

Cuadernos CDTI

Centro para el Desarrollo  
Tecnológico Industrial.  
Ministerio  
de Industria y Energía.

**Aprovechamiento  
energético de la  
biomasa**



Cuadernos CDTI

Febrero, 1983

Centro para el Desarrollo  
Tecnológico Industrial.  
Ministerio  
de Industria y Energía.

**Aprovechamiento  
energético de la  
biomasa**



Depósito legal: M. 5904-1983  
ISBN: 84-500-8465-2  
Diseño Gráfico: TRAMA 3  
Fotomecánica y Fotocomposición:  
CASTELLANA, S. A.  
Solana de Luche, 11  
MADRID-11  
Imprime: PRAL, S. A.  
Belmonte de Tajo, 12  
MADRID-19

**CDTI Febrero 1983**

Desde hace cerca de tres mil millones de años, las plantas captan la radiación solar para desencadenar, vía fotosíntesis, las reacciones bioquímicas que transforman el anhídrido carbónico y el agua en moléculas complejas —azúcares, proteínas, celulosas y ligninas— almacenando, así, la radiación solar en forma de energía química, presta a ser liberada.

La materia orgánica, procedente de las plantas y de los animales que encuentran en ellas su alimento, susceptible de ser convertida en energía útil, es lo que conocemos por biomasa. La biomasa suministra hoy en día, a nivel mundial, casi el 10% de las necesidades energéticas, y aun cuando limitándonos a los países occidentales industrializados ese porcentaje desciende hasta 1,6, hay países como Suecia en donde representa el 8%, con tendencia hacia el crecimiento, o Finlandia donde la biomasa aporta el 15% de la energía primaria.

El proceso fotosintético tiene muy bajo rendimiento: apenas aprovecha el 0,1% de la radiación solar. A pesar de ello, las plantas fijan anualmente unos 200.000 millones de toneladas de carbono, con un contenido energético de  $3 \times 10^{21}$  julios que queda atrapado en la biomasa producida. Esta cifra supera en 10 veces el consumo energético mundial.

Estas cifras, aunque impresionantes, no deben inducir un falso optimismo:

- Cerca del 40% es biomasa acuática, que se produce fundamentalmente en los océanos y es de muy difícil recuperación.
- De la biomasa terrestre, una gran parte está muy dispersa, haciendo imposible su aprovechamiento rentable.
- Para aprovechar la parte utilizable es preciso aportar una cierta cantidad de energía para su recolección, transporte y transformación

en combustible útil, lo cual reduce la energía neta resultante.

Sin embargo, mediante el desarrollo de una adecuada tecnología, parece evidente que podría utilizarse la energía de la biomasa para cubrir un porcentaje considerable de la demanda energética. Existe, también, la posibilidad de incrementar esa biomasa con cultivos energéticos, planificándolos para su máximo aprovechamiento en producción de energía. Esas tecnologías ya existían. Algunas se están sofisticando para hacerse viables en esta época de automatismos. Otras emergen para producir vectores más nobles.

Desde que el hombre aprendió a manejar el fuego, la leña se ha venido utilizando como recurso energético fundamental, hasta mediados del siglo XIX. Nuevos procesos, más sofisticados, hacen su aparición permitiendo no sólo obtener calor, mediante su combustión, sino producir combustibles líquidos y gaseosos con potencial sustitutivo del petróleo, incluso en aplicaciones que, como el transporte por carreteras, parecían impermeables a la penetración de otros recursos.

Una utilización masiva de la biomasa conduciría a un medio ambiente más limpio, ayudando a reciclar los nutrientes y el bióxido de carbono de la atmósfera. La utilización de la biomasa no resolverá por sí sola, en modo alguno, el problema energético del mundo actual. Pero acertadamente gestionada, para evitar problemas como la deforestación, podrá contribuir de forma apreciable al balance energético mundial. Para ello, hay que profundizar en las tecnologías basadas en la microbiología; hay que conocer mejor los balances de masa y energía y comprobar que pueden resolverse los problemas de funcionamiento a escala industrial en aquellos sistemas que parecen ya resueltos a nivel de laboratorio.

Bajo la figura "Programa Especial de Investigación y Desarrollo", creada

por resolución de 28 de mayo de 1981 de la Secretaría de Estado de Universidades, existe un "Programa Especial para el Aprovechamiento Energético de la Biomasa y la Agroenergética" en el que las tecnologías de conversión disponen de un presupuesto de 1.456 millones de pesetas a invertir en cuatro años. Este Cuaderno detalla las líneas principales de acción de esas tecnologías.

Confío en que, como resultado de ese Programa Especial, llegaremos a dominar tanto las tecnologías clasificadas en la vía húmeda —actuación de microorganismos sobre la biomasa para modificar su estructura—, como las de la vía seca, entre las que destaca la combustión, ampliada ya hoy a la gasificación y la pirólisis.

Una gran parte de esta biomasa se está hoy comercializando por canales no convencionales, distorsionando las estadísticas energéticas. Nos sorprendería conocer en qué porcentaje estos residuos orgánicos están siendo utilizados como combustibles. Las tecnologías de las que aquí se habla, permitirán ennoblecer, en cierto modo, el uso de la biomasa y, sin duda, contribuirán a aumentar su aportación a la economía del país, disminuyendo la factura energética a pagar al exterior.

La Ley 82/1980, sobre la Conservación de la Energía, incentiva la utilización de recursos renovables como la biomasa. Estoy convencido de que el futuro desarrollo de esta Ley abrirá aún más cauces para aprovechar esos combustibles que las nuevas tecnologías extraerán de esa fuente inagotable que es el sol, aprovechando directamente su radiación o utilizando ese almacén colosal que son las plantas.

CARMEN MESTRE VERGARA  
Directora General de la Energía  
Ministerio de Industria y Energía

# INDICE

## Objetivos de este Cuaderno 7

## Recomendaciones para la difusión de la biomasa como fuente de energía 8

### DOCUMENTO BASE

## Producción de biomasa 13

Definición de biomasa ..... 13

Biomasa agrícola ..... 15

Biomasa forestal ..... 18

Biomasa procedente de residuos ganaderos ..... 19

Biomasa acuática ..... 21

Balances energéticos en la producción de biomasa ..... 26

## Procesos de transformación de la biomasa 29

Procesos de transformación de la biomasa por vía seca ..... 29

    Combustión ..... 29

    Gasificación ..... 31

    Pirólisis ..... 35

    Licuefacción ..... 39

Procesos de bioconversión ... 40

    Producción de bioalcohol .. 40

    Fermentación anaerobia ... 47

    Bioquímica y microbiología del proceso ..... 47

    Producción de biogás y fertilizantes ..... 53

    Condiciones del proceso ... 55

    Procedimientos de digestión anaerobia ..... 56

## Impacto de la utilización de biomasa con fines energéticos 60

Impacto sobre el medio ambiente ..... 60

Impactos socioeconómicos ... 61

## Panorámica nacional e internacional ..... 62

Panorámica internacional .... 62

Panorámica nacional ..... 63

    Aprovechamiento energético de residuos agrarios ... 63

    Aprovechamiento agrícola de residuos urbanos e industriales ..... 65

    Cultivos energéticos ..... 65

## ANEXOS

Definiciones ..... 71

Unidades energéticas ..... 73

Programa Especial de I + D "Aprovechamiento energético de la biomasa y de la agroenergética" (Resumen) ..... 75

Bibliografía ..... 77

## OBJETIVOS DE ESTE CUADERNO

La biomasa en su forma actual o fósil ha sido cuantitativamente la más importante fuente de energía que el hombre ha utilizado hasta ahora.

En el momento presente, y frente a los precios en constante alza del petróleo, científicos y técnicos especialistas en ramas muy diversas del saber, se afanan por encontrar nuevos productos energéticos. La biomasa, sin duda alguna, seguirá ocupando un papel sustancial en ese aporte de material energético que nuestra cultura precisa para su expansión. Pero ciertamente el hombre deberá desligarse de la dependencia de combustibles fósiles, que irremediablemente serán agotados, y, por otra parte, no puede, como sus antepasados, talar sus bosques de forma indiscriminada para obtener materiales energéticos, ya que esta actitud conduciría inexorablemente a la desertización de nuevas zonas de la Tierra y a la consecuente pérdida de recursos genéticos en cada uno de los reinos de los seres vivos. Ambos factores, avance de los desiertos sobre las zonas fértiles y erosión genética, comprometen el futuro de la vida en la Tierra.

Aunque la desertización de determinadas áreas del globo han sido debidas a causas ajenas a la acción humana, también es verdad que el hombre ha contribuido a la misma, destruyendo bosques para favorecer la caza, crear áreas de pasto e instaurar la agricultura. Hoy, desgraciadamente, la subida de los precios de los crudos petrolíferos, en países no desarrollados, ha desencadenado una demanda creciente de madera para ser utilizada como principal combustible de la economía doméstica, cocina y calefacción, de tal manera que, según los analistas del tema, la destrucción forestal en el mundo avanza al preocupante ritmo de siete hectáreas por segundo. Sólo un manejo cuidadoso de nuestros recursos en biomasa y una aquilatada asesoría pluridisciplinar, científica y técnica pueden conducir a una ex-

plotación racional de la riqueza que los productores primarios captan diariamente del sol.

En este documento se pretende pasar revista a algunas cuestiones fundamentales en relación con la extracción de biomasa del ecosistema, como, por ejemplo, ¿qué especies podrán ser explotadas como fuentes de materiales energéticos?, ¿serán especies domesticadas o silvestres?, ¿agrícolas o forestales?, ¿qué posibilidades tienen las plantas acuáticas y los microorganismos? La importancia de los residuos, materiales en gran parte utilizados y ahora con nuevas posibilidades de uso, procedan de la agricultura, la silvicultura o la ganadería, también queda destacada en este trabajo. La utilización de residuos como fuente de energía cumple además el importante papel de evitar la contaminación, aspecto éste de vital importancia sobre todo en el caso de la ganadería intensiva, donde se concentran grandes volúmenes de residuos que vertidos en los ríos eutrofizan y contaminan los cursos de agua, destruyendo su flora y fauna naturales.

No menos importante es el tema de la transformación de la biomasa, ya que ésta en su forma bruta es de difícil utilización y a veces costoso almacenaje y transporte. Se buscan productos energéticos elaborados, compactos y, por lo tanto, fáciles de transportar y susceptibles de ser utilizados en los instrumentos y máquinas habituales en la industria, la automoción y el hogar. Fundamentalmente se tiende, siempre que es posible, a la obtención de combustibles líquidos o gaseosos, aunque tampoco se desdeñan otras formas menos refinadas como los pellets y las briquetas. A este tema de la transformación de la biomasa con sus múltiples posibilidades se le da igualmente amplia cabida en el presente documento, abordándose los sistemas de transformación termoquímicos y los procesos de bioconversión. También se analiza el im-

pacto que sobre el medio ambiente pueden producir estas nuevas y diversas tecnologías productoras y transformadoras de la biomasa.

Finalmente, se incluye una panorámica de la situación nacional e internacional en lo que se refiere a investigación y desarrollo en este campo.

Es de desear que el presente documento sea de utilidad para todos aquellos que quieran asomarse a las posibilidades que estas áreas de la ciencia y de la tecnología, antiguas y nuevas a la vez, ofrecen al hombre de hoy.

## RECOMENDACIONES PARA LA DIFUSION DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGIA

De acuerdo con los datos publicados por la Comunidad Económica Europea en 1979, el consumo de combustibles no comerciales a nivel mundial alcanzaba entonces un valor medio aproximado al 6%, encontrándose, como es lógico, notables diferencias entre países desarrollados y países en vías de desarrollo: mientras el consumo de aquellos combustibles en Europa Occidental era sólo del 0,7%, en Africa alcanzaba el 60%. En Europa se pretende que estos bajos porcentajes de energía procedentes en su inmensa mayoría de la biomasa, pasen en los próximos dos decenios a constituir entre un 5 y un 10% del consumo total. Sin embargo, hasta el momento actual los países desarrollados han paliado el problema de la elevación de los precios del petróleo adoptando fundamentalmente medidas de conservación y ahorro de energía y sustituyendo parcialmente los productos petrolíferos por otros combustibles convencionales como, por ejemplo, el carbón. En los países no desarrollados la utilización de biomasa es mayor pero, en gran medida, supone un mal uso de la riqueza forestal, con los graves peligros que esta política entraña. Todo lo anterior demuestra que el uso racional de la biomasa como fuente de energía es una tarea aún por hacer, una labor en sus inicios.

En términos generales y aun reconociendo los progresos realizados a nivel mundial en el campo del aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos, el impulso recibido hasta ahora por parte de los poderes públicos de los países desarrollados ha sido relativamente escaso. De acuerdo con la autorizada opinión en este terreno de D. O. Hall, los programas que impulsen la agroenergía sólo serán eficaces "si cuentan con el pleno apoyo de los poderes decisorios y de la propia sociedad, convencida de la importancia práctica de los sistemas utilizados".

En España, aunque la toma de conciencia del problema energético ha

sido tardía, se puede afirmar que una preocupación eficaz y diversas acciones en el campo del desarrollo científico y técnico a través de distintos Ministerios han permitido que nuestra tecnología esté en muchos de los temas agroenergéticos y en particular en el de la recuperación de residuos, al mismo nivel que la de los restantes países europeos, permitiendo en algunos casos la transferencia de tecnología. En el campo de la investigación, distintos equipos, algunos de reconocido prestigio internacional, trabajan en diferentes aspectos básicos y/o aplicados que persiguen la obtención de la energía a través de sistemas biológicos.

Posiblemente la acción inmediata que precisa un mayor impulso por parte de la Administración es el proceso de transferencia de información desde la Universidad y los Organismos oficiales de Investigación hacia la Empresa y, como es natural, también el proceso en sentido inverso.

Con fecha 30 de octubre de 1981 fue aprobado por acuerdo del Consejo de Ministros un Programa Especial de Investigación y Desarrollo (I + D), sobre "Aprovechamiento energético de la biomasa y de la agroenergética", con una dotación de más de dos mil millones de pesetas y que se orienta a fomentar la aplicación práctica de conocimientos básicos a la extracción de energía de la biomasa, entendida ésta en su más amplio sentido como cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen en un proceso biológico, quedando así incluidas las áreas agrícola, forestal y ganadera, y el aprovechamiento de los residuos orgánicos procedentes de las áreas urbanas. En el Anexo III se ofrece un resumen del Programa Especial.

En el caso específico de los productores primarios destinados a la obtención de energía y a fin de conseguir su mayor rendimiento o productividad, será necesaria la realización de una prospección exhaustiva de

especies susceptibles de producción de material energético y hasta ahora no utilizadas por el hombre. Esta acción deberá ir acompañada por la contrastación de determinadas especies ya cultivadas por su valor alimenticio y utilizadas en determinadas regiones o circunstancias como fuente de energía. En este grupo es muy importante añadir aquellas especies que, habiéndose utilizado en tiempos pretéritos, hoy se ha dejado de cultivarlas, quizá por falta de calidad de sus productos desde el punto de vista alimentario, pero que pueden encerrar un importante potencial como fuente de energía y, en muchos casos, una buena adaptación a situaciones definidas por cualquier tipo de marginalidad.

Las especies que paulatinamente se seleccionen en esta etapa en base a la estimación de su rendimiento en materia seca y calidad o composición, deberán ser sometidas a un primer estudio de fisiología del cultivo, en el que con más precisión se delimiten sus posibilidades en relación con las variables que ofrezca el medio ambiente en el que se pretenda instaurar su cultivo. Corresponde también a este estudio fisiológico el definir unos parámetros sencillos de detectar e indicativos de su calidad que sirvan para fases futuras.

Finalmente, las especies que hayan superado esta segunda etapa deberán ser confiadas simultáneamente a dos equipos diferentes de trabajo, uno formado por genetistas y otro por especialistas en fitotecnia o silvicultura. Los primeros abordarán la tarea de la mejora genética del material que se les entregue, mientras que los segundos deben poner en práctica las técnicas que faciliten la explotación agrícola o forestal a gran escala.

En lo que se refiere a las no menos importantes labores de transformación de la biomasa en combustibles, existen dos grandes posibilidades: los procesos transformadores por



vía termoquímica y aquellos en los que el proceso se realiza por medio de microorganismos o enzimas aisladas de los mismos. En muchos casos, seres microscópicos pertenecientes a grupos taxonómicos diferentes, como cianofíceas, bacterias, hongos o algas, no son solamente transformadores de biomasa producida por otros seres vivos, sino que ellos son también los productores primarios o su propia biomasa constituye al menos una parte del producto energético final. Disciplinas básicas como la bioquímica, la genética y la ingeniería genética deberán contribuir a todos estos procesos de generación y transformación de biomasa a escala industrial y sólo un estrecho contacto entre los centros de investigación y las empresas, podrán producir resultados satisfactorios.

Entre los argumentos frecuentemente utilizados como obstáculo para la aplicación práctica de la tecnología del aprovechamiento de la biomasa como fuente energética, el más importante es el de su falta de rentabilidad. En este sentido, se puede afirmar que diversos procesos de aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía son, dentro del marco económico actual, plenamente rentables desde el punto de vista económico y lo serán aún más, en la medida en que se depure y elabore la tecnología de la que se dispone. Para apoyar las razones de la competitividad de los combustibles originados en la biomasa, puede decirse que en EE. UU., en 1981, el metanol de origen biomásico tenía un coste que oscilaba entre 8,4 y 15,9 dólares por millón de unidades BTU, mientras que el coste del mismo producto obtenido de forma convencional era de 8,4 dólares por millón de BTU. En el etanol los costes se estiman en el primer caso entre 15,0 y 36,3 dólares frente a 19,6 dólares por millón de BTU para un producto extraído en la forma tradicional. Con otros productos energéticos se obtienen relaciones semejantes. Además hay que tener en cuenta que cuando los mate-

riales energéticos se obtienen a partir de los residuos, en la estimación del coste del producto final se debe tener en cuenta que en muchas ocasiones se evita, de esta forma, una contaminación del medio natural no bien evaluada, pero que ciertamente supone a la larga una elevadísima factura.

La biomasa como fuente de energía, evidentemente, no puede satisfacer el cien por cien de la actual demanda energética, pero sí ciertamente cubrir un área importante liberando en parte a España de costosas dependencias.

Con el acercamiento del mundo de la investigación y de la empresa, con el ejercicio mutuo de la imaginación y la ósmosis de los conocimientos y contando con la actividad tutelar del Estado en determinados temas y circunstancias, España puede obtener un puesto destacado y competitivo en el campo de la utilización de la biomasa y en el desarrollo de tecnología propia.

En junio de 1984 tendrá lugar en Gotenburg (Suecia), la Segunda Conferencia y Exhibición Mundial sobre bioenergía. La Primera Conferencia, celebrada en Atlanta (EE. UU.), en 1980, constituyó, en gran medida, una declaración de intenciones. Ha llegado el momento de hacer el inventario de los recursos y posibilidades con que España puede contar para emprender una acción decidida en este área. Aún se está a tiempo de aceptar el reto que supone participar en una confrontación pacífica como ésta.



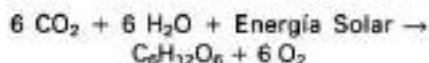
## PRODUCCION DE BIOMASA

### DEFINICION DE BIOMASA

Se puede definir como biomasa cualquier material de origen vivo, poco o nada transformado, animal, vegetal o constituido por microorganismos. Desde un punto de vista ecológico y nutricional, hay que distinguir la biomasa formada por los productos primarios, es decir, la integrada por los seres fotosintéticos, la que corresponde a los consumidores de primer orden o herbívoros y la de los consumidores de segundo orden o carnívoros. Productores primarios, consumidores de primer orden y de órdenes sucesivos se interrelacionan entre sí formando las cadenas o redes tróficas. Desde el punto de vista de este trabajo, considerando la biomasa como fuente de energía, importa, sobre todo, la constituida por los productores primarios que son fundamentalmente los vegetales verdes.

Se denomina fotosíntesis el proceso mediante el cual algunos seres vivos son capaces de captar energía luminosa proveniente del sol y, utilizando una fuente de hidrógeno, fundamentalmente el agua, y el anhídrido carbónico del aire, producir azúcares y otras sustancias orgánicas reducidas necesarias para el desarrollo de las estructuras y funciones vitales.

De forma resumida, el proceso fotosintético puede concretarse en la siguiente reacción química:



Las clorofilas, ayudadas por los carotenos y xantofilas y a veces por otros pigmentos pardos, azules y rojos, son las "antenas" responsables de la captación de la energía luminosa. Estas moléculas de color se encuentran en el interior de las células vegetales fotosintéticas, contenidas en unos orgánulos que reciben el nombre de cloroplastos.

Desde hace aproximadamente quinientos mil años, cuando el *Pithecanthropus erectus*, un homínido

con características auténticamente humanas, utilizaba el fuego en los fríos inviernos paleolíticos, hasta nuestros días en los que el *Homo sapiens* puede controlar, al menos una parte de la energía nuclear, la principal fuente de la energía del hombre ha sido la biomasa.

En Europa, a finales del siglo XVI, el agotamiento de la madera, que había constituido hasta entonces el principal elemento combustible, condujo a la explotación progresiva del carbón, una forma de biomasa fósil cuyo origen se remonta al período Carbonífero, en el Paleozoico, hace aproximadamente doscientos ochenta millones de años. Esta nueva fuente de energía fue la responsable de la Revolución Industrial en Occidente, que ha tenido tanta transcendencia, no sólo en el campo de la tecnología, sino además en el de las relaciones socioeconómicas. Después del carbón se empezó a utilizar el petróleo, formado también por residuos orgánicos fosilizados, pero el petróleo, como el resto de los combustibles fósiles que atesora el subsuelo de la tierra, es un recurso de naturaleza finita y algún día se agotará o al menos sus reservas se harán tan escasas que su explotación será antieconómica. La búsqueda de una fuente alternativa de energía se ha visto precipitada en el mundo Occidental, por la elevación de los precios de los crudos petrolíferos, por parte de los países exportadores, a partir del año 1973.

A corto plazo, la energía nuclear está destinada irremediablemente a proporcionar a nuestra civilización una parte importante del poder energético que consumirá en los próximos años. Sin embargo, a nadie se le ocultan los riesgos que la energía nuclear lleva consigo, no sólo para el hombre directamente, sino para toda la biosfera. Cuando el equilibrio ecológico del planeta Tierra es un tema de profunda y real preocupación, el hallazgo de una fuente de energía limpia y renovable tiene una gran importancia. Las dos condiciones an-

teriores las reúne la energía solar, interesando su captación en forma de materia orgánica, es decir, en forma de biomasa.

Todos los años, las plantas verdes fijan a través de la fotosíntesis alrededor de  $2 \times 10^{11}$  toneladas de carbono, lo que equivale a un contenido energético de  $7,2 \times 10^{17}$  Kcal. Es importante resaltar que esta cantidad representa aproximadamente diez veces la energía total que se utiliza al año en el mundo y equivale a doscientas veces el consumo energético alimentario mundial.

La eficiencia de transformación de la energía solar en biomasa, para el conjunto de la superficie emergida de la tierra, es de alrededor de 0,2 - 0,3%, pero la eficiencia de los cultivos agrícolas varía entre el 0,5 y el 2% anual para las cosechas más eficaces. Estos rendimientos se estima que podrán elevarse hasta un 4,5% aproximadamente mediante el uso de prácticas agronómicas adecuadas y de mejora genética. Los rendimientos anteriores pueden parecer bajos, sobre todo, si se compara con el correspondiente aparato fotoquímico aislado que es más alto del 30% en condiciones óptimas. Sin embargo, aun así, las plantas son unas magníficas convertidoras de la energía solar, ofreciendo al final del proceso energía fácilmente almacenable y también de fácil uso y transformación.

Reciben el nombre de cultivos energéticos los destinados a la producción de biomasa vegetal para la generación de energía. Se pueden considerar a este fin:

- Cultivos agrícolas tradicionales de alto rendimiento en contenido energético.
- Especies arbóreas de crecimiento rápido.
- Especies acuáticas marinas o de agua dulce.
- Especies espontáneas, hasta ahora no cultivadas, por no haberse propuesto nunca en agricultura la

selección de la característica "alta producción de biomasa", independientemente de su calidad.

Las limitaciones en agua y fertilizante son los dos principales factores limitantes, no intrínsecos a las plantas, para el desarrollo de los cultivos energéticos. La escasez de agua y su repercusión en la productividad vegetal, así como la óptima utilización de los recursos hídricos, tanto en el suelo, como en el cuerpo de los vegetales, constituyen problemas de gran urgencia que hoy debe abordar la Investigación Agraria.

Según estimaciones relativamente recientes del potencial agrícola mundial (1970), se cultivan en la tierra aproximadamente 950 millones de hectáreas en las que se cosechan al año 1.050 millones de toneladas métricas de cereal y 445 millones de toneladas métricas de materia seca procedente de otras cosechas distintas de las de cereales. El contenido en proteínas de los productos anteriores se estima en unos 170 millones de toneladas métricas. Teniendo en cuenta el número de habitantes del globo en el momento de esta estimación, tres mil ochocientos millones de habitantes, cada uno podría recibir por día, en el caso de un reparto equitativo, algo más de 4.000 kilocalorías y algo más de 100 gramos de proteínas, lo que constituiría un aporte alimentario óptimo. Sin embargo, en la estimación anterior no se han tenido en cuenta las pérdidas, debidas a almacenaje, transporte y otras, que pueden hacer bajar el rendimiento estimado en aproximadamente un 50%. Teniendo en cuenta esta última consideración, ciertamente no se puede afirmar que sobren alimentos en el mundo y mucho menos si se tiene en cuenta las provisiones existentes respecto al aumento demográfico en el planeta. Resulta obvio, después de lo dicho, que para la obtención de biomasa como fuente de energía, como norma general, no podrán utilizarse terrenos de regadío, y ni siquiera secanos de calidad, teniendo que relegar-





se su cultivo a zonas marginales para la agricultura, aprovechando las épocas en las que en aquéllas se disponga de suficiente agua de lluvia y temperatura para el desarrollo de las cosechas. En cuanto a la fertilización, deberá limitarse a abonados de restitución, es decir, aquellos que reincorporan al terreno los nutrientes extraídos por la cosecha. Desde este punto de vista, resultan especialmente interesantes los cultivos leñosos, ya que la madera que se extrae como materia energética está formada básicamente por celulosa y lignina y contiene un bajo contenido en cenizas, es decir, extrae pocos nutrientes minerales que, en las especies de hoja caduca, son reincorporados al terreno cuando aquellas sufren abscisión y sus componentes son degradados y mineralizados por microorganismos saprófitos. También serán preferibles aquellos procesos de transformación de cualquier tipo de biomasa en combustible, que permitan la recuperación a partir de los residuos, del nitrógeno, fósforo y potasio, que son los tres elementos básicos en la nutrición mineral de las plantas.

#### BIOMASA AGRICOLA

Dentro de los cultivos agrícolas tradicionales de alto rendimiento energético y susceptibles de cultivarse en climas templados, pueden considerarse las siguientes especies: maíz (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum bicolor*) girasol (*Helianthus annuus*), patata (*Solanum tuberosum*) y remolacha (*Beta vulgaris*). Teniendo siempre en cuenta la importante limitación que supone la competencia entre especies alimentarias y energéticas, puede considerarse como susceptible de este último uso, en determinadas circunstancias, en este país además de las reseñadas, la pataca (*Helianthus tuberosum*), un tallo subterráneo del que se pueden obtener rendimientos medios de hasta 50 TM/ha de tubérculo.

El girasol, más arriba nombrado, tiene el interés de poseer un sistema ra-

dical profundo, pudiéndose intentar la sustitución de parte de los barbechos de cereal por un semillado de girasol forrajero, manteniéndose así una alternativa cereal-girasol en parte de los secanos de la España árida. Evidentemente la utilización de este girasol no tiene por qué ser estrictamente energética.

Los maíces de tallo azucarado ofrecen una cosecha normal de grano y, además, el azúcar de sus tallos como un subproducto de calidad. A partir de estos maíces, se pueden alcanzar rendimientos en la producción de grano de hasta 14.000 kg/ha y además 2.400 kilogramos de azúcar procedentes del tallo.

El sorgo dulce ha sido ampliamente recomendado y ensayado por diversos autores como una importante cosecha agroenergética, con posibilidades en un futuro inmediato. Presentan especial interés los sorgos de tallo azucarado que resultan de la hibridación de los sorgos de grano y de los sorgos dulces, ofreciendo el doble producto del almidón del grano y los azúcares directamente fermentables de los tallos. Estos híbridos pueden compararse a los maíces de tallo azucarado, ofreciendo la ventaja de ser más sobrios desde el punto de vista de sus exigencias nutritivas y de demanda hídrica. El sorgo dulce puede tener rendimientos en azúcares entre 4.000 y 8.000 kg/ha; sin embargo, estos azúcares presentan el inconveniente de ser inestables y, por lo tanto, necesitan ser procesados en un tiempo de semanas. Esta estacionalidad de la materia prima para la industria del alcohol o para la fabricación de cualquier otro producto energético, supone importantes dificultades económicas y, por tanto, se propone la integración de las cosechas de sorgo dulce con otras que suministren material a la industria transformadora en los periodos de no recolección del primero. En este sentido, puede considerarse el maíz como un cultivo complementario, o bien el empleo de sorgos de tallo azucarado, o la obtención de azúca-

res, además de las cañas del sorgo dulce. Tanto el maíz como el sorgo son plantas C-4 y que por tanto poseen los mecanismos metabólicos necesarios para evitar la pérdida de poder reductor fotosintético que implica la fotorespiración. Este hecho hace que posean una elevada tasa fotosintética y que su utilización sea importante si se trata de sacar el máximo provecho a la energía limpia y renovable que llega del sol.

En países de clima tropical, como el Brasil, además de los maíces y sorgos, se utilizan como plantas energéticas la caña de azúcar (*Saccharum sp.*) y el cazave (*Manihot esculenta*).

