bioenergía son relevantes los siguientes acercamientos:

- Secuestro del carbono en los suelos.
- Secuestro del carbono en la biomasa fija.
- Sustituir el uso del combustible fósil por la bioenergía.

El secuestro de carbono en el suelo y plantas no implica ningún coste de recolección y simplemente invierte las pérdidas de carbono en plantas/suelo de los siglos pasados. El almacenamiento de carbono de 2500 GtC es muy superior al de la biomasa (560 GtC) y al de la atmósfera (760 GtC). (Véase Figura 2). Conservar o

mejorar este depósito es de vital importancia para minimizar las emisiones de carbono a la atmósfera. Lal (2004b) aporta una estimación de 136 Gt de emisiones de carbono procedentes de la conversión del uso global de la tierra desde 1850. La pérdida del carbono del suelo supone unos 78 Gt del total. Además, se estima que la mitad o dos tercios de la pérdida histórica del carbono en el suelo (aprox. 40-50 Gt o un Gt/año) podría fijarse en unos 20-50 años mejorando las prácticas de la gestión del suelo. Esta unidad de Gt/año puede compararse a la cifra de 6,3 Gt/año de emisiones C del combustible fósil. Por otro lado, Lal defiende que aumentar el almacenamiento de carbono en el suelo no sólo es un modo de fijación seguro y natural sino que además aportará múltiples beneficios: su artículo enumera 30.

La fijación terrestre de carbono se enfrenta a numerosos retos y esfuerzos de equilibrio; se delibera sobre si debe ser superficial o subterráneo. Por ejemplo, el carbono del suelo puede aumentar si los residuos de las cosechas se reciclan, en vez de destruirlos y quemarlos como combustible (LAL, 2004b). ¿Es más rentable seguir quemando combustibles fósiles incrementando el carbono del suelo, o utilizar, al menos, algunos residuos de cosechas como combustible renovable sustituyendo parte del combustible fósil? Aumentar el carbono del suelo puede tener sus propios costes por el aumento del consumo del combustible fósil para la fertilización o riego del suelo. Además de la energía para la extracción, el agua subterránea de riego en zonas áridas puede inducir a unas emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub> procedentes del bicarbonato cálcico disuelto presente en el agua subterránea (SCHLESINGER, 1999). Y puede incluso suceder que la conservación o aumento del carbono en el suelo redujera el polvo atmosférico transportado por el viento. Esto, a su vez, podría conducir a una reducción del hierro depositado en los océanos con la consiguiente reducción de la PPN y por consiguiente una disminución de la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> (JANZEN, 2004). Mejorar un depósito no atmosférico puede ser a costa de debilitar otro.

Cox *et al.* (2000) ofrece otra razón para la precaución con el secuestro de carbono en el suelo o en biomasa superficial: el almacenamiento sólo puede ser temporal. El aumento de las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> produce un efecto de fertilización inmediato resultando en un mayor almacenamiento de carbono en los bosques del mundo. Pero incrementar los niveles de CO<sub>2</sub> también producirá un aumento de las temperaturas, con una década de retraso debido a la inercia termal de los océanos. Las temperaturas más altas no sólo aumentan el porcentaje de respiración autotrófica de las plantas, sino también el nivel de respiración heterotrófica de los suelos. Este modelo muestra que el incremento del almacenamiento de carbono se reducirá e invertirá con el tiempo. Los bosques y los

suelos se convertirán en el futuro en una fuente de CO<sub>2</sub>. Los incendios forestales pueden acelerar esta emisión de carbono. Fearnside (2004), un investigador de campo en la Amazonía, defiende que la deforestación y el talado con la consiguiente fragmentación del bosque tropical producirán un gran aumento de la inflamabilidad, siendo mayor la frecuencia de incendios en el bosque restante.

### 3.2. Análisis del cambio climático

Los análisis energéticos discutidos más arriba muestran grandes incertidumbres incluso en las estimaciones de las ratios energéticas de la bioenergía, aun cuando los mismos investigadores examinan la misma cosecha y métodos de producción. También muestran la importancia potencial de la energía de riego. Estas incertidumbres se complican cuando se analiza el cambio climático. En general, los análisis basados en la combustión de CO<sub>2</sub> llevan a conclusiones similares que las de los análisis energéticos. La inclusión de las emisiones N<sub>2</sub>O procedentes de fertilizantes hace aumentar esta incertidumbre, al igual que los intentos de incluir los cambios del equilibrio del carbono en el suelo (ROBERTSON y GRACE, 2004). Que las plantaciones de bioenergía secuestren o emitan carbono del suelo depende esencialmente del uso previo de la tierra. Si el bosque se convierte en plantaciones de bioenergía o, peor aún, en tierras de uso agrícola (para uso energético o no) provocará pérdidas de carbono de suelo. A la inversa, convertir la tierra de uso agrícola en plantaciones energéticas SRC producirá normalmente un aumento del carbono en el suelo (REIJNDERS y HUIJBREGTS, 2003; BARAL y GUHA, 2004).

Un problema adicional del cálculo del cambio climático reside en la descomposición de los combustibles de biomasa almacenados. Esta descomposición provoca una pérdida energética de la bioenergía. Según un reciente estudio sueco (WIHERSAARI, 2005), se obtienen unas pérdidas de material seco de seis meses del 6,6% para residuos de bosque secados de forma natural y del 15,6% para los residuos de bosque fresco. El mismo estudio también demostró que el proceso de descomposición también produce notables emisiones de metano y óxido nitroso, gases de efecto invernadero. Ambos efectos reducen los beneficios del uso de la bioenergía en el cambio climático.

