
Jesús Fernández González

La agricultura como fuente productora de energía

1. LA AGRICULTURA COMO SISTEMA CAPTADOR DE LA ENERGIA SOLAR

La energía solar es transformada en biomasa por los vegetales por medio de la fotosíntesis. La biomasa producida a través del proceso fotosintético ha sido la principal fuente energética que ha mantenido la vida en la Tierra desde hace más de mil millones de años. El hombre primitivo, al igual que los restantes seres vivos, dependía completamente de la biomasa vegetal o animal producida en la Naturaleza, de tal forma que la producción natural de la Tierra en cada lugar condicionaba la población máxima admisible.

El hombre primitivo, en su faceta de cazador-recolector, aprovechaba principalmente la biomasa con propiedades alimenticias, mientras que la restante biomasa producida o no la utilizaba, o lo era en escala reducida para fines industriales o de confort (utensilios, habitación, fuego, etc.).

Para satisfacer las necesidades energéticas de la dieta de cada individuo primitivo (unas 3.000 kilocalorías/día) se

* Doctor Ingeniero Agrónomo. Profesor agregado de la E. T. S. I. A. de Madrid.

necesitaba una superficie de varias decenas de hectáreas, donde practicaba la caza y recolectaba los frutos base de su alimentación. Con la aparición de la agricultura en el Neolítico, hace unos diez mil años, el hombre empezó a aprovechar racionalmente la energía solar (aunque tal vez no fuera muy consciente de ello), utilizando las plantas como elementos captadores y acumuladores de la energía de las radiaciones solares.

Entre las diferentes especies que crecían espontáneamente, el hombre fue seleccionando las que ofrecían mejores posibilidades de producción de alimentos no solamente teniendo en cuenta la producción total, sino también la calidad de la cosecha. De esta forma se redujo considerablemente la superficie requerida para la subsistencia de un individuo y progresivamente fue disminuyendo más a medida que se perfeccionaron las técnicas de cultivo, y como consecuencia se aumentaba la productividad de la tierra, lo cual era una consecuencia de una mejor captación de la energía solar a través del proceso fotosintético de los vegetales cultivados.

Según se puede observar en la tabla I, a medida que fue evolucionando la civilización, el hombre ha ido consumiendo cada vez más energía, perdiendo importancia relativa la cantidad de energía contenida en los alimentos de la dieta frente a la energía de confort, industria y transporte. En los países más desarrollados, la energía contenida en la dieta alimenticia apenas llega a suponer el 2 por 100 del consumo energético total. Para satisfacer esta demanda energética tan considerable ha habido necesidad de recurrir a otras fuentes energéticas distintas de la agricultura, fenómeno que empezó a ocurrir sensiblemente en el siglo pasado a partir de la utilización de los combustibles fósiles (el carbón primero y posteriormente el petróleo).

2. RENDIMIENTO ENERGETICO DE LA PRODUCCION VEGETAL

De la totalidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre, solamente una parte, la comprendida entre

Tabla I
Consumo de energía por el hombre a lo largo de la historia, según E. Cock (1)

	Consumo diario por individuo (x 1.000 kilocalorías)				Total
	Alimento (*)	Confort y comercio	Industrias y agricultura	Transporte	
Hombre primitivo recolector	2	—	—	—	2
Hombre primitivo cazador	3	2	—	—	5
Agricultor primitivo	4	4	4	—	12
Agricultor avanzado	6	12	7	1	26
Hombre de época industrial	7	32	24	14	77
Hombre de época tecnológica	10	66	91	63	230

(*) Se considera la energía contenida en los alimentos, más la energía gastada en producirlos.

los 400 y los 700 nm., es fotosintéticamente activa (RFA), lo que constituye el 43 por 100 del total de la energía de la radiación solar.

A nivel de los cloroplastos, el rendimiento energético en la asimilación de una molécula de CO_2 es aproximadamente del 28 por 100 respecto a la energía de la RFA, ya que se necesita la absorción de ocho fotones como mínimo para arrancar los cuatro electrones de la molécula de agua y reducir a la molécula de CO_2 (2).

A nivel de las hojas, en un día soleado la eficiencia fotosintética es de un 15 a un 17 por 100, debido a que se producen gastos energéticos en las transformaciones metabólicas y en el proceso fotorrespiratorio. Si en lugar de una hoja se considera la planta completa durante todo un día de permanencia en el campo, la eficiencia fotosintética (respecto a la RFA) sería entonces de un 2 a un 5 por 100, ya que en este caso se producirían pérdidas considerables en los procesos de absorción, traslocación y respiración oscura, además de los propios del metabolismo general.