Entre los residuos agrícolas merece la pena destacarse por su volumen la paja de los cereales, en los que se acumula en forma de grano aproximadamente un 40% de la biomasa total. En términos generales, se puede considerar 1 TM de peso seco de residuo por cada tonelada métrica de peso seco del producto. La paja de los cereales, aunque es pobre en nutrientes minerales (0,5% de nitrógeno; 0,2% de fósforo y 2% de potasio), de hecho juega un papel importante para mantener la materia orgánica del suelo y los nutrientes; además se utiliza como parte de la dieta de los rumiantes o como cama del ganado reintegrándose en ambos casos, en gran medida, al suelo en forma de estiércol.

Por estas razones, sólo en zonas muy concretas tendrá utilidad como fuente energética, utilizándose su poder calorífico después de la combustión directa. También puede ser transformada la paja a través del proceso de pirólisis, o se puede recurrir a la hidrólisis ácida o enzimática de la celulosa para la obtención de azúcar fermentable.

Entre las especies no cultivadas hasta ahora y con posibilidades agroenergéticas, se pueden citar cuatro, a modo de ilustración y por lo tanto sin pretender ser exhaustivos: *Cucurbita foetidissima*, *Simmondsia chinensis* (jojoba), *Euphorbya lathyris* y *Ono-*

*podum sp.* Todas ellas pueden ser cultivadas en condiciones semiáridas y, por lo tanto, soportan la principal limitación de nuestras tierras marginales que es la falta de agua.

La primera de las especies mencionadas es una planta perenne que puede llegar a convertirse en una mala hierba, por lo que su introducción debería considerar este riesgo. Desde el punto de vista energético se estima que puede producir materiales muy variados como son: alrededor de 13 TM/ha y año de almidón, acumulado en sus raíces, y además unos 3.000 kg/ha de semillas que contienen un 33% de su peso en forma de proteína y una proporción equivalente en forma de grasa; además a partir de las semillas se pueden obtener 3,5 barriles de hidrocarburo por cada hectárea cultivada.

La jojoba es una especie a la que, en sentido estricto, no se debe considerar como agroenergética, ya que el producto obtenido de sus semillas, aunque puede ser utilizado como combustible, es preferido por sus extraordinarias cualidades como lubricante y en la industria farmacéutica y de cosméticos. Se trata de un arbusto del desierto de Sonora (EE. UU. y Méjico), que contiene una cera líquida en sus semillas que puede sustituir al esperma de ballena. La planta puede ser cultivada con aportes relativamente pequeños de agua, pero no soporta temperaturas bajas ya que los capullos florales perciben daños entre -4 y -5 °C. Por esta razón, las plantaciones comerciales no deberán hacerse en áreas donde las temperaturas desciendan por debajo de esas temperaturas.

La *E. Lathyris* es una planta productora de latex, secreción producida por células especializadas denominadas laticíferas. Este latex es rico en hidrocarburos, que pueden ser utilizados para dos misiones fundamentales: como combustibles y como moléculas de calidad para la industria química. La *E. lathyris* produce

alrededor de 10% de su peso seco de hidrocarburos; si se consiguen cosechas del orden de 20.000 kg/ha de materia seca, supondrá, por tanto, un rendimiento de 2.000 kg/ha de hidrocarburo. A esta producción se deben añadir los azúcares contenidos por esta planta en una proporción entre el 20 y 25%, que se traduce en una producción anual de aproximadamente 4.500 kg/ha y año de azúcares fermentables. El bagazo celulósico que queda después de la extracción del hidrocarburo y azúcar puede constituir otro material energético que permita un aprovechamiento integral de la planta. Además, las producciones podrán ser mejoradas básicamente mediante un mejor conocimiento de su fisiología, unas apropiadas prácticas de cultivo y un adecuado programa de mejora genética. A este respecto es interesante señalar que el árbol del caucho (*Hevea brasiliensis*), planta que se explota de forma industrial por su producción de latex, llegó a mejorar su rendimiento en un 200% en el espacio de 35 años. Una mejora equivalente de la *E. lathyris* convertiría a ésta en un auténtico monstruo de producción; probablemente no se conseguirán resultados tan espectaculares, pero no cabe duda que no resultará muy difícil incrementar las actuales producciones a través de programas de mejora genética, sobre todo si se tiene en cuenta que esta planta no ha sido nunca cultivada y que se parte de poblaciones silvestres elegidas al azar sin ningún criterio selectivo.

Una parte importante de los hidrocarburos contenidos en el latex de *E. lathyris* son triterpenoides que deben ser transformados previamente a su utilización como combustibles convencionales o como materia prima para la industria química. Por craqueo catalítico de los triterpenoides de *E. lathyris* se han podido obtener los siguientes compuestos: etileno, 10%; propileno, 10%; tolueno, 20%; xileno, 15%; Arenos C<sub>5-20</sub>, 21%; Coke, 5%; alcanos C<sub>1-4</sub>, 10% y fuel oil, 10%.

El balance energético del cultivo de *E. lathyris* según las primeras estimaciones es positivo y puede resumirse de la siguiente manera:

	Kcal
Consumo energético del cultivo/ha. . . . .	24.688 × 10 <sup>3</sup>
Producción energética de la cosecha/ha. . . . .	63.625 × 10 <sup>3</sup>
Balance neto (diferencia: producción-consumo) .	38.937 × 10 <sup>3</sup>
Rendimiento energético (cociente producción/consumo)	2,58

Un beneficio positivo o un rendimiento energético mayor que 1 constituyen una condición indispensable para que un cultivo de este tipo sea viable.

En España, tanto el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias como la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid, experimentan la posibilidad de utilizar distintas especies de cardos como fuente de biomasa, consistente fundamentalmente en material lignocelulósico. Se ensayan las siguientes especies: *Onopordum nervosum*, *O. illyricum* y *O. scanthium* ofreciendo la primera de ellas, endémica española, las mayores esperanzas. No se pueden dar hasta el momento cifras exactas de los rendimientos en materia seca, ya que por ser especies bianuales, hasta ahora no se ha logrado cerrar su ciclo vegetativo en una sola temporada, manteniéndose en la actualidad varias parcelas experimentales en el terreno. No obstante, no será difícil llegar a producciones que alcancen los 20.000 kg/ha de materia seca, cifra considerada por muchos autores como suficiente para poder considerar a un cultivo potencialmente interesante desde el punto de vista energético.

Las especies silvestres citadas con posibilidades energéticas no son, evidentemente, las únicas. Han sido propuestas a modo de ejemplo y su valor debe ser contrastado. Por otro lado, nuevas especies deberán ser

ensayadas para evaluar su viabilidad como fuente de energía y su adaptación a diferentes climas y terrenos.

## BIOMASA FORESTAL

El cultivo de especies leñosas susceptibles de ser utilizadas como fuentes energéticas puede llevarse a cabo desde dos puntos de vista diferentes.

Las especies de alta producción (chopos, sauces, eucaliptos, acacias, etc.), exigen unas mínimas condiciones del suelo, clima y agua, que las pone en competencia, en cuanto al uso de la tierra, con otras actividades. El eucalipto, en particular, posee en su haber las siguientes características positivas: crecimiento rápido con alto contenido en celulosa; capaz de rebrotar, lo que permite cortes sucesivos; resistente a las plagas y capaz de adaptarse a condiciones climáticas diversas. También los chopos híbridos constituyen, entre las especies forestales, unos candidatos firmes como productores de biomasa con fines energéticos. La forma de explotación de estas especies son plantaciones con densidades altas (6.500-7.000 árboles/ha) y rotaciones cortas (por ejemplo, 6 años). Los rendimientos de las especies forestales pueden oscilar entre 11 y 27 TM/ha de materia seca, pudiendo ascender con un manejo cuidadoso a 36-45 TM/ha.

Se estima que este tipo de explotaciones destinadas a la producción de biomasa de origen forestal deberán poseer, para ser rentables, grandes superficies (por ejemplo, entre 10.000 y 20.000 ha), unas condiciones climáticas y edáficas relativamente exigentes, como son 600 mm anuales de precipitación, terreno agrícola y no más del 30% de pendiente. La planta de conversión de biomasa en una explotación de este tipo deberá situarse aproximadamente en el centro geométrico de su superficie y estar bien comunicada para facilitar el acceso desde las par-

celas de producción al centro transformador.

También se pueden utilizar especies de baja producción, pero capaces de adaptarse a condiciones más difíciles (acacias, falsas acacias, eucaliptos, prosopis, tamarix, zizyphus, etc.), en grandes superficies de nuestro territorio, en las que su incidencia competitiva sobre otras actividades agrícolas o ganaderas sería ínfima. Ocuparían estas especies zonas auténticamente marginales de difícil uso alternativo al que se propone, contribuyendo, además, a frenar la erosión del suelo, creando puestos de trabajo y posiblemente mejorando el equilibrio ecológico y la belleza de determinadas zonas.

En cuanto a la utilización de residuos forestales, éstos tienen la importante característica de que deben ser, en todo caso, retirados del monte para conseguir un buen manejo del mismo, independientemente de que se utilicen o no como fuente de energía. Por esta razón, el empleo de los residuos debe estar integrado con la explotación del monte considerado como conjunto, que se beneficiará, así, incrementando la producción de madera y leña, aumentando la capacidad ganadera y creando empleo. Se trata en el momento actual de encontrar las máquinas idóneas para la extracción de los citados residuos.



## BIOMASA PROCEDENTE DE RESIDUOS GANADEROS

Tradicionalmente los residuos producidos por el ganado constituían la única fuente fertilizante de los suelos agrícolas. Con la aparición de los fertilizantes, los estiércoles dejan de utilizarse en gran número de explotaciones, apareciendo con ello una separación entre agricultura y ganadería. Algún tipo de ganadería, como la porcina y, mucho más, la aviar, funcionan en la actualidad como verdaderas industrias agrarias; no necesitan suelo para cultivar pues se alimentan de piensos compuestos y, por otra parte, al no tener suelo, se corta la vía de eliminación de estos residuos, agravándose con ello los problemas de las explotaciones ganaderas.

### Utilización energética

Al pensar en la utilización energética del estiércol, el interés se centra fundamentalmente en dos hechos: es una biomasa que ya existe (que no hay que producir) y que en gran medida no se utiliza con otros fines, y, en muchos casos, la eliminación de dichos residuos constituye un problema grave (puede originar contaminación) y de solución costosa (en términos económicos y energéticos).

Para abordar el problema es preciso conocer, en primer lugar, las cantidades de residuos existentes, su distribución geográfica y su potencial energético. Aunque no existen aún inventarios detallados sobre el parti-

Tipo de residuos	Ministerio de Agricultura	F.A.O.
Agrícolas	36,6	35,5
Estiércol (materia seca)	7,3	8,6
Fonostales	5,2	5,2
Industrias Agrícolas	4,8	4,8

Cuadro 1. Cantidades de residuos en millones de toneladas/año (España).

cular, se han realizado ya algunos estudios que permiten conocer el orden de magnitud de las cantidades de los residuos existentes. En el Cuadro 1 se resumen dos prospecciones realizadas en 1980, una por el Ministerio de Agricultura y otra por la FAO. Las cifras se refieren a millones de toneladas/año.

Los residuos agrícolas son los más importantes, representando el 66,7% del total de residuos de origen agrario, seguidos a gran distancia por el estiércol, que representa el 14,7%. La distribución de este último, según especies, en miles de toneladas (peso total) y el porcentaje que corresponde a cada una de ellas, se facilita en el Cuadro 2.

Especies	Deyecciones mTM/año	% del total
Bobinos	39.800	60,17
Porcinos	14.700	22,22
Aves	1.850	2,80
Ovinos y caprinos	9.800	14,81

Cuadro 2.

La distribución geográfica de estos residuos está recogida en diversas publicaciones de los Ministerios de Agricultura y de Industria, que constituyen una importante base de partida para estudios futuros. Según estas fuentes ya en 1975 se superaron las 500 TM/año en 21 provincias españolas.

Tomando las cifras recogidas como base y aplicando un índice estimativo de recuperación (30-35% de promedio para las deyecciones animales) y de pérdidas en el proceso de transformación en energía (alrededor de un 60% de promedio, considerándose este valor como mínimo, con las tecnologías de conversión actualmente existentes), se puede calcular un saldo neto energético del orden de  $6 \times 10^7$  Kcal/año. Ello representa aproximadamente el 0,6% del consumo total actual de energía en España y sería suficiente para cubrir prácticamente casi todas las necesidades energéticas de la ganade-

ría española. Con una mejora en los sistemas de recogida y, sobre todo, de transformación, se puede pensar en llegar a obtener de los estiércoles en las próximas dos décadas una cantidad de energía tal vez el doble de la indicada.

#### Posibilidades del aprovechamiento

Para poder explotar el considerable potencial energético que representa la biomasa procedente de residuos ganaderos, es preciso intensificar las acciones de investigación y aplicación en tres aspectos fundamentales. En primer lugar, optimizar la recolección de los estiércoles. Ello implica el análisis del impacto de este proceso en la fertilidad del suelo (en muchos casos, los residuos que se aportan al terreno, constituyen una importante contribución a la fertilidad del suelo y una defensa contra la erosión) y el desarrollo de sistemas específicamente adaptados para su recolección y preparación.

En segundo lugar, es preciso optimizar los procesos e instalaciones de conversión de los residuos ganaderos en energía, susceptibles de aplicación general. Con la tecnología actual, en esta etapa se pierde, por término medio, más del 50% de la energía contenida en los estiércoles.

Por último, es preciso un análisis en profundidad del destino de la ener-

gía producida. En general, se piensa en la propia explotación agraria o en su entorno rural como principal usuario de la energía producida. Para que ello sea realizable, es preciso estudiar la relación entre las curvas de oferta y demanda energética de la explotación, tanto en función del tipo de energía (calor, electricidad, etc.) y prever unos mecanismos que permitan "exportar" durante ciertos períodos el excedente de producción energética e "importar" la energía requerida en los períodos deficitarios.

La elección del método de transformación energética más apropiado para la biomasa residual, depende fundamentalmente de dos parámetros: porcentaje en agua de la biomasa residual y su relación carbono/nitrógeno.

Sobre esta base, se pueden establecer unos primeros criterios, que se recogen en el Cuadro 3.

Se observa que los métodos termoquímicos presentan su mayor interés en el tratamiento de residuos con bajo porcentaje en agua, o con una relación C/N alta. En los demás casos resulta más aconsejable la vía bioquímica.

Los residuos ganaderos (estiércol, purines, etc.) son, sin duda alguna, los de mayor interés de utilización en

los procesos de digestión anaerobia, por cuatro razones principales: son residuos localizados; están diluidos; aportan un alto contenido en nutrientes para el crecimiento bacteriano, y el efluente de la digestión no se empobrece en concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo) respecto al influente, lo que supone una gran ventaja dada su utilización posterior como fertilizante.

La recogida y transporte de las deyecciones animales hasta la instalación de transformación bioquímica se presenta como una operación simple, cuando los animales están reclusos en estructuras de crianza apropiadas. En general, el estiércol se recolecta a la salida de los establos, en lugares destinados al efecto, diferentes según el tipo de deyecciones (sólidas o líquidas). El transporte a la instalación de transformaciones puede hacerse por medio de dispositivos mecánicos si se trata de deyecciones sólidas (> 25% de materia seca), o por medio de bombas en el caso de deyecciones líquidas, para las que las instalaciones de digestión son, por lo general, de tipo continuo, siendo la carga diaria. Según la F.A.O., el consumo de energía se mantiene a niveles inferiores a 3 MJ/TM tratada.

El pretratamiento de las deyecciones se hace necesario cuando:

- la concentración de las deyecciones es inferior a 3-4% de materia seca. En este caso, se utilizan cubas de decantación, añadiendo en caso de necesidad floculantes, a fin de eliminar el agua excedentaria que queda en la superficie, liberada en buena parte de materia orgánica.

- el contenido en materia seca de las deyecciones es superior al 15%. En este caso se mezclan las deyecciones entre sí o se las diluye. A este efecto, se pueden utilizar cubas abastecidas por bombas o mezcladores, por lo general de tipo mecánico, absorbiendo una cantidad de energía compren-

Tipo de biomasa	% H <sub>2</sub> O	C/N	Proceso aconsejado
Residuos leñosos . . . . .	< 35		Termoquímico
Residuos con elevado contenido celulósico . . . .		30	Termoquímico
Residuos celulósicos y amiláceos . . . . .	> 35		Fermentación alcohólica + hidrólisis
Residuos con elevado contenido en azúcares . . . . .	15 - 90		Fermentación alcohólica
Residuos fermentescibles . . . . .	> 35	20 - 30	Digestión anaerobia
Residuos oleaginosos . . . . .	> 35		Extracción aceites
Residuos origen animal . . . . .	70 - 90	20 - 30	Digestión anaerobia

Cuadro 3.

Fuente: FAO 22/80 (4a).

dida, según los sistemas empleados, entre 4 y 8 MJ/TM de producto diluido.

La producción de biogás (60-70% de metano) por digestión anserobia depende, de una forma general, de la cantidad de sólidos volátiles (S. V.) (materia orgánica biodegradable) presente en las deyecciones animales. Este valor está en correlación con la velocidad de degradación de los S. V. y con la eficacia de los metabolismos de las diferentes especies animales consideradas.

Las cifras que se manejan en la actualidad sobre valores relativos a la producción de biogás, mediante procesos de digestión anaerobia de diversas especies ganaderas, son puramente indicativas ya que la tecnología del biogás está progresando, tanto en disminución de costes de instalación, como en aumento de producciones. Cabe esperar, por ello, que a finales de esta década se generalice su implantación, con superiores rendimientos.

#### **BIOMASA ACUATICA**

A pesar de que la superficie de los continentes no alcanza ni el 40% de la de los océanos, la biomasa acuática representa una cantidad dos veces inferior a la de tierra firme. Esta producción relativamente baja, constituida en más de un 90% por algas microscópicas (fitoplancton), es debida a la pobreza en nutrientes minerales de la zona superficial de los océanos donde aquéllas se localizan. Por lo que respecta a los macrofitos, que representan el 10% restante, la necesidad de un sustrato sólido para su anclaje es el factor limitativo más importante de su desarrollo.

Por otra parte, la biomasa de agua dulce está llamada a jugar un papel destacado en el futuro. Puede colonizar ambientes donde no existe competencia por el espacio y su rendimiento de conversión de energía solar es elevado, cuando se satisfacen

sus necesidades nutritivas. Las investigaciones a medio plazo se centran en especies capaces de crecer en aguas contaminadas, contribuyendo así a la protección del medio ambiente, y permitiendo a su vez la producción de proteínas y energía.

#### **Plantas acuáticas**

Entre las especies vegetales de agua dulce, el jacinto de agua es la planta de mayor producción de materia seca por hectárea que se conoce. Dadas sus cualidades, ha recibido últimamente una gran atención, hasta el punto de ser objeto de un estudio en profundidad realizado por la NASA.

El jacinto de agua es una planta de origen tropical que se utiliza en USA en explotaciones piloto asociadas a lagunas residuales. Por su gran productividad (hasta 154 TM/ha/año), su alto contenido proteico (20% del peso seco total y 35% del peso seco de las hojas), su composición en aminoácidos (semejante a la harina de soja) y su alto poder depurador de aguas (una ha en crecimiento rápido puede absorber el nitrógeno y el fósforo producido por 800 habitantes, siendo fijados contaminantes como metales pesados, fenoles y pesticidas, de forma que la cantidad de agua depurada permite su utilización en piscicultura) hacen de este vegetal, entre los macrofitos, el más indicado para su cultivo, dadas sus especiales características.

Al final de la década de los setenta, tanto en USA como en Europa, se realizaron proyectos de investigación sobre el jacinto de agua, enfocados todos ellos a la producción de biomasa y su aprovechamiento. Entre los primeros cabe citar los estudios realizados por B. C. Wolverton y financiados por la NASA en Louisiana, obteniendo 154 TM/ha/año de materia seca en lagunas de varias hectáreas de superficie y 70 cm de profundidad. En Italia, M. Bonetti recolectó 144 TM/ha/año en el laboratorio de CSN de Casaccia, con luz natural. Las producciones obtenidas



*Cultivo de jacintos de agua sobre afluentes de un digestor para la producción de biogás.*

por M. S. Parcevaux en el INRA de Versailles, descienden a 83,6 TM/ha/año de materia seca, en invernadero con un 60% de luz exterior.

En cuanto a los aprovechamientos del cultivo de jacinto de agua, los estudios se han orientado a la bioconversión en metano, a la obtención de proteínas y a la descontaminación de aguas residuales.

#### *Bioconversión en metano:*

El jacinto de agua es una planta con una apropiada relación C/N para la producción de metano, por medio de la fermentación anaerobia. Tanto en USA como en Italia se han realizado experiencias en este sentido.

En Lousiana, la NASA realizó pruebas de fermentación anaerobia con jacintos a temperatura mesófila (35°

C) y un tiempo de retención hidráulico de 20 días, obteniendo 380 litros de biogás por kilogramo de materia seca, con una riqueza en metano del 60%.

En el laboratorio de Casaccia, se realizaron ensayos con digestores de 25 litros, utilizando bacterias termófilas a 58°C y tiempos de retención de 10 y 20 días, obteniéndose cerca de 19 y 15 litros de biogás/día respectivamente.

#### *Obtención de proteínas:*

El contenido proteico del jacinto de agua se encuentra en torno al 25% de la sustancia seca. Tal valor es superior, o al menos equivalente, al de los forrajes convencionales. La dificultad principal encontrada en muchos países donde se utiliza esta planta como alimento animal, radica

en su alto contenido en agua y elementos minerales (K, Fe, Ca, Na) presentes en la biomasa fresca. Para superar estas dificultades, tanto en Florida, como en la universidad de Pisa donde se estudia este vegetal bajo el programa "Nuove Fonti Protelichi", se están utilizando nuevas técnicas de ensilado de jacinto parcialmente desecado (cerca del 80% de agua) y estudiando su empleo como suplemento (20-30%) en la dieta nutricional.

#### *Descontaminación de aguas residuales:*

En este sentido la NASA ha realizado varias experiencias de depuración de lagunas que reciben residuos urbanos. En los meses fríos las especies predominantes son las lentejas de agua (*Lemna sp* y *Spirodela sp*), mientras que en los cálidos se desarrolla bien el jacinto de agua. En una laguna de 2 hectáreas durante los primeros 14 meses de operación con plantas acuáticas, el DBO<sub>5</sub> entrante se redujo en un 95%, de 110 mg/l hasta 5 mg/l en el efluente. También se recuperaron importantes cantidades de nitrógeno y fósforo que pasaron respectivamente de 12 a 3,4 mg/l y de 3,7 a 1,6 mg/l.

Los jacintos de agua han demostrado su capacidad para mantener DBO<sub>5</sub> y los sólidos suspendidos totales (TSS) dentro de los límites prescritos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

En la actualidad, los jacintos de agua han suscitado gran interés en nuestro país. Es importante señalar el grave peligro que puede entrañar este vegetal, ya que constituye la plaga acuática más importante de las aguas dulces tropicales y subtropicales. Puede causar graves daños en canales de riego, presas, lagos, etc., así como constituir un refugio de ciertas enfermedades. A comienzos de siglo, en USA, se le trató de controlar con arseniato de sodio, pero los daños ocasionados por este producto en las aguas, hizo que en 1937

se prescindiera de su aplicación. Más tarde en los años cuarenta se utilizó el 2,4-D que también hubo de abandonarse. En 1973, los jacintos invadieron 200.000 ha de agua en Louisiana y en 1975 la superficie era de 400.000 ha. Para su control también se han utilizado la recolección mecánica sin resultados positivos. En el momento actual, el USDA ensaya procedimientos biológicos, como insectos y microorganismos, combinados con métodos químicos y mecánicos.

#### **Algas**

Aunque, en comparación con los macrofitos, las algas precisan de CO<sub>2</sub> para su implantación y tienen problemas para lograr su separación del medio líquido, presentan, a su vez, un gran conjunto de utilidades, basadas en el aprovechamiento de la energía solar a través de la fotosíntesis.

Dado su elevado contenido en principios inmediatos, aminoácidos esenciales y vitaminas, así como de productos químicos o químico-farmacéuticos (pigmentos, alcoholes, ácidos grasos insaturados, aminas, etc.), las algas pueden ser una inapreciable fuente de alimentación y de materia prima en la industria extractiva, así como constituir un material extremadamente valioso en la descontaminación y la agroenergética. En estos campos existen actualmente investigaciones para evaluar los diversos potenciales que esta biomasa acuática posee. Fundamentalmente los estudios están dirigidos hacia las microalgas y dentro de éstas, hacia los géneros *Chlorella* y *Spirulina*.

La *Chlorella* es la microalga más representativa y conocida por su fácil manejo y capacidad de adaptación. Se trata de una cloroficea unicelular, autotrófica en la luz con CO<sub>2</sub> como fuente de carbono, y heterotrófica en la oscuridad, exigiendo en este caso una fuente orgánica de carbono. Este género ha sido estudiado por G. Flo-

renzano en la Universidad de Florencia, utilizando depósitos de cemento para su cultivo al aire libre, obteniendo entre los meses de mayo a septiembre 36,72 TM/ha < > 18,36 TM de proteína. Este dato es muy interesante pues hace pensar que si la *Chlorella* se cultiva en condiciones óptimas de autotrofismo, con nitrógeno nítrico como fuente nitrogenada, el contenido en proteínas podría llegar hasta el 75% del peso seco. Según S. Aaronson en Israel, un cultivo de *Chlorella* realizado en condiciones normales, produciría diariamente de 15 a 25 g de peso seco/m<sup>2</sup>, llegando a conseguirse en ciertas condiciones una producción de 70-75 TM/ha. Esta producción es importante si se compara con la obtenida, en cuanto a proteínas se refiere, con otros productos agrícolas. Así, mientras que de *Chlorella* se cosechan 60 TM de proteínas/ha/año, en la misma extensión y tiempo, se obtienen 6 TM de proteínas de alfalfa y maíz, 0,5 de cacahuate, 0,3 de trigo y 0,2 TM/ha/año de arroz, consumiendo en estos casos cinco veces más agua que en el caso de las algas, agua que en su mayor parte se perdería por evaporación, filtración y transpiración.

La *Spirulina* es una cianoficea flotante que se da espontáneamente en los lagos salados de El Chad (África) y Texcoco (México). Esta alga, actualmente estudiada en USA, Japón y Francia, tiene una membrana celular muy sencilla y no posee celulosa. Se utiliza para la obtención de pan verde, galletas, helados, etc., existiendo una gran exportación de la misma de México a USA.

En el INRA de Antibes se cultivan estas microalgas en un gran recipiente con fondo de plástico a 35°C, que recibe una inyección periódica de CO<sub>2</sub>. En estas condiciones se ha obtenido una producción de 40 a 50 TM/ha/año, estimando su contenido proteico en el 60 o 70% de su peso seco. Se calcula que esta alga en cultivo industrial podría alcanzar producciones superiores a los 150 TM/ha/año.

Tanto el género *Chlorella* como el *Spirulina* y *Scenedesmus*, han sido investigados por C. Golueke y W. J. Oswald, realizando los primeros estudios experimentales en plantas de oxidación con aguas residuales, usando microalgas para retirar de ellas los nutrientes orgánicos. Los efluentes se vierten en grandes piscinas o tanques de poco fondo y en ellos se siembran las algas. Las bacterias desdoblan los compuestos orgánicos que quedan en las aguas y liberan CO<sub>2</sub>, que es utilizado por las microalgas para su crecimiento. A su vez, las algas absorben del medio nitrógeno, fósforo y otros iones metálicos, tóxicos algunos, así como CO<sub>2</sub>, liberando simultáneamente O<sub>2</sub>. Con este procedimiento se consiguió la purificación de dichas aguas, recuperándolas para un posterior uso (reciclaje, riegos convencionales, vertido en corrientes limpias, etc.)

En la región mediterránea francesa, se llevan a cabo estudios basados en las experiencias de C. Golueke, con el fin de optimizar las condiciones de producción de algas en lagunas de estabilización. Concretamente en Grau-du-Roi (Gard) se realizan ensayos en estanques naturales contaminados. La biomasa acuática será transformada en metano, acoplándose así la producción de energía a la descontaminación.

En el plano puramente energético, la utilización de microalgas es también muy prometedora y en este sentido se han realizado brillantes estudios en dos campos diferentes:

#### *Producción de hidrocarburos utilizando el alga Botryococcus braunii*

Dentro de los vegetales que han sido analizados por su contenido en hidrocarburos, existe sólo una especie en la que el porcentaje de los mismos puede llegar hasta el 75% de su peso seco. Esta especie es un alga verde unicelular de agua dulce denominada *Botryococcus braunii*, que presenta células piriformes con paredes espesas y agrupadas en rosetas.

El *Botryococcus* se ha encontrado en todo el mundo, bajo climas fríos (tundras árticas) y templados (Canadá, Inglaterra, Francia, Turquestán Ruso, Australia) así como en tropicales.

Esta microalga que se manifiesta en la naturaleza con una fluorescencia

espectacular, ha sido descrita bajo dos estados fisiológicos distintos: una fase verde de crecimiento exponencial, fase A, y una fase roja de reposo o degeneración, fase B. Dentro de la fase A, el contenido en hidrocarburos, constituidos fundamentalmente por tres dienos  $C_{27}$ ,  $C_{29}$ ,  $C_{31}$  y un trieno  $C_{29}$ , es equivalente al 15-

20% del peso seco. Para la fase B, el porcentaje de hidrocarburos está formado principalmente por triterpenos tetrametiles lineales, que llegan a representar un 75% del peso seco. En el momento actual, la fase B ha sido observada sólo en la naturaleza, escaseando las experiencias en laboratorio.

En la actualidad existen pocos datos relativos a esta alga. L. W. Hillen y D. R. Warren han calculado, sobre la base de productividad observada en el medio natural, un rendimiento en hidrocarburos de 2,5 TM/ha/año. Consideran, teniendo en cuenta las producciones alcanzadas de 150 TM/ha/año de biomasa obtenidas por otras algas unicelulares en cultivo industrial, que los rendimientos de hasta 37 TM/ha/año de hidrocarburos podrían ser razonablemente alcanzados.