Otras dudas hacen que sea aún más difícil evaluar el análisis de la bioenergía en el cambio climático. Para comenzar, la *ubicación* de la plantación energética puede ser relevante. Betts (2000) presenta un modelo sobre el efecto del incremento de la capa de bosque sobre el albedo y, por lo tanto, su efecto en el cambio climático.

El estudio concluye que en proyectos de aforestación a altas latitudes, el aumento de la aceleración climática por la reducción de albedo compensará la reducción de la aceleración climática que resulta de unos niveles atmosféricos reducidos de CO<sub>2</sub>. En zonas nevadas, los proyectos de bosque exacerbarán, por lo tanto, el calentamiento global, ya que la vegetación verde absorbe más radiación solar que la nieve. Por otro lado, la reforestación en las áreas tropicales sería de gran ayuda. Desgraciadamente, la deforestación continúa en la zona tropical mientras que los bosques aumentan en los climas cálidos del norte. Es de esperar que las plantaciones energéticas leñosas a altas latitudes reduzcan el albedo, al igual que la aforestación, aumentando por lo tanto la absorción terrestre de la energía radiante entrante.

Además, necesitamos examinar las implicaciones de los cambios mayores en las condiciones climáticas. Aunque la bioenergía u otras fuentes de energías renovables se utilicen para evitar un mayor cambio climático, se producirán otros cambios por dos razones. Primero, incluso si dejamos de aumentar en la actualidad la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, las temperaturas seguirían aumentando durante varias décadas debido a la inercia térmica de los océanos (WIGLEY, 2005). En segundo lugar, no dejaremos de quemar combustibles fósiles por la noche. Si asumimos que intentamos en serio prevenir el calentamiento global, nos llevaría varias décadas reemplazarlos. Los combustibles fósiles representan en la actualidad casi el 80% del consumo de la energía primaria y las inversiones en su producción y plantas de conversión siguen incólumes. La temperatura de la tierra ya ha aumentado 0,6 - 0,8° C desde la década de los 80. Parece inevitable un aumento en las próximas décadas (WIGLEY, 2005).

Los efectos de fertilización de CO<sub>2</sub> ya se han producido por el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico de 280 ppmv, a finales de la primera década del siglo XIX, a los 380 ppmv de la actualidad, con un crecimiento neto resultante en la biomasa global de bosque, incluso después de la deforestación. Pero, como argumentamos más arriba, el aumento de temperaturas puede tardar varias décadas en producirse.

Podría provocarse un aumento no lineal en la respiración de los microorganismos de la biomasa y suelo. Los responsables en la toma de decisiones han sido inducidos erróneamente a pensar que los bosques pueden secuestrar permanentemente el carbono puesto que la fertilización de CO<sub>2</sub> actúa inmediatamente, mientras que la reducción (incremento de respiración) tardará décadas en aparecer (PEARCE, 1999). Estas incertidumbres siembran dudas sobre la eficacia del secuestro del carbono en los bosques y suelos sugiriendo que la bioenergía puede ser un mejor acercamiento.

Resumiendo, un amplio análisis de la bioenergía en el cambio climático debe considerar primero todas las emisiones de gases de efecto invernadero, incluso los procedentes del suelo. Dado que una gran expansión de la bioenergía afectará a la agricultura y silvicultura, se deben incluir también estos sectores en el análisis. Es esencial un acercamiento del sistema terrestre (MARLAND *et al.*, 2003; STEFFEN *et al.*, 2003) para evaluar los posibles beneficios climáticos del secuestro de carbono en la biomasa o de los combustibles procedentes de la biomasa. El análisis no sólo debe tener en cuenta el CO<sub>2</sub> o todas las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la combustión de combustible fósil, sino que también debe examinar todos los efectos del cambio climático incluyendo las variaciones de albedo. Por último, dado que se espera un gran aumento de bioenergía en las próximas décadas, necesitamos anticipar los efectos del cambio climático en un mundo (y clima) diferente al actual. Los análisis parciales de las implicaciones de la biomasa en el cambio climático nos llevan a conclusiones erróneas.

## 4. Potencial técnico global de la bioenergía

Ahora podemos evaluar mejor el potencial técnico global de la bioenergía. La bioenergía moderna sólo representa aproximadamente 7 EJ de la energía primaria, y no está creciendo tan rápido como, por ejemplo, la energía eólica; pasarán décadas hasta que se desarrolle todo su potencial. Según algunos estudios importantes (FISCHER y SCHRATTENHOLZER, 2001; HOOGWIJK *et al.*, 2003; PARIKKA, 2004), se ha elegido el año 2050 para evaluar el potencial de la bioenergía. En los próximos dos apartados se examinan, en primer lugar, las estimaciones sobre el potencial técnico que se presentan en estos estudios para, posteriormente, tomando como base estos trabajos, volver a evaluar el potencial técnico de las plantaciones dedicadas a la bioenergía.

### 4.1. Estudios anteriores

Los investigadores del *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA)

(Fischer y Schrattenholzer, 2001) han publicado recientemente un análisis sobre el potencial global de la energía procedente de la biomasa. Dividen el mundo en once regiones, y estiman de forma separada el potencial de la biomasa en cada región. Establecen cinco fuentes de biomasa: residuos de cosechas, bos-

ques, cultivos energéticos, residuos animales y residuos municipales, siendo los cultivos energéticos y los bosques las más importantes. Su análisis produjo un potencial de bioenergía total de 225 EJ para 1990, año que se toma como base. Para el año 2050, el potencial estimado aumenta a un rango de 370 a 450 EJ (Tabla 2), comparado con el consumo de energía de biomasa que representa 46 EJ para 2002, el uso de energía primaria total es de 427 EJ. El potencial se dobla entre 1990 y 2050, especialmente como consecuencia del aumento de la producción procedente de residuos municipales, residuos forestales y plantaciones energéticas. Otro estudio europeo (HOOGWIJK *et al.*, 2003) también analiza la contribución potencial de estas mismas fuentes para el año 2050 obteniendo un rango mucho mayor: 38-1174 EJ. La Tabla 2 muestra las contribuciones de cada fuente según estos dos estudios.