Si se considera la eficiencia fotosintética de una plantación teniendo en cuenta la energía total recibida en la superficie ocupada por el cultivo durante el tiempo de permanencia de éste y la materia orgánica cosechable, la eficiencia resulta considerablemente menor. Así, por ejemplo, para una latitud análoga a la de Madrid, en la que la energía de la RFA que se recibe durante todo el año es del orden de $6,32 \times 10^9$ Kcal/Ha., la eficiencia fotosintética para un cultivo que produjera 10.000 Kg/Ha. de materia seca total sería de un 0,63 por 100 (un 0,27 por 100 si se considera respecto a la radiación total), considerando el valor calórico de la materia seca de 4.000 Kcal/Kg.

Aparte de la energía solar, que se recibe gratuitamente en todas las zonas de la tierra, para producir biomasa vegetal en las explotaciones agrícolas se necesita aportar una cierta cantidad de energía exterior procedente de diversas fuentes (desde el trabajo muscular a la energía eléctrica, pasando por el petróleo y sus derivados).

Las necesidades de energía convencional son diferentes para los distintos cultivos (tabla II), así como el contenido

Tabla II

Energía convencional consumida para producir 1 kilogramo de producto agrícola, según datos promedio de la O. C. D. E. (3)

<i>Producto</i>	<i>Energía consumida (Kcal/Kg.)</i>
Cereales	1.100
Remolacha azucarera	200
Patatas	500
Guisantes	600
Lechugas de invernadero	55.000
Lechugas en el campo	450
Algodón	13.500
Tabaco	16.000
Forraje ensilado	1.000

calórico de éstos (tabla III). También influye mucho en el balance energético de un cultivo el sistema productivo empleado, como se puede apreciar en la tabla IV.

Tabla III

Contenido calórico de distintos tipos de biomasa, según diversos autores (4, 5 y 6)

<i>Producto</i>	<i>Contenido calórico Kcal/gr.⁻¹</i>
Glucosa	4,1
Celulosa	4,55
Proteínas	5,3
Grasas	9,3
Avena (grano)	3,7
Trigo (grano)	3,3
Cebada (grano)	3,5
Maíz (grano)	3,5
Centeno (grano)	3,4
Paja	2,6 - 3,8
Raíces feculentas	0,8
Remolacha azucarera	0,68
Patata	0,9
Legumbres secas	3,5
Legumbres verdes	de 0,25 a 0,4
Fruta fresca	0,55
Fruta seca	2,8
Azúcar	3,9
Frutos oleaginosos	5,5
Maíz forrajero en verde	0,9
Madera seca	3,6 - 4,7

Tabla IV

Balances energéticos de algunos sistemas de cultivos agroalimentarios típicos, según datos de diversos autores Equivalencia:
1 Gcal. = 10^9 calorías = 0,1 TEP (ton. equival. de petróleo)

SISTEMA DE CULTIVO	Producción anual bruta (materia seca)		Consumo anual Gcal/Ha. (C)	Producción neta Gcal/Ha. (P-C)	Eficiencia (P/C)	REFERENCIA
	Kg/Ha. ⁻¹	Gcal/Ha. (P)				
Agricultura tradicional (Uganda)	48	0,192	0,038	0,154	5,05	(7)
Agricultura de subsistencia (India)	618	2,472	0,168	2,304	14,71	(7)
Trigo mediterráneo (*) (Francia)	4,500	18,000	4,150	13,850	4,33	(5)
Trigo de alta producción (*) (Francia)	11,750	47,000	6,700	40,300	7,01	(8)
Maíz tradicional (*) (México)	1,758	7,033	0,215	6,816	32,56	(7)
Maíz para grano (*) (U. S. A.)	10,166	40,664	7,185	33,479	5,66	(9)
Arroz (*) (Filipinas)	5,400	21,600	1,530	20,070	14,12	(9)
Arroz (*) (U. S. A.)	11,600	46,400	15,520	30,880	2,99	(9)

(*) Se considera la paja (50 por 100), más el grano (50 por 100).

3. LA AGROENERGETICA

La *agroenergética* se define como una nueva faceta de la agricultura en la que se aborda la producción y el aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos exclusivamente. Esta finalidad diferencia a la *agroenergética* de las actividades *agroalimentaria* y *agroindustrial*, que han sido las que tradicionalmente ha venido considerando la agricultura clásica.

El concepto de biomasa objeto de la agroenergética es muy amplio, pudiéndose extender a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen como consecuencia de un proceso biológico. Se denomina *biomasa primaria* a la que procede directamente de la actividad fotosintética de los vegetales, es decir, a la materia orgánica vegetal, y *biomasa secundaria* a la que procede del consumo de la biomasa primaria, como puede ser la carne del ganado vacuno o de cualquier herbívoro. La carne de un carnívoro sería biomasa terciaria en su gran mayoría.

Dentro del campo de la agroenergética hay que considerar, por tanto, en primer lugar las fuentes capaces de suministrar biomasa transformable en combustible, y en segundo lugar, los procesos que se pueden aplicar para realizar estas transformaciones.

Entre las fuentes de biomasa para la obtención de energía cabe citar:

- La biomasa residual procedente de las explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, así como la generada en las industrias y en los núcleos urbanos.
- La biomasa producida especialmente para fines energéticos en las llamadas «plantaciones de energía».

4. APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE LA BIOMASA RESIDUAL

La biomasa residual ofrece unas perspectivas universales de aprovechamiento, ya que se produce en todo momento

como consecuencia de la actividad humana, y normalmente constituye un problema su eliminación. En general, considerando globalmente la actividad humana, se estima que por habitante y año se producen unas dos toneladas de biomasa residual seca, con un poder calorífico de unos ocho millones de kilocalorías.

Entre las ventajas que ofrece la biomasa residual para ser utilizada con finalidad energética, cabe destacar:

- Se reduce la contaminación ambiental y el deterioro del medio ambiente que produce.
- Los costes de producción son muy reducidos, ya que normalmente están cargados en el producto principal. El principal coste de producción es el de la recogida en los casos en que ésta no se realiza necesariamente.
- Permite la reutilización de los elementos minerales con fines agrícolas.

Los países que poseen una elevada densidad de población, y que necesitan la mayor parte de su superficie cultivable para la producción de alimentos, han fijado su atención prioritariamente en el aprovechamiento de la biomasa residual, ya que, por una parte, poseen abundante cantidad de residuos y, por otra, carecen de las superficies marginales necesarias para dedicarlas a cultivos energéticos. Este es el caso de la mayoría de los países de la C. E. E., que en su programa conjunto sobre utilización de la biomasa estiman que podrían obtener de la biomasa residual cerca del 10 por 100 de sus necesidades energéticas.

En un estudio realizado en la E. T. S. de Ingenieros Agrónomos de Madrid, a petición del Ministerio de Agricultura (10), se evalúa la potencialidad energética de la biomasa residual producida en España (tabla V), estimándose en total un valor calórico de $2,266 \times 10^{14}$ kilocalorías, equivalente a un 14,3 por 100 de la demanda energética previsible en España para 1985 ($1,58 \times 10^{15}$ kilocalorías). Como puede observarse en la tabla III, la principal fuente de residuos está constituida por los restos de cosechas agrícolas (51,6 por 100), seguida de los restos de explotaciones fores-

tales (26,7 por 100) y del estiércol de las explotaciones ganaderas (12,7 por 100). Las basuras urbanas (6,7 por 100) y los restos generados en las industrias agrarias (2,3 por 100) tienen, proporcionalmente, una menor importancia en cuanto a la producción total, pero a nivel individual de cada industria, la utilización de su biomasa residual puede resultar económicamente interesante.

Tabla V

Estimación de la biomasa residual producida anualmente en España (1)

<i>Tipo de biomasa Residual</i>	<i>Producción (10⁶ Tm.)</i>	<i>Contenido calórico</i>	
		<i>(10¹² Kcal.)</i>	<i>Porcentaje</i>
Agrícola	36,7	117,4	51,7
Forestal	15,2	60,8	26,8
Basuras urbanas (sólidas)	3,8	5,3	2,3
Industrias agrarias	4,8	14,4	6,3
Estiércol (materia seca)	7,3	29,2	12,9
Total	67,8	227,1	100,0

5. LAS PLANTACIONES DE ENERGIA

Hasta el momento presente, la finalidad principal perseguida por el agricultor con el cultivo de la tierra ha estado encaminada a la obtención de productos alimentarios o de utilización industrial. Estos dos objetivos constituyen los aspectos agroalimentario y agroindustrial de la agricultura.

Como consecuencia de la crisis energética originada por los sucesivos embargos petrolíferos iniciados en la pasada década, se ha empezado a considerar seriamente la posibilidad de establecer cultivos con la finalidad de producir biomasa transformable en combustible, dando así origen a una nueva faceta de la agricultura: la agroenergética, según se indicó anteriormente.

Para desarrollar los cultivos energéticos es preciso empezar desde cero, al igual que en su día lo hizo el hombre neolítico con los cultivos agroalimentarios, y tratar de descubrir entre las especies silvestres (o cultivadas), las que mejor se

adapten a cada zona, establecer su fitotecnia y comenzar una selección genética encaminada a la obtención de variedades que acumulen la mayor cantidad posible de la energía solar en la biomasa recolectable.

Dado que la población humana tienen la necesidad prioritaria de obtener los alimentos necesarios para su subsistencia, en principio no cabe pensar en utilizar las tierras dedicadas a cultivos agroalimentarios para producir biomasa energética. Para este fin habría que emplear las tierras consideradas como marginales o de baja productividad para los cultivos agrícolas tradicionales.