E. Casadevall, en laboratorio, en condiciones de cultivo normales en medio mineral diluido, ha obtenido rendimientos del orden de 2 g/l/mes de biomasa, conteniendo una media del 17% de hidrocarburos. Esto conduce a un rendimiento de 8,5 TM/ha/año de hidrocarburos (equivalentes a 8,5 tep/ha/año).

El cultivo en masa de *Botryococcus* presenta la facilidad, dada su localización extracelular, de recolectar hidrocarburos por un simple tratamiento mecánico. La tecnología actual para la obtención de cuerpos grasos a partir de oleaginosas puede ser fácilmente utilizada para este tratamiento. Tiene, por lo tanto, la ventaja de que ninguna transformación, termoquímica o bioquímica, es indispensable para la extracción de sus hidrocarburos.

La productividad de *Botryococcus braunii* ocupa una posición fuerte frente a especies tales como la caña de azúcar, que ha sido considerablemente mejorada en decenios de cultivo intensivo. Si se tiene en cuenta el hecho de que el poder calorífico de los hidrocarburos es, al menos, igual al doble del de los azúcares, se pue-



de pensar que el cultivo de esta microalga puede instalarse a la cabeza de los cultivos energéticos, prácticamente al mismo rango que la caña de azúcar.

#### Producción de hidrógeno

Otra vía de investigación estudiada es la bioproducción fotosintética de hidrógeno. Es un proceso interesante ya que permitiría obtener un producto de alto poder calorífico (29 Kcal/g frente a los 3,5 de los glúcidos) utilizando una energía gratuita, la luz, y una materia prima abundante, el agua.

La primera etapa de la producción de hidrógeno es idéntica a la fotosíntesis. Es la fotólisis del agua que está acompañada de desprendimiento de oxígeno, liberación de protones, aparición de poder reductor por transferencia de electrones y síntesis de ATP. La segunda etapa, que en la fotosíntesis daba lugar a la reducción de CO<sub>2</sub>, se orienta en este caso hacia la producción de hidrógeno, gracias a un enzima denominado hidrogenasa.

Esta bioproducción de hidrógeno es llevada a cabo por organismos tales como las algas microscópicas que poseen una hidrogenasa. Por tanto, poblaciones de algas seleccionadas permiten la realización de este fenómeno.

El hidrógeno es objeto de numerosas investigaciones en el mundo. El Instituto Francés del Petróleo realiza actualmente estudios con algas para tratar de encontrar un procedimiento que permita producir H<sub>2</sub> sin consumir energía eléctrica.

#### BALANCES ENERGETICOS EN LA PRODUCCION DE BIOMASA

La Agricultura consume un porcentaje muy bajo en relación con el consumo energético total (alrededor de 3,5% a nivel mundial). En España se sitúa alrededor del 4,5%. (Véase Cuadros 4 y 5).

Países desarrollados . . . . .	3,4
Norteamérica . . . . .	2,8
Europa Occidental . . . . .	4,9
Oceanía . . . . .	5,6
Otros . . . . .	1,8
Países en vías de desarrollo. . . . .	4,8
África . . . . .	4,5
Sudamérica . . . . .	3,8
Próximo Oriente . . . . .	6,4
Lejano Oriente . . . . .	5,3
Países socialistas . . . . .	3,2
Asia . . . . .	2,9
URSS y Europa Oriental . . . . .	3,3
MUNDIAL (Promedio) . . . . .	3,5

Cuadro 4. Energía utilizada en agricultura (porcentaje del consumo total). (Según FAO).

En los países desarrollados, aunque se consume más energía que en los socialistas, el porcentaje es inferior al de los países en vías de desarrollo. El mayor porcentaje se consume en fertilizantes y maquinaria que representan casi un 90% del total. En España, según la Dirección General de la Producción Agraria (DGPA), la distribución en 1979 fue la siguiente: maquinaria, 57%; fertilizantes, 38%; plaguicidas, 1,5% y varios, 3,5%.

	Fertilizantes		Maquinaria		Riego		Plaguicidas	
	1973	1985	1973	1985	1973	1985	1973	1985
Países desarrollados . . . . .	35,3	44,3	61,5	53,0	1,2	1,1	2,0	1,7
Norteamérica . . . . .	35,0	48,2	60,7	48,2	1,7	1,4	2,6	2,2
Europa Occidental . . . . .	34,2	39,7	63,2	58,2	0,7	0,6	1,7	1,5
Oceanía . . . . .	25,5	35,9	73,0	63,0	0,9	0,9	0,5	0,4
Otros . . . . .	51,2	52,3	46,8	45,9	1,5	1,4	0,4	0,3
Países en vías de desarrollo. . . . .	63,6	70,3	27,9	23,5	7,5	4,3	1,0	1,9
África . . . . .	54,3	56,9	42,9	37,4	1,7	1,6	1,7	4,3
Sudamérica . . . . .	48,9	55,4	47,3	41,3	1,9	1,6	1,7	1,6
Próximo Oriente . . . . .	51,2	60,4	29,8	28,7	18,3	9,4	0,8	1,4
Lejano Oriente . . . . .	83,5	87,4	7,8	6,6	8,2	4,1	0,4	1,9
Países Socialistas . . . . .	56,6	65,4	38,0	31,4	2,5	1,5	2,9	1,7
Asia . . . . .	76,4	79,1	9,6	12,5	8,5	4,6	5,6	3,7
URSS y Europa Oriental . . . . .	51,6	62,0	45,2	36,2	0,9	0,6	2,3	1,2
MUNDIAL (Promedio) . . . . .	44,5	56,5	51,0	39,9	2,3	1,9	2,1	1,7

Cuadro 5. Energía utilizada por la agricultura. Porcentaje por capítulos (Según FAO).



<b>Producción:</b>	
Grano (6,6 TM) . . . . .	2,90
Paja (5,3 TM) . . . . .	1,80
<b>TOTAL</b> . . . . .	<b>4,70</b>
<b>Consumo:</b>	
Fertilizantes . . . . .	0,29
Combustible . . . . .	0,15
Producción de semillas . . . . .	0,11
Fabricación de maquinaria . . . . .	0,05
Tratamientos fitosanitarios . . . . .	0,03
<b>Sub-total</b> . . . . .	<b>0,63</b>
Recolección de paja . . . . .	0,04
<b>TOTAL</b> . . . . .	<b>0,67</b>
Rendimiento energético = 4,6	
Rendimiento energético con paja = 7,0	
Balance neto energético = 4,03	

Cuadro 6. Balance energético de un cultivo de trigo (tep/ha/año).

La energía consumida en la Agricultura, comparada con la energía total consumida, es una porción muy pequeña. Por ello, habría que enfocar el problema más que hacia una disminución del consumo energético, que implicaría una disminución de la producción, hacia un uso más eficaz tanto del abono como de la maquinaria.

Con el balance energético se intenta comparar la energía producida y la energía consumida en el proceso de producción de biomasa.

Energía consumida.

Existen dos términos:

- Energía consumida directamente: comprende aquellos consumos fáciles de medir, como son carburantes, electricidad, mano de obra, fertilizantes, etc.

- Energía consumida indirectamente: difícil de determinar, comprende, por ejemplo, la energía en fabricar, producir, transportar y mantener equipos o la realización y mantenimientos de obras, etc., durante el proceso de producción de biomasa.

Energía producida

Contiene dos apartados:

- Energía producida por las cosechas.
- Energía producida por los residuos, que aunque no forma parte típica de la recolección, puede tener un interés energético dependiendo del cultivo y del tipo de recolección.

La forma de expresar el balance energético puede ser:

Balance neto energético = Energía producida — Energía consumida (Output - Input).

Rendimiento energético =

$$\frac{\text{Energía producida}}{\text{Energía consumida}} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}}$$

El Cuadro 6 incluye el balance energético de un cultivo de trigo en Francia, de acuerdo con los datos facilitados por el Dr. Chartier.

A partir del mismo, si se suprimiera el consumo de fertilizantes y la producción se redujera en un 20%, el balance energético neto del sistema sería 3,76 — 0,38 = 3,38 tep. Estudios similares a éste han realizado otros autores (D. A. Lewis y J. A. Tatchell).

Los datos que aparecen en el Cuadro 7 muestran que el balance energéti-

	Con N		Sin N	
	Producción (TM/ha)	Energía Aportada (tep/TM)	Producción (TM/ha)	Energía Aportada (tep/TM)
Trigo . . . . .	4,61	0,16	2,7	0,19
Cebada . . . . .	3,86	0,18	2,47	0,22
Patata . . . . .	23,7	0,04	15,7	0,05
Azúcar (de remolacha).	4,5	0,17	3,5	0,16

Cuadro 7. Influencia de la fertilización nitrogenada en el balance energético de algunos cultivos.

co con aportaciones de fertilizantes nitrogenados son iguales o superiores que en el caso de los no fertilizados.

Frecuentemente se afirma que la producción agraria consume más energía de la que genera y que su balance es negativo. Evidentemente, cuanto menos desarrollado sea un sistema de explotación agraria, menores son los consumos energéticos. Sin embargo, ello no significa en modo alguno que los sistemas primitivos necesariamente resulten en un balance energético más favorable que los métodos modernos.

Los modernos sistemas de producción conducen no sólo a una producción muy superior a la de los sistemas más primitivos, sino que ofrecen balances energéticos más positivos. Los balances energéticos negativos aparecen en la transformación de los productos agrícolas en ganaderos (Ver Cuadro 8).

Cereales . . . . .	2,0 - 2,5
Remolacha azucarera . . . . .	2,5
Patata . . . . .	1,3
Leche . . . . .	0,40
Carne (bovino) . . . . .	0,10 - 0,34
Carne (ovino) . . . . .	0,13 - 0,43

*Cuadro 8. Balances energéticos. Relación Output/Input de energía.*

Los índices de conversión de elementos vegetales en carne son, por término medio, del orden del 10%.

Los problemas que se presentan al realizar un balance son: carencia de una metodología completa y uniforme, y falta de un enfoque global de los sistemas de producción.

Los balances energéticos pueden jugar un papel importante como elemento para la toma de decisiones en política agraria.

Ejemplos de balances energéticos.

— Comparación entre explotaciones forestales de especies de ciclo corto y de ciclo largo.

Explotaciones forestales de especies de ciclo corto.

Supuesta una producción de 111 TM de materia seca cada 10 años, con densidad de 480 kg/m<sup>2</sup>, se tienen los siguientes datos:

<b>Consumo energético (por ha de bosque):</b>	
Astillado . . . . .	84 MJ/TM sec.
Saca . . . . .	54 MJ/TM sec.
Secado . . . . .	2,8 MJ/kg agua caliente
Corta, herbicidas, abono . . . . .	305.282 MJ/ha
<b>Como hay 111 TM, resulta:</b>	
111 x 84 . . . . .	9.324 MJ
111 x 54 . . . . .	5.994 MJ
2,8 x 55.500 . . . . .	155.400 MJ
Corta, herbicida, abono . . . . .	<u>305.282 MJ</u>
<b>TOTAL . . . . .</b>	<b>476.000 MJ</b>
<b>Producción energética:</b>	
111.000 Kg x 19 MJ/Kg madera seca = 2.109.000 MJ	
Rendimiento energético = $\frac{2.109.000}{476.000} = 4,4$	
Balance neto energético: 2.109.000 - 476.000 = 1.633.000 MJ	

Fuente: F. Gómez Gallardo.

Explotaciones forestales de especies de ciclo largo.

Supuesta una producción de 67 TM/ha a los 10 años, con 50% de humedad, se tienen los siguientes datos:

<b>Consumos energéticos:</b>	
Astillado más secado . . . . .	96.000 MJ
Saca y diversos . . . . .	<u>47.000 MJ</u>
<b>TOTAL . . . . .</b>	<b>143.000 MJ</b>
<b>Producción energética:</b>	
33.500 Kg x 19 MJ/Kg = 636.500 MJ	
Rendimiento energético = $\frac{636.500}{143.000} = 4,4$	
Balance neto energético = 636.500 - 143.000 = 493.500 MJ	

Fuente: F. Gómez Gallardo.

## PROCESOS DE TRANSFORMACION DE LA BIOMASA

### PROCESOS DE TRANSFORMACION DE LA BIOMASA POR VIA SECA

Dentro de los procedimientos de transformación de la biomasa por vía seca, se va a tratar la combustión, la gasificación, la pirólisis y la licuefacción.

Estas técnicas de aprovechamiento energético, en su mayor parte, no son nuevas, sino que el hombre las ha estado utilizando a lo largo de la historia. Sin embargo, en este siglo y muy especialmente a partir de los años setenta han progresado extraordinariamente, de forma que existe en la actualidad una alta tecnología, que aplicada a la biomasa, la hace resurgir con miras energéticas.

#### Combustión

La combustión directa de la biomasa es el sistema más elemental y, por supuesto, más antiguo de recuperación energética de la misma. Su eficiencia energética, al igual que el resto de los métodos térmicos, está muy condicionada por el contenido de humedad, que, aun cuando está seca, tiene todavía de un 15 a un 20%. No se espera que la aportación energética, a través de procesos térmicos, en los próximos veinte años sea superior al 3% de la demanda total, aunque más del 2% se obtendrá por combustión.

Se entiende por combustión, la oxidación completa de la materia. La combustión de la biomasa puede caracterizarse por la siguiente reacción química:

Exceso de oxígeno + celulosa + hemicelulosa + lignina + minerales  
 $\rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{cenizas} + \text{calor}$

Esta reacción es muy exotérmica y, a partir de ella, se puede definir el poder calorífico inferior (PCI) y el poder calorífico superior (PCS) de cualquier combustible (Ver Cuadro 10).

Los materiales utilizables como combustibles deben tener un poder calorífico superior a las 1.200 Kcal/kg y

—Comparación entre el cultivo de maíz en España y EE. UU. (ver Cuadro 9).

Concepto	Unidades productivas por ha		Valoración energética: Kcal. 10 <sup>2</sup>	
	España	USA	España	USA
<b>Consumos (inputs)</b>				
Mano de obra . . . . .	128 h.	25 h.	70,4	12,7
Equipo agrícola . . . . .	116 Kg.	500 Kg.	278,4	1.050,0
Carburantes . . . . .	115 l.	217 l.	1.100,0	1.977,0
N . . . . .	60 Kg.	125 Kg.	1.128,0	2.350,0
Abonos Ph . . . . .	30 Kg.	40 Kg.	146,0	117,0
K . . . . .	21 Kg.	70 Kg.	47,0	157,0
Semillas . . . . .	24 Kg.	30 Kg.	125,0	157,0
Insecticidas . . . . .	1	1	27,0	27,0
Herbicidas . . . . .	1	1	27,0	27,0
Riego . . . . .	—	—	2.250,0	85,0
Secado . . . . .	—	—	80,0	125,0
Energía eléctrica . . . . .	—	—	4,0	75,0
Transportes y otros . . . . .	—	—	175,0	175,0
Total soporte energético (a) . . . . .			5.457,8	6.334,7
<b>Producciones (outputs)</b>				
Rendimiento en grano . . . . .	5 TM	5 TM	20.000,0	20.000,0
Rendimiento en paja . . . . .	10 TM	10 TM	30.000,0	30.000,0
Total energía producida (b) . . . . .			50.000,0	50.000,0
Balance neto: b-a . . . . .			44.542,2	43.665,3
Rendimiento energético: b/a . . . . .			9,16	7,89

Cuadro 9. Balance energético del cultivo de maíz-grano en el Valle del Ebro y en el "corn-belt" norteamericano.

Fuente: de Miguel, A.

Materia seca	PCI (Termias) Tonelada	PCs (Tep/Tonelada de producto seco)
Paja de cereales . . . . .	4.185	0,42
Carbón de madera . . . . .	7.500	0,75
Antracita . . . . .	8.000	0,8
Metano . . . . .	12.000	1,2
Butano . . . . .	11.010	1
Propano . . . . .	10.920	1
Gasolina normal . . . . .	10.500	1
Gasoil . . . . .	10.000	1
Metanol . . . . .	4.700	0,47
Etanol . . . . .	6.400	0,64

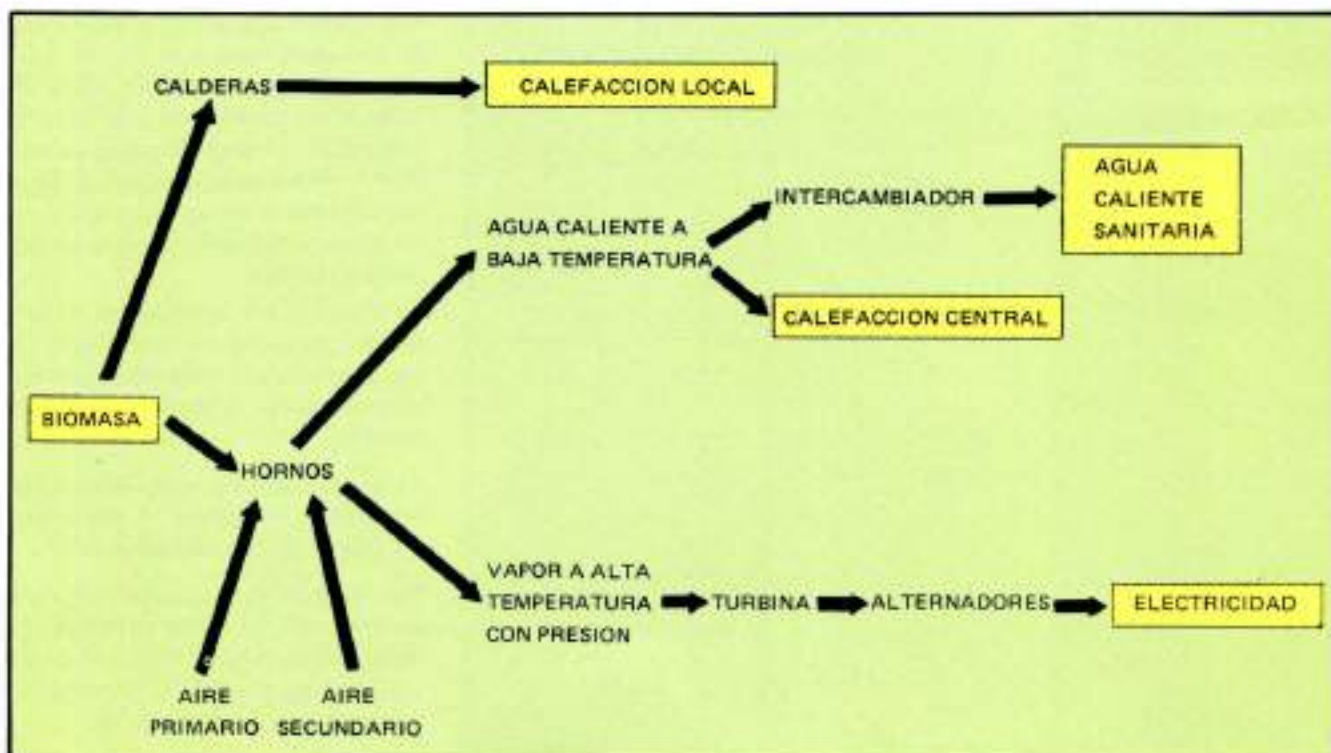
Cuadro 10. Poder calorífico de algunos productos.

Fuente: P.A. Jayet, J.C. Sourie.

contenidos no elevados de azufre, cloro y flúor. Estos materiales pueden generarse en zonas rurales (madera, residuos de poda, restos de cosechas, estiércol y cultivos energéticos), en la industria forestal (corteza, serrín, astillas y otros residuos de los aserraderos y fábricas de pulpa de madera) y en zonas urbanas (residuos sólidos urbanos y aguas residuales industriales).

La combustión se puede realizar en unidades energéticas que constan de: horno, equipo de recuperación de calor (caldera) y sistema para hacer uso de la energía recuperada (red de conducción de vapor, turbo generador, etc.).

La energía obtenida puede destinarse a producción de calor, en forma de agua o de aire caliente, para uso



Cuadro 11. Aprovechamiento energético de la biomasa mediante combustión.

Fuente: P. A. Jayet, J. C. Sourie.

doméstico o industrial, calefacción, desecado del lodo de las plantas de depuración de aguas negras, etc. y a producción de electricidad (Ver Cuadro 11).

Las innovaciones en este campo tienen su mayor virtualidad, no en el proceso, como es lógico, sino en los equipos y nuevas tecnologías que permiten la obtención directa de electricidad o de vapor, o la conjunta de ambas, adecuando los equipos a los objetivos y a las materias primas disponibles.

En general, el aire de combustión interviene a dos niveles (Figura 1). El aire primario asegura la carbonización y gasificación del producto, mientras que el aire secundario permite la combustión de los gases producidos. En general, a partir de ciertas dimensiones (30 termias/hora), debe existir una ventilación.

En el caso particular de la biomasa, las dificultades de empleo se presentan en el almacenamiento y en la automatización de la carga. Por otra parte, los problemas más difíciles de resolver son los de engrase (alquitranes) y de bloqueo (aglomeración de cenizas en fusión).

En U.S.A. existen ya cerca de una decena de centrales de capacidad comprendida entre 10 y 15 MW que queman residuos forestales o de serrerías y virutas de madera en mezcla con fuel, en proporción del 75% y 25% respectivamente, sin que el contenido de humedad en el material combustible supere el 60%, pues de lo contrario el aporte energético de la biomasa seca es inferior al requerido para la vaporización del agua. La eficiencia térmica del proceso es baja, pues a pesar de que se emplean excesos de aire de combustión de sólo el 25% sobre el teórico, sobre la base de una humedad del 50%, los rendimientos de recuperación energética oscilan entre el 20%

y 22%, aunque excepcionalmente parece que se han llegado a alcanzar niveles del 30%.

### Gasificación

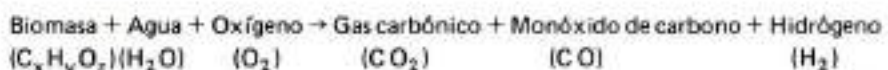
Bajo el epígrafe de gasificación se recogen todos aquellos procesos que llevan implícita una combustión en defecto de oxígeno, con producción de CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones de proceso. Puede decirse que es una tecnología muy semejante a la de gasificación del carbón, con algunas ventajas y, también, inconvenientes. Entre las ventajas, están los menores requerimientos de oxígeno, que en parte es aportado por las biomásas, y el mínimo contenido de azufre; entre los inconvenientes está la menor producción de gas (H<sub>2</sub> + CO) a causa, lógicamente, del más bajo contenido en carbono.

Pensando en la utilización de residuos para gasificación, hay que tener en cuenta que la estequiometría del proceso varía con la composición elemental de los mismos. A continuación se incluye, sobre base seca, las relaciones C/H/O, más frecuentes, para tres tipos de residuos: los residuos sólidos urbanos (R.S.U.), los agrícolas y los forestales.

R.S.U. . . . . .	C H <sub>1,68</sub> O <sub>0,61</sub>
Residuos agrícolas. . . . .	C H <sub>1,47</sub> O <sub>0,68</sub>
Residuo forestal . . . . .	C H <sub>1,27</sub> O <sub>0,83</sub>

La gasificación, frente a la combustión, se puede presentar como una oxidación total o parcial que permite la producción de una mezcla gaseosa reductora (monóxido de carbono e hidrógeno).

La química de la gasificación se basa en diversas reacciones. La combinación de estos equilibrios, para una biomasa determinada, se puede representar de la siguiente forma:



### COMBUSTION ASCENDENTE



### COMBUSTION HORIZONTAL



*Este sistema permite el paso de los gases combustibles a través de la brasa, asegurando una mejor combustión.*

### COMBUSTION INVERSA



- Ⓒ CAMARA DE COMBUSTION
- ⒫ AIRE PRIMARIO
- ⒮ AIRE SECUNDARIO
- Ⓒ CENIZAS

*Las llamas se desarrollan por debajo de la parrilla.*

*Figura 1. Diversos sistemas de combustión  
Fuente: P. A. Jayat.*

La temperatura es un factor importante. Para obtener un buen rendimiento de la mezcla ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) es necesaria una temperatura mínima de 700 a 800°C. Para evitar los problemas tecnológicos debidos a la fusión y a la aglomeración de cenizas se impone una temperatura máxima.

La gasificación es frecuentemente parcial: aparecen materiales no consumidos (partículas de carbono, alquitranes...) pudiendo ser el origen de cierta contaminación.

La mezcla obtenida se denomina gas pobre: del orden de 1 termia/m<sup>3</sup>, en general, para una gasificación con aire. El aporte de agua es necesario si se quiere enriquecer el gas en hidrógeno, produciendo I.B.G. (gas de poder calorífico medio) o G.N.S. (gas natural sintético) y a partir de éste la síntesis catalítica del metanol (Cuadro 12).

El gas de gasógeno se obtiene mediante una combustión incompleta de un combustible sólido (como por ejemplo, carbón, leña o residuos

agricolas con un contenido de humedad inferior al 20%), obtenida haciendo pasar a gran velocidad una pequeña cantidad de aire a través de una gran masa en combustión.

El oxígeno del aire quema el carbón proporcionando  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ ; este último se reduce a su vez a  $\text{CO}$  en contacto con la masa incandescente. Por su parte, el vapor de agua se disocia produciendo  $\text{H}_2$  y liberando  $\text{O}_2$  que se combina con el carbón para producir más  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ . También se obtienen hidrocarburos (principalmente metano) y por emplearse aire existe un porcentaje elevado de  $\text{N}_2$ .

Como resultado, se obtiene un gas denominado gas de gasógeno o gas pobre, debido a su reducido poder calorífico (4.500-5.600 KJ/m<sup>3</sup>).

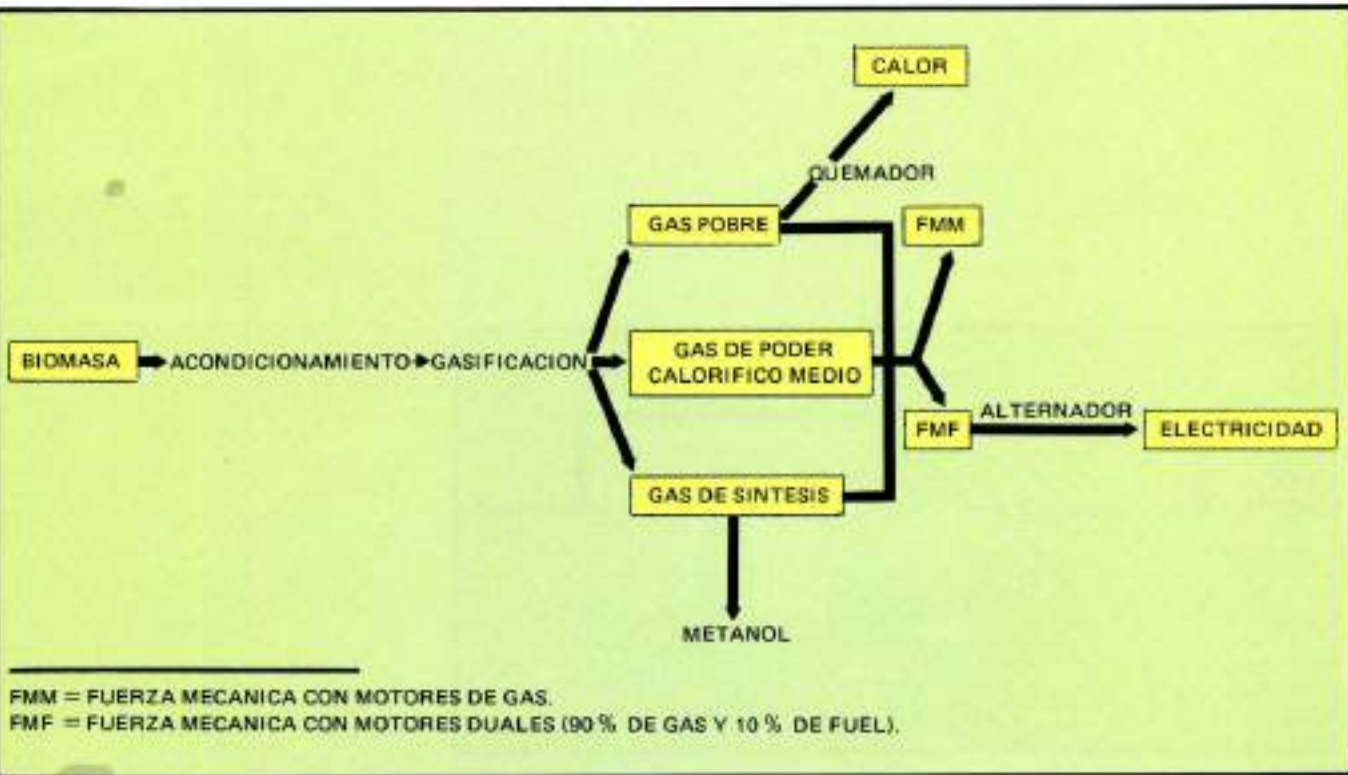
La corriente gaseosa de gasificación, además de los anteriores componentes, contiene  $\text{CH}_4$  y  $\text{C}_2\text{H}_6$  y pequeñas cantidades de  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{HCl}$ . Asimismo, arrastra cenizas volantes y gotas de aceite que se separan por diferentes sistemas, aunque es frecuente el

empleo de un "scrubber" de agua y un precipitador electrostático. Para la depuración de los gases ácidos, en especial el  $\text{H}_2\text{S}$ , existen diferentes alternativas, aunque las exigencias de pureza están en función del destino que posteriormente se le vaya a dar al gas obtenido. Cuando se trata de obtener G.N.S. o I.B.G., basta con fijarlo en un lecho de  $\text{ZnO}$ .

Cuando se destina a gas de síntesis de metanol, se precisa un tratamiento previo con metanol que actúa como adsorbente líquido y reduce el contenido de  $\text{H}_2\text{S}$  a 1 p.p.m., para que al pasar después por el  $\text{ZnO}$  se rebaje hasta 0,2 p.p.m.