Tabla 2. Potencial global de biomasa (EJ) por categorías, dos estudios con estimaciones para el año 2050

<b>Categoría de biomasa</b>	<b>Fischer and Schratzenholzer (2001)</b>	<b>Hoogwijk et al. (2003)</b>
Plantaciones energéticas	149-206	8-1098
Residuos	221-244	30-76
Residuos forestales	92-114	10-16
Residuos municipales	58	1-3
Residuos animales	50	9-25
Residuos agrícolas	21-22	10-32
<b>Total</b>	<b>370-450</b>	<b>38-1174</b>

Fuente: Fischer and Schratzenholzer (2001) y Hoogwijk *et al.* (2003)

El rango de plantaciones energéticas propuesto por IASA queda incluido dentro del expresado por Hoogwijk *et al.*, que es mucho más amplio; sólo las estimaciones de residuos agrícolas son similares en ambos estudios. La principal razón para el amplio margen de las plantaciones energéticas reside en la incertidumbre sobre las necesidades de tierra para la producción de alimentos. Otra razón puede ser la producción de las cosechas. En cuanto a las categorías de residuos forestales, agrícolas y animales, las estimaciones varían en función del pequeño porcentaje que representa su retirada sostenible. Aunque estos dos estudios (y otros, véase BERNDES *et al.*, 2003) indican los mismos valores para los residuos de cosechas, es probable que éstos no se puedan retirar sin reducir el contenido de carbono en el suelo o la producción de la cosecha (LAL, 2005; PATZEK, 2004). Aún así, al menos en un tipo de producción agrícola, la caña de azúcar, se tienen que eliminar los tallos del campo para que se muelan en el molino; por ello los residuos leñosos de la caña de azúcar (bagazo) son y seguirá siendo una materia prima local importante para la biomasa.

Los residuos municipales están disponibles en cantidades por renta per cápita similares en todos los países industrializados. El estudio de IIASA supone que, para el 2050, las once regiones convergirán en 2,5 toneladas per cápita, nivel medio actual de los países industrializados. Esto parece bastante incierto dados los esfuerzos que se están llevando a cabo en muchos países de la OCDE para reducir estos residuos, lo que intensificará el futuro coste energético. El valor de 1-3 EJ parece más probable.

En breve, el acercamiento realizado en estos estudios basados fundamentalmente en la disponibilidad de la tierra no nos permite obtener cifras fiables sobre el potencial total de la bioenergía en el futuro. Como se expone en el siguiente apartado, se necesitan otros acercamientos.

#### 4.2. Limitaciones del agua en las plantaciones destinadas a la bioenergía

Es obvio que la principal razón para la incertidumbre del potencial técnico total de la bioenergía reside en la incertidumbre del potencial de las plantaciones energéticas. La bioenergía y agricultura compiten por la tierra, pero Tilman *et al.* (2002) defienden que la mayor parte de la tierra de labranza se destina a la agricultura. Por lo tanto, la mayor expansión de áreas se producirá en tierras marginales que no pueden producir grandes cosechas y son vulnerables a la degradación. En términos generales, se piensa que será muy difícil incluso satisfacer las necesidades alimenticias de los 8-10 millardos de personas de una forma sostenible desde el punto de vista ecológico. Otros especialistas exponen sus ideas de forma similar. La tierra libre disponible para la agricultura se ha sobreestimado en gran medida (YOUNG, 1999) y ya «está en uso la mayor parte de tierra para cultivos de secano» (MATSON *et al.*, 1997).

La intensificación continuada de la agricultura, y posiblemente también la de las cosechas energéticas de biomasa, se considera como un modo de posibilitar ambos: el crecimiento de la producción alimenticia y una masiva expansión de la bioenergía. (Incluso así, no parece que la aplicación futura de la biotecnología a los cultivos ofrezca mucha esperanza para un aumento sustancial de la producción agrícola (SINCLAIR *et al.*, 2004)). Pero el incremento de la producción agrícola por hectárea ya ha provocado serios problemas ecológicos. Por ejemplo, los fertilizantes artificiales necesarios para las grandes producciones han alterado de forma radical los ciclos globales de nutrientes (REID *et al.*, 2005) y han «provocado de



forma inadvertida la eutrofización de estuarios, floraciones de algas, muertes masivas de peces y contaminación del agua subterránea» (STOTSKAD, 2005). Sin embargo, los problemas ambientales de la intensificación y expansión de la agricultura o de la bioenergía no son fácilmente cuantificables. Este apartado se centrará a continuación en la disponibilidad global de agua, que como se demostró anteriormente cuenta con serias implicaciones energéticas. Para proporcionar energía neta, la producción energética de la cosecha debe exceder los costes de los *input* energéticos del agua.