Las principales diferencias entre los cultivos agroalimentarios y los agroenergéticos se podrían resumir en los siguientes puntos:

1. En los cultivos agroalimentarios el objetivo final es la obtención de alimentos de buena calidad, mientras que en los agroenergéticos se trata de obtener la mayor cantidad posible de biomasa transformable en energía.
2. Las especies que se cultiven con fines energéticos serán, casi con toda seguridad, distintas a las que se cultiven con fines alimenticios, pudiéndose dar casos de cultivos poliespecíficos en una misma superficie de cultivo.
3. En los cultivos agroalimentarios se suele utilizar solamente una parte de la biomasa producida, mientras que en los agroenergéticos interesa toda la biomasa producida que sea económicamente recolectable.
4. Tanto el marco de plantación como la época de recolección pueden variar para una misma especie, según que el enfoque sea agroalimentario o agroenergético.
5. Los cultivos energéticos pueden cultivarse en tierras consideradas como marginales para los cultivos agrícolas tradicionales por ser más amplio el espectro de las plantas susceptibles de ser cultivadas en cada zona.
6. Al contrario de lo que ocurre en las explotaciones agroalimentarias, en las explotaciones agroenergéticas no se produce una pérdida de elementos minerales por exportación de la cosecha, ya que, en teoría, éstos pueden ser recu-

perados casi íntegramente en los procesos de transformación de la biomasa en combustibles, al quedar como residuos del proceso. Teniendo en cuenta que las explotaciones agroenergéticas deben tener los centros de transformación de la biomasa en combustible en lugares cercanos a los centros de producción, se puede siempre pensar en la reutilización del residuo mineral en las tierras que produjeron la biomasa energética.

6. TIPOS DE CULTIVOS ENERGETICOS

Los cultivos susceptibles de ser utilizados como productores de energía deben estar seleccionados de acuerdo a la premisa general de obtener la máxima cantidad posible de energía neta compatible con las condiciones edafoclimáticas de cada zona. A continuación se da una relación de cultivos susceptibles de ser aprovechados con fines energéticos.

6.1. Cultivos herbáceos tradicionales

- *Sacharum officinarum* (caña de azúcar).
- *Zea mays* (maíz, principalmente las variedades forrajeras y de tallo dulce).
- *Sorgum vulgare* (sorgo, principalmente el de tallo azucarado).
- *Sorgum vulgare* y *Sorgum sudanense* (híbridos de sorgo y pasto del Sudán).
- *Pennisetum* sp. (hierba elefante).
- *Helianthus annuus* (girasol forrajero).
- *Helianthus tuberosum* (pataca o tupinambo).
- *Solanum tuberosum* (patata).
- *Beta vulgaris* (remolacha).
- *Ipomea batatas* (batata o boniato).
- *Brassica rapa* (nabo forrajero).
- *Manihot utilissima* (mandioca).

Las variedades más interesantes de estas especies cultivadas son las que ofrecen mayores índices de producción, aunque no se cultiven tradicionalmente, por su mala calidad alimenticia.

6.2. Cultivos no convencionales

Desde que se ha empezado a considerar la posibilidad de utilizar cultivos con fines energéticos, en diversos países se han comenzado proyectos de prospección de especies silvestres de posible utilización energética. A continuación se relacionan algunas de las especies consideradas y los países donde se han experimentado. Algunas de estas especies ya se cultivaban en sitios aislados, pero nunca con la intención de obtener energía.

Para zonas húmedas

- Arundo donax (caña de Provenza), Francia.
- Phragmites australis (caña común), Suecia.
- Typha sp. (juncos de agua), USA.
- Portulaca olerácea (verdolaga), España.

Para zonas áridas y semiáridas

- Onopordum nervosum (toba), España.
- Cynara cardunculus (cardo lleno o alguacil), España.
- Amaranthus retroflexus, USA.
- Simmondsia chinensis (jojoba), USA.
- Euphorbia sp., USA, Francia, Brasil, España.
- Bryophillum sp., España.
- Opuntia ficus-indica (chumbera), España.
- Agave americana (pita), España.

6.3. Plantas acuáticas

La planta más interesante por su enorme productividad (hasta cien toneladas de materia seca por hectárea y año) es el denominado jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), que procede de las zonas cálidas de Sudamérica, donde se desarrolla abundantemente en las lagunas y aguas remansadas. Para producir elevados rendimientos requiere altas temperaturas durante su desarrollo, así como gran cantidad de elementos minerales. Es una planta que crece muy bien en las aguas residuales y puede ser utilizada como depuradora de éstas, además de productora de biomasa energética. En la actualidad esta planta está considerada como una mala hierba difícil de extirpar (debido a su reproducción vegetati-

va natural), y constituye serios problemas en las acequias y canales de riego. Debido a su alto contenido acuoso, el empleo más indicado es para la producción de metano por digestión anaerobia.

Algunas *algas marinas*, tales como *Macrocystis sp.*, tienen buenas características debido a que sus células no tienen envoltura lignocelulósica, lo cual favorece la digestión de su materia orgánica. El mayor problema que ofrecen estas plantas es el originado por su recolección cuando no se cultivan en «granjas marinas» bajo condiciones especiales.