Con el proceso descrito se llega esencialmente a I.B.G., quizá con el único matiz de que el gasificador trabaja a 20 atm, que es suficiente para ser enviado a una distancia de 30 a 50 km. El gas tiene un poder calorífico de unas 2.300 Kcal/m<sup>3</sup>, a causa de su contenido en  $\text{CO}_2$ .

La obtención de G.N.S. requiere realizar la gasificación a unas 35 atm y la



Cuadro 12. La gasificación como transformación de biomasa en energía.

conversión parcial del CO por vía catalítica en  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  es

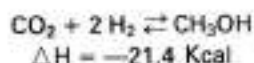


hasta conseguir que  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}$  queden en la proporción adecuada, para emplearlos en un proceso, también catalítico, de metanización según

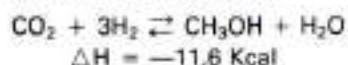


El  $\text{CO}_2$  se separa de la reacción de conversión para favorecer ésta, por tratamiento con carbonato sódico, eliminándose del orden del 25%. El que queda, junto con el formado en la reacción de conversión, se separa después, con carbonato potásico, obteniéndose un G.N.S. cuya capacidad calorífica es de unos 8.400 Kcal/ $\text{m}^3$ .

La obtención del metanol requiere también acondicionar la composición de gas obtenido en la gasificación a las exigencias de la estequiometría de la reacción de síntesis, que es



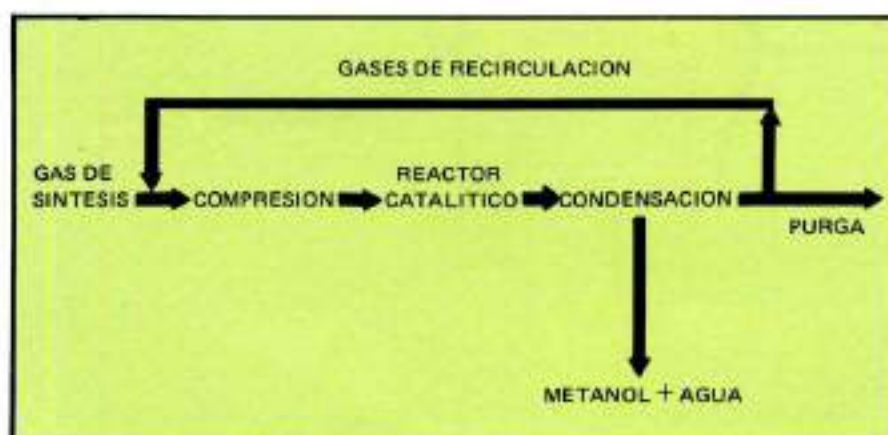
aunque simultáneamente, y en menor grado se produce también la hidrogenación del  $\text{CO}_2$ , según



Desde la perspectiva energética hay que destacar que ambas reacciones son exotérmicas, pues las posibilidades del proceso pueden depender de la mayor o menor recuperación de este calor.

Las reacciones se favorecen con el aumento de presión, siendo más sensible sobre el equilibrio el aumento de la presión parcial de hidrógeno que la de monóxido de carbono. Como la cinética del proceso es lenta y el incremento de temperatura afecta al rendimiento, se recurre al uso de catalizadores.

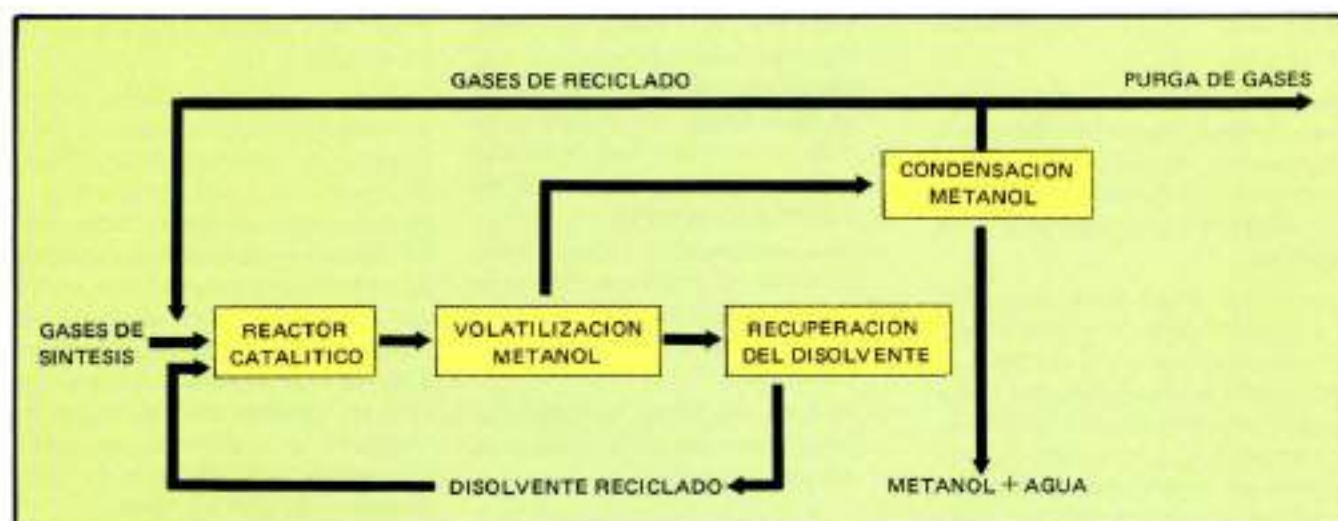
Hay diferentes procedimientos para obtener metanol, aunque en lo esencial sean todos muy análogos y respondan prácticamente al diagrama del cuadro 13.



Cuadro 13. Diagrama de la síntesis de metanol.

Fuente: S. Jiménez,





Cuadro 14. Síntesis del metanol en fase líquida.

Fuente: S. Jiménez.

Las diferencias entre los distintos métodos radican en el catalizador y en el diseño del reactor que, en general, es consecuencia del tipo y disposición del catalizador y de la forma de realizar la recuperación de calor, aspecto éste que no sólo es importante por lo que afecta al balance energético, sino también para controlar la temperatura del reactor de la que depende, en buena parte, el rendimiento del proceso.

En la actualidad, se intentan innovaciones del proceso basadas en la utilización de hidrocarburos en los que son solubles los gases de síntesis, los de reciclado y el metanol. El hidrocarburo, conteniendo los gases de síntesis y de reciclado, atraviesa el lecho catalítico y, a medida que se forma el metanol, queda disuelto en el propio hidrocarburo, del cual se separa a la salida del reactor por volatilización. El hidrocarburo, que no tiene por qué estar agotado en gases ni en metanol, se recircula a la fase de absorción. En el Cuadro 14 aparece un esquema del proceso. El disolvente favorece el contacto entre los reactivos y el catalizador, y constituye un vehículo ideal para eliminar el calor de reacción y para controlar la temperatura del reactor.

Los procedimientos de gasificación se pueden clasificar de dos maneras:

1. Considerando la naturaleza del lecho del combustible, se distinguen la gasificación en lecho fijo y la de arrastre o de lecho fluidizado, siendo estos procesos últimos los que tienen mayor capacidad de tratamiento por unidad de volumen porque ofrecen la ventaja de operar a presión.
2. Considerando los intercambios de calor con el medio exterior, se distinguen los siguientes procedimientos:
  - Procedimientos autotérmicos, donde el carácter exotérmico de la reacción permite compensar las pérdidas.
  - Procedimientos alotérmicos, que necesitan un aporte de calefacción externo o interno (agua, vapor, por ejemplo).
  - Procedimientos cíclicos, donde el reactor sufre alternativamente reacciones endotérmicas y exotérmicas.

La mayor parte de las gasificaciones convencionales requieren un material de tamaño de partícula homogéneo, a fin de que pueda garantizarse la constancia de la gasificación, y

que no presenten un espectro de densidad amplio para evitar segregaciones que puedan ser motivo de acumulación de sólidos o de arrastres excesivos.

Actualmente se están diseñando varios gasificadores de gas de mediano (I.B.G.) y alto valor energético (G.N.S.) para ser utilizados, sobre todo, con biomasa leñosa.

## Pirólisis

### Pirólisis-carbonización

La pirólisis es una descomposición térmica de moléculas orgánicas complejas, en ausencia de oxígeno.

La propia concepción de la pirólisis exige un aporte térmico que, aunque puede tener diferentes orígenes, parece lógico recurrir al del mismo material que se piroliza, lo que comporta el que toda pirólisis lleve implícita una combustión de parte de la materia prima, previa a la misma.

La naturaleza y composición de los productos finales de la pirólisis dependen de la naturaleza del combustible primario, de la temperatura, de la presión y de los tiempos de retención del producto en el reactor, ya

que en él se producen un gran número de reacciones.

Aunque la pirólisis es una tecnología muy antigua (fabricación de carbón de madera), no se conoce aún en profundidad la química de las sucesivas reacciones que intervienen en el proceso.

Los productos que se investigan hoy en día para desarrollar esta técnica son esencialmente los residuos urbanos y los subproductos, tanto agrícolas como forestales. El combustible primario está asegurado en estos últimos por la celulosa, hemicelulosa y lignina que constituyen la materia vegetal.

Los estudios de los mecanismos de la pirólisis se han llevado a cabo fundamentalmente a partir de análisis térmicos diferenciales (que dan la característica endo o exotérmica en función de la temperatura) y de análisis termogravimétricos (pérdidas de peso en función de la temperatura).

Y. Schwob distingue cuatro periodos o etapas de la pirólisis:

— Pérdidas de agua y de otros productos volátiles hasta los 200°C.

— Entre los 200 y 250°C, los constituyentes menos estables se descomponen con desprendimientos de agua, de gas carbónico y de óxido de carbono. Los destilados acuosos se enriquecen en ácido acético y en metanol.

— Una reacción exotérmica interviene hacia los 275°C que recalienta la masa hasta 300-350°C. El desprendimiento de productos es al máximo.

— Después de 300°C, la destilación (alquitranes esencialmente) es de nuevo endotérmica.

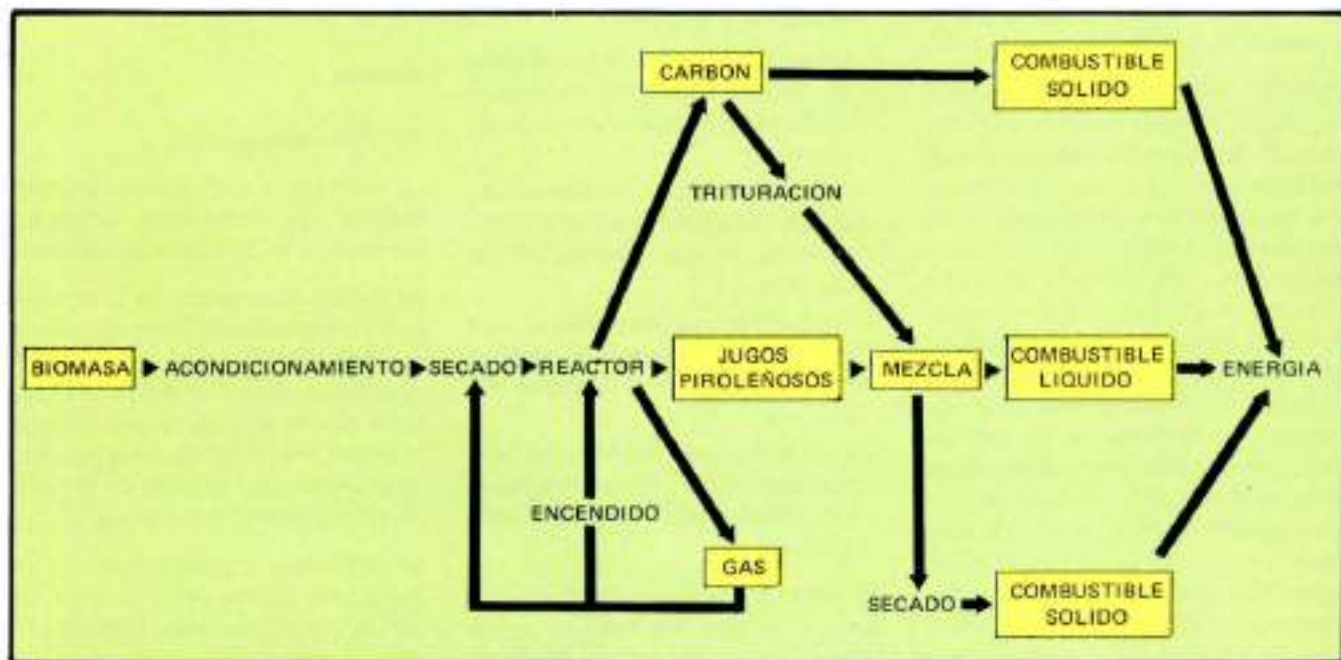
En toda pirólisis, se generan, por lo tanto, unos productos gaseosos combustibles, otros líquidos, igualmente combustibles, y carbón vegetal (Cuadro 15). Su proporción depende de las condiciones del proceso y de las características del material a pirolizar, muy en especial del contenido de humedad. De aquí que las directrices de tratamiento más generalizadas se orienten hacia la obtención de dos de los tres productos combustibles: en general gases y sólidos o líquidos y sólidos, aunque es frecuente que la obtención de gases esté situada en un estadio inter-

medio para producir otros productos de síntesis.

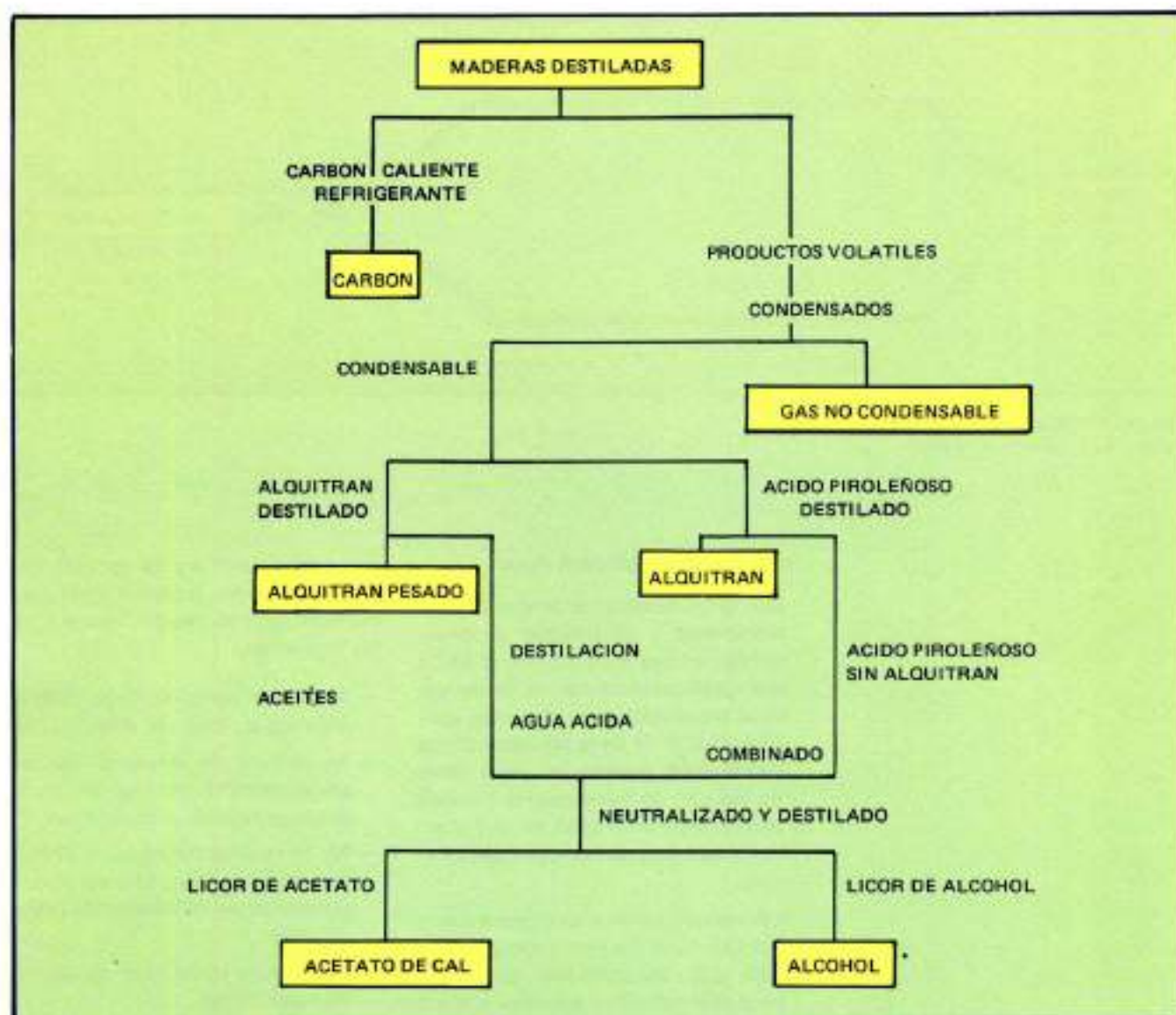
La pirólisis puede realizarse dentro de unos intervalos de temperatura y tiempo muy variables, cuya adecuada elección depende del objeto pretendido y de la naturaleza de la materia prima, en especial de su contenido en humedad y en carbono, por lo que estos parámetros afectan a las reacciones anteriores de gasificación y conversión. A medida que aumenta la temperatura de pirólisis, se incrementa la proporción de gases producidos y disminuye la de combustibles líquidos y sólidos.

La fracción gaseosa está constituida por hidrógeno, metano, monóxido de carbono, etileno y etano, aunque su composición cuantitativa varía también de forma muy sustancial con la temperatura.

En el caso de producción de combustibles líquidos y carbón vegetal, se requiere una alimentación con humedad baja y constante, para lo cual se realiza una desecación previa utilizando los gases de la propia pirólisis, con lo que se genera un vapor aprovechable "in situ". Si la producción de gases fuera superior a la que se



Cuadro 15. La pirólisis.  
Fuente: P. A. Jeyet, J. C. Sourie.



Cuadro 16. Productos de la pirólisis de la madera.

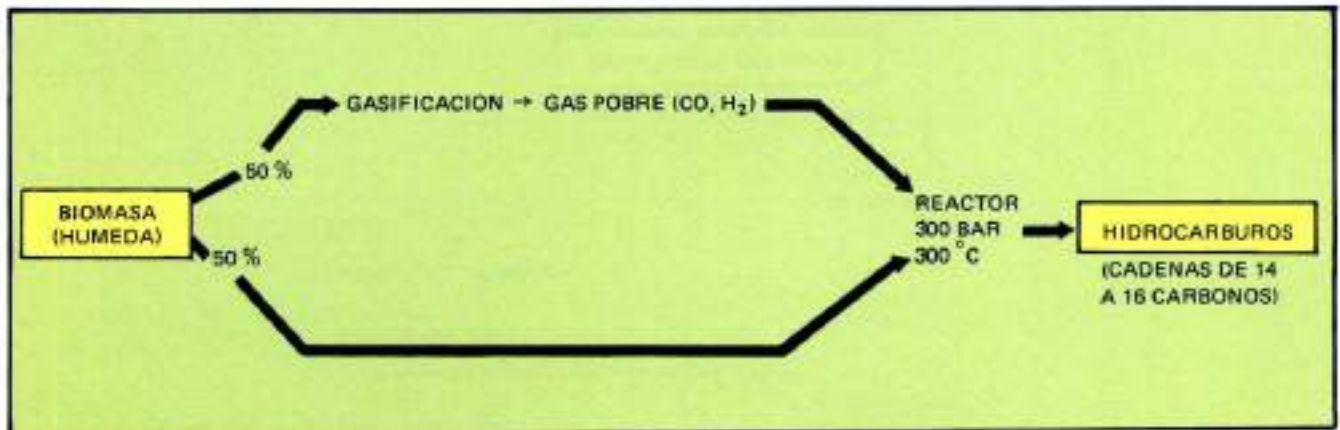
Fuente: P. A. Jayet.

necesita para el secado de la biomasa, aquéllos se emplean también como combustible de pirólisis, lo que permite aumentar la producción de carbón vegetal.

Los líquidos combustibles producidos se utilizan, en gran parte, para mezclarlos con la biomasa seca, lo que permite favorecer el proceso de pirólisis y disminuir el contenido de cenizas en los líquidos combustibles salientes que, en todo caso, deben filtrarse antes de ser reciclados. La proporción entre los líquidos combustibles reciclados y los retirados es del orden de 20:1.

Por cada tonelada de biomasa se producen unas 0,2 TM de líquidos y 0,25 TM de carbón vegetal. Los primeros tienen un contenido de agua del orden del 12% siendo su poder calorífico superior del orden de 6.700 Kcal/kg. El contenido de agua en el carbón vegetal es de 1 a 2% y tiene un poder calorífico superior de unas 7.300 Kcal/kg.

La química de la madera ha progresado en el análisis de los jugos piroleñosos, pero no se conoce aún la composición precisa de los mismos (Cuadro 16).



Quadro 17. Hidrolícuación de la celulosa.  
Fuente: P. A. Jayet, J. C. Sourie.

#### Gasificación o pirólisis-flash

Con el fin de evitar la producción de alquitranes y de mejorar el rendimiento en gas o de orientarse hacia una gasificación total, se investiga, en la actualidad, en la elevación sensible (1.000° C) de la temperatura de combustión durante un corto lapso de tiempo, de forma que la pirólisis pueda llegar a ser total, en detrimento del carbón y de los jugos piroleñosos.

Las investigaciones en curso sobre la pirólisis-flash tienden a una gasificación total, obteniéndose gases con un poder calorífico superior a 4 y 5 termias/m<sup>3</sup>. Utilizando este principio, se están construyendo un cierto tipo de calderas (procedimiento Tabel) donde se suceden la pirólisis (flash), la gasificación y la combustión con buenos rendimientos.

#### Hidrolícuación de la celulosa

Bajo una fuerte presión (300 atm) en medio hidrogenado o en presencia de una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono y a alta temperatura (300°C), la biomasa, esencialmente la celulosa, se transforma en hidrocarburos líquidos (Quadro 17).

La mezcla gaseosa (CO, H<sub>2</sub>) puede obtenerse también a partir de la biomasa por gasificación y posterior enriquecimiento en hidrógeno.

El proceso pirolítico en general, como se ha visto, presenta múltiples ventajas, que se pueden resumir en las siguientes:

- Reduce el volumen de la materia orgánica en más del 90%.
- Transforma la mayoría de los compuestos orgánicos en compuestos de interés económico.
- No contamina las aguas ni el medio ambiente, por lo cual puede ser usado en el interior de áreas urbanas.
- Los costos estimados de operación son bajos.
- El espacio requerido es semejante al utilizado en incineración, y mucho menor que el necesario para compostaje.
- Se producen combustibles que se pueden usar en hornos y quemadores convencionales, a pesar de que su poder calorífico es menor que el de los combustibles tradicionales fósiles.

#### Lícuación

La lícuación o hidrogenación catalítica es un proceso térmico que, a altas temperaturas y presiones y en presencia de catalizadores, produce líquidos combustibles.

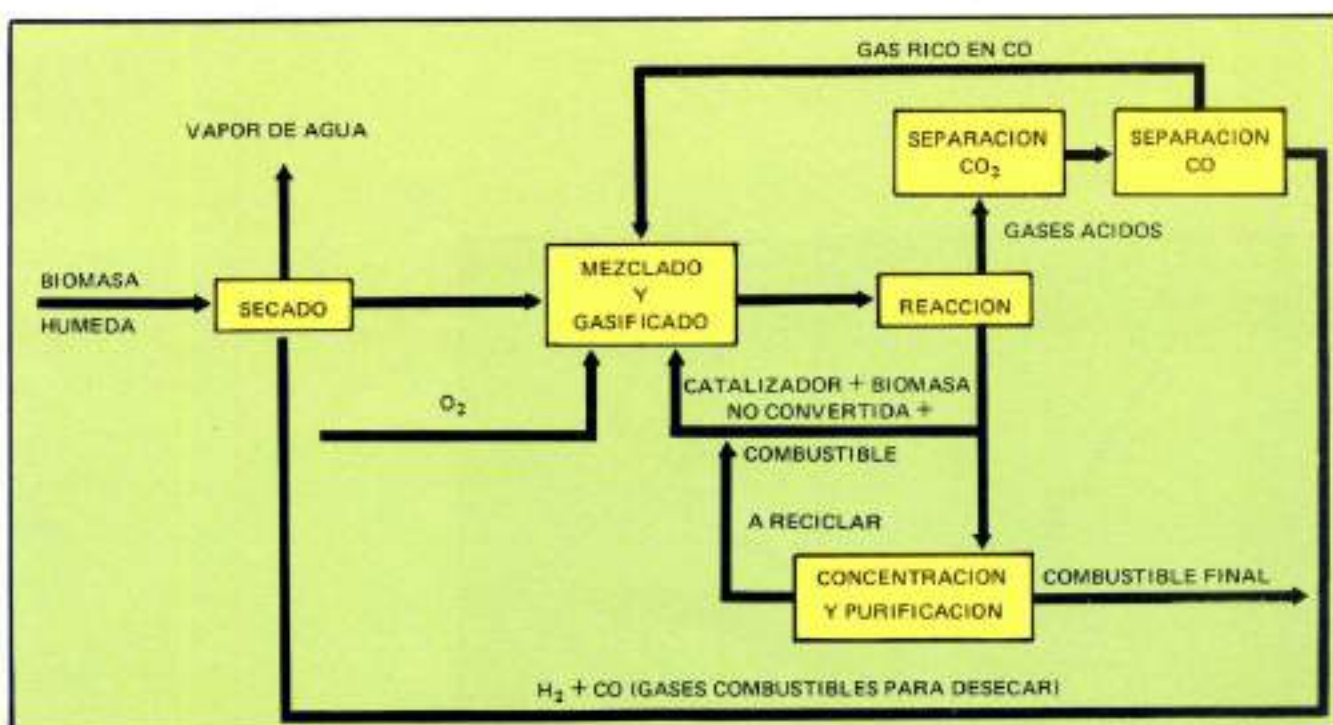
Los métodos de licuefacción del carbón han inspirado otro tipo de métodos de carácter térmico para la licuefacción de biomasa, a pesar de que el horizonte de su desarrollo esté aún demasiado difuso. Sin embargo, hay que destacar que, aunque estén inspirados en unos objetivos relativamente semejantes a los del carbón, son, en su esencia, sustancialmente distintos en su metodología, pues, mientras la obtención de hidrocarburos del carbón se basa en una hidrogenación catalítica, la licuefacción de biomasa lo hace en una desoxigenación, igualmente catalítica. Este hecho cambia radicalmente la concepción del proceso, ya que la desoxigenación puede realizarse con CO generado en el propio tratamiento térmico.

El esquema del proceso se recoge en el Cuadro 18. Puede observarse que la biomasa se seca para que el proceso se realice a humedad constante, evitando así reacciones parásitas de conversión del vapor de agua, que

modificarían tanto el rendimiento en combustibles líquidos como la cantidad y composición de los gases. A esta operación se destinan los gases ricos en  $H_2 + CO$ , procedentes de la separación de gases.

En el proceso se generan unos gases ácidos de los que, en primer lugar, se separa  $CO_2$  y después, por un doble tratamiento criogénico y con tamices moleculares, se separa el CO, para reciclar y el  $H_2 + CO$  que se emplea en el secado de la biomasa. La suspensión de catalizador, biomasa no convertida y combustible se divide en dos corrientes, una de las cuales se recicla directamente, y la otra se purifica y concentra para separar, por un lado, el combustible líquido de producción y, por otro, la suspensión enriquecida en sólidos que se une a la corriente de reciclado.

El combustible obtenido tiene un poder calorífico de unas 7.700 Kcal/kg y equivale a una recuperación energética del 50 al 55 %.



Cuadro 18. Esquema de la hidrogenación catalítica.  
Fuente: S. Jiménez.

## PROCESOS DE BIOCONVERSION

### Producción de bioalcohol

Mediante la fermentación de la biomasa se obtiene el alcohol, fuente de energía renovable.

Los tipos de biomasa a partir de los cuales se puede obtener alcohol son:

- Azucaradas: mostos y jugos de frutas; remolachas y caña de azúcar, y sorgo y maíz azucarado.
- Amiláceas: cereales y tubérculos.
- Celulósicos: madera y residuos.

Los celulósicos presentan un gran interés para el futuro de la producción biológica del alcohol industrial. La celulosa es un compuesto hidrocarbonado, renovable biológicamente, el más abundante presente en residuos y subproductos forestales, agrícolas y agro-alimentarios, y se encuentra en un 40 a 60% de los residuos urbanos. Su interés como combustible líquido no radica únicamente en la situación energética actual, sino también en el plano descontaminante cada vez más importante.

Según Spano, la recolección anual de maderas está en 1 billón de TM elevándose la recuperación de residuos al 24% de esta producción. Esto significaría obtener 120 millones de TM de glucosa, convertibles en 187 millones de barriles de etanol. Asimismo, podría obtenerse 524 millones de barriles de alcohol a partir de la celulosa contenida en los residuos ganaderos, agro-alimentarios y urbanos producidos anualmente en EEUU.

Se ha estimado que 200.000 TM de paja permitiría obtener 50.000 TM de alcohol puro y 20.000 TM de furfural. Asimismo, de 1 TM de residuos de papel pueden obtenerse 0,5 TM de glucosa, que por fermentación, sería 295 l de alcohol. Aunque estas producciones son técnicamente posibles, económicamente es muy discutible, dependiendo realmente a más o menos largo plazo de las mejoras técnicas y de la evolución de los costos de las fuentes clásicas de energía.