A diferencia de lo que sucede con el agotamiento del petróleo y el cambio climático, el problema de la escasez del agua se ha reconocido ampliamente. Una editorial reciente de *New Scientist* (ANON, 2004) afirma sin rodeos: «*Permanent hydrological drought is close to becoming a global fact of life*» (La constante sequía hídrica está a punto de convertirse en una realidad global). La ONU define los países con estrés hídrico («*water stressed*») como aquellos países con menos de 1.700 m<sup>3</sup> (1.700 toneladas) de agua limpia per cápita (SAWIN, 2003). En la actualidad, unos 1.400 millones de personas viven en estos países, especialmente en el norte de África y Oriente Medio. Pero la ONU proyecta que, para el año 2050, esta cifra puede aumentar a 7.000 millones de personas en 60 países (SAWIN, 2003). En términos generales, la agricultura consume en torno al 70% del agua limpia.

Un estudio de Postel *et al.* (1996) calcula que en 1995 se destinó al ser humano el 26% de los 69.600 km<sup>3</sup> de la evapotranspiración terrestre, según la Producción Primaria Neta (PPN) utilizada por las personas. (La apropiación humana de PPN es en sí misma muy significativa, como demuestra Imhoff *et al.* (2004)). Se calcula en 40.700 km<sup>3</sup> al año la cantidad terrestre total del agua que llega a los océanos, incluyendo un componente de agua subterránea. En 1995 ya se estaba utilizando el 54% del agua de lluvia disponible espacial y temporalmente para las personas. El agua que no se considera disponible incluye la de los ríos lejanos a los centros de población (como la procedente del río Amazonas) y la mayor parte del agua de inundaciones. La necesidad humana de caudales, por ejemplo para la disolución de contaminación y mejora de la calidad del agua, se incluyó dentro de la apropiación de agua limpia.

Aunque las personas utilicemos un 54% de toda la cantidad de agua de lluvia disponible, sólo se consume un sexto de la cantidad total. ¿Cuánta cantidad del agua actualmente no disponible podría ponerse a disposición de las personas en el futuro como, por ejemplo, capturando en presas más agua? El estudio de 1996 concluyó que la construcción de nuevas presas con una capacidad adicional de 1.200 km<sup>3</sup> en 30 años, 1995-2225, aumentaría la cantidad accesible de

agua en un 10%, mucho menos que el aumento del 38% de población que se espera (proyección media 1995-2025, UN, 2003). Estas estimaciones parecen razonables ya que gran parte de la capacidad nueva se necesitará para sustituir la pérdida como sedimentación de las presas antiguas. El problema de la sedimentación aumentará seriamente a partir de la próxima década ya que una serie de presas construidas en los años 60 y 70 pierden capacidad (PRITCHARD, 2002). Incluso con este crecimiento de agua disponible, la apropiación humana habrá aumentado a más del 70%, provocando más estrés en los ecosistemas (POSTEL, 1998).

El crecimiento económico y poblacional será el principal determinante sobre la demanda de agua futura y, por lo tanto, la adecuación de la oferta de agua. A su vez, cualquier cambio climático también puede limitar la cantidad de agua disponible al cambiar las corrientes temporales y espaciales del agua de lluvia global (VOROSMARTY *et al.*, 2000; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001). En general aumentará con gran probabilidad la liberación de agua por parte de los ríos, pero este aumento se experimentará especialmente en las áreas con una buena disposición hídrica en la actualidad, como los ríos que desembocan en el mar Ártico. En cambio, en otras áreas se experimentará un descenso de las corrientes y la evaporación de agua reducirá la hidratación de suelos en muchas zonas habitadas del mundo (PEARCE, 2004a). Además, la distribución en el tiempo de la cantidad anual de agua de lluvia puede cambiar con descensos del caudal de los ríos que se alimentan del deshielo glacial y de nieve durante las épocas secas (IPCC, 2001). En pocas palabras, el agua limpia accesible puede disminuir en el futuro a pesar de las demandas de un mayor incremento en todos sitios. Simplemente no habrá agua disponible para los grandiosos planes de trasvases de aguas. Por otro lado, el empeoramiento de la calidad del agua (y la intrusión del agua salada en los acuíferos costeros) limitará la cantidad de agua limpia disponible en el futuro (PEARCE, 2005b; REID *et al.*, 2005).

Se estima que en todo el mundo se extrae ya alrededor de 200 Gt (o 200 km<sup>3</sup>) al año de los acuíferos, provocando un descenso de la capa freática (ANON, 2004). En otras palabras, se está acabando con mucha agua subterránea más que utilizarla de un modo sostenible. Los niveles de la capa freática están descendiendo en los principales países de producción de alimentos como China, India, EEUU y México (BROWN, 2005). En India, se encuentran pozos para extraer el agua de riego a 1.000 m de profundidad (PEARCE, 2004b), que si se utilizaran para las plantaciones energéticas se encontrarían claramente por encima de la ratio límite de 167 m calculada anteriormente. Algunos estados indios están utilizando la mitad de su consumo eléctrico para la extracción del agua (BROWN, 2005).

Incluso el riego con aguas superficiales puede acarrear un coste energético considerable. Por ejemplo, en el río Amarillo de China se extrae agua de más de 300 m (CHENGRUI y DREGNE, 2001). El trasvase de agua entre cuencas puede ser también muy intensivo en energía. El proyecto de agua del Estado de California precisa de 8,8 MJ de energía eléctrica por m<sup>3</sup> de agua trasvasada, y el acueducto del Río Colorado 5,8 MJ/m<sup>3</sup> (IRRIGATION TRAINING AND RESEARCH CENTER, 2003). Con estos proyectos se obtendría una ratio energética inferior a uno en términos de energía primaria. La desalinización, que se supone una solución de gran consumo energético para hacer frente a la escasez de agua, es un claro indicador de la urgencia actual de la disponibilidad del agua. Se está empleando en la actualidad en 120 países, especialmente en Oriente Medio o pequeños países isleños con estrés hídrico. Se encuentran también grandes plantas desalinizadoras en uso o proyectadas en el Reino Unido, Estados Unidos, Australia y China. A pesar de que estos países cuenten con un ratio de agua limpia per cápita superior a 1.700 m<sup>3</sup>, límite de estrés hídrico de la ONU, todos ellos están teniendo problemas con la disponibilidad del agua.