Las *algas unicelulares* han sido objeto de estudio para su cultivo en gran escala en balsas de agua de poca profundidad. En la actualidad se utilizan algas microscópicas para el tratamiento de aguas residuales; el oxígeno que generan se emplea en el proceso aerobio del tratamiento, y al asimilar los elementos minerales producen una abundante cantidad de biomasa. La recolección de estos organismos es un factor técnico limitante, ya que se requiere un considerable aporte energético en las técnicas de filtrado y centrifugación que normalmente se utilizan.

6.4. Cultivos energéticos de plantas forestales

El manejo de especies forestales en plantaciones de energía difiere del que tradicionalmente se hace en las explotaciones madereras. Para fines energéticos son preferibles especies de crecimiento rápido y precoz con altas densidades de plantación (espaciamientos de menos de un metro), sometiendo a un tratamiento selvícola intensivo y cosechando su producción en ciclos cortos (de menos de cinco años generalmente). En estas plantaciones, el vigor juvenil de las plantas, el rápido recubrimiento del suelo y la competencia intensa inducen un elevado crecimiento en altura durante la primavera, seguido de un robustecimiento del tronco en el resto del año. La cosecha de la biomasa se realiza a los tres o cinco años, durante el invierno. En la primavera siguiente rebrotan las gemas que estaban durmientes en el cuello de la raíz y estos brotes se vuelven a cosechar a los tres o cinco años, repitiéndose el ciclo sucesivamente.

En la selección de especies para este tipo de plantaciones hay que tener en cuenta los siguientes factores, aparte de los indicados al principio de este punto:

- a) Vigor y precocidad de crecimiento con objeto de obtener la mayor cantidad de biomasa en el ciclo más reducido posible.
- b) Para igualdad de las restantes características, se prefieren especies que acumulen mayores porcentajes de energía por unidad de peso seco.
- c) Se prefieren especies que rebroten de cepa a los que lo hagan exclusivamente por semilla.
- d) El tipo de tratamiento que se vaya a dar a la biomasa para transformarla en energía, ya que si se va a seguir un tratamiento biológico, por ejemplo, el mayor contenido en lignina y en terpenos disminuye las posibilidades de ataque por los microorganismos.
- e) Carácter de especie mejoradora del suelo.

7. BALANCE ENERGETICO DE LAS PLANTACIONES DE ENERGIA

La principal característica que deben reunir las plantaciones de energía para ser viables es la de presentar un balance energético positivo, es decir, producir más energía de la que consumen en su cultivo y recolección (sin contabilizar la energía solar, naturalmente). La relación entre la energía producida y la consumida (*output/input*) da una idea de la *eficiencia* del proceso productivo, pero no indica nada sobre la magnitud de la producción total. La *producción neta* de energía (*output-input*) es el dato más interesante para comparar los rendimientos de distintos cultivos desde una óptica puramente energética.

Si llamamos P al contenido energético de la biomasa producida y C a la energía consumida en la totalidad del proceso productivo, podemos describir las relaciones:

$$\text{Eficiencia del proceso: } E = \frac{P}{C}$$

$$\text{Energía neta producida: ENP} = P - C = P(1 - \frac{1}{E})$$

En la tabla IV se dan los balances energéticos de varios cultivos agrícolas. Se puede apreciar que los sistemas tradicionales de cultivo no son capaces de producir, de forma neta, el equivalente energético de una tonelada de petróleo (1 TEP = 10^{10} calorías), mientras que se pueden alcanzar varios TEP con una modernización de los medios de producción. Si se realizaran estos balances energéticos para cultivos hortícolas intensivos, la energía neta final, en general, daría un saldo negativo.

La agricultura, como empresa, depende fundamentalmente del balance económico de su producción, más que del balance energético. Los balances energéticos negativos pueden resultar rentables, desde el punto de vista empresarial, siempre que el precio de las unidades energéticas invertidas en el cultivo sea inferior al de las producidas. A este respecto cabe recordar que el precio de los productos agrarios no está fijado precisamente por su contenido calórico.

En la tabla VI se expresan los resultados de un trabajo realizado por Inman (11) sobre el balance energético de dos plantaciones forestales situadas en dos estados diferentes de los Estados Unidos; una de ellas, en Wisconsin (al norte) y la otra, en Lousiana (al sur, junto al Golfo de Méjico). Ambas zonas tienen unas condiciones edafoclimáticas muy diferentes (mucho más favorables las de Lousiana), y por este motivo, mientras que en la plantación de Lousiana se puede obtener una producción neta equivalente a unas 10 TEP, en la de Wisconsin, sin embargo, apenas se llegan a las 3,5 TEP. De todas formas, comparando con los datos expuestos en la tabla IV, se puede observar que las plantaciones forestales producen unos balances energéticos muy superiores a los de los cultivos agrícolas.