El etanol se emplea en la producción de bebidas alcohólicas, como producto químico, como materia prima

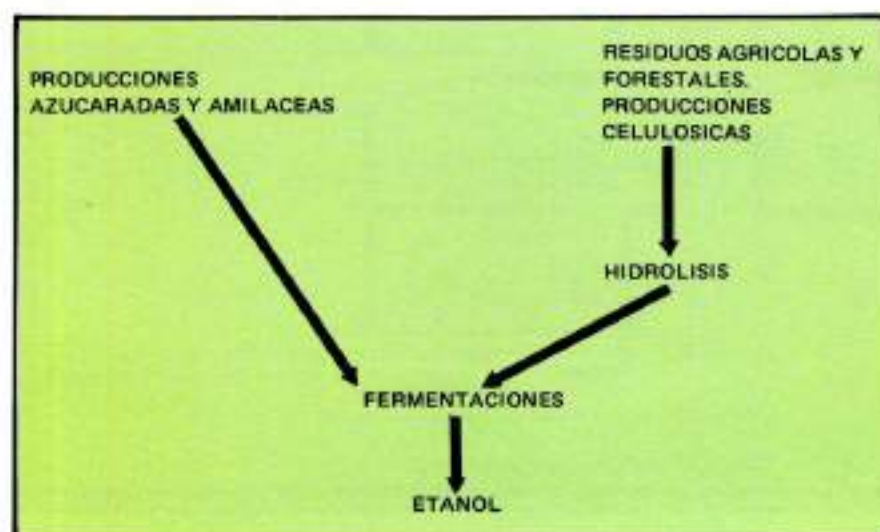
para producir otros productos químicos y como sustituyente del petróleo o sus derivados (combustible para calderas, sustituto de la gasolina y de combustible diesel). Su mayor importancia radica en la sustitución de la gasolina, bien total o parcialmente.

Los procesos para la transformación de la biomasa en etanol son los siguientes:

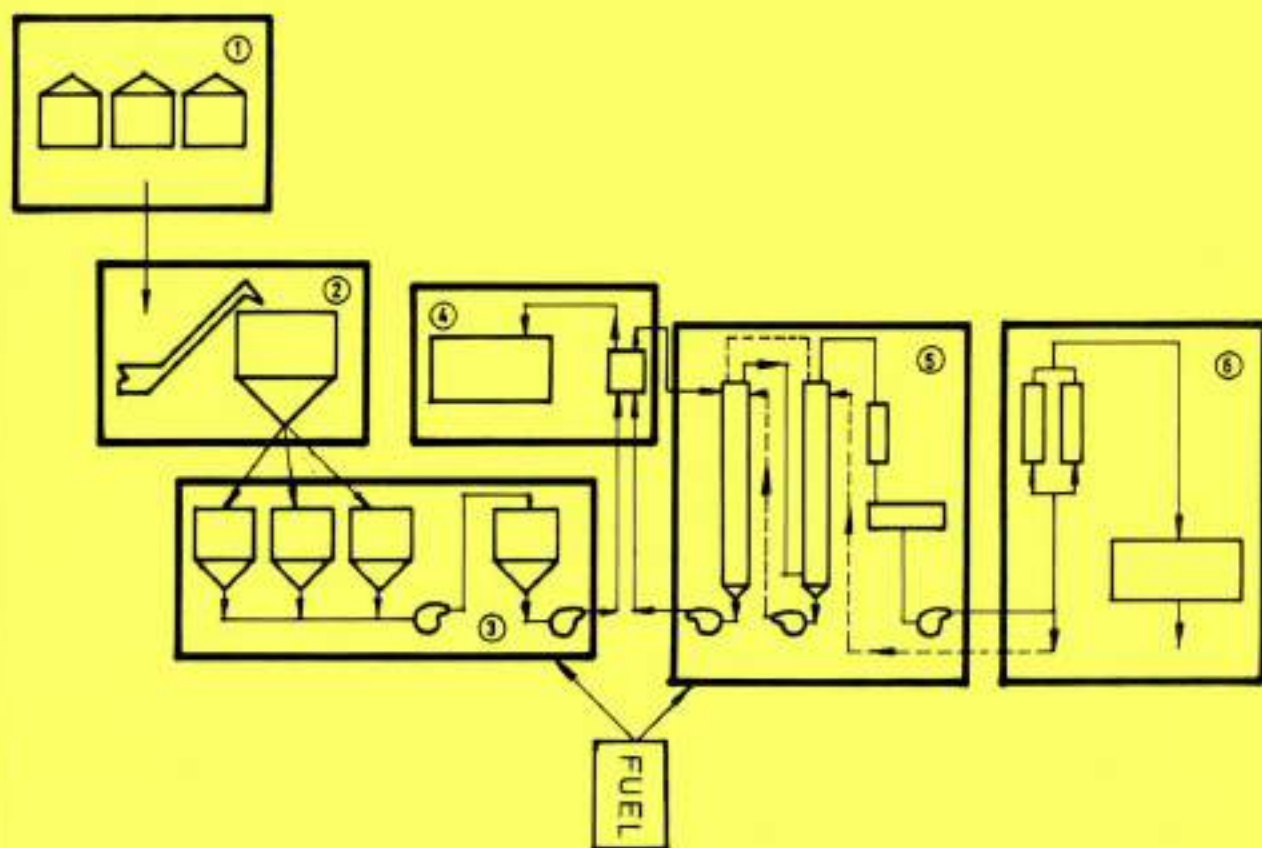
- Preparación: tratamientos necesarios para extraer el azúcar de la biomasa. Tiene por objeto obtener una serie de materias hidrocarbonadas en medio acuoso, y crear un medio adecuado para la fermentación (Fuentes de carbono y nitrógeno, eliminación de sustancias tóxicas, pH óptimo 4,5 a 5, concentraciones iniciales óptimas de azúcares fermentables).

Las celulosas y hemicelulosas son glúcidos de forma más compleja y polimerizada por lo que es necesario realizar una hidrólisis ácida o enzimática.

- Fermentación: transformación de azúcar en alcohol y gas carbónico



Quadro 19. Esquema de la producción de etanol.



- ① ALMACEN
- ② TRITURACION
- ③ FERMENTACION
- ④ TRATAMIENTOS Y ALMACENAJE DE VINAZAS
- ⑤ DESTILACION
- ⑥ DESHIDRACION

Figura 2. Esquema de producción industrial de etanol.  
Fuente: Jesús Pérez Sarmiento.

en condiciones anaerobias. Los microorganismos capaces de realizar más eficazmente la fermentación son las levaduras.

Existen aproximadamente unos cuarenta géneros de levaduras, muchas de ellas con capacidad fermentativa: *Candida*, *Kluyveromyces*, *Saccharomyces*, etcétera.

— Destilación: concentración de alcohol obtenido de la fermentación. Existen dos tipos de destilación:

a) Discontinua: se realiza en alambique, quedando en la actualidad reducida a escala de laboratorio.

b) Continua: propia para la industria. En este proceso de parte de concentraciones de 6-15% de alcohol, llegando hasta obtener concentraciones máximas de 96%, punto donde se encuentra el azeotropo. Por rectificación se obtiene el alcohol puro, perdiendo aldehidos, éteres y aceites málicos.

— Deshidratación: proceso para obtener alcohol absoluto rompiendo el azeotropo.

#### *Hidrólisis ácida de celulosa y hemicelulosas*

Es un método de preparación de la materia vegetal para la producción de alcohol. Consiste en la ruptura de las cadenas polioxigenadas.

Procedimientos industriales de hidrólisis:

— Procedimiento Schöller: con la ayuda de ácido sulfúrico diluido, baja presión y fuertes temperaturas (140 a 200°C)

— Procedimiento Bergius: utiliza el ácido clorhídrico concentrado en condiciones normales de temperatura y presión.

Estos procedimientos aseguran la transformación de la celulosa y de las hemicelulosas en una solución azucarada. Esta solución puede servir como sustrato para fermentaciones, mientras los residuos pueden servir como combustible.

A partir de 1 TM de madera se obtiene 0,65 TM de una solución azucarada 30%, y 0,33 TM de residuos. Para ello se necesitan 0,5 a 5 TM de vapor, 80 a 20 kWh, 5 a 10 m<sup>3</sup> de agua y gran cantidad de ácido.

Los inconvenientes son los siguientes:

— Aproximadamente el 30% de la producción de azúcar se pierde en el curso de la descomposición del sustrato.

— Gran consumo en energía calorífica.

— El material utilizado debe resistir la corrosión.

— Las impurezas que acompañan los residuos celulósicos reaccionan con los ácidos para dar subproductos indeseables.

Los procesos de hidrólisis ácida son actualmente los más utilizados para convertir en glucosa las materias primas celulósicas y hemicelulósicas.

#### *Hidrólisis enzimática de celulosa y hemicelulosas*

Esta técnica asegura buenos rendimientos y la melaza obtenida es de mejor calidad y composición y más constante que la obtenida a partir de la hidrólisis ácida.

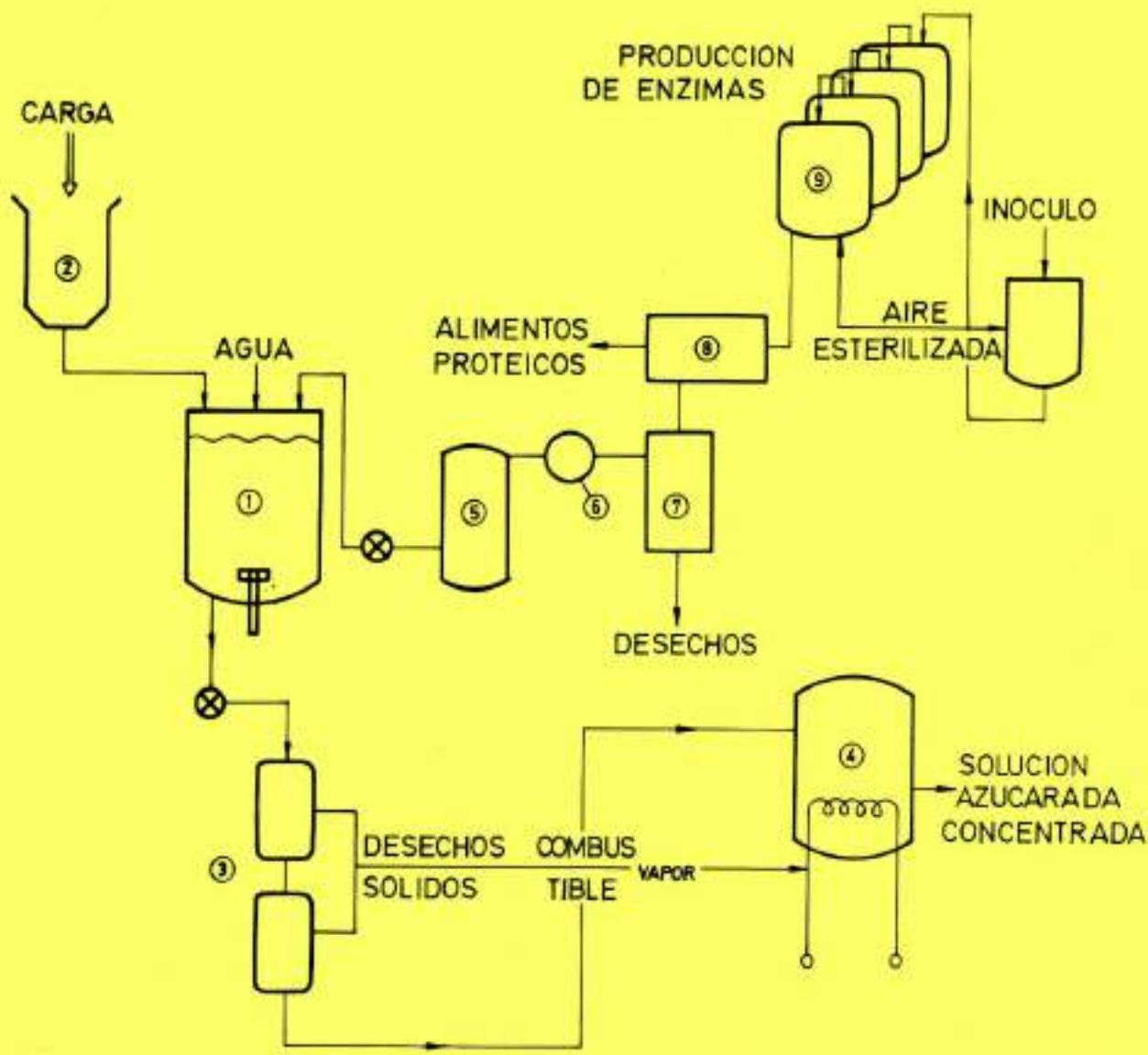
La hidrólisis enzimática es una mezcla compleja donde se distinguen dos factores, C<sub>1</sub> y C<sub>x</sub>. El mecanismo de degradación es:

Celulosa cristalina  $\xrightarrow{C_1}$  Celulosa modificada  $\xrightarrow{C_x}$  Oligosacáridos  $\xrightarrow{\text{Celobiasa}}$  Glucosa.

El factor C<sub>1</sub> efectúa una acción prehidrolítica sobre la celulosa cristalina, que la sensibiliza al ataque posterior del complejo C<sub>x</sub>. Esta actividad varía, sin embargo, en función de la celulosa y de los sustratos celulósicos empleados.

C<sub>x</sub> es una mezcla de endo y exo β 1-4 glucanasa, de celobiasa y aril-β glucosidasa. Su actividad depende del organismo que la sintetiza y del sustrato celulósico a tratar.





- |                         |                  |                      |
|-------------------------|------------------|----------------------|
| ① REACTOR DE HIDROLISIS | ④ EVAPORACION    | ⑦ ULTRAFILTRACION    |
| ② PULVERIZACION         | ⑤ PRECONCENTRADO | ⑧ FILTROS            |
| ③ FILTRACION            | ⑥ CONCENTRADO    | ⑨ REACTOR ENZIMATICO |

Figura 3. Instalación industrial de hidrólisis enzimática  
Fuente: A. Demeyer, F. Jacob, M. Jay, G. Menguy, J. Perrier.

La producción industrial de celulasa se hace a partir de organismos celolíticos; éstos son, sobre todo, hongos *Aspergillus* y *Trichoderma*.

La hidrólisis enzimática se efectúa generalmente en discontinuo o en semidiscontinuo a temperatura de 50° C y pH de 4,8 a 5, con un tiempo de duración del orden de una a dos horas. Es posible reciclar la celulasa. Los rendimientos de sacarización se encuentran entre 33 a 77% para un tiempo de reacción de 24 h y de 80 a 85% en tiempos superiores.

Existe aún una serie de problemas a resolver para que la hidrólisis enzimática resulte viable económicamente, como son:

- Tiempo de reacción bastante alto (30 a 40 horas) para obtener una buena conversión.
- Las instalaciones de producción de enzimas son muy costosas.
- Hay pérdida importante de enzimas a pesar de la recuperación parcial por ultrafiltración y adsorción.

Para reducir estos problemas es necesario:

- Encontrar pretratamientos eficaces para reducir el consumo energético.
- Encontrar por mejora genética nuevas cepas para mejorar la productividad enzimática.
- Perfeccionar las condiciones de hidrólisis y crear las salidas comerciales para la producción obtenida.
- Optimizar los procesos de cultivo de microorganismos celolíticos.

#### *Sustitución de gasolina por etanol*

El etanol, al ser un combustible concentrado y líquido, constituye un sustituto ideal de la gasolina. (Ver Cuadro 20).

En una mezcla que puede llegar hasta el 20% de alcohol, no es necesario hacer ningún cambio en el motor de combustión, pero son necesarias ciertas modificaciones para que funcionen con el 100% de etanol.

Propiedades de la gasolina y etanol		
	Gasolina	Etanol
Punto de fusión °C.	- 53,5	- 113,89
Punto de ebullición °C.	26,6 - 26,7	78,34
Densidad absoluta Kg/l	0,69 - 0,77	0,79
Densidad relativa	0,70 - 0,78	0,794
Solubilidad en el agua a 20° C. (ppm)	240	∞
Solubilidad del agua en 20° C. (ppm)	88	∞
Tensión superficial	—	23
Viscosidad a 20° C.	0,288	1,17
Índice de octano	95	106
Potencia calorífica superior Kcal/l	8,30	5,64
Potencia calorífica inferior Kcal/l	7,67	4,89
Relación aire/combustible	14,2 - 15,1	9,0
Resistencia específica	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$
Calor de vaporización Kcal/l	59,85	$2,25 \cdot 10^{-1}$
Coefficiente de expansión térmica (15° C. y 1 atm.)	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$

Cuadro 20. Sustitución de la gasolina por etanol.

El empleo del etanol como sustituto de la gasolina no es nuevo pues ya en el siglo pasado se pretendió que las primeras máquinas de combustión funcionaran con alcohol.

Durante la Primera Guerra Mundial se permitió el empleo de la mezcla gasolina-alcohol en Inglaterra. De 1920 a 1930 se extendió el uso a países como Argentina, Cuba, Japón, Nueva Zelanda, Filipinas, Sudáfrica y Suecia. En los años treinta, Chrysler Motor Corporation produce coches modificados que funcionan con el 100% de alcohol y la Internacional Harvester, camiones.

Durante la Segunda Guerra Mundial, es Alemania quien construye vehículos que funcionan con el alcohol obtenido de la patata. Después de la Segunda Guerra Mundial el abaratamiento del petróleo hace que el mundo base su fuente energética en este carburante.

Sólo a partir de los años 70 y principalmente debido a la crisis energética, se vuelve a pensar en la posibilidad del alcohol como carburante.

Así, Australia trabaja en la obtención

de alcohol a partir de eucalipto, aunque quizá el caso más sobresaliente es el de Brasil. Brasil importaba el 80% de petróleo que necesitaba. La crítica situación producida por el alza de los precios y el déficit crónico de la balanza de pagos, llevó al gobierno, junto con empresas privadas, a desarrollar una serie de proyectos para la obtención de energía a partir de biomasa (Programa Nacional de Alcohol, 1975). En el año 1977 la producción de caña de azúcar era de  $3 \times 10^6$  TM, siendo un millón directamente destinado a la producción de alcohol. A finales de 1979, la producción de etanol era de  $3,8 \times 10^6$  TM, pretendiendo el Plan producir  $10 \times 10^6$  TM de etanol en 1985.

En el Programa Nacional de Alcohol pueden encontrarse otros impactos positivos, como pueden ser su ventaja atmosférica (el etanol tiene una combustión relativamente limpia), desarrollar una industria de bienes de equipos, incentivar una industria química basada en el alcohol y contribuir a aminorar las disparidades de ingresos y regiones.

Según U. Stumph, del Centro de In-

investigaciones Aeroespaciales del Brasil, algunas de las modificaciones que hay que introducir al motor de combustión interna por gasolina para que funcione con alcohol son las siguientes: aumentar la proporción de compresión; cambiar el ritmo de ignición; enriquecer la mezcla de aire y combustible del carburador y precalentar el alcohol antes de introducirlo en la cámara de combustión, pues su temperatura de vaporización es superior a la gasolina.

Un motor que funciona con etanol es 18% más potente que un motor de gasolina, consumiendo sólo 1,4% de etanol más que de gasolina.

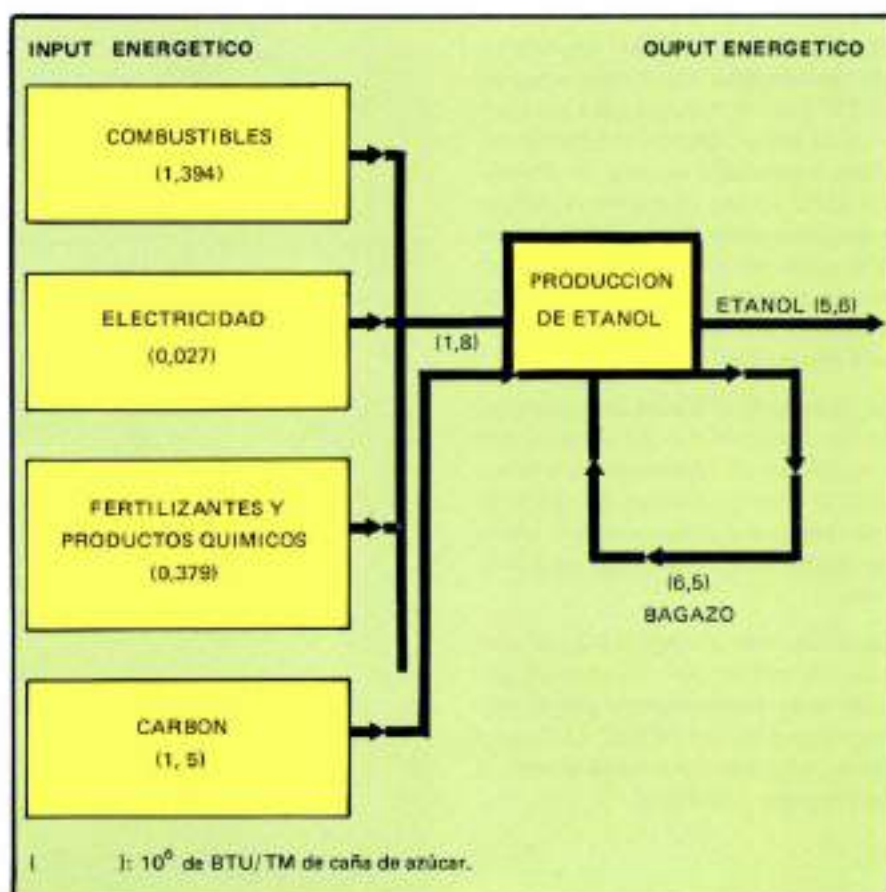
*Balances energéticos en la producción de etanol a partir de productos o residuos agrarios*

El balance energético depende prin-

cialmente del pretratamiento necesario para preparar el mosto. Las necesidades energéticas aumentan con la complejidad molecular de los glúcidos que forman la biomasa.

Los resultados están en función del tipo de biomasa utilizada para la producción de etanol:

- Biomasa azucarada. Como muestra el esquema, el balance energético de productos azucarados, como la caña de azúcar, resulta positivo debido a que no es necesario un pretratamiento para la obtención del alcohol. El bagazo puede emplearse como combustible en dicha producción (Cuadro 21).
- Amiláceas. Por ejemplo, a partir de la mandioca se pueden obtener 2 TM/ha/año de alcohol, mientras que el consumo energético es de 14,543 Kcal para sintetizar 1 kg de



Cuadro 21. Balance energético de la obtención de etanol a partir de la caña de azúcar. Fuente: Nicholas P. Cheremisinoff.

alcohol. El balance es deficitario en 7.488 Kcal/kg. Ahora bien, cabe la posibilidad de reducir este déficit con el empleo como combustible de los residuos de la producción, aunque su potencial energético es inferior al del bagazo. Los brasileños han estimado que se puede reducir por este método hasta el 50% de la energía necesaria, con lo que el balance podría ser positivo.

- Celulósicas. La paja y madera, por ejemplo, necesitan una sacarificación preliminar. La elección de los métodos de hidrólisis influyen de una manera muy importante sobre el balance energético.

La madera por hidrólisis ácida necesita 23.445 Kcal para hacer 1 kg de biocombustible, aunque el balance es deficitario en 16.340 Kcal/kg. Se puede reducir dicho déficit en 9.569 Kcal/kg si se utilizan los residuos de la transformación.

En el caso de hidrólisis enzimática las necesidades están evaluadas en 57.177 Kcal de energía para producir 1 kg de etanol, siendo el balance deficitario en 50.072 Kcal/kg. La diferencia entre ambos procesos es debido a que para obtener una fermentación adecuada mediante hidrólisis enzimática es necesaria una buena trituración y pulverización, además de una producción de enzimas.

Es de esperar una evolución positiva en lo concerniente a los balances energéticos de hidrólisis enzimática, debido a la posibilidad de emplear complejos enzimáticos susceptibles de degradar sin necesidad de pulverizar.

La producción energética en el proceso de producción de alcohol podría verse suplementada por el empleo como pienso de 0,07 kg de proteína de levadura por kg de etanol, lo que supone 1.268 Kcal.





### Fermentación anaerobia

La digestión anaerobia es uno de los procesos más frecuentemente utilizados por la naturaleza para descomponer la materia orgánica en sus componentes energéticos ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ) y fertilizantes (N, P, K) de forma espontánea.

Entre todos los mecanismos de biodegradación natural, la fermentación en ausencia de oxígeno constituye probablemente el primer signo de vida que hubo sobre nuestro planeta.

El interés de los científicos por la producción de gases combustibles se remonta al siglo XVIII, siendo Volta en 1776 quien identificó por primera vez el "gas de los pantanos". Posteriormente, Pasteur describió los primeros microorganismos anaerobios de la fermentación butírica, llegando a proponer la posibilidad de obtener biogás (metano, 60-70% y  $\text{CO}_2$ ) a partir del estiércol.

A principios del siglo XX, tanto en Asia como en Europa, fueron numerosas las experiencias que se realizaron tanto en laboratorios como en plantas piloto. La penuria energética sufrida por Alemania durante la Segunda Guerra Mundial determinó en este país un gran impulso en la construcción de instalaciones de fermentación metánica con vistas a la producción de un gas combustible (biogás) a partir de residuos ganaderos. Esta tecnología fue difuminándose al cesar las condiciones de escasez energética en Europa Occidental, reduciéndose su empleo hasta prácticamente desaparecer.

Al contrario que en Europa, en la India y en China se ha realizado en los últimos treinta años un gran esfuerzo para la instalación de digestores en comunidades rurales, conociendo todos estos proyectos un éxito sin precedentes. En ambos países, las materias primas son los excrementos animales y humanos, los desperdicios domésticos y algunos agrícolas.

Sin embargo, en los países industrializados el interés por esta tecnología ha estado motivado por los problemas de medio ambiente, derivados de la acumulación de aguas residuales industriales y urbanas. Han abundado estudios sobre la química, bioquímica y microbiología del proceso, llegándose con ellos a diseñar e implantar numerosas instalaciones de tratamiento de aguas.

A partir de la crisis energética de 1973 y como consecuencia del aumento de los precios del petróleo, la producción de un gas combustible mediante procesos de digestión anaerobia, así como el aprovechamiento del efluente digerido por la misma como fertilizante, hacen de esta tecnología una posibilidad muy prometedora como es, mediante un bajo impacto ambiental, utilizar importantes cantidades de residuos agropecuarios y transformarlas en bienes tan escasos como son, hoy en día, los combustibles y los fertilizantes.

### *Bioquímica y microbiología del proceso*

Aunque la fermentación anaerobia es ampliamente conocida, se posee en la actualidad una información muy limitada sobre la microbiología y bioquímica del proceso.

La digestión, en síntesis, puede considerarse como un complicado proceso de degradación, en ausencia de oxígeno, de la materia orgánica.

La materia orgánica, compuesta por complejas sustancias tales como hidratos de carbono, compuestos nitrogenados y lípidos, se degrada en múltiples etapas por la intervención de un gran número de especies bacterianas, dando como producto final un gas combustible (biogás) formado fundamentalmente por metano y anhídrido carbónico.

Un importante descubrimiento microbiológico es que no existe una relación simbiótica entre los diferentes grupos de microorganismos que intervienen en el proceso, siendo las

relaciones de orden trófico, es decir, un grupo dado de microorganismos aprovecha los alimentos que le son suministrados por el metabolismo de otros grupos. Esto significa que el proceso puede ser desmontado y que cada etapa puede ser independientemente estudiada de las otras.

La degradación de la materia orgánica en ambientes anaerobios, en ausencia de nitratos y sulfatos, se verifica, por tanto, a varios niveles tróficos, en los que intervienen dos grupos de microorganismos:

— Bacterias facultativas, capaces de asimilar componentes específicos de los residuos de carácter orgánico para su síntesis celular. Estas bacterias, muy numerosas, se desarrollan fortuitamente, en el medio cuando las condiciones les son favorables o bien pertenecen a la flora de la sustancia orgánica a digerir. Todas realizan un amplio espectro de actividades enzimáticas que hacen posible la transformación de las complejas sustancias orgánicas en sustancias más simples, principalmente ácidos grasos volátiles, aminoácidos, amoníaco, anhídrido carbónico e hidrógeno.

— Bacterias estrictamente anaerobias, productoras de metano o metanobacterias, capaces de utilizar el anhídrido carbónico, el hidrógeno, el amoníaco, o bien, los ácidos acético y fórmico en presencia de sales minerales, para la síntesis de sus constituyentes celulares.

La fermentación anaerobia de los sustratos orgánicos, se realiza en tres fases, como aparece reflejado en el Cuadro 22:

1.ª Hidrólisis: degradación de los biopolímeros constituyentes de la materia orgánica dando lugar a ácidos grasos, aminoácidos, monosacáridos, glicerol, etc. Estos productos son transformados, a su vez, en compuestos más sencillos por organismos facultativos.

2.ª Acetogénesis: degradación de los componentes intermedios, a partir del ácido pirúvico, formando acetato, formiato, hidrógeno y CO<sub>2</sub>, precursores del metano.

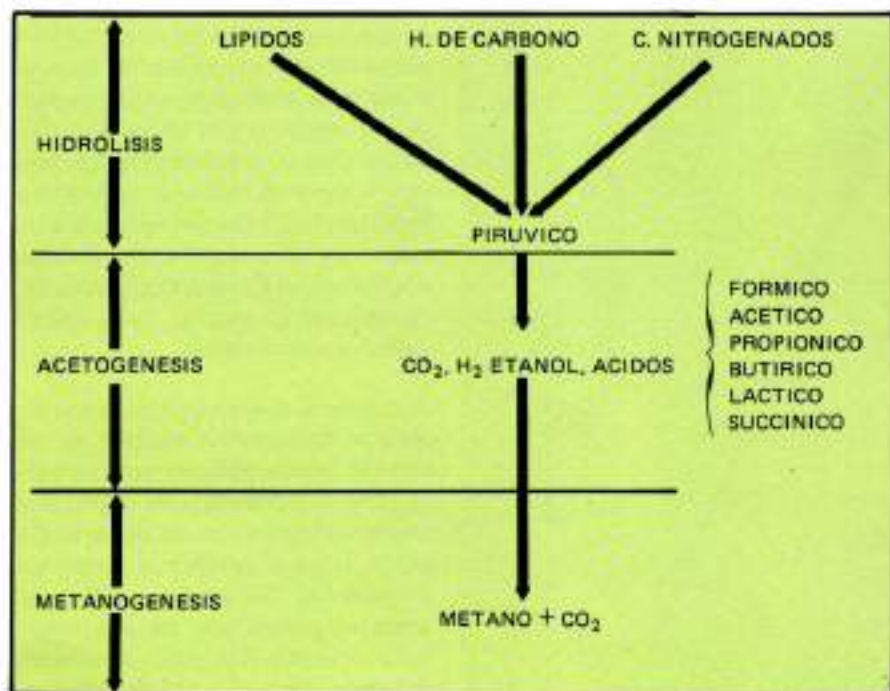
3.ª Metanogénesis: obtención de metano como producto final, a partir de los sustratos precursores creados en la etapa anterior.