En general, concluimos que el potencial técnico de la bioenergía se reducirá con el tiempo, a diferencia de lo expresado en el estudio de IASA. Los análisis anteriores sobre el potencial técnico, y en especial el de los cultivos destinados a la bioenergía, no han considerado la bioenergía junto con la agricultura/silvicultura, o no han tenido en cuenta la energía neta. El área actual total destinada a las cosechas energéticas sólo representa mil hectáreas en todo el mundo, especialmente en Suecia. Debido a que las cosechas energéticas compiten con la agricultura por el uso del agua (y otros inputs), un análisis adecuado sobre la energía y el cambio climático integrando a la agricultura y silvicultura daría como resultado un pequeño potencial energético en la actualidad y casi cero en el futuro, ya que los costes energéticos del agua aumentan.

## 5. Discusión: el uso de la bioenergía en un futuro incierto

Como se indicó más arriba, consideramos que los «arreglos técnicos», como la fijación de CO<sub>2</sub> en océanos o vehículos con pilas de hidrógeno, deben superar duros retos para que se consiga su implantación con éxito. Además, anteriormente hemos defendido (MORIARTY y HONNERY, 2005) que todas las fuentes de energías renovables tienen sus limitaciones y no sólo la bioenergía. La bioenergía cuenta con una importante ventaja sobre la energía eólica y otras fuentes de

energía intermitentes, ésta se puede almacenar al igual que el combustible fósil. Además, después de su conversión se puede utilizar de forma líquida, sólida o gaseosa.

Hasta ahora los gobiernos no han catalogado los combustibles como renovables o no renovables, en base a una evaluación previa de todos sus impactos sobre el cambio climático. Este artículo ha subrayado la complejidad de evaluar los impactos presentes, y especialmente los futuros, en el cambio climático como consecuencia de una introducción a gran escala de la bioenergía. Sin embargo, algunas fuentes de bioenergía como los que se indican a continuación no presentan problemas:

1. gas proveniente de alcantarillado,
2. gas en vertederos de los residuos orgánicos,
3. gases de residuos de carbón vegetal,
4. residuos orgánicos municipales,
5. residuos de restos de la caña de azúcar molida (bagazo),
6. residuos de aserraderos,
7. residuos animales en explotaciones ganaderas de engorde,
8. camadas de pollos y animales.

Estas materias primas no representan ningún problema porque se encuentran ya disponibles a coste cero en las plantas de conversión o en las granjas y sólo hay que añadir los costes de transporte. Aquí se hace referencia a los costes energéticos y de cambio climático, así como a los monetarios. Otro beneficio añadido es que las materias primas de 1 a 4, no sólo evitan las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera procedente de la combustión fósil, sino que tampoco emiten gas metano (en el caso de la basura de vertedero). Se calcula que el metano por molécula tiene un potencial de calentamiento global 62 y 23 veces más que el CO<sub>2</sub> en un horizonte de 20 y 100 años (ROBERTSON y GRACE, 2004). Para las materias primas 4-8, los costes de la eliminación de estos residuos se reducen enormemente. En general, se deben considerar los beneficios en el cambio climático, algunas materias primas resultan económicas para la producción de bioenergía. Otras materias primas, como los residuos animales en explotaciones ganaderas de engorde, son el resultado de prácticas problemáticas desde el punto de vista medioambiental. Pero mientras esta actividad continúe, usar esta materia prima como bioenergía representa beneficios palpables sobre el cambio climático. Aún así, el potencial de la bioenergía procedente de estas fuentes es modesto y en muchos casos ya se está utilizando.

Un segundo tipo de materias primas son aquéllas disponibles en cultivos complementarios, es decir un cultivo nuevo que se incorpora en un sistema agrícola existente para proporcionar alguna forma de protección o mejora del rendimiento. En Australia, la salinidad representa un gran problema, por lo que se están plantando eucaliptos mallee alrededor de los trigales de Australia occidental para ayudar a controlar la salinidad, como Bartle *et al.* (2007) expone en este *Special Issue*. Dado que los costes de la cosecha complementaria se comparten con la agricultura existente, se mejora la ratio energética. Si como en el caso de mallee, el combustible bioenergético es simplemente un residuo después de obtener producciones de gran valor, se mejoran aún más las ratios energéticas. En cualquier lugar, las cosechas leñosas (de árboles) pueden ser útiles por otras razones medioambientales, incluyendo la protección ante la erosión o la recuperación de la tierra en zonas mineras. En estas situaciones, la bioenergía aportará ratios mucho mayores a uno, así como beneficios al cambio climático. Es posible que algunos residuos agrícolas y forestales se incluyan en esta categoría. Sin embargo, es necesario que en todos los proyectos se evalúen los impactos en el cambio climático.

Bastante diferente es el caso del tercer tipo de materias primas, es decir las plantaciones energéticas. En vez de ser un complemento, éstas compiten con la agricultura y silvicultura. Aunque la expansión de la apropiación humana de PPN seguirá aumentando el estrés en ecosistemas causado por la agricultura intensiva, el problema central de los cultivos energéticos residirá en los costes energéticos del agua. Sin otros usos que compartan los costes de los *inputs* energéticos, éstos dejarán de tener sentido en un mundo con carencias hídricas desde el punto de vista energético.