En la tabla VII se muestra el resultado de un estudio realizado por el Stanford Research Institute (7), sobre una plantación de energía hipotética, realizado en una superficie de 4.000 hectáreas, con una producción total de 272.000 toneladas de biomasa seca anual. Este estudio, en el que se

Tabla VI

Balances energéticos de dos plantaciones forestales situadas en dos zonas de diferente productividad de los Estados Unidos (Lousiana y Wisconsin). Los valores están referidos a una hectárea de plantación (11). 1 Gcal. = 10^9 calorías = 0,1 TEP

	Localización de la plantación	
	Lousiana	Wisconsin
<i>Consumo energético (C) expresado en Gcal.</i>		
— Operaciones de cultivo, transporte y supervisión	0,991	0,457
— Riego	3,012	1,997
— Manufacturas de abonos:		
Urea	2,740	0,882
P_2O_5	0,220	0,071
K_2O	0,457	0,137
CONSUMO TOTAL	7,420	3,544
<i>Producción de biomasa</i>		
— Peso de la materia seca, expresado en toneladas	28,484	9,443
— Contenido calórico (P), expresado en Gcal.	113,938	37,772
<i>Producción energética neta (P-C), expresada en Gcal.</i>	106,518	34,228
<i>Eficiencia energética (P/C)</i>	15,36	10,66

consideran optimizadas las condiciones de cultivo, se basó en un policultivo de plantas anuales y perennes a las que se daban varios cortes durante la época de crecimiento. En el estudio se consideran dos supuestos, según que sea preciso o no el aporte de agua de riego. El balance energético neto, en el caso de que no haya que aportar el agua de riego, es equivalente a unas 25 TEP, mientras que en el caso más desfavorable es equivalente a 20,5 TEP. En este último caso, la relación entre calorías producidas y calorías gastadas es de 4 a 1, mientras que en el primer supuesto es de 14 a 1, aproximadamente.

8. Procesos de transformación de la biomasa en combustible

La biomasa seca se puede utilizar directamente como fuente energética mediante la combustión. Sin embargo, en la mayoría de los casos parece más interesante transformar la biomasa en combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, cer-

Tabla VII

Balance energético de una plantación de 4.000 hectáreas (supuesto teórico), con una producción anual de 272.000 toneladas de biomasa seca. La plantación considerada es un policultivo optimizado para producir biomasa según el Stanford Research Institute. Valores referidos a una hectárea (7)

	Peso (Kg.)	Equivalente energético (Gcal.)
<i>Consumo (C)</i>		
— Abonos	1.314	14,00
— Productos fitosanitarios	6,25	0,17
— Agua de riego	$1,5 \times 10^7$	(46,0) *
— Combustible	228,5	2,53
— Amortización de maquinaria (desgaste de material férreo)	16,32	0,35
— Electricidad	—	3,26
— Producción de semillas	—	0,06
a) Consumo total con riego	—	66,37
b) Consumo total sin riego	—	20,37
<i>Producción bruta (P)</i>	68.000 (ms)	272,00
<i>Producción neta (P-C)</i>		
a) Con riego	—	205,63
b) Sin riego	—	251,63
<i>Eficiencia (P/C)</i>		
a) Con riego	—	4,1
b) Sin riego	—	13,3

* En el supuesto «sin riego», el agua existe en la propia plantación (lluvias, pozos, etc.); en el supuesto «con riego», el agua hay que tomarla de una zona situada a más de 100 kilómetros.

ca de los centros de producción (o de acumulación en caso de biomasa residual), para evitar gastos de transporte.

Casi todos los procesos de transformación de la biomasa en combustible pretenden un aumento de la densidad calórica, así como una adecuación del producto a las condiciones de la combustión requerida por el proceso en que se vaya a utilizar el combustible.

Los procedimientos para transformar la biomasa en combustible son agrupados en dos categorías: térmicos y biológicos. A los primeros pertenecen la combustión directa, la pirólisis y la gasificación, mientras que a los segundos

pertenecen la digestión anaerobia y la fermentación alcohólica. A continuación se describe brevemente cada uno de ellos, pero una información más completa puede encontrarse en las referencias 6, 7, 9, 12 y 13.

8.1. Combustión directa

Es el procedimiento más antiguo y ha sido el más utilizado por el hombre hasta principios del presente siglo. En la actualidad se utiliza para el aprovechamiento de residuos urbanos y de industrias forestales para la producción de vapor y electricidad en algunas centrales térmicas. El rendimiento de la conversión térmica en electricidad oscila del 30 al 35 por 100.

8.2. Pirólisis

Es el procedimiento que se ha empleado tradicionalmente para la obtención de carbón vegetal, consistente en una combustión lenta y parcial de la biomasa con un cierto contenido en humedad a una temperatura variable entre 250 y 600 °C. En la obtención de carbón vegetal solamente se recupera de un 25 a un 40 por 100 del poder calorífico inicial, ya que los gases resultantes (con un contenido calórico de unas 3.000 a 4.000 Kcal/m³) no se utilizan. El contenido calórico del carbón vegetal (cisco) es de unos 6.000 a 8.000 Kcal/Kg., según su contenido en cenizas. Existen algunos dispositivos comercializados que utilizan este procedimiento para el tratamiento de basuras, con un contenido en humedad del 30 al 70 por 100. Como residuo de la pirólisis quedan también un conjunto de aceites pesados y de productos de naturaleza diversa que se aglutinan con la denominación de breas.