Se puede establecer que la producción de metano en un fermentador pasa por dos temperaturas óptimas, la primera hacia los 35 °C y la segunda a los 65 °C. Esto se explica por el establecimiento de dos floras microbianas totalmente diferentes, una mesófila y la otra termófila.

### Hidrólisis

#### Hidratos de Carbono

El carbono forma parte de todas las moléculas que componen la célula. Los diferentes tipos de bacterias pueden obtener el carbono celular por numerosas vías, una de ellas es la del carbohidrato que proviene de la fermentación de los sustratos.



Cuadro 22. Etapas de la fermentación anaerobia.

Con algunos tipos de bacterias anaeróbicas, parte del sustrato carbohidratado desaparece y no aparece como producto de la fermentación, ya que es asimilado y convertido en constituyente celular. Pero en muchos casos, los glúcidos o hidratos de carbono, casi en su totalidad, se convierten en productos de la fermentación y son utilizados como fuente de energía.

Cada célula obtiene el carbono celular de los materiales existentes en el medio; algunas bacterias metanogénicas utilizan también para ello, el ácido acético, así como los ácidos grasos volátiles.

Los sustratos carbohidratados están formados casi exclusivamente por celulosa, hemicelulosa y lignina.

La lignina, constituida por alcoholes aromáticos polimerizados muy difíciles de hidrolizar, presenta en la actualidad unas dificultades casi insalvables de fermentación, dada su escasa biodegradabilidad.

La hemicelulosa, que también acompaña a la celulosa en las estructuras de las plantas, es fermentable y no requiere un sistema enzimático tan complejo como las celulosas para su hidrólisis.

La celulosa para hidrolizarse necesita la presencia de numerosos enzimas. Los enzimas responsables de la degradación de la celulosa se reúnen en las llamadas bacterias celulolíticas (complejo celulasa) que transforman la celulosa en glucosa. La hidrólisis de un sustrato insoluble (celulosa) por un enzima múltiple (celulasa) tiene lugar en varias etapas.

#### *Compuestos nitrogenados*

Los compuestos nitrogenados se pueden considerar "proteínicos" y "no proteínicos". Las proteínas son inicialmente degradadas a aminoácidos o a dipéptidos o tripéptidos, pudiendo ser estos últimos utilizados por alguna bacteria o ser más rápidamente hidrolizados a sus consti-

tuyentes aminoácidos. Posteriormente, pueden dar por sus mecanismos de degradación habituales (transaminación, desaminación, decarboxilación), ácidos grasos volátiles, así como  $\text{CO}_2$  y amonio, que es probablemente la principal fuente de nitrógeno celular.

Como los glúcidos, los aminoácidos son también susceptibles de conducir al ácido pirúvico y, por lo tanto, a los mismos productos que los azúcares degradados por la glicólisis. Es decir, para cada aminoácido hay una ruta degradativa particular; el producto final (pirúvico, acético) de cada ruta se integra en las rutas degradativas del metabolismo central.

Tanto la urea como otros compuestos nitrogenados no proteicos pueden ser rápidamente degradados a amonio y éste perderse por volatilización, pero, fundamentalmente, los péptidos, aminoácidos y el amonio van a volver a dar proteínas microbianas. Por tanto, la proporción de ácidos formados por la degradación de los aminoácidos es baja.

#### *Lípidos*

En general, la dieta alimenticia del ganado contiene solamente los lípidos de la materia vegetal, aunque algunas grasas animales aparecen en los suplementos proteínicos. Por otra parte, las grasas son digeridas por el animal, aunque algunas escapan de la digestión y aparecen en las heces.

Los lípidos del estiércol son, en su mayoría, compuestos del glicerol y ácidos grasos de cadena larga. Estos, a su vez, pueden ser saturados y no saturados.

Los ácidos grasos no saturados, que tienen dobles enlaces en su cadena hidrocarbonada, en el proceso de fermentación anaerobia son hidrogenados por las bacterias y transformados en ácidos grasos saturados.

Los ácidos grasos son, en un principio, liberados gracias a las lipasas de

las bacterias que atacan a los triglicéridos, que separan de esta forma los ácidos grasos del glicerol. Este puede convertirse en la glicólisis, después de la fosforilación y oxidación, en dihidroxiacetona fosfato.

En el rumen, los ácidos grasos libres constituyen, en gran parte, el producto terminal de la digestión, absorbiéndose inmediatamente, mientras que en un digestor ocurre lo contrario, es decir, los ácidos grasos se degradan.

Los mecanismos de formación de ácidos grasos de cadena corta a partir de los ácidos grasos de cadena larga, son aún mal conocidos, aunque verosíblemente parece ser que es la  $\beta$ -oxidación. Así H. Heukelekian y B. Muller constataron en un digestor la transformación del ácido esteárico ( $C_{18}$ ) en ácido palmítico ( $C_{16}$ ) y después en ácido mirístico ( $C_{14}$ ). Parece ser, pues, que la  $\beta$ -oxidación

transforma un ácido  $C_n$  en otro  $C_{n-2}$  acompañando la formación del ácido acético.

### Acetogénesis

Como se ha visto, los sustratos empleados más corrientemente en las fermentaciones anaerobias son los azúcares de seis átomos de carbono, en especial la glucosa, pero algunas bacterias pueden obtener su energía metabólica induciendo la fermentación anaerobia de pentosas, ácidos grasos y aminoácidos.

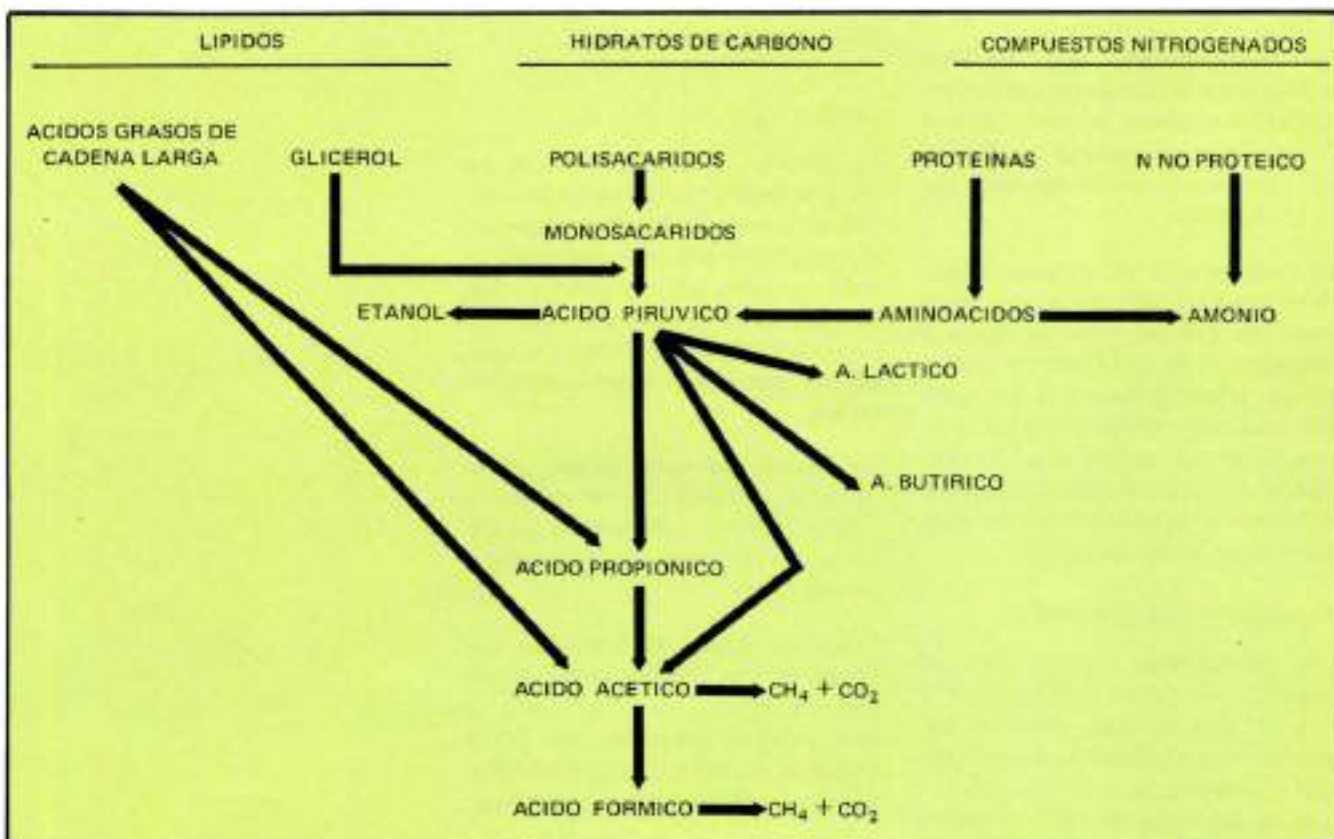
La formación de gas metano viene precedida, puesto que la diversidad microbiana así lo permite, de una serie de fermentaciones solapadas llevadas a cabo por bacterias acetogénicas, productoras de hidrógeno y dióxido de carbono. Estas bacterias, a partir del ácido pirúvico, producto resultante de la anterior etapa hidrolítica, producen ácidos grasos voláti-

les de cadena corta y alcoholes, sustratos todos ellos precursores de los del metano.

Un grupo importante de organismos quedan por descubrir: aquéllos que a partir de los ácidos grasos volátiles suministran a las bacterias metanogénicas los compuestos que les son necesarios. Parece ser que numerosas bacterias sulfato-reductoras están implicadas en la transferencia de hidrógeno de estos ácidos a las metanogénicas.

J. P. Kotze y otros, siempre a través de análisis enzimáticos, afirman también que el ciclo de Krebs, así como el ciclo glicólico, juegan un importante papel en el metabolismo de las bacterias acetogénicas.

De entre las fermentaciones características de la etapa acetogénica, se puede distinguir la alcohólica, láctica, acética, propiónica y butírica (Cuadro 23).



Cuadro 23. Secuencias bioquímicas de la degradación anaerobia de la materia orgánica.



Género	Gram	Morfología	Composición de la pared celular
I Methanobacterium . . . . .	+	Bacilos largos	Pseudomureína
II Methanobrevibacterium . . . . .	+	Bacilos cortos	Pseudomureína
III Methanococcus . . . . .	-	Cocos regulares o irregulares	Unidades de proteína con glucosamina
IV Methanomicrobium . . . . .	-	Bacilos cortos curvados	Unidades de proteína
V Methanogenium . . . . .	-	Cocos muy irregulares	Unidades de proteína
VI Methanospirillum . . . . .	-	Bacilos largos curvados	Unidades de proteína con capa externa
VII Methanosarcina . . . . .		Cocos irregulares en paquetes	Heteropolisacárido.

Cuadro 24. Aspectos relevantes de la morfología y anatomía de las bacterias metanogénicas.

Fuente: T. Ruiz Argüeso.

dos sobre la estructura del DNA, metabolismo intermedio y composición de lípidos, han confirmado esta posición y hoy es aceptada una nueva reestructuración taxonómica del grupo. Esta nueva clasificación agrupa las bacterias metanogénicas en tres órdenes, cuatro familias y siete géneros. Las características genéricas diferenciales se recogen en el Cuadro 24 y los sustratos susceptibles a su ataque en el Cuadro 25.

Las bacterias metanogénicas estudiadas en cultivo puro son muy diversas, siendo su rasgo común la propiedad de poder fabricar metano a partir de hidrógeno, CO<sub>2</sub>, metanol, fórmico y acetato, así como poseer ciertos compuestos muy particulares, tales como el coenzima M y el factor F<sub>420</sub>, que es un compuesto fluorescente en luz ultravioleta. La

### Metanogénesis

Las bacterias metanogénicas son microorganismos estrictamente anaerobios, capaces de utilizar los productos obtenidos en las dos etapas precedentes, para la formación de metano. Los tiempos de regeneración son diez veces superiores a las acetogénicas.

Morfológicamente se distinguen cuatro tipos de bacterias metanogénicas: sarcinas, bacilos, cocos y formas espiriladas.

Todas las especies examinadas hasta ahora tienen paredes tipo células Gram positivas, aunque algunas cepas se han referido como Gram negativas o variables. El porcentaje de G + C en su DNA es muy distinto según las especies y su rango de variación para el grupo va desde 27 a 61%.

Las bacterias metanogénicas forman un grupo biológico único, uniforme y filogenéticamente muy alejado del resto de las bacterias y de los organismos eucariotes. Estudios realiza-

Especies	G + C (Mol %)	Sustratos para el crecimiento y producción de metano
I. Methanobacterium formicicum . . . . .	40,7	H <sub>2</sub> formiato
Methanobacterium bryantii . . . . .	32,7 - 33,2	H <sub>2</sub>
Methanobacterium thermoautotrophicum . . . . .	49,7	H <sub>2</sub>
Methanobacterium ruminantium . . . . .	30,6	H <sub>2</sub> formiato
II. Methanobrevibacter smitzi . . . . .	31,0	H <sub>2</sub> formiato
Methanobrevibacterium arboriphilus . . . . .	27,5 - 31,6	H <sub>2</sub>
III. Methanococcus rannielli . . . . .	31,1	H <sub>2</sub> formiato
Methanococcus voltae . . . . .	30,7	H <sub>2</sub> formiato
IV. Methanomicrobium mobile . . . . .	48,8	H <sub>2</sub> formiato
V. Methanogenium cariaci . . . . .	51,6	H <sub>2</sub> formiato
Methanogenium marisnigri . . . . .	61,2	H <sub>2</sub> formiato
VI. Methanospirillum hungatii . . . . .	45,0 - 46,5	H <sub>2</sub> formiato
VII. Methanosarcina barkeri . . . . .	40,5 - 51,0	H <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> acetato

Cuadro 25. Contenido en bases G + C y sustratos que sirven como fuente única de electrones para la generación de metano y el crecimiento.

Fuente: T. Ruiz Argüeso.

presencia de este pigmento ha sido aprovechada por T. Edwards y B. C. McBride para proponer métodos de enumeración, ya que las colonias metanogénicas presentan fluorescencia cuando se las observa bajo rayos ultravioletas de gran longitud de onda.

Otra característica común de las bacterias metanogénicas es la exigencia para su crecimiento de una atmósfera reductora. Su cultivo debe realizarse en un ambiente que contenga al menos un 50% de hidrógeno.

Para que las bacterias metanogénicas realicen su trabajo es necesario que otras bacterias les preparen las sustancias necesarias y que las condiciones de cultivo les sean propicias, no existiendo, en particular, sustancias inhibitorias.

En lo que concierne al primer punto, se ha visto que las metanogénicas tienen necesidad de hidrógeno y de  $\text{CO}_2$  y que los iones acetato o formiato, o incluso el metanol, pueden ser utilizados para producir metano. Hace falta, pues, que las bacterias pertenecientes a otros géneros produzcan estos sustratos. Esta misión la desempeñan las bacterias acetogénicas, aunque está todavía muy lejos de conocerse cuáles de entre ellas utilizan mejor sus facultades.

Por otra parte, la producción de metano está condicionada por el tamaño de las poblaciones metanogénicas. Un número de microorganismos suficiente es necesario para metabolizar los sustratos, lo que significa que la carga de alimentación al digestor no debe contener inhibidores al crecimiento de los metanógenos. Se ha comprobado que los iones sulfato inhiben la fermentación, así como los residuos antibióticos, ya sean aportados por los excrementos o fabricados en anaerobiosis. Las interacciones entre cepas bacterianas pueden igualmente oponerse al desarrollo de las bacterias.

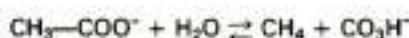
Todas las especies bacterianas metanogénicas reducen el anhídrido car-

bónico a metano, cuando se encuentran en presencia de hidrógeno.

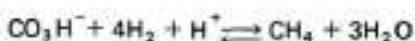


Esta reducción transcurre paso a paso vía formiato, formaldehído y metanol.

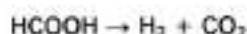
Alrededor del 70% del total de metano producido procede de la decarboxilación del ácido acético, de acuerdo con la reacción:



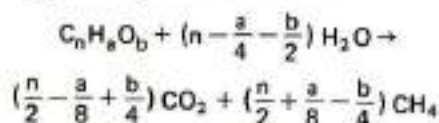
El metano restante proviene, como se ha visto, del anhídrido carbónico y de los ácidos carbónico y fórmico, así como del metanol. De todos ellos, el más importante es el ácido carbónico que da lugar a  $\text{CH}_4$ , mediante un proceso de reducción que utiliza el  $\text{H}_2$  producido en etapas anteriores.



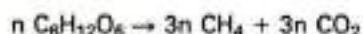
Algunas bacterias transforman el formiato en  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$ , que más tarde dan lugar a metano.



Buswell y Mueller relacionan directamente la destrucción de la materia orgánica con la producción de gas, según la siguiente ecuación:



Esta relación, llamada ecuación de estabilización de la materia orgánica, permite evaluar teóricamente la producción de biogás, que aplicada al caso de los hidratos de carbono es:



De esta forma se puede determinar la producción, aunque para ello es necesario presuponer una degradación absoluta y total de todas las materias que forman el sustrato.

Animal	Peso medio por cabeza (Kg)	Defecaciones producidas (Kg/cabeza/día)	Contenido en materia seca (%)	Sólidos volátiles (Kg/cabeza/día)	Producción de biogás (l/Kg S.V.)	Producción de biogás por cabeza (l/cabeza/día)	Producción de energía prevista (KJ/cabeza/día)
Bovinos . . .	400	27,5	12,0	2,40	300	720	18.700
Porcinos . . .	60	4,5	9,2	0,30	400	120	3.120
Aves . . . . .	1,5	0,1	25,0	0,016	400	6,4	166
Ovinos y Caprinos . .	30	1,6	25,0	0,20	230	47	1.222

Cuadro 26. Defecaciones animales: valores medios relativos a la producción de biogás por digestión anaerobia.  
Fuente: F.A.O. (1980).

#### Producción de biogás y fertilizantes

El rendimiento de biogás, es decir, el número de litros producidos por kg de sólidos volátiles, depende no sólo de la composición de la materia prima, sino también del nivel de degradación conseguido, que como se verá, es producto de una serie de condiciones en las que se realiza el proceso.

En el Cuadro 26 se ilustran los valores medios relativos a la producción de biogás por digestión anaerobia de distintos tipos de defecaciones animales. La composición media de biogás se pone de manifiesto en el Cuadro 27 y el valor del mismo como combustible, en el Cuadro 28, en el que se comparan las potencias caloríficas de éste con las de los diferentes combustibles comerciales. Las características esenciales del metano aparecen en el Cuadro 29.

Componente	%
Metano . . . . .	54 - 70
Anhidrido carbónico . . . . .	27 - 45
Nitrógeno . . . . .	0,3 - 3
Hidrógeno . . . . .	1 - 10
Monóxido de carbono . . . . .	0,1
Oxígeno . . . . .	0,1
Sulfuro de hidrógeno . . . . .	Trazas

Cuadro 27. Composición media del biogás resultante de residuos animales.  
Fuente: Merrill y Fry (1973).

Combustible	Potencia calorífica (Kcal/m <sup>3</sup> )
Gas ciudad . . . . .	4.005 - 4.450
Biogás . . . . .	4.806 - 7.400
Metano . . . . .	7.974 - 9.514
Gas natural . . . . .	9.345 - 19.580
Propano . . . . .	19.580 - 23.140
Butano . . . . .	25.810 - 30.260

Cuadro 28. Potencia calorífica de diferentes combustibles gaseosos.  
Fuente: Merrill y Fry (1973).

Peso específico . . . . .	0,715	Kg/m <sup>3</sup>
Densidad (Temperatura del aire 0° C) . . . . .	0,550	Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura de evaporación . . . . .	- 161,5	° C.
Solubilidad en agua (A 20° C) . . . . .	0,03	Kg/m <sup>3</sup>
Velocidad del frente de llama . . . . .	0,30	m/s.
Límites de inflamabilidad de la mezcla		
Aire - CH <sub>4</sub> . . . . .	7 a 14	
Índice de octano . . . . .	Sup. a 100	
Poder calorífico inferior . . . . .	9,0	th/m <sup>3</sup> (15° C)
Energía liberada . . . . .	10	kWh/m <sup>3</sup>
Temperatura de la llama . . . . .	2.000	° C.

Cuadro 29. Características esenciales del metano.  
1 Termia (th) = 4.185 megajulios.

El otro producto resultante de la fermentación anaerobia de la materia orgánica son los lodos de digestión. La composición media del efluente según Singh es la siguiente:

N .....	1,8 - 2,4 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	1,0 - 1,2 %
K <sub>2</sub> O .....	0,6 - 0,8 %

Esta es la composición clásica de un buen fertilizante. Generalmente, un 10-15% del nitrógeno se halla en forma amoniacal, y el 50% de total de sólidos corresponde a materia orgánica, lo que hace de estos lodos unos buenos acondicionadores de suelos.

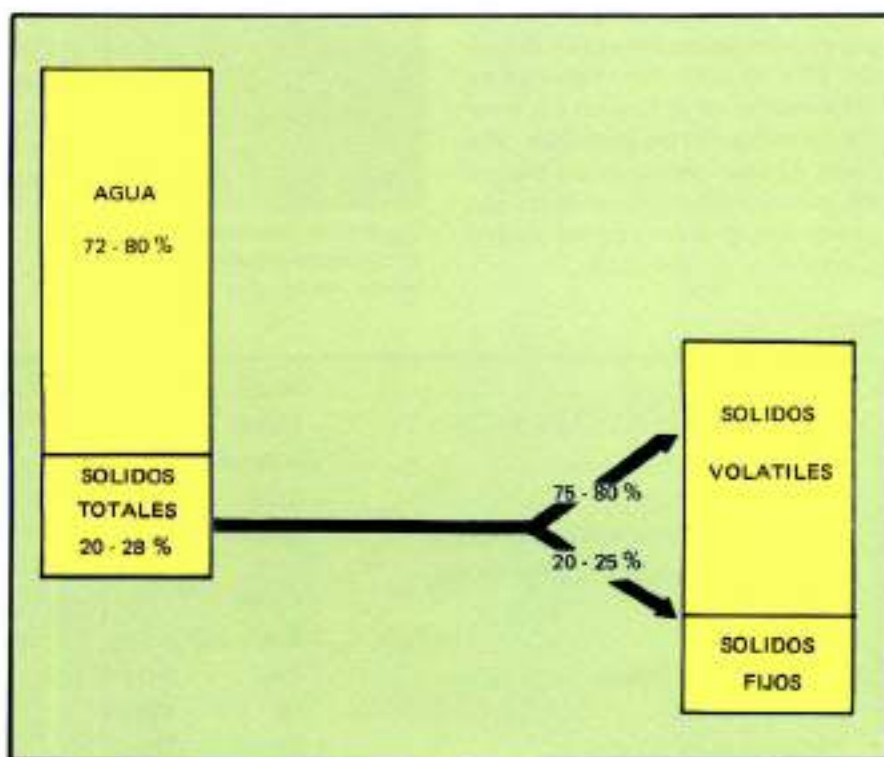
Si los lodos han alcanzado el grado de digestión requerido, se pueden

verter al campo directamente desde el digestor, con lo que se evitan en buena parte las pérdidas de nitrógeno amoniacal.

#### Condiciones del proceso

#### Sustrato

Las cantidades y características de los residuos animales susceptibles de ser digeridos son muy variadas. En las zonas rurales el material digerible depende del clima, tipo de alimentación, manejo del ganado, etc. De ahí la necesidad de establecer unos parámetros que permitan juzgar la idoneidad de una materia prima y hacer previsiones sobre la producción de biogás. Estos parámetros que aparecen en el Cuadro 30 son los siguientes:



Cuadro 30. Proporción de sólidos en el estiércol.

Fuente: S. Valles et al.

- **Sólidos Totales (ST):** peso de material sólido después de secar el producto a 103° C hasta peso constante.
- **Sólidos Fijos (SF):** peso de material sólido después de calcinar a 550° C durante una hora.
- **Sólidos Volátiles (SV):** diferencia entre sólidos totales y fijos. Son los sólidos potencialmente transformables en biogás.
- **Relación carbono/nitrógeno (C/N):** esta relación representa un índice significativo, en lo que se refiere a la digestibilidad y al rendimiento potencial de un determinado sustrato.

El valor de esta relación, como puede apreciarse en el Cuadro 31, es muy variable, dependiendo dentro de cada especie fundamentalmente del tipo de ración alimenticia y del estado fisiológico del animal.

Su valor óptimo está comprendido entre 25 y 30 (P. Merrill y L. J. Fry). El mínimo puede establecerse, según F. A. Sanders y D. E. Bloodgood, en 16, y el máximo varía según las condiciones de manejo (D. J. De Ranzo).

Residuos	C/N
Aves	7 - 15
Caballar	25
Vacuno	18
Porcino	15
Ovino y Caprino	15

Cuadro 31. Relación Carbono/Nitrógeno de diferentes residuos animales.

#### Otros parámetros

— **Temperatura:** Como se indicó anteriormente, el proceso es viable a dos niveles de temperatura distintos (mesófilo y termófilo) para cada una de las cuales puede definirse un óptimo de máximo crecimiento de las floras microbianas responsables de la producción de biogás. En general,

puede afirmarse que, dentro del intervalo en que es estable un determinado tipo de flora, la velocidad de producción de gas aumenta con la temperatura a igualdad de las restantes condiciones.

Para un digestor mesófilo, en nuestras latitudes, se necesita para calefacción alrededor del 20% del biogás producido en verano y un 35% en los meses más fríos.

— **pH.** El valor del pH no sólo determina la producción total de biogás sino, lo que es más importante, su composición en metano, ya que por debajo de pH=6,2, la acidez existente en el fermentador inhibe la actividad de las bacterias metanogénicas, y por debajo de pH=5,0 la inhibición afecta también a las fermentativas. Efectos similares se detectan a valores de pH por encima de 8,0.

— **Tiempo de retención:** El volumen del tanque digestor dividido por la carga diaria de estiércol, determina el tiempo de retención hidráulico requerido para optimizar el proceso. El tiempo de retención recomendable oscila entre 10 y 20 días según el sustrato, para el caso de una fermentación mesofílica.

— **Sustancias tóxicas:** Algunas sustancias tienen un efecto inhibitor sobre los microorganismos si sus concentraciones son muy elevadas. Entre éstas se incluyen metales alcalinos y alcalinoterreos, metales pesados, iones, amonio, sulfídrico y algunos compuestos orgánicos.

#### Reducción de la carga orgánica

Aunque la producción de energía mediante procesos de fermentación anaerobia de residuos ganaderos es una tecnología que aprovecha el residuo pero sin destruir sus propiedades fertilizantes, como se ha indicado anteriormente, también tiene otra vertiente tanto o más importante que las anteriores, como es la descontaminación.

La eficiencia del proceso de fermentación o lo que es lo mismo, la disminución del poder contaminante del residuo, oscila entre el 70-95%, que es precisamente la cantidad de sustancia orgánica que se transforma en gas.

Para medir el grado de contaminación del efluente de la digestión anaerobia se utiliza el método DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno). Este parámetro expresa la cantidad de oxígeno necesaria para la destrucción o transformación de las materias orgánicas biodegradables contenidas en 1 litro de agua. El análisis se realiza a 20° C, después de un periodo de 5 días en ausencia de luz. El resultado se expresa en mg/l de oxígeno disuelto.

Hasta 30 mg/l puede considerarse que el efluente no está contaminado. Se aconseja no superar los 20 mg/l. Valores inferiores a 10 mg/l se refieren a aguas no contaminadas.

Otro método utilizado es el de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) que es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación por vía química, de las materias orgánicas contenidas en 1 litro de agua. Se expresa también en mg/l de oxígeno disuelto.

Existen diversos procedimientos secundarios para reducir la carga contaminante del efluente:

**Tratamientos físico-químicos.** Decantan los sólidos en suspensión del estiércol digerido. Pueden realizarse por coagulación-floculación, por electroflotación, así como por oxidación catalítica, pasando el agua depurada antes de su vertido final por filtros de arena o turba.

**Tratamientos biológicos.** Estos tratamientos de depuración pueden realizarse implantando en lagunas de vertido, especies acuáticas de alto poder de absorción. El cultivo de juncos de agua ha demostrado su capacidad para mantener la DBO<sub>5</sub> y los sólidos suspendidos totales (TSS) dentro de los límites prescritos por la

Agencia de Protección Ambiental (EPA) que son 30 mg/l de DBO<sub>5</sub> y 30 mg/l de TSS.

#### *Procedimientos de digestión anaerobia*

Existen en la actualidad varios procedimientos de aplicación de esta técnica, entre los que se destacan los siguientes:

— **Procedimiento convencional** (Figura 4): La alimentación es intermitente y el contenido del digestor ni se calienta ni se mezcla. Este sistema no permite controlar la temperatura, el equilibrio biológico, el pH, el contacto entre el sustrato y las bacterias. De todas formas, los resultados pueden ser buenos, si el tiempo de retención alcanza de 30 a 60 días y la carga permanece muy fluida.