## 6. Conclusiones

No es probable que se expandan mucho los usos actuales de la bioenergía a no ser que el cambio climático y, en menor medida, la oferta de petróleo sean problemas serios. Este análisis se ha centrado en evaluar la utilidad de la bioenergía a la hora de evitar graves cambios climáticos. En cambio, cualquier evaluación extensa de la bioenergía debe tener en cuenta lo siguiente.

- En la evaluación del potencial técnico de la bioenergía es necesario considerar las condiciones climáticas, posiblemente modificadas, así como las hídricas, ya que la gran expansión de la bioenergía se producirá en varias décadas.

- Se deben evaluar no sólo las emisiones GEI, sino también todos los efectos de la bioenergía en el cambio climático, como los cambios en el carbono del suelo y de albedo. En términos generales, es necesario un acercamiento desde el punto de vista del sistema terrestre para evaluar los efectos del cambio climático y su potencial técnico.
- Se tienen que considerar los efectos del cambio climático con la expansión de la bioenergía sobre la agricultura y silvicultura.

Los cultivos dedicados al uso energético representan el mayor potencial técnico futuro para la bioenergía según las estimaciones que se encuentran en la literatura. Pero si se realiza un estudio detallado que considere los efectos de la bioenergía en el cambio climático, el beneficio previsto para estos cultivos energéticos resulta ser dudoso. La producción neta energética puede ser muy baja o incluso negativa. El principal problema reside en los altos costes energéticos del futuro riego de la tierra. En la actualidad, la agricultura que hace uso de aproximadamente el 70% del agua extraída total está provocando el agotamiento de la capa freática, así como el deterioro de la fertilidad del suelo y daños ecológicos. La mayor parte de las tierras con buen acceso al agua de regadío se encuentra actualmente en uso agrícola, sólo el abastecimiento de agua para las necesidades agrícolas y de la silvicultura representa ya un gran reto para el futuro, haciendo más difícil el intento de producir cultivos energéticos.

Por suerte, las plantaciones dedicadas a la bioenergía no son la única fuente de biomasa. Son posibles otros dos grupos de materias primas. El primero está compuesto por residuos que suponen un problema para su gestión o se encuentran disponibles sin costes en las plantas de conversión. Aportan claros beneficios al cambio climático e incluso económicos, pero su contribución energética será modesta. El segundo grupo está compuesto por la biomasa cultivada para obtener otros objetivos medioambientales como la recuperación de tierras o para combatir la salinidad en tierras secas, como ocurre en Australia. La biomasa total posible es mucho mayor que la proporcionada por el primer grupo pero tendrán que evaluarse cuidadosamente los beneficios para el cambio climático.

## Bibliografía

- > ANON (2004), «Running on empty», *New Scientist*, 21st August, p.3.
- > BARAL, A. and GUHA, G. S. (2004), «Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: the issue of carbon benefit», *Biomass and Bioenergy*, Vol. 27, pp.41–55.
- > BARTLE, J.; OLSEN, G.; COOPER, D. and HOBBS, T. (2007), «Scale of biomass production from new woody crops for salinity control in dryland agriculture in Australia», *Int. Journal of Global Energy Issues*, Vol. 27, No. 2, pp.115–137.
- > BERNDES, G. (2002), «Bioenergy and water – the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply», *Global Environmental Change*, Vol. 12, pp.253–271.
- > BERNDES, G.; HOOGWIJK, M. and VAN DEN BROEK, R. (2003), «The contribution of biomass in the future global energy system: a review of 17 studies», *Biomass and Bioenergy*, Vol. 25, No. 1, pp.1–28.
- > BETTS, R. A. (2000), «Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo», *Nature*, Vol. 408, pp.187–190.
- > BP (2005), *BP Statistical Review of World Energy 2004*, 54th ed., BP, London. (Also earlier editions).
- > BROWN, L. R. (2005), *Outgrowing the Earth: The Food Security Challenge in an Age of Falling Water Tables and Rising Temperatures*, Norton & Co., New York.
- > BUSCH, M. and MICKOLS, W. E. (2004), «Reducing energy consumption in seawater desalination», *Desalination*, Vol. 165, pp.299–312.
- > CHENGRUI, M. and DREGNE, H. E. (2001), «Review article: silt and the future development of China's Yellow River», *The Geographical Journal*, Vol. 167, No. 1, pp.7-22.
- > CHOW, J.; KOPP, R. J. and PORTNEY, P. R. (2003), «Energy resources and global development», *Science*, Vol. 302, pp.1528–1531.
- > COX, P. M.; BETTS, R. A.; JONES, C. D.; SPALL, S. A. and TOTTERDELL, I. J. (2000), «Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model», *Nature*, Vol. 408, pp.184–187.