8.3. Gasificación

Al someter el cisco y la brea a altas temperaturas (entre 800 y 1.100 °C) se transforman en productos gaseosos, con un poder calorífico bajo (de 1.000 a 1.200 Kcal/m³), consistentes, principalmente, en N₂, CO, H₂, CH₄ y CO₂ en proporciones variables. Estos sistemas constituyen los llamados gasógenos, que se utilizan en combinación con motores

para producir energía mecánica o eléctrica. El gas de gasógeno se puede emplear en motores de encendido por chispa con un coeficiente de compresión adecuado o en un motor diésel de doble combustible (10 por 100 de gasóleo y 90 por 100 de gas gasógeno en el aporte energético global). El consumo normal en instalaciones productoras de electricidad es de 0,8 kilogramos de madera seca y 25 gramos de petróleo para calderas por kilovatio-hora producido (14).

La conversión de biomasa seca en gas frío y limpio tiene un rendimiento del 65 al 75 por 100 y la transformación en electricidad a través de un alternador movido por un motor Diesel de dos combustibles tiene un rendimiento aproximado del 35 por 100, lo que supone un rendimiento global de casi un 25 por 100 en la transformación de la biomasa en energía eléctrica por este procedimiento.

8.4. Digestión anaerobia para producir metano

Por digestión en condiciones anaerobias de la biomasa se puede obtener el llamado biogás, a razón de unos 300 litros por kilogramo de materia seca, con un valor calórico de unas 5.500 Kcal/m³. La composición del biogás es variable, pero está formado principalmente por metano (55-65 por 100) y CO₂ (35-45 por 100), y en menos proporción por nitrógeno (0-3 por 100), hidrógeno (0-1 por 100), oxígeno (0-1 por 100) y sulfuro de hidrógeno (trazas). El poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano (9.500 Kcal/m³), pudiéndose aumentar ésta, eliminando todo o parte del CO₂ contenido.

La digestión anaerobia está indicada para el tratamiento de biomasa con alto contenido en humedad, ya que no necesita de la desecación. Tiene una aplicación muy clara en el tratamiento de aguas residuales urbanas y de explotaciones ganaderas.

8.5. Fermentación alcohólica

Las levaduras, en ausencia de oxígeno, transforman la glucosa en etanol, según la ecuación:



Según esta ecuación, de 100 gramos de glucosa se obtienen 51,1 gramos de etanol y 48,9 gramos de CO₂. En la práctica, el rendimiento es de 47,2 gramos de etanol, equivalentes a 59,1 milímetros de etanol de 100° ó 62,44 milímetros de etanol de 95°.

La transformación de la biomasa en etanol requiere una sacrificación previa cuando la naturaleza de la biomasa no contiene glucosa o sacarosa. Las materias amiláceas y celulósicas pueden ser sacrificadas por procedimientos químicos clásicos (hidrólisis ácida) o enzimáticos. La biomasa celulósica es la que presenta más dificultades, pero también se puede utilizar con fines industriales. A partir de paja, por hidrólisis, se está obteniendo glucosa con un rendimiento del 24 por 100 en peso, proceso éste susceptible de mejora (15 y 16).

En la tabla VI se indica un resumen de la eficiencia energética media de las diversas transformaciones—relación entre el contenido energético final y el contenido energético de biomasa inicial, referidos a paja de cereal con un contenido en humedad del 15 por 100, según Stout (9).

8.6. Destilación directa de combustibles

En la Naturaleza existen algunas especies que producen en su metabolismo compuestos muy hidrogenados (hidrocarburo, esteroides, aceites, etc.), de un elevado poder calorífico y que pueden ser extraídos por diversos procesos, principalmente por destilación fraccionada. Un caso especial de este tipo de aprovechamiento de la biomasa para la obtención directa de combustibles lo está estudiando el profesor Melvin Calvin en la Universidad de California (Berkeley), utilizando diversas especies del género *Euphorbia*, que producen un látex rico con compuestos hidrogenados.

9. Conclusión

Como resumen de este trabajo podemos concluir que la *agroenergética da una nueva dimensión al cultivo de la tierra*, y que los procesos de transformación de la biomasa en combustible abren un abanico de posibilidades para el de-

desarrollo de nuevas industrias agrarias, principalmente para la producción de etanol, metano y metanol.

Para que toda esta actividad se desarrolle con la celeridad que precisa la gravedad de la situación energética, es necesario un cambio rápido de la mentalidad agrícola tradicional de muchos técnicos, tanto del sector privado como del público, y que las autoridades responsables potencien a todos los niveles los estudios e investigaciones sobre la producción y aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos.