— **Procedimiento de mezcla completa** (Figura 5): El tanque digestor lleva un sistema de calefacción para mantener la temperatura apropiada, así como un agitador mecánico o por recirculación de gas, para homogenizar el medio.

Con este procedimiento se facilita el control de los diversos parámetros que inciden en la digestión, pues las reacciones bioquímicas, las relaciones entre las diferentes bacterias por una parte y de éstas con el sustrato por otra, son idénticas en todos los niveles del digestor.

La alimentación puede ser o no continua, no existiendo separación de sólidos. Los tiempos de retención varían de 10 a 30 días según el sustrato.

Este tipo de digestor permite aplicar cargas más importantes o tiempos de retención más cortos.

— **Procedimiento de contacto** (Figura 6): Este sistema incluye digestión anaerobia con sistema de agitación, dispositivo de recogida de gases, tanque de recogida de lodos y un sistema para devolver parte al digestor.

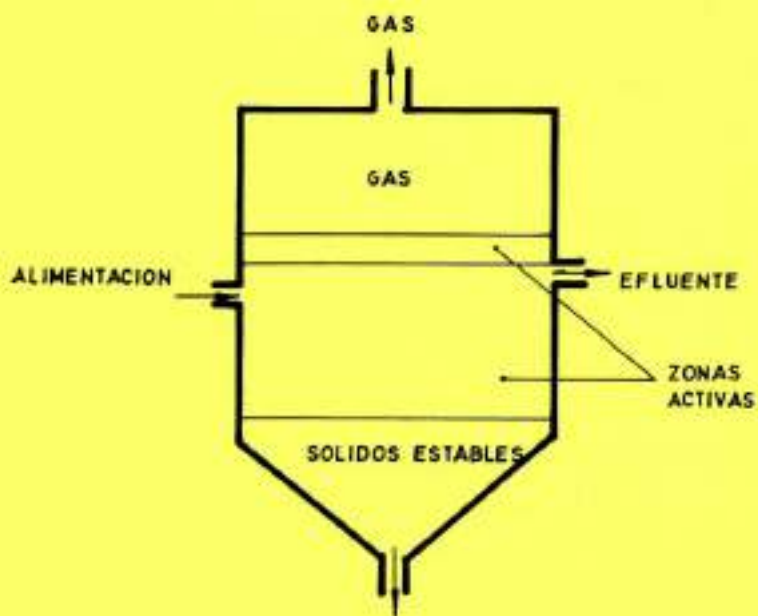


Figura 4. Esquema de un digester convencional.

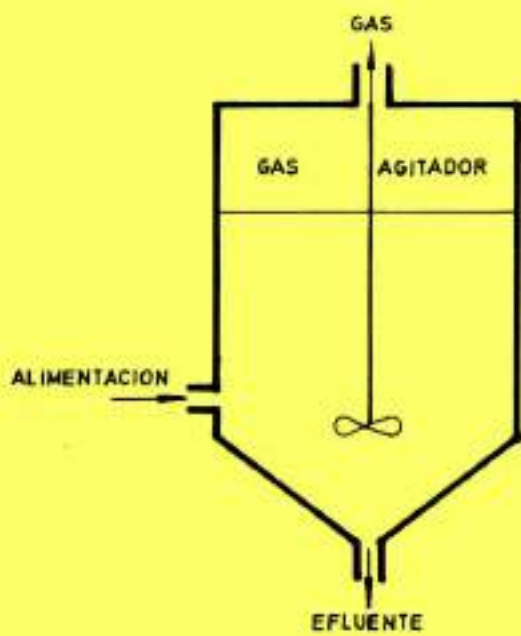


Figura 5. Esquema de un digester de mezcla completa.

Con este procedimiento se disminuye el tiempo de retención, ya que reciclando los lodos previamente decantados, aumenta el contenido de microorganismos, con lo que se favorece la velocidad de digestión.

El contenido en metano de biogás es más importante, pues el carbónico se disuelve en los lodos reciclados que llegan al digestor y que no tienen gas.

En general, la relación entre el caudal de reciclado sobre el de alimentación varía de 1 a 3.

Este sistema de digestión parece ser el más adecuado para tratar efluentes de mucho volumen y poca concentración de sólidos, como las aguas residuales de las industrias cárnicas y hortofrutícolas.

— **Procedimiento de dos fases** (Figura 7): Este procedimiento se basa en considerar que los microorganismos que intervienen en la digestión anaerobia de la materia orgánica son de dos grupos distintos: uno que determina la hidrólisis

y acetogénesis y otro la metanogénesis. Si se logra establecer las condiciones óptimas independientes para cada grupo será posible una mayor eficacia. En la práctica se emplean dos digestores separados alimentados en continuo y parece que los resultados obtenidos hasta ahora con fangos cloacales son prometedores.

La separación en dos fases estriba en un control cinético de cada una de ellas, regulando la tasa de dilución y eventualmente la de reciclado. Como las bacterias metanogénicas tienen un tiempo de regeneración diez veces superior a el de las acetogénicas, se favorece su eliminación del primer digestor, aplicando a éste una tasa de dilución elevada, es decir un tiempo de retención corto. Por el contrario, las bacterias productoras de metano pueden desarrollarse en el segundo digestor donde el tiempo de retención es mucho más largo, recibiendo un sustrato adaptado a sus necesidades. Las bacterias acetogénicas no se desarrollan, ya que los sustratos que utilizan se han trans-

formado totalmente en el primer digestor.

— **Filtros anaerobios** (Figura 8): La carga a depurar pasa por una superficie de sólidos inertes que retienen las bacterias anaerobias y mantienen así una concentración importante de las mismas, como el reciclado en un digestor.

Este procedimiento es aplicable a las aguas residuales que contienen materias orgánicas muy solubles. Para una misma carga orgánica, el rendimiento de depuración aumenta con la concentración en DQO de la carga de entrada.

#### *Aprovechamiento del biogás en la agricultura*

La utilización de biogás en una instalación ganadera puede ser múltiple:

1. Utilizándolo directamente para aplicaciones domésticas en la granja (cocina, calefacción, agua caliente, aire acondicionado, etc.) o para calefacción del propio digestor.

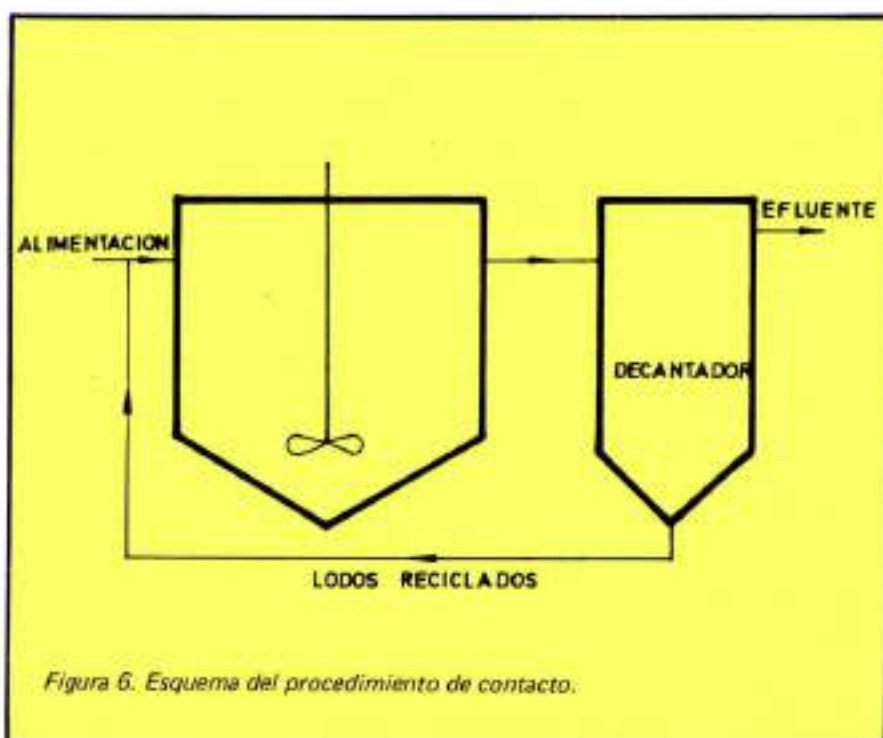


Figura 6. Esquema del procedimiento de contacto.



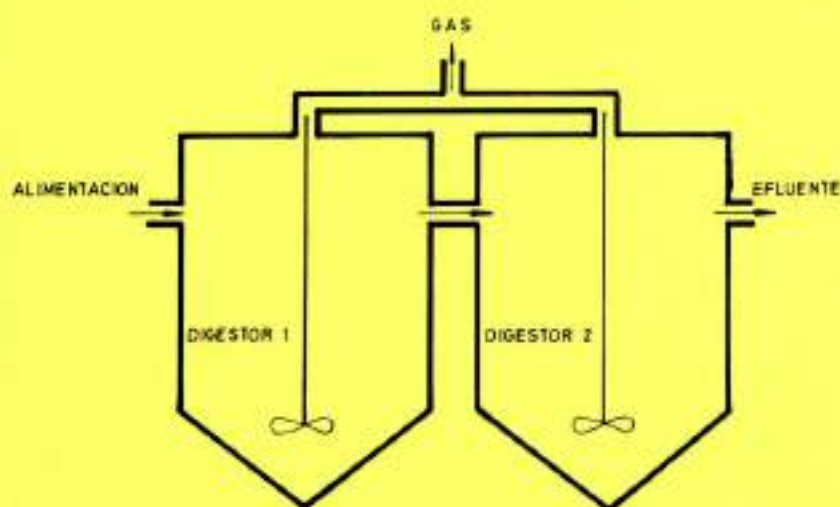


Figura 7. Esquema del procedimiento de dos fases.

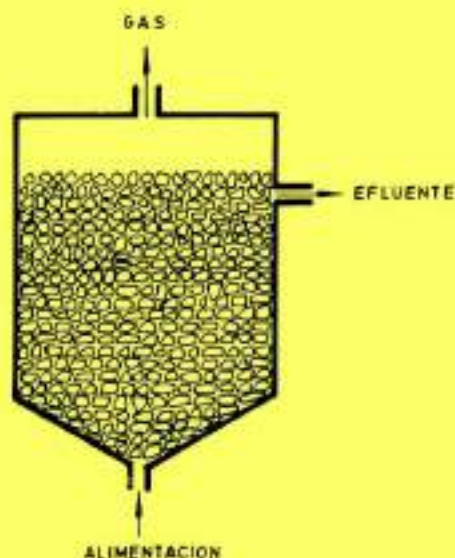


Figura 8. Esquema del procedimiento de filtros anaerobios.

2. Quemándolo para secado de productos, en invernaderos y en instalaciones agro-alimentarias.
3. Mediante un motor de combustión interna para elevar agua mediante un grupo motobomba o produciendo electricidad mediante un generador eléctrico.

En esta última opción el balance energético depende mucho del proyecto de la instalación. En general, se puede considerar que sólo el 20% de la energía contenida en el biogás puede convertirse en electricidad a través del sistema motor-generador. Sin embargo, si el calor proveniente del agua de refrigeración del motor es utilizado para calentar el digestor a través del correspondiente intercambiador de calor, el rendimiento económico puede superar el 30%.

Hasta el presente, los motores más utilizados en estas instalaciones han sido los de explosión, aunque dado que los motores diesel tienen mayor rendimiento y duran más, su utilización en la forma dual, es decir realizándose el encendido inyectando una pequeña cantidad de gas-oil (15-25% de la energía total), va a ser cada vez mayor.

Merece especial mención el motor de explosión de Fiat TOTEM de energía total, del que se aprovecha no sólo la energía mecánica, sino también la energía calorífica proveniente de la refrigeración del motor y de los gases de escape; la primera, con agua caliente directamente del sistema de refrigeración del motor, y la segunda, mediante un intercambiador de calor.

# IMPACTO DE LA UTILIZACIÓN DE BIOMASA CON FINES ENERGETICOS

## IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

Los más importantes impactos que la biomasa puede producir inciden sobre el uso de la tierra, el suelo y los nutrientes, la calidad del aire, la fauna, la flora y las aguas.

— **Uso de la tierra:** Este posible impacto depende del sistema de producción y del modelo regional del uso de la tierra.

La producción de biomasa tiende a intensificar los cultivos, principalmente los cultivos de tipo forestal, lo que trae consigo un mayor empleo de técnicas, como recolección, repoblación, empleo de especies más productivas, fertilización, podas y controles de fuego, insectos y enfermedades.

Otro punto importante en cuanto al uso de la tierra es la competencia entre tierra para producción de alimentos o para la producción de energía. Ejemplo: A partir de la fermentación de la biomasa se pretende ahorrar el 10% de la gasolina en EE. UU. Esto implica producir  $110 \times 10^6$  TM de maíz con unas necesidades de terreno de  $20 \times 10^6$  ha, lo que representaría el 1,5 más de la superficie actual del cultivo de maíz. Este problema se aumenta al intentar el sector agrario disminuir su consumo energético, cambiándose una agricultura intensiva por una agricultura extensiva, con menores consumos energéticos, con lo que para mantener la producción de alimentos se necesitará más superficie de cultivo.

— **Suelos y nutrientes:** La preparación intensiva del suelo, así como la utilización de los residuos forestales y agrícolas, aumentan el grado de erosión de los suelos.

El empleo de vehículos ocasiona la compactación de los suelos. El grado de compactación depende de varios factores, pero principalmente del peso del vehículo y del estado de humedad del suelo.

Los efectos de la compactación son el decrecimiento de la filtración de las precipitaciones, el aumento de las escorrentías y el riesgo de erosión.

Las cosechas residuales que se dejaban en el suelo tenían una gran importancia, pues eran un aporte de nutrientes al mismo, aumentaban la porosidad, incrementaban la filtración del agua en el suelo, disminuían el impacto del aire y de la lluvia y reducían la erosión y las escorrentías. El empleo de dichos residuos va a condicionar las características del suelo.

— **Calidad del aire:** Las grandes extensiones para el cultivo de biomasa traen consigo grandes efectos sobre la calidad del aire, principalmente el polvo formado por el viento en las grandes extensiones no cubiertas por la masa vegetal.

Las técnicas para disminuir el efecto del viento son el empleo de cortavientos y no levantar el suelo, sino emplear herbicidas, aunque esta última técnica puede causar un problema mayor como es la contaminación del aire y las aguas al tener que emplear grandes cantidades de aquéllos.

Una de las ventajas que ofrece el empleo de los residuos forestales y agrarios es no tener que quemarlos, con lo cual se evita la contaminación del aire.

Un efecto importante sobre la calidad del aire es la emisión producida durante la fase de conversión de la biomasa. Las emisiones variarán y dependerán del proceso de conversión que se esté empleando. La combustión de la biomasa producirá partículas de monóxido de carbono y, en menor cantidad, óxidos de azufre, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno. Dichas cantidades no son muy significativas a excepción de la combustión de la madera, donde las cantidades son más considerables.

La pirólisis e hidrólisis tienen diferentes emisiones gaseosas menos controladas: aminas, hidrocarburos aromáticos, aldehídos y fenoles.

— **Fauna y flora:** La vida animal en las áreas de producción de biomasa se verá impactada por el incremento de la actividad humana. Los grandes mamíferos, reptiles y pájaros se desplazarán a otras zonas más tranquilas y solamente quedarán pequeños mamíferos y reptiles, así como anfibios.

La flora tradicional de la zona será sustituida por las especies empleadas para la producción de biomasa.

— **Aguas:** El impacto sobre las aguas se produce principalmente durante la fase de producción de biomasa. Así, la escorrentía de los fertilizantes contamina las aguas, así como el uso en exceso e inadecuado de los plaguicidas, pudiendo ocasionar efectos perniciosos sobre especies animales. Las fuertes corrientes de agua que causan la erosión, pueden causar también efectos con la sedimentación de materiales y turbidez en las aguas.

Las aguas residuales de los centros de conversión de biomasa contaminarán las aguas, debido a los tratamientos químicos que han de aplicarse.

La vida acuática puede ser afectada por los cambios de temperatura, por los fertilizantes, los flujos de volumen de agua y la sedimentación. Esto puede desestabilizar el equilibrio ecológico de los ríos, con la probabilidad de la desaparición de especies acuáticas, el cambio en las especies dominantes y el fuerte desarrollo de las algas.

#### **IMPACTOS SOCIOECONOMICOS**

Los más importantes impactos socioeconómicos pueden producirse sobre uso de la tierra, el mercado, la alimentación, el empleo, los cambios demográficos y el transporte, siendo necesaria la articulación de una serie de medidas políticas e institucionales.

— **Uso de la tierra:** La producción de biomasa con fines energéticos necesita de grandes extensiones para que las producciones sean significativas. Esto trae grandes problemas de estética, de métodos de trabajo y de disponibilidad de la tierra.

— **Mercado:** Los mercados de productos de biomasa pueden ser muy complejos e inestables, por las variaciones en la producción. Es necesario fomentar una diversidad de productos y mezcla de éstos. Un excesivo proteccionismo sobre la producción de biomasa podría llevar a una superexpansión y ocasionar consiguientes desajustes.

— **Alimentación:** La competencia entre producción de alimentos y energía afectaría al abastecimiento de productos alimenticios en los mercados nacionales e internacionales, así como a sus precios.

— **Empleo y cambios demográficos:** La localización en áreas rurales de centros productores y transformadores de biomasa modificará significativamente la situación del empleo así como toda la actividad local y regional.

— **Transporte:** Hay que considerar los impactos indirectos que tendrán las alteraciones del sistema de transporte en las zonas de producción de biomasa, como es un aumento de la contaminación. Sería necesario un plan para mantenimiento de carreteras y caminos y creación de nuevas comunicaciones con zonas productoras.

— **Medidas institucionales:** Es necesario un marco de relaciones entre productores y transformadores de biomasa, una regulación ambiental y un tratamiento económico propio de dicha actividad.

— **Medidas políticas:** Descentralización y subvenciones a los programas de producción de energía.

### PANORAMICA INTERNACIONAL

Entre los países que mayor desarrollo e importancia han dado hasta ahora a la biomasa como fuente de energía, se puede citar a Brasil, Estados Unidos, Suecia y China. El mayor programa mundial es, sin duda, el brasileño para la producción del alcohol etílico que mezclado con la gasolina constituye el gasohol, excelente combustible para la automoción y que también se emplea en EE. UU. En Brasil la fuente del alcohol es la caña de azúcar y el cañave, mientras que en EE. UU. lo es el grano de maíz.

El problema sueco es de una naturaleza diferente por su clima, muy alejado del tropical, que imposibilita el cultivo de especies como la caña de azúcar y el cañave. En Suecia no existen reservas de los más importantes combustibles fósiles que hasta hoy ha utilizado el hombre: carbón, petróleo y gas natural. Sin embargo, la riqueza forestal sueca es la gran reserva que este país piensa poder utilizar como fuente energética, basándose fundamentalmente en la utilización de los residuos forestales y en las plantaciones densas de árboles en turnos cortos. Se experimenta fundamentalmente con sauces y abedules.

En China son los pequeños digestores para la producción de biogás, las instalaciones más desarrolladas para el aprovechamiento de la biomasa. También en la India se ha extendido mucho este tipo de instalaciones; en ellas se procesan fundamentalmente las deyecciones de los animales domésticos y también las humanas. Este tipo de instalaciones para uso en la unidad familiar cumple con la doble misión de evitar la contaminación y producir energía, disminuyendo, además, el uso de combustible de origen leñoso que en muchas zonas es escaso. De esta forma, se defiende también la mayor o menor riqueza forestal.

En EE. UU. muchos y diversos programas son abordados con vistas al

aprovechamiento de la biomasa y que comprenden todos los aspectos citados y algunos otros: utilización de sorgos dulces para la producción de azúcar y alcohol; obtención de este último producto a partir de maíz grano; utilización de especies hasta ahora consideradas como silvestres; explotaciones forestales, producción de biogás y otros procesos de transformación.

Es evidente que la utilización de la biomasa como fuente de energía no deberá hacerse de la misma forma en los distintos países, ni siquiera en regiones distintas dentro de un mismo país, siendo por lo tanto, las soluciones muchas veces locales. Además, se ha puesto especial énfasis en el hecho de que, en un mundo en el que faltan los alimentos, la producción de plantas como fuente energética no debe competir por el terreno con las plantas alimentarias, relegando las primeras a los terrenos marginales para la Agricultura que muchas veces están constituidas por zonas áridas y semiáridas.

La mejora genética de las plantas portadoras de cualidades fisiológicas que se adapten a determinados ambientes en los que se puede producir biomasa como fuente de energía, es una tarea apasionante en la que se empieza a trabajar en algunos laboratorios del mundo. Estos trabajos culminarán con la ingeniería genética o manipulación de genes que permite la introducción de aquellos seleccionados en determinados organismos. Esto permitirá en el futuro obtener en una sola generación plantas y animales que posean las características más deseadas reunidas en un mismo individuo o grupo de individuos.

Contemplar las plantas exclusivamente como fuentes de energía es, sin embargo, limitar de antemano las enormes potencialidades que éstas ofrecen como fuente de sustancias químicas para la industria. No debe olvidarse que si escasea el petróleo, lo harán también muchas sustancias obtenidas como subproduc-

tos del mismo y que hoy produce la poderosa industria petroquímica. Muchas moléculas, contenidas quizá en pequeñas proporciones en las plantas que se cultiven como fuente de energía, podrán tener importancia en la industria de los plásticos, la farmacéutica, la cosmética, la textil, etc. Puesto que los cultivos energéticos deberán contar con superficies importantes para resultar rentables, cualquier producto valioso, aunque sea contenido en proporciones ínfimas, deberá ser tenido en cuenta al estimar futuras producciones y rendimientos energéticos y económicos.

## PANORAMICA NACIONAL

Se pueden distinguir básicamente tres líneas de actividad:

1. Aprovechamiento energético de residuos agrarios.
2. Aprovechamiento agrícola de residuos urbanos e industriales.
3. Cultivos energéticos.

### Aprovechamiento energético de residuos agrarios

Al contemplar la utilización energética de la biomasa, el interés se centra, en primer lugar, en los residuos y subproductos agrarios, puesto que es una biomasa que ya existe y que, en gran medida, no tiene utilidad para ningún otro aprovechamiento. En muchos casos, la eliminación de tales residuos constituye un problema grave, ya que puede originar conta-

minación, y de solución costosa, en términos económicos y energéticos.

Aunque no existe en España un inventario detallado de residuos agrarios y de su disponibilidad real para su aprovechamiento energético, las cifras siguientes dan una idea de su magnitud:

Cereales . . . . .	12,7	Millones TM/año
Leguminosas . . . . .	0,8	"
Tubérculos . . . . .	5,3	"
Cult. Indust. . . . .	5,1	"
Cult. Forrajeros . . . . .	5,8	"
Frutales . . . . .	5,8	"
Total . . . . .	35,5	"
Estiércol (materia seca) . . . . .	8,6	"
Forestales . . . . .	5,2	"
Industrias agrícolas . . . . .	4,8	"

Sobre la base de estas cifras y aplicando unos índices estimativos de recuperación y de pérdidas energéticas en los procesos de transporte y

transformación, el aprovechamiento energético de los residuos agrarios cubrirá aproximadamente el 4% de la demanda energética nacional, lo que representaría cubrir la práctica totalidad de la energía consumida por la agricultura española.

Se han realizado investigaciones preliminares para determinar el aprovechamiento energético más adecuado para cada tipo de residuo, y una prospección sobre el grado de desarrollo de las tecnologías de transformación ya existentes y aplicables en cada caso.

En 1980, el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) montó, en el Departamento de Análisis Ambiental (Burgos), un sistema de producción de biogás, a escala de laboratorio, en digestores de 25 litros de capacidad. Se está obteniendo metano a partir de distintos residuos or-



Digestor para la producción de biogás a partir de residuos agrarios.



*Paneles solares de apoyo energético a una instalación de biogás.*

gánicos y analizando diversos parámetros que inciden en el proceso de digestión.

El Servicio de Investigación Agraria (SIA) de Cataluña, en colaboración con el INIA, ha completado una instalación piloto para producción de biogás por digestión anaerobia de excrementos-purines procedentes de una explotación ganadera de ganado porcino. Consta, esencialmente, de los siguientes elementos:

- Cuba fermentadora de 10 m<sup>3</sup> de capacidad.
- Cuba gasométrica de campana flotante (5 m<sup>3</sup>).
- Sistema de compresión de recirculación del biogás para agitación del sustrato.
- Calentador-acumulador de 150 litros.

Se ha puesto a punto una metodología de análisis para determinar, entre otros parámetros, la composición del biogás obtenido y el valor agronómico de los lodos efluentes.

En el Centro Regional de Investigación y Desarrollo Agrario de Madrid

(INIA) se lleva a cabo un proyecto para la producción y utilización de biogás a partir de residuos agrícolas y ganaderos, que consta fundamentalmente de:

- Sistema de producción de biogás por digestión anaerobia en un digestor de 50 m<sup>3</sup>.
- Sistema de almacenamiento de biogás.
- Utilización de biogás para calefacción de edificios e invernaderos.
- Producción de biomasa en el citado invernadero, para alimentación del propio digestor.
- Transformación del biogás en electricidad.
- Paneles solares de apoyo energético al conjunto de la instalación.

La Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S. A. (ENADIMSA) tiene en marcha varios proyectos de aprovechamiento de residuos agrarios, entre los que cabe destacar:

- Aprovechamiento energético y ganadero de los residuos de la poda del olivar.

- Aprovechamiento energético de residuos forestales para obtención de carbón vegetal.
- Desarrollo de tecnología para la digestión anaerobia de residuos ganaderos.
- Aprovechamiento energético de residuos de alcoholes.

Diversas instituciones han puesto en marcha estudios de viabilidad de la obtención de alcohol a partir de residuos lignocelulósicos (paja, residuos de poda) y del aprovechamiento de residuos forestales, procedentes de aprovechamientos maderables y trabajos silvícolas.

#### **Aprovechamiento agrícola de residuos urbanos e industriales**

Los sistemas de depuración de las aguas residuales urbanas, ya sean por vía biológica o físico-química, tienen como consecuencia la producción, en cantidades importantes, de un subproducto que se conoce como lodo residual y que es preciso eliminar.

Los sistemas de eliminación más comúnmente utilizados son la simple descarga, la incineración y la utilización agraria.

La utilización agraria de los lodos se está incrementando en los países industriales. Así, por ejemplo, Suiza utiliza el 70% de los lodos producidos; EE. UU., el 25% y Francia, el 24%. Los restantes países de la CEE están abordando también el tema, especialmente Bélgica y Alemania.

Aunque su composición es variable, un lodo residual contiene, aproximadamente, el 4% de nitrógeno total, el 6% de fósforo total y el 0,5% de potasio total. Su utilización agrícola permite, por lo tanto, contribuir a incrementar la fertilidad del suelo.

El INIA ha planteado un proyecto de investigación para:

- Establecer un programa de utilización de los lodos, respondiendo a las necesidades existentes desde

los puntos de vista económico, social y sanitario, incidiendo especialmente en la calidad de los productos agrícolas, la protección del medio ambiente y el ahorro en el consumo de energía.

- Determinar el valor agrícola de los lodos, fijando las condiciones óptimas de su utilización desde el punto de vista del rendimiento y calidad de las cosechas.

El proyecto se realizará simultáneamente en siete regiones agrarias distintas.

Se han iniciado ya trabajos de laboratorio y ensayos de campo en parcelas experimentales (cereales, patata y chopos).

#### **Cultivos energéticos**

Los principales cultivos energéticos que están siendo considerados actualmente son los siguientes:

- a) Cultivos agrícolas de aprovechamiento mixto energético-alimentario.

- Maíz de tallo azucarado. Su grano puede utilizarse para alimento de ganado; su tallo, con un elevado contenido en azúcares fermentables, se puede destinar a la producción de alcohol.

- Sorgo de tallo azucarado, cuya utilización sería similar al anterior: extracción y fermentación de los azúcares del tallo y aprovechamiento del grano y hojas como pienso. El etanol extraído del tallo se estima en 3.000-4.000 litros/ha/año.

- b) Especies vegetales actualmente no cultivadas. Su principal ventaja estriba en su posible adaptación a zonas marginales o áreas no aprovechables para cultivos alimentarios o industriales, con lo que se evitaría la competencia con dichos cultivos.

- c) Especies forestales de crecimiento rápido en ciclos cortos de producción.

El Programa de Investigación del INIA se ha centrado, hasta ahora, en los cultivos agrícolas de aprovechamiento mixto energético-alimentario y en las especies actualmente no cultivadas que pudieran adaptarse a zonas marginales.

Dentro del primer grupo se encuentra el maíz híbrido de tallo azucarado. Se han realizado ensayos de campo en la zona Centro y Levante, colaborando con el Instituto de Biología de Barcelona del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, donde se producen y ensayan estos híbridos, comparando dos híbridos comerciales de maíz con otro de tallo azucarado. Los primeros resultados indican que la materia seca de tallos y hojas, aparte de la producción de grano, varía de 10-20 TM/ha con una posible producción de 2.000 kg/ha de azúcar. El potencial real de producción de alcohol se está cuanti-

ficando actualmente y se prosiguen las experiencias para evaluar las ventajas e inconvenientes de su cultivo.

Se han realizado ensayos, por parte del INIA, en Andalucía (Málaga, Sevilla y Córdoba) y en la zona centro de Madrid con 11 variedades de sorgo dulce. La producción ha superado, en algunos casos, las 100 TM/ha de materia fresca y las 6 TM/ha en azúcares. En fibra seca se han superado las 17 TM/ha, siendo el contenido energético de esta producción del orden de 100.000 Kcal.