- > DICKSON, A.; SHORT, C.; DONALDSON, K. and ROBERTS, A. (2002), «Australian energy: key issues and outlook to 2019-20», *Australian Commodities*, Vol. 9, No. 1, pp.198–208.
- > ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA) (2004), *Annual Energy Outlook 2004 with Projections to 2025*, US Dept. of Energy.
- > ERCOLI, L.; MARIOTTI, M.; MASONI, A. y BONARI, E. (1999), «Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of Miscanthus», *Field Crops Research*, Vol. 63, pp.3–11.
- > FAAIJ, A. P. C. (2006), «Bio-energy in Europe: changing technology choices», *Energy Policy*, Vol. 34, No. 3, pp.322–342.
- > FALKOWSKI, P.; SCHOLLES, R. J.; BOYLE, E.; CANADELL, J.; CANFIELD, D.; ELSER, J.; GRUBER, N.; HIBBARD, K.; HOGBERG, P.; LINDER, S.; MACKENZIE, F. T.; MOORE, B.; PEDERSEN, T.; ROSENTHAL, Y.; SEITZINGER, S.; SMETACEK, V. and STEFFEN, W. (2000), «The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system», *Science*, Vol. 290, pp.291–296.
- > FEARNSIDE, P. M. (2004), «Are climate change impacts already affecting tropical forest biomass?», *Global Environmental Change*, Vol. 14, pp.299–302.
- > FISCHER, G. and SCHRATTENHOLZER, L. (2001), «Global bioenergy potentials through 2050», *Biomasa and Bioenergy*, Vol. 20, pp.151–159.
- > GIAMPIETRO, M.; ULGIATI, S. and PIMENTEL, D. (1997), «Feasibility of large-scale biofuel production», *BioScience*, Vol. 47, pp.587–600.
- > HOOGWIJK, M.; FAAIJ, A.; VAN DEN BROEK, R.; BERNDES, G.; GIELEN, D. and TURKENBURG, W. (2003), «Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy», *Biomasa and Bioenergy*, Vol. 25, pp.119–133.
- > IMHOFF, M. L.; BOUNOUA, L.; RICKETTS, T.; LOUCKS, C.; HARRISS, R. and LAWRENCE, W. (2004), «Global patterns in human consumption of Net Primary Production», *Nature*, Vol. 429, pp.870–873.
- > INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2001), *Climate Change 2001: The Scientific Basis, A Report of Working Group 1 of the IPCC*, Also, *Mitigation, A Report of Working Group 2*. Accessed respectively at [www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/) and [www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg2/index.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/index.htm).



- > INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2003) (Ed.), *Renewables Information*, IEA/OECD, Paris. Irrigation Training and Research Center (ITRC) (2003) *Californian Agricultural Water Electrical Energy Requirements: Final Report*, Available at [www.itrc.org/reports/cec/energyreq.pdf](http://www.itrc.org/reports/cec/energyreq.pdf).
- > JANZEN, H. H. (2004), «Carbon cycling in earth systems – a soil science perspective», *Agriculture, Ecosystems and the Environment*, Vol. 104, pp.399–417.
- > LAL, R. (2004a), «Carbon emissions from farm operations», *Environment International*, Vol. 30, pp.981–990.
- > LAL, R. (2004b), «Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security», *Science*, Vol. 304, pp.1623–1627, Supporting Online Material at [www.sciencemag.org/cgi/content/304/5677/1623/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/304/5677/1623/DC1).
- > LAL, R. (2005), «World crop residues production and implications of its use as a biofuel», *Environment International*, Vol. 31, No. 4, pp.575–584.
- > MARDON, C. (2007), «The feasibility of producing alcohol fuels from biomass in Australia», *Int. Journal of Global Energy Issues*, Vol. 27, No. 2, pp.138–159.
- > MARLAND, G.; PIELKE, R. A.; APPS, M.; AVISSAR, R.; BETTS, R. A.; DAVIS, K. J.; FRUMHOFF, P. C.; JACKSON, S. T.; JOYCE, L. A.; KAUPPI, P.; KATZENBERGER, J.; MACDICKEN, K. G.; NEILSEN, R. P.; NILES, J. O.; NIYOGI, D. S.; NORBY, R. J.; PENA, N.; SAMPSON, N. y XUE, Y. (2003), «The climatic impacts of land surface change and carbon management, and the implications for climate-change mitigation policy», *Climate Policy*, Vol. 3, pp.149–157.
- > MATSON, P. A.; PARTON, W. J.; POWER, A. G. and SWIFT, M. J. (1997), «Agricultural intensification and ecosystem properties», *Science*, Vol. 277, pp.504–509.
- > MATTHEWS, R. W. (2001), «Modelling of energy and carbon budgets of wood fuel coppice systems», *Biomass and Bioenergy*, Vol. 21, pp.1–19.
- > MORIARTY, P. and HONNERY, D. (2003), «World alternative energy potential: implications for combustion», *2003 Australian Symposium on Combustion*, 8–9 December, Monash University, Australia.
- > MORIARTY, P. and HONNERY, D. (2005), «Can renewable energy avert global climate change?», *17th International Clean Air and Environment Conference*, Hobart, Tasmania, 3–6 May.

