

**PERSPECTIVAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES EN ARGENTINA,  
CON ÉNFASIS EN EL ETANOL DE BASE CELULÓSICA**

**INFORME FINAL**

**Noviembre 2006**

**Lic. Rubén Patrouilleau<sup>1</sup>**

**Lic. Carlos Lacoste**

**Ing. Pablo Yapura<sup>1</sup>**

**Ing. Mónica Casanovas<sup>1</sup>**

1. En cumplimiento de sus respectivos contratos de locación de obra con Fundación ArgenInta.

## MEMORIA DESCRIPTIVA

El objetivo del presente trabajo es contribuir a mejorar la calidad decisional de los referentes políticos e institucionales del campo agropecuario del gobierno argentino. A ese fin, se pretende trazar una síntesis diagnóstica de la pertinencia económica, tecnológica y ambiental de la producción del etanol como biocombustible en Argentina, con énfasis en la posible utilización de materia prima de naturaleza ligno-celulósica, de fuente agrícola, y forestal.

En procura de cumplimentar ese objetivo, el presente trabajo presenta una revisión relativamente pormenorizada de *la biomasa como materia prima para la generación de biocombustibles*, en correlación con el alcance originalmente pretendido, y consignado en los términos de referencia del trabajo, detallando sus propiedades químicas relevantes para tal finalidad. Con ese objetivo, se efectúa una descripción del estado actual que ha alcanzado a nivel internacional el desarrollo tecnológico de los procesos de obtención del etanol a partir de celulosa de maderas duras, maderas blandas, residuos forestales, y residuos agrícolas.

Al respecto, fueron relevadas las diferentes técnicas de pre-tratamiento y tratamiento orientados a provocar tanto la hidrólisis ácida como la enzimática de la celulosa y la hemicelulosa, orientada a producir la ruptura de las largas cadenas de los polisacáridos para su transformación en sus respectivos monómeros. Del mismo modo, también se relevaron los diferentes procesos y microorganismos encargados de fermentar los azúcares de seis, y cinco carbonos. El relevamiento incluye un listado de las diferentes plantas ya instaladas en el mundo, sus escalas de producción, y las tecnologías que aplican en la producción de etanol.

También se presenta información sobre la producción forestal primaria actual y futura, sobre la actividad foresto-industrial y una estimación de la cantidad de residuos que produce, todo en referencia a la cuantificación de materia prima potencial utilizable. Como una contribución adicional, y a fin de ir permitiendo dimensionar los recursos naturales y tierras a afectar para dar abasto a la eventual producción de etanol mediante material ligno-celulósico, se pone a consideración una estimación sobre la superficie necesaria para el abastecimiento de la demanda con plantaciones forestales, analizando la potencialidad de diferentes núcleos regionales, y realizando un somero análisis sobre particularidades que al mismo fin debieran ser consideradas, si es que se piensa en los residuos agrícolas como materia prima.

Finalmente, se hace una comparación de las diferentes opciones para producir etanol comparando la alternativa de hacerlo mediante fuente celulósica, versus otras materias primas y procesos industriales, y analizando los aspectos económicos, energéticos, ambientales y sociales más significativos que resultan de ese cotejo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>BIOCOMBUSTIBLES.....</b>	<b>2</b>
Bioetanol como combustible.....	3
<b>2. LA BIOMASA COMO FUENTE DE OBTENCION DEL ETANOL .....</b>	<b>5</b>
<b>BIOMASA .....</b>	<b>5</b>
Los azúcares en la biomasa .....	5
Azúcares monoméricos o diméricos .....	6
Almidón.....	6
Compuestos celulósicos .....	7
Celulosa.....	7
Hemicelulosa.....	8
<b>BIOMASA LIGNOCELULÓSICA .....</b>	<b>10</b>
Lignina .....	11
<b>3. PROCESOS DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA .....</b>	<b>14</b>
Hidrólisis ácida.....	14
Hidrólisis enzimática.....	15
<b>PRETRATAMIENTO DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA .....</b>	<b>17</b>
Pretratamientos físicos .....	18
Trituración mecánica.....	18
Radiación de alta energía.....	18
Pretratamientos físico-químicos.....	18
Explosión por vapor .....	18
Proceso de explosión por vapor con amoníaco (AFEX).....	19
Explosión con CO <sub>2</sub> .....	20
Pretratamientos químicos .....	20
Tratamiento con agua caliente líquida.....	20
Oxidación húmeda.....	20
Tratamientos con ozono .....	20
Hidrólisis con álcalis .....	21
Tratamiento con solventes orgánicos .....	21
Pretratamientos biológicos .....	21