Con respecto a las especies espontáneas, se ha realizado una prospección de aquéllas con potencial de producción de gran cantidad de biomasa y con posibilidades de adaptación a condiciones edáficas y climáticas adversas. Entre ellas destacan las siguientes:

- Agave y chumbera. Se ha iniciado su cultivo en parcelas experimentales, para determinar su potencial de producción y la posible obtención de combustibles de su biomasa.
- Cardos. Se están realizando ensayos de campo con las especies *Onopordum nervosum*, *O. acanthium*, *O. illyricum*, *Cynara cardunculus* y *Silybum marianum*. Algunas de estas especies alcanzan gran desarrollo (2,5 a 3 metros), produciendo gran cantidad de material celulósico (alrededor de unas 20 TM/ha/año de materia seca, que podría transformarse en combustible, como, por ejemplo, alcohol).
- Plantas laticíferas. Se ha iniciado un programa de investigación sobre diversas especies de la familia de las euforbiáceas, plantas que producen latex con una composi-



Plantación experimental de "*Euphorbia lathyris*".



ción química análoga a la del petróleo. Las investigaciones se están centrando, sobre todo, en la especie *Euphorbia lathyris*, con la que ya se han iniciado ensayos de campo en parcelas experimentales.

En estos momentos, aún no se puede predecir el futuro de estas especies como cultivos energéticos. Es preciso, previamente, estudiar toda una serie de aspectos fisiológicos, genéticos y agronómicos para poder abordar su cultivo extensivo y analizar su rendimiento, tanto económico

como energético. El potencial energético de estos cultivos es indudable. Falta poder transformar este potencial en realidad y esto es lo que precisamente la investigación agraria está intentando.

Hay que indicar que este apartado presenta una panorámica general de los trabajos que actualmente algunas instituciones desarrollan en este campo, sin la pretensión de ser exhaustivos, reconociendo de antemano la posible exclusión de otras iniciativas, igualmente valiosas.



Plantación de sorgo dulce para extracción de azúcares.



## DEFINICIONES

### A

**Aerobio:** Se dice de microorganismos que se desarrollan en presencia de aire o de oxígeno libre.

**Agroenergía:** Término de reciente creación que se refiere a la actividad agraria en cuanto generadora de energía.

**Algas:** Las más elementales de las plantas verdes. Su tamaño varía de 0,01 cm a 300 m de longitud.

**Amiláceas:** Sustancias que están compuestas principalmente por almidón. Este es la unión de moléculas de glucosa.

**Anaerobio:** Se dice de microorganismos que viven sin necesidad del oxígeno del aire atmosférico.

**Azucarada:** Sustancia compuesta principalmente de azúcar, hidrato de carbono que forma una serie de compuestos solubles en agua y de sabor dulce.

### B

**Bagazo:** Residuo, normalmente de naturaleza lignocelulósica, que permanece después de la extracción industrial del producto principal de los órganos vegetales que constituyen una cosecha.

**Barbecho:** Se llama así al terreno agrícola que no se cultiva durante algún tiempo pero que es sometido a determinadas prácticas de cultivo tendentes fundamentalmente a la acumulación de agua con vista a su nueva utilización para el cultivo.

**Biomasa:** Es la materia producida a partir de procesos biológicos. Es una fuente de energía renovable que se origina a partir de la captación y transformación de energía solar.

### C

**Caloría:** Unidad de medida de la cantidad de calor. Es la milésima parte de la kilocaloría.

**Celulosa:** Constituyente fundamental de la membrana vegetal. Materia orgánica con contenido elevado en carbono e hidrógeno.

**C/N:** Es la relación entre el carbono y el nitrógeno contenidos en una materia orgánica en seco.

**Combustión:** Es el proceso de oxidación completa de la materia.

### D

**DBO:** Demanda bioquímica de oxígeno. Es la cantidad de oxígeno necesaria para la degradación por vía bioquímica, de las materias orgánicas presentes en un litro de agua. Se expresa en mg/litro.

**Digestión:** Es un proceso biológico mediante el cual queda transformada la materia orgánica. Digestión de lodos: fermentación por bacterias anaerobias.

**DQO:** Demanda química de oxígeno. Es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación completa por vía química, de las materias orgánicas presentes en un litro de agua. Se expresa en mg/litro.

### G

**Gasificación:** Es el proceso de combustión en defecto de oxígeno, con producción de gases, de la materia.

### H

**Hidrocarburo:** Compuesto químico formado sólo por carbono e hidrógeno.

**Hidrólisis:** Reacción de descomposición de una sustancia. En muchos casos se provoca por un ácido o por una enzima.

**Hidropónico:** Cultivo sin suelo donde las plantas crecen en soluciones ricas en elementos nutritivos.

## L

**Levadura:** Microorganismo capaz de descomponer algunos compuestos orgánicos, en un medio anaerobio.

**Licuefacción:** Proceso térmico que, a altas presiones y temperaturas y en presencia de catalizadores, produce líquidos combustibles.

**Lignina:** Materia orgánica que se encuentra en los tejidos leñosos de los vegetales y constituye, con la celulosa, las paredes celulares.

**Lux:** Unidad de intensidad luminosa. Una fuente de luz de un watio a una distancia de 1 metro produce 6.801 lux.

## M

**Mejora genética:** Parte de la genética, ciencia que trata de la herencia en los seres vivos, que basándose en los aspectos fundamentales de ésta, pretende la reunión de caracteres interesantes desde el punto de vista agrario en determinado grupo de individuos de una misma especie.

**Metanogénesis:** Etapa final de la digestión anaerobia, en la que el medio favorece una rápida proliferación de bacterias responsables de la formación del metano.

## P

**Pirólisis:** Es el proceso de descomposición térmica de materias orgánicas complejas, en ausencia de oxígeno.

**Plantas C-4:** Esta denominación se refiere a la forma de hacer la fotosíntesis. En particular, las especies así denominadas lo son por fijar una molécula de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico sobre otra molécula ya existente en el vegetal, de tres átomos de carbono, dando como resultado una molécula de cuatro átomos de carbono: C-4. Las plantas denominadas C-3 fijan originariamente

una molécula de  $\text{CO}_2$  sobre otra molécula de cinco átomos de carbono produciendo así una nueva con seis carbonos, que siendo inestable pronto origina dos moléculas con tres átomos de carbono cada una: C-3.

## R

**Residuo agrícola:** Material obtenido a partir de una cosecha o como consecuencia de cualquier actividad agrícola, considerado hasta ahora de valor despreciable y que normalmente se abandona en el terreno.

## S

**Subproducto:** El que se obtiene de una determinada cosecha, de valor complementario pero inferior al principal.

**Sustrato:** Lodos contenidos en el digestor sobre los cuales proliferan las bacterias.

## UNIDADES ENERGETICAS

EQUIVALENCIA DE UNIDADES				
Símbolo	Nombre	kWh	Kcal	Tep
BTU	British Thermal Unit	$2,93 \times 10^{-4}$	0,252	$0,252 \times 10^{-7}$
Kcal	Kilocaloría	$1,163 \times 10^{-3}$	—	$10^{-7}$
KJ	Kilojulio	$0,278 \times 10^{-3}$	0,24	$0,24 \times 10^{-7}$
kWh	Kilowatio-hora	—	800	$0,86 \times 10^{-4}$
MWa	Megawatios-año	$8,76 \times 10^6$	$7,534 \times 10^9$	753,36
MJ	Megajulio	0,278	240	$0,24 \times 10^{-4}$
MTep	Megatep	$1,163 \times 10^{10}$	$10^{13}$	$10^6$
Quad	$10^{15}$ BTU	$293 \times 10^9$	$252 \times 10^{12}$	$0,252 \times 10^8$
TWh	Terawatio-hora	$10^9$	$0,86 \times 10^{12}$	$0,86 \times 10^5$
Th	Termia (Megacaloría)	1,163	$10^3$	$10^{-4}$
Tec	Tonelada equivalente carbón	$0,775 \times 10^4$	$0,667 \times 10^7$	0,667
Tep	Tonelada equivalente petróleo	$1,163 \times 10^4$	$10^7$	—

**PROGRAMA ESPECIAL DE  
INVESTIGACION Y  
DESARROLLO  
"APROVECHAMIENTO  
ENERGETICO DE LA  
BIOMASA Y DE LA  
AGROENERGETICA"  
(RESUMEN)**

En julio de 1981 tiene lugar una jornada de reflexión organizada por el CDTI que congrega a empresas, organismos de la Administración, centros oficiales de investigación y otras instituciones públicas y privadas para contemplar la posibilidad de poner en marcha un programa especial sobre biomasa. Se obtiene un primer listado de proyectos y estudios que se encuentran en curso, al mismo tiempo que se solicita una relación de los que se considera deben emprenderse en el futuro, como consecuencia del estado actual de esta tecnología y de sus perspectivas en los próximos años. En función de ello, se propone a la CAICYT un Programa Especial de I + D en este campo. La propuesta conjunta de los Ministerios de Agricultura y Pesca e Industria y Energía tiene lugar en septiembre del mismo año, obteniéndose la aprobación del Programa en acuerdo del Consejo de Ministros de 30 de octubre.

La resolución del Ministerio de Educación y Ciencia por la que se convoca la presentación de solicitudes para este Programa Especial se produce el 21 de mayo de 1982 (B.O.E. de 9 de julio).

El objetivo global del Programa consiste en conseguir para España el óptimo aprovechamiento energético de la biomasa, así como fomentar la agroenergética y las tecnologías asociadas, contribuyendo, de esta manera y en la medida de lo posible, a la solución de la crisis energética.

El objetivo global indicado se orienta específicamente hacia cuatro grandes objetivos parciales estrechamente relacionados:

- Ahorro energético en la producción agraria y sustitución de la energía fósil por otras energías alternativas o "inputs" de menor coste energético que los actuales.
- Aprovechamiento energético de la biomasa, tanto de la biomasa residual, como de la producida específicamente.

- Aplicación de los resultados obtenidos mediante la puesta a punto de la tecnología necesaria para su integración práctica en los actuales sistemas de explotación agraria.
- Desarrollo de las tecnologías para conseguir los citados ahorros y aprovechamientos mediante procesos y maquinaria de origen nacional.

En consecuencia, el Programa se estructura con un objetivo claramente finalista orientado hacia el desarrollo de actividades de investigación aplicada, desarrollo tecnológico y transferencia de la tecnología adquirida, para lograr:

- A corto plazo, una reducción considerable de la energía consumida por el sector agrario.
- A medio plazo, una autosuficiencia energética de dicho sector y el desarrollo de unos procesos y de unos equipos nacionales.
- A largo plazo, una aportación neta de energía por el sector agrario a otros sectores consumidores de energía.

Resulta evidente que la crisis energética provocada por el encarecimiento del precio del petróleo y —en definitiva— por un progresivo agotamiento de los combustibles fósiles no renovables, no puede resolverse, a corto ni medio plazo, por ninguna otra energía alternativa única. El problema debe enfocarse hacia el máximo aprovechamiento de todas y cada una de las fuentes energéticas potenciales y, especialmente, de aquellas que son renovables para, mediante el uso conjunto de todas ellas, ir reduciendo gradualmente el consumo de combustibles fósiles.

Con el presente programa no se pretende, por lo tanto, resolver globalmente el problema energético en España. Resulta factible, sin embargo, llegar a obtener resultados que permitan cubrir un cierto porcentaje de la demanda energética nacional.

Aunque es aventurado cuantificar de antemano dicho porcentaje, no parece utópico estimarlo en un 10% a medio plazo y en una magnitud superior a largo plazo.

El Programa se estructura en diez subprogramas que abordan las siguientes áreas de actuación:

**Subprograma 1. Energía solar térmica.** Desarrollo de sistemas de muy bajo coste para la captación y aprovechamiento de la energía solar bajo calefacción de invernaderos y otros sistemas de cultivo bajo protección térmica. Desarrollo de prototipos de secaderos solares específicos para distintos cultivos. Sistemas de calefacción única o de apoyo para instalaciones ganaderas.

**Subprograma 2. Energía eólica.** Desarrollo y ensayo de prototipos de captadores eólicos de baja potencia. Análisis de ubicación y condiciones óptimas de aplicación para elevación de aguas subterráneas y para suministro de energía eléctrica en pequeñas explotaciones aisladas.

**Subprogramas 3. Lodos residuales.** Utilización agrícola de lodos procedentes de la depuración de aguas residuales urbanas. Valor como fertilizante y técnica de descontaminación y aplicación. Estudio de su incidencia sobre la calidad de los productos agrícolas y la protección del medio ambiente.

**Subprograma 4. Vertidos de centrales térmicas.** Desarrollo de sistemas de aprovechamiento de la energía térmica disipada en el proceso de refrigeración de centrales térmicas. Posible utilización para calefacción de suelos en cultivos protegidos. Aporte energético para calefacción de invernaderos.

**Subprograma 5. Residuos agrarios.** En base a los inventarios globales de residuos de biomasa principalmente forestal y de cultivos leñosos existentes, diseñar instalaciones piloto

convenientemente localizados que permitan evaluar la viabilidad de aprovechamiento energético de estos recursos.

**Subprograma 6. Cultivos energéticos.** Prospección e identificación de especies con elevada rusticidad y producción de biomasa transformable. Domesticación y técnicas de explotación de especies no cultivadas en áreas marginales o no aprovechables para fines alimentarios o industriales. Balances energéticos. Plantas piloto de transformación.

**Subprograma 7. Plantas acuáticas.** Domesticación y aprovechamiento energético y descontaminante.

**Subprograma 8. Transformación de biomasa por vía seca.** Producción de briquetas de carbón vegetal procedente de residuos forestales. Preparación de combustibles comerciales a partir de residuos de poda u otros. Procesos termoquímicos y otros para producir combustibles líquidos a partir de residuos orgánicos.

**Subprograma 9. Fermentaciones:**

a) Aprovechamiento agrícola de compost procedente de residuos urbanos. Compostaje a partir de residuos forestales urbanos y ganaderos y producción de briquetas y polvo combustible. Prototipos de maquinaria e instalaciones.

b) Desarrollo de plantas piloto para producción de alcoholes a partir de residuos azucarados, amiláceos o celulósicos mediante fermentación. Hidrólisis ácida microbiológica y/o enzimática. Estudios de viabilidad de plantas a gran escala.

c) Fermentación anaerobia mesófila y termófila. Diseño y ensayo de digestores de una o dos fases. Tratamientos previos. Filtros anaerobios. Lecho fluidizado. Rendimiento y costes operacionales de los digestores. Aprovechamiento de biogás. Instalaciones integradas a escala comercial

para tratamiento de residuos ganaderos, cultivos energéticos y residuos orgánicos de procesos industriales.

**Subprograma 10.** Recoge aquellos proyectos muy directamente relacionados con los objetivos del Programa no incorporables a los subprogramas anteriores pero que pueden incidir de forma específica y destaca en el ahorro o producción de energía en el sector agrario.

## BIBLIOGRAFIA

- AARONSON, S. et al. 1978. *Microalgae as source of chemicals and natural products. The production and use of microalgal biomass*. AKKO, Israel.
- ALLIRAND, J. M. 1977. *Memoire de fin d'études*. Centre National de Recherches Agronomiques. Station de Bioclimatologie. Versailles.
- AYERBE MATEO-SAGASTA, L. 1981. *Biohidrocarburos y Combustibles naturales*. II Curso de Agroenergética U.P.M. INIA. Madrid.
- BLANCO, M., BLANCO, J. L. y SALEMA, A. 1957. *Obtención de Híbridos de maíz de tallo azucarado de doble aprovechamiento —grano y planta— y estudio comparativo de su valor industrial, agrícola y económico*. Trabajos Experimentales C.S.I.C.
- BONETTI, M. et al. 1979. *Impiego del Giacinto Acquatico per l'utilizzazione produttiva di effluenti termici ed organici*. CNEN-CSN, Casaccia.
- BONETTI, M. et al. 1981. *Produzione de biogas da fitomasse*. CNEN-RT (BIO) 81.6.
- BRAUNSTEIN, et al. 1981. *Biomass, Energy Systems and the environment*. Pergamon Press.
- BUCHANAN, S. A. et al. 1978. a. *Hydrocarbon and Rubber-Producing Crops*. *Economic Botany* 32, 131-145.
- BUCHANAN, R. A. et al. 1978. b. *Hydrocarbon and Rubber-Producing Crops*. *Economic Botany* 32, 146-153.
- CALVIN, M. 1980. b. *Comunicación Personal*.
- CALVIN, M. 1978. *Chemistry, Population, Resources*. *Interdisciplinary Science Reviews* 2,3, 233-243.
- CALVIN, M. 1980. a. *Obtención de hidrocarburos mediante cultivos agrícolas*. Conferencia pronunciada en la E.T.S. de Ingenieros Agrónomos de Madrid, el 3 de junio de 1980.
- CASADEVALL, E. et al. 1980. *La culture de l'algue unicellulaire Botryococcus Braunii; Une source renouvelable d'Hydrocarbures*. Colloque CENECA. Agricultures et énergie. Paris.
- CASTAÑEDA, E. b. *Biomasa residual*. II Curso de Agroenergética. U.P.M. INIA. Madrid.
- CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ENERGIA: *La biomasa como fuente energética*. Ministerio de Industria y Energía. Madrid. 1981.
- CISSY WALLACE. MAZINGIRA 11, Foro.
- COUPLET, P. y ALBAGNAC, G. 1978. *La digestión anaerobia. Applications aux industries agro-alimentaires*. *Ann. Technol. Agric.* 27, 2, 533-564.
- CUADROS, S. 1981. *Biomasa residual de origen agrario*. II Curso de Agroenergética. U.P.M. INIA. Madrid.
- CUTTER, E. G. 1978. *Plant Anatomy Part I Cells and Tissues*. Edward Arnold London.
- CHARTIER, P. y MERIAUX, S. 1981. *La energía de la biomasa*. *Mundo Científico*, 2, 160-171.
- CHEREMISINOFF, M. P.; CHERENISINOFF, P. N. y ELLERBUSCH, F. 1980. *Biomass. Applications, technology and production*. Energy, Power and Environment. West Lafayette.
- CHEREMISINOFF, N. P. *Gasohol for energy Production 1979* Ann Arbor Science, Michigan.
- CHEREMISINOFF, P. N. y MORRESI, A. C. 1976. *Energy from solid wastes*. Marcel Dekker Inc. New York.
- DEMEYER, A. et al. 1981. *La Conversion Bioenergetique du rayonnement solaire et les biotechnologies*. Technique et Documentation. Paris.
- DE RANZO, D. J. 1977. *Energy from bioconversion of waste materials*. Noyes Data Corp. New Jersey.
- EDWARDS, Y. y Mc BRICE, B. C. 1975. *New method for the isolation and identification of methanogenic bacteria*. *Appl. Microbiol.* 29, 540-545.
- FAHN, A. D. 1972. *Plant Anatomy*. Pergamon Press Oxford.
- F.A.O. 1980. *Documento ECA. 22/80 (4a)*. Junio.
- FETTWEIS, D. 1979. *Fermentation méthanique en deux phases: Metabolisme des acides gras volatils, Application aux eaux résiduaires de distilleries*. DEA. Sciences Alimentaires. Montpellier.
- FIESTAS ROS DE URSINOS, J. A. 1979. *Obtención de energía en la industria alimentaria a partir de la depuración anaerobia de sus residuos*. Simposio: Posibilidades de aprovechamiento de nuevas fuentes de energía. FVEA. Valencia.
- FLORENZANO, G. 1959. *Moderni processi microbiologici e biochimici nel campo delle industrie agraria*. Instituto de Microbiología Agraria. Universidad de Florencia.
- FRANCOIS, J. 1978. *Eichhornia Crassipes, peste aquatique. Un hydrophyte d'avenir? Helionynthèse et aquaculture*. Séminaire de Martiques.
- GOMEZ GALLARDO, F. 1980. *La madera como solución local a la crisis de la energía*. II Curso de Agroenergética. U.P.M. INIA. Madrid.
- GOWEKW, C. et al. 1964. *Role of Plants in closed systems*. *Ann. Rev. Plant. Physiol.* 15, 387-408.
- HESS, D. 1975. *Plant Physiology*. Springer-Verlag. Berlin.
- HEUKEVEKIAN, H. y MUELLER, P. 1958. *Transformation of some lipids in anaerobic sludge digestion*. *Sewage Ind. Wastes*, 30, 1108.
- HILLEN, L. W. y WARREN, D. R. 1976. *Mechanical engineering report 148*. Department of Defence. Australia.
- HILLMAN, W. S. et al. 1978. *The uses of Duckweed*. *American Scientist*, 66, 442-451.
- HITCHCOCK, A. E. et al. 1950. *Growth and reproduction of water hyacinth: an alligator weed and their control by means of 2, 4-D*. *Contr. Boyce Thompson Inst.* XVI, 3, 91-130.



- HITCHCOK, A. E. et al. 1949. *Water hyacinth: its growth reproduction and practical control by 2, 4-D*. Contr. Boyce Thompson Inst. XV, 7, 363-401.
- HOBSON, P. N.; BOUSFIELD, S. y SUMMERS, R. 1981. *Methane Production from Agricultural and Domestic Wastes*. Applied Science Publishers Ltd. London.
- IBAÑEZ, G. 1980. *Bioconversión de Jacintos en metano*. VII Convención Nacional de la Industria Química. Sevilla.
- JAYET, P. A. 1979. *Bioconversión: Energie et Agriculture*. Revue de l'Energie n.º Spécial. Energie solaire, 313, 267-279.
- JAYET, P. A. 1978. *Bioconversión et transformations thermochimiques de la biomasse*. DEA. INRA. Ecole de Mines.
- JAYET, P. A. y SORIE, J. C. 1979. *La Biomasse; source d'énergie*. OCDE. INRA.
- JIMENEZ, S. 1981. *La biomasa residual como fuente de energía*. Conferencia en el Colegio Oficial de ITA y PA de Badajoz. Badajoz.
- JIMENEZ, S. 1982. *Generación y aprovechamiento de alcoholes de origen vegetal*. Cursillo sobre energías renovables en el medio rural. CEOTMA/MOPU. Madrid.
- JIMENEZ, S. 1982. *Panorámica sobre el beneficio de las biomásas*. CEOTMA/MOPU. (En prensa).
- JIMENEZ, S. 1981. *Posibilidades potenciales de las biomásas*. Conferencia en el Instituto de España. Madrid.
- JIMENEZ, S. 1981. *Protección del medio urbano*. Ciclo de Conferencias sobre Ordenación del Territorio. ETSIA. Lérida.
- JOHNSON, J. D. and HINMAN, C. W. 1980. *Oils and Rubber from Arid Land Plants*. Science, 208, 460-464.
- JOURNET, E. 1979. *Culture en serie de la Jacinthe d'eau*. Memoire de DEA. Paris XI.
- KOTZE, J. P. et al. 1969. *Anaerobic digestion. The characterization and control of anaerobic digestion*. Water Res., 3, 459-494.
- KOTZE, J. P. et al. 1968. *A biological and chemical study of several anaerobic digesters*. Water Res., 2, 195-213.
- LEMOYNE HOGAN, Et al. 1980. *Joyoba: A New Horticultural Crop for Arid Regions*. Hort. Science, 15, 2, 114.
- LOOMIS, R. S. 1980. *Agriculture* (En prensa)
- MELLADO, L. 1980. *Producción de combustible a partir de la biomasa*. Seminario sobre recuperación de recursos de los residuos. Soria.
- MERRIL, R. y FRY, L. J. 1973. *Methane digesters for fuel gas and fertilizer*. New Alchemy Institute. Santa Barbara. California.
- MIGUEL, A. de. 1979. *El futuro de la Energía de la Empresa Agraria*. Ponencia 1.ª. IX Conferencia Internacional de Mecanización Agraria. Zaragoza.
- Ministerio de Agricultura. 1962. *Mapa de cultivos y Aprovechamiento de España*.
- Ministerio de Agricultura. 1979. *Anuario de Estadística Agraria*.
- MIRANDA DE ONIS, J. 1980. *Producción de biomasa mediante cultivos herbáceos*. I Curso de Agroenergética. U.P.M. INIA. Madrid.
- MONROY, O. y VINIEGRA, G. 1981. *Bioteología para el aprovechamiento de los desperdicios orgánicos*. AGT Editor, S. A. México.
- NEMETHY, E. K. et al. 1979. *Analysis of extractable from the Euphorbia*. J. Amer. Oil Chem. Assoc., 56, 957.
- NUÑEZ, M. 1981. *Hidrólisis enzimática de la celulosa*. II Curso de Agroenergética. U.P.M. INIA. Madrid.
- ORTEGA, M. M. 1972. *Estudio de las algas comestibles del Valle de México*. Rev. Lat. Amer. Microbiol., 14, 2, 85-87.
- ORTIZ-CAÑAVATE, J. 1979. *Combustibles gaseosos de origen agrícola para motores de combustión interna*. Simposio: Posibilidades de aprovechamiento de nuevas fuentes de energía. FVEA. Valencia.
- ORTIZ-CAÑAVATE, J. y MUÑOZ, J. A. *Generación de biogás y gas de gasógeno y su aplicación a motores de combustión interna*. XIII Conferencia Internacional de Mecanización Agraria. Zaragoza.
- OSWALD, W. J. et al. 1960. *Biological transformation of solar energy*. Adv. Appl. Microbio., 2, 223-262.
- PARCEVAUX, M. S. de. 1980. *Possibilités d'utilisation de la Jacinthe d'eau en France*. Colloque CENECA, Agriculture et énergie. Paris.
- PEREZ SARMENTERO, J. 1981. *Producción de etanol*. II Curso de Agroenergética. U.P.M. INIA. Madrid.
- Proceedings of the E. C. Contrator's Meeting held in Copenhagen. 23-24 June. 1981. Energy From Biomass.
- RODRIGUEZ-LOPEZ, M. 1965. *Morphological and structural changes produced in Chlorella Pyrenoidosa by assimilable sugars*. Archiv für Mikrobiologie, 52, 319-324.
- RODRIGUEZ-LOPEZ, M. 1981. *Producción de biomasa mediante cultivos de microalgas*. II Curso de Agroenergética. U.P.M. INIA. Madrid.
- RODRIGUEZ-LOPEZ, M. et al. 1975. *Estudio sobre Chlorella en orden a su utilización en la alimentación humana y/o animal*. Anal. Bromatol. XXVII, 3, 275-286.
- ROUSTAN, J. L. 1980. *Fermentation méthanique des déjections animales et production de biogaz. Principe et réflexions sur les résultats et les problèmes posés*. Journées d'études du SITMA. Mécanisation agricole et crise de l'énergie.

- RUIZ-ARGÜESO, T. 1981. *Biogénesis de metano e hidrógeno*. II Curso de Agroenergética. U.P.M. INIA. Madrid.
- SANDERS, F. A. y BLOODGOOD, D. E. 1965. *The effect of nitrogen to carbon ratio on anerobic descomposition*. J. Water. Pollot. Control. Fed., 37, 1, 741-752.
- SANTAMARIA, J. 1980. *Biogénesis del metano*. I Curso de Agroenergética. U.P.M. INIA. Madrid.
- SANTAMARIA, J. 1981. *Fermentación alcohólica*. II Curso de Agroenergética. U.P.M. INIA. Madrid.
- SAUZE, F. 1981. *Potentiel énergétique et chimique de la biomasse aquatique*. La technique de l'eau et de l'assainissement, n.º 413.
- SCHWOB, Y. 1977. *Bois et charbon de bois: Chimie et économie de la carbonisation*. PCUK.
- SINGH, R. B. 1974. *Biogas plant. Generating methane from organic wastes*. Gobar Gas Researcha Station, Ajitmal. Etawah (U.P.). India.
- SINGH, R. B. 1971. *Biogas plant*. Gobar Research Station, Ajitmal. Etawah (U.P.). India.
- SINGH, R. B. 1971. *Some experiments with biogas*. Gobar Gas Research Station, Ajitmal. Etawah (U.P.). India.
- Solar Energy R & D in the European Community.
- STAFFORD, D. A.; HAWKES, D. L. y HORTON, R. 1976. *Methane Production from waste Organic Matter*. CRC Press. Inc. Boca Raton. Florida.
- TAIGANIDES, E. P. 1980. *Recuperación de energía de los excrementos animales*. Revista Mundial de Zootecnia, n.º 35, 2-12.
- U.N.E.P. 1981. *Biogas Fertilizer System: Technical Report on training Seminar in China*. Nairobi. Kenya.
- VALLES, S. et al. 1980. *Producción de metano por fermentación anaerobia*. I. Descripción del proceso. Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment., 20, 2, 189-208.
- VAN DEN BERG, L. y LENTZ, C. P. 1977. *Methane production during treatment of food plant wastes by anaerobic digestion, Food, Fertilizer and Agricultural residues*. Cornell Agricultural Waste Management Conference. Ann Arbor Science, 381, 393. Michigan.
- WILKOMM, M. et LANGE, J. 1980. *Prodromus Florae Hispanicae*. Stuttgart. Vol. III.
- WOLVERTON, B. C. et al. 1978. *Compiled data on the vascular aquatic plant program: 1975-1977*. Water hyacinth. NASA/ERL. Washington D.C.
- WOLVERTON, B. C. y DONALD, R. C. 1978. *The water hyacinth: from prolific pest to potential provider*. Ambio., 8, 1, 2-9.

## AGRADECIMIENTO

El presente documento ha sido elaborado por:

Luis Ayerbe Mateo-Sagasta  
Manuel Bigeriego Martín de Saavedra  
Emilio Buendía Manzanares  
Luis Mellado Brauns  
José Luis Tenorio Pasamón

A ellos y a cuantas personas colaboraron con sus críticas y sugerencias, el agradecimiento del CDTI.



La Innovación Industrial y las relaciones Industria-Universidad



La Innovación Industrial y su Tratamiento Fiscal



La conversión fotovoltaica de la energía solar



La ingeniería genética en la biotecnología



Innovación industrial y sistema educativo



¿Qué es la innovación tecnológica?



La telemática



Innovación Industrial  
y Empleo



Robótica Industrial



La financiación de la  
innovación industrial.



Pequeñas centrales  
hidráulicas



El microprocesador  
en la industria

CDTI

Centro para el  
Desarrollo Tecnológico  
Industrial

Ministerio  
de Industria y Energía

Edificio Gan  
Ramírez de Arellano s/n  
Madrid 27  
España

Apto. de Correos: 29136  
Teléf: (91) 416 2016  
Telex: 23121 CDTI E