- > NONHEBEL, S. (2002), «Energy yields in intensive and extensive biomass production systems», *Biomass and Bioenergy*, Vol. 22, pp.159–167.
- > PARIKKA, M. (2004), «Global biomass fuel resources», *Biomass and Bioenergy*, Vol. 27, pp.613–620.
- > PATZEK, T. W. (2004), «Thermodynamics of corn bioethanol biofuel cycle», *Critical Reviews in Plant Sciences*, Vol. 23, pp.519–567.
- > PEARCE, F. (1999), «That sinking feeling», *New Scientist*, 23rd October, pp.20, 21.
- > PEARCE, F. (2004a), «Climate change heralds thirsty times ahead for most», *New Scientist*, 22nd May, pp.16, 17.
- > PEARCE, F. (2004b), «Asian farmers suck continent dry», *New Scientist*, 28th August, pp.6, 7.
- > PEARCE, F. (2005a), «Cities may be abandoned as salt water invades», *New Scientist*, 16th April, p.9.
- > PEARCE, F. (2005b), «Act now before it's too late», *New Scientist*, 12th February, pp.8–11.
- > PIMENTEL, D.; BERGER, B.; FILIBERTO, D.; NEWTON, M.; WOLFE, B.; KARABINAKIS, E.; CLARK, S.; POON, E.; ABBETT, E. and NANDAGOPAL, S. (2004), «Water resources: current and potential issues», *BioScience*, Vol. 52, pp.1111–1120.
- > POSTEL, S. L. (1998), «Water for food production: will there be enough in 2025?», *BioScience*, Vol. 48, pp.629–637.
- > POSTEL, S. L.; DAILY, G. C. and EHRLICH, P. R. (1996), «Human appropriation of renewable fresh water», *Science*, Vol. 271, pp.785–788.
- > PRITCHARD, S. (2002), «Overloaded», *International Water Power and Dam Construction*, Vol. 54, No. 7, pp.18–22.
- > REID, W. V.; MOONEY, H. A.; CROPPER, A.; CAPISTRANO, D.; CARPENTER, S. R.; CHOPRA, K.; DASGUPTA, P.; DIETZ, T.; DURAIAPPAH, A. K.; HASSAN, R.; KASPERSON, R.; LEEMANS, R.; MAY, R. M.; MCMICHAEL, A. J.; PINGALI, P.; SEMPER, C.; SCHOLE, R.; WATSON, R. T.; ZAKRI, A. H.; SHIDONG, Z.; ASH, N. J.; BENNETT, E.; KUMAR, P.; LEE, M. J.; RAUDSEPP-HEARNE, C.; SIMONS, H.; THONELL, J. and ZUREK, M. B.

(2005), *Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report*, Available at [www.maweb.org/en/index.aspx](http://www.maweb.org/en/index.aspx).

- > REIJNDERS, L. and HUIJBREGTS, M. A. J. (2003), «Choices in calculating life cycle emissions of carbon containing gases associated with forest derived biomass», *Journal of Cleaner Production*, Vol. 11, pp.527–532.
- > RENEWABLE FUELS ASSOCIATION (RFA) (2005), *Ethanol Industry Outlook 2005*, RFA, Boston.
- > ROBERTSON, G. P. and GRACE, P. R. (2004), «Greenhouse gas fluxes in tropical and temperate agriculture: the need for a full-cost accounting of global warming potentials», *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 6, pp.51–63.
- > SAWIN, J. L. (2003), «Water scarcity could overwhelm the next generation», *World Watch*, July–August, Vol. 16, No. 4, p.8.
- > SCHLESINGER, W. H. (1999), «Carbon sequestration in soils», *Science*, Vol. 284, p.2095.
- > SHAPOURI, H.; DUFFIELD, J. and WANG, M. (2002), *The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update*, AER-814, USDA, Washington.
- > SINCLAIR, T. R.; PURCELL, L. C. and SNELLER, C. H. (2004), «Crop transformation and the challenge to increase yield potential», *Trends in Plant Science*, Vol. 9, pp.70–75.
- > STEFFEN, W.; ANDRAE, M. O.; BOLIN, B.; COX, P. M.; CRUTZEN, P. J.; CUBASCH, U.; HELD, H.; NAKICENOVIC, N.; SCHOLES, R.; TALAUE-MCMANUS, L. and TURNER, B. L. (2003), «Abrupt changes: the Archilles' Heel of the earth system», *Environment*, Vol. 46, No. 3, pp.8–20.
- > STOTSKAD, E. (2005), «Taking the pulse of Earth's life-support systems», *Science*, Vol. 308, pp.41–43.
- > TILMAN, D.; CASSMAN, K. G.; MATSON, P. A.; NAYLOR, R. and POLASKY, S. (2002), «Agricultural sustainability and intensive production practices», *Nature*, Vol. 418, pp.671–677.
- > UNITED NATIONS (UN) (2003), *U.N. World Population Prospects, 2003*, Accessed at <http://esa.un.org/unpp/>.

- > VOROSMARTY, C. J.; GREEN, P.; SALISBURY, J. and LAMMERS, R. B. (2000), «Global water resources: vulnerability from climate change and population growth», *Science*, Vol. 289, pp.284–288.
- > WEISS, M. A.; HEYWOOD, J. B.; DRAKE, E. M.; SCHAFER, A. and AUYEUNG, F. F. (2000), *On the Road in 2020: A Lifecycle Analysis of New Automobile Technologies*, Energy Laboratory Report # MIT EL 00-003, MIT.
- > WIGLEY, T. M. L. (2005), «The climate change commitment», *Science*, Vol. 307, pp.1766–1769.
- > WIHERSAARI, M. (2005), «Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue», *Biomass and Bioenergy*, Vol. 28, pp.444–453.
- > YOUNG, A. (1999), «Is there really spare land? A critique of estimates of available cultivable land in developing countries», *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 1, pp.3–18.

## Abreviaturas

EIA	<i>Energy information administration</i> (EE.UU.)
EJ	Exajulio (10 <sup>18</sup> julios)
UE	Unión Europea
GEI	Gases efecto invernadero
GJ	Gigajulio (10 <sup>9</sup> julios)
GL	Gigalitro (10 <sup>9</sup> litros)
GtC	Gigatoneladas (10 <sup>9</sup> toneladas) de carbono
IEA	<i>International energy agency</i>
IIASA	<i>International institute for applied systems analysis</i>
MJ	Megajulio (10 <sup>6</sup> julios)
PPN	Producción primaria neta
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
ppm(v)	Partes por millón (volumen)
SRC	<i>Short rotation coppicing</i> (cultivos energéticos herbáceos y leñosos)