<b>PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA CELULOSA EN ETANOL .....</b>	<b>21</b>
Procesos en dos etapas .....	22
Procesos en una etapa.....	22
Utilización de levaduras termo-tolerantes en los procesos de obtención de etanol .....	23
Avances biotecnológicos en el proceso de fermentación.....	24
Avances a nivel internacional en la producción de etanol a partir de fuentes lignocelulósicas .....	24
<b>4. LAS MATERIAS PRIMAS DE FUENTE CELULÓSICA.....</b>	<b>26</b>
El sector forestal primario .....	27
La industria forestal.....	29
Materia prima forestal para el etanol de base celulósica.....	30
Biomasa originada en la agricultura como materia prima.....	36
<b>5. VISIÓN COMPARADA DE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE ETANOL.....</b>	<b>39</b>
Aspectos económicos .....	39
Aspectos energéticos .....	41
Aspectos ambientales .....	42
Impactos globales y locales sobre el recurso aire, gases efecto invernadero .....	42
Impactos locales sobre el recurso agua .....	43
Aspectos sociales.....	44
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>46</b>
<b>7. DESAFÍOS.....</b>	<b>49</b>
Instituciones nacionales relevadas .....	49
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles constituyen una de las expresiones más conspicuas de las energías renovables para las que Argentina y Sudamérica presentan ventajas comparativas importantes, tanto en términos de su autoabastecimiento energético, como de su exportación a países industriales que deben mejorar su balance energético en función de los compromisos asumidos ante la comunidad internacional en el marco del primer periodo de compromiso previsto por el Protocolo de Kyoto (2008-2012). En este sentido es que el Congreso Nacional promulgó la ley nacional N° 26093 que fija que a partir del año 2010 todos los combustibles que se expendan en el país deberán contener un mínimo del 5% de biocombustibles, tanto para el gas oil como para las naftas. Así como en Argentina se ha promulgado esta ley, metas similares se han establecido en la Unión Europea.

Reducir la alta dependencia energética de los productos petrolíferos y aumentar la seguridad del suministro sostenible de un combustible en el sector del transporte constituyen objetivos prioritarios de toda estrategia energética. Uno de los usos masivos de combustibles fósiles es su utilización en el auto-transporte, en donde se utilizan principalmente dos tipos de combustibles líquidos: el gas oil y las naftas. En Argentina en el caso del gasoil el bio-sustituto más probable a imponerse como elección para cumplir con la normativa son los ésteres metílicos o etílicos de los ácidos grasos contenidos en aceites vegetales (comúnmente denominados biodiesel), los que en principio se estima serán provistos –básicamente y en las primeras etapas– por aceite devenido del procesamiento de la soja, aunque seguramente se progresará al uso de aceites provenientes de otras oleaginosas y/o frutos.

En el caso de las naftas, el bio-sustituto es el etanol, que puede utilizarse directamente como aditivo antidetonante en pequeñas proporciones (5-10%), o transformado en el aditivo ETBE (etilterbutil ester) para reemplazar al aditivo antidetonante MTBE (metiliterbutil ester), que es el utilizado hoy en día, aunque presenta innumerables impactos ambientales. Es de destacar que el etanol puede ser utilizado como combustible directo (sin corte con hidrocarburos fósiles) en su forma no anhidra, en motores específicamente diseñados al efecto, o en cualquier proporción de corte con naftas de origen fósil, en motores con tecnología denominada flex-fuel.

Las demandas mínimas de biocombustibles estimadas para el año 2010, se sitúan en el orden de los 800 a 900 mil m<sup>3</sup> anuales de biodiesel (demanda actual de gasoil de 12,6 millones de m<sup>3</sup> anuales creciendo alrededor de 5% anual) y 400 mil m<sup>3</sup> anuales de etanol (demanda actual de naftas estabilizada en 4 millones de m<sup>3</sup> anuales y tomado como base al menos un corte del 10% como reemplazante total del MTBE).

En el caso del biodiesel se estima que no habrá mayores problemas de abastecimiento de aceites vegetales para la producción ya que Argentina es un fuerte exportador de aceites vegetales, y el corte al 5% para el combustible local requerirá alrededor del 15% de la producción anual actual de aceites vegetales. Inclusive esta producción actual permitirá satisfacer necesidades del exterior, como sucede actualmente con un pequeño productor (Fox-oil) que está exportando su producto a Alemania.

*Para el etanol la situación es muy diferente ya que actualmente sólo se producen 160 mil m<sup>3</sup> anuales (OCEBA), fundamentalmente por fermentación de caña de azúcar, cereales o frutas. Además se puede destacar que en el presente prácticamente no se utiliza como combustible líquido y la mayor parte se exporta. Esto implica que será necesario incrementar fuertemente la producción de etanol si se debe satisfacer esta nueva necesidad. Por lo tanto, el desarrollo de la producción de etanol tiene reservado, para el futuro inmediato y mediato, un papel importante para un abanico de opciones productivas estratégicas para abastecer el requerimiento de este*

nuevo combustible en el plano local, con potencial para alimentar un mercado internacional de creciente demanda de energía a partir de fuentes renovables.