Se hace preciso introducir en la nueva *agronomía energética*, aparte de los nuevos cultivos de plantas leñosas y herbáceas no tradicionales, una *acuicultura vegetal* para el desarrollo de los cultivos acuáticos de algas y plantas superiores, ya que, desde el punto de vista energético, ofrecen muy buenas perspectivas.

Finalmente, diremos que es necesario potenciar al máximo los *estudios sobre la fotosíntesis*, ya que este proceso es la base de toda producción vegetal y, como consecuencia, de la vida en la Tierra. Del conocimiento profundo del proceso fotosintético se puede deducir la forma de actuar sobre él con vistas a lograr un incremento en la captación de la energía solar, y de esta manera lograr un aumento en la producción de biomasa vegetal. Esta afirmación es evidente si consideramos la distancia que existe entre el rendimiento fotosintético de los cultivos actuales y el que podría obtenerse optimizando, hasta su límite natural, el proceso fotosintético.

BIBLIOGRAFIA

1. COOK, E.: «The flow of energy in an industrial society», en *Scientific American*, septiembre 1971.
2. FERNÁNDEZ, J.: «Utilización de la energía solar por medio de la fotosíntesis», en *Energía Nuclear*, núm 18, 1974, págs. 391-402.
3. O. C. D. E.: «Le secteur agroalimentaire face au problème de l'énergie», en *Informe de la Dirección de Alimentación, Agricultura y Pesca*, DAA/1662, 1982, pág. 11.

4. ARANDA, E.: «Demanda energética de la Agricultura». Curso de agroenergética de la E. T. S. I. A., Madrid, 1980.
5. MERCIER, J. R.: *Energie et Agriculture*, Edit. Debard, París, 1978.
6. PALZ, W., y CHARTIER, P.: *Energy from biomass in Europe*, Applied Sci. (Publis.), London, 1980.
7. SLESSER, M., y LEWIS, Ch.: *Biological Energy Resources*, Edit. E. and F. N. Spon. Ltd., London, 1979.
8. HUTTER, W.: «Reflexions sur le bilan energetique des cultures», Colloque International, CENECA, París, 1980.
9. STOUT, B. A.: «Energía para la agricultura mundial», en *Agricultura*, núm. 7, Colección F. A. O., Roma, 1980.
10. E. T. S. I. A.: «Aplicación de las fuentes alternativas de energía a la agricultura» (vol. 4). Informe realizado para el Ministerio de Agricultura, 1980.
11. INMAN, R. E.: *Silvicultural biomass farms* (vol. 1), The Mitre Corporation/Metrec Division, USA, 1977.
12. RUSSELL, E. A.: *Biological Paths to selfreliance*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1979.
13. CHEREMISINOFF, N. P.; CHEREMISINOFF, P. N., y ELLERBUSCH, F.: *Biomass, Applications, Technology and Production*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1980.
14. NIERAT, J. M.: *De l'électricité produite à partir du bois. Courrier de l'exploitant et du scieur*, Centre Technique du bois, París, 1975.
15. BERTIN et al.: *Production d'alcool d'origine vegetale*, citado por Stout (9), 1975.
16. LAPERROUSAZ, P.: «Alcool de paille: Une idée en fermentation», en *Cahier des ingenieurs agronomes*, núm. 304, 1975.

RÉSUMÉ

L'homme, dès son apparition, depend entièrement de la biomasse végétale ou animal produite dans la nature, en depit du fait que le rendement énergétique de la production végétale, basée sur la photosynthèse, est bas. Avec les deux activités classiques de l'agriculture: agro-alimentation et agro-industrie, on developpe une troisième, l'agro-énergie, c'est-à-dire, l'agriculture comme source d'énergie. Celle-ci peut provenir de la biomasse résiduelle ou des plantations d'énergie qu'à son tour peuvent consister en cultures herbacées, conventionnelles ou pas, cultures ligneuses ou cultures aquatiques. Les plantations d'énergie seront viables si elles présentent un bilan énergétique positive, c'est-à-dire, si elles produisent plus d'énergie que celle qu'elles consomment dans sa culture et récollection.

L'auteur conclut en insistant sur l'importance de la potentiation des études sur la photosynthèse.

SUMMARY

Man from his apparition on earth has depended entirely on the vegetal or animal biomass produced in nature, in spite of the fact that the energy yield of crop production, based on photosynthesis, is low. Together with the two classical activities of agriculture —food and fiber— a third one is developing —agro-energetics—, that is, agriculture as a source of energy. It can come from the residual biomass or from energy crops that in its turn can be based on herbaceous crops, conventional or not, on wood crops or on aquatic crops. Energy crops will be viable if they show a positive energy balance, that is, if they produce more energy than what they consume for its cultivation and harvesting.

The author concludes by insisting on the importance of furthering the studies about photosynthesis.