En este marco conviene destacar que las opciones actuales de producción de etanol en Argentina dificultan la obtención de un producto de uso masivo que pueda competir en precio con el etanol producido en Brasil. El etanol brasileño se obtiene básicamente por fermentación de caña de azúcar, y las condiciones de producción de toda la cadena productiva en Brasil son tales, que el etanol de este país es el único en el nivel internacional que en el presente puede competir con ventajas respecto a las naftas de petróleo. Ningún otro productor de etanol (USA, Canadá, España, India, Colombia, República Dominicana) ha alcanzado esa competitividad. Ello se debe básicamente a las condiciones extraordinarias que presenta el cultivo de la caña de azúcar en Brasil, que permite producir materia prima con altos rendimientos y costos relativamente bajos, pero también a la continuidad de la investigación y desarrollo, tanto del sector primario (variedades de caña, métodos de cultivo-cosecha, etc.) como del industrial, resultante de los subsidios estatales que tuvo esta cadena productiva durante más de 30 años (WB Draft, 2005).

La otra fuente importante de materia prima en la actualidad es el maíz. Si bien tecnológicamente aún se puede mejorar la eficiencia en la cadena productiva del etanol a partir del almidón de maíz, en el nivel internacional no se espera una reducción de los costos de producción más allá del 10% de los niveles actuales (Graf Angela, 2000). Esto sugiere que será muy difícil que pueda competir con el etanol producido en Brasil. Otra opción con potencial para la producción del etanol es la fermentación de las hexosas y pentosas contenidas en la celulosa y hemicelulosa que se encuentra en distintos vegetales. Si bien en la actualidad el precio no resulta competitivo, se espera que los progresos en el desarrollo tecnológico, tanto en la extracción de las hexosas y pentosas contenidas en maderas, residuos agrícolas y otros cultivos, como en la eficiencia en los procesos de fermentación de los azúcares de 5 carbonos, permitirá reducir sensiblemente el costo actual del etanol de base celulósica. Concurren a este pronóstico las diferentes fuentes de celulosa y hemicelulosa que se pueden utilizar (entre ellas los residuos agrícolas), el relativamente bajo costo de la materia prima (en el caso de ciertos residuos estaría reducido al de recolección y transporte) y a que no es estrictamente necesario contar con condiciones agrícolas excepcionales para su producción, factor sin duda determinante en la competitividad del etanol brasileño.

Para contribuir al cumplimiento de las metas establecidas en la ley 26093, el gobierno nacional debe tomar decisiones estratégicas con el mayor grado de información posible. Ello implica la necesidad de contar con mayores precisiones sobre los recursos naturales que constituirán la materia prima para los biocombustibles, las alternativas tecnológicas de su producción, los escenarios y circunstancias económicas presentes y de mediano plazo, siempre con las debidas consideraciones ambientales en el orden general, y las relativas al cambio climático en particular. Del mismo modo, parece necesario profundizar el conocimiento de las fortalezas y debilidades que en estos campos presenta el etanol, en particular cuando deviene de fuente celulósica, considerándolo como uso alternativo a otros destinos de la celulosa.

## **BIOCOMBUSTIBLES**

El término *biocombustible* engloba a todos aquellos combustibles derivados de la biomasa vegetal, los que pueden ser líquidos, gaseosos o sólidos. En general los biocombustibles sólidos se utilizan para la generación de energía térmica y no para el auto-transporte. Los biocombustibles líquidos y gaseosos dedicados al auto-transporte deben presentar, como condición necesaria, características similares a los productos de origen fósil, tal que permitan su utilización en motores a explosión, los que conceptualmente han evolucionado en su tecnología

para obtener el máximo rendimiento posible de esos combustibles fósiles. La principal ventaja de los biocombustibles es que no contribuyen a aumentar la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera, ya que los mismos se reciclan y no se extraen de fuentes de carbono secuestradas de la atmósfera, como son los yacimientos fósiles.

A nivel local, la producción de biocombustibles en Argentina supone una alternativa agrícola interesante, para contribuir en forma eficaz a la generación de empleo en los sectores de la agricultura, industria y servicios, fundamentalmente en el área rural, en la que seguramente contribuirá a la recomposición de economías regionales hoy deprimidas, que las transforman en expulsoras de mano de obra.

Para que los biocombustibles de origen agrícola sean una alternativa energética real se necesita que estos productos no sólo presenten características equivalentes a los de procedencia fósil, sino que el balance energético a lo largo de su cadena productiva sea positivo, y que su costo de producción, una vez tomadas en cuenta las externalidades sociales y ambientales, también resulte favorable o al menos neutro con respecto al de los combustibles fósiles.

En la actualidad los biocombustibles líquidos se obtienen a partir de productos agrícolas tales como el azúcar, los cereales y semillas oleaginosas, que se producen principalmente para el sector alimentario.

### **Bioetanol como combustible**

El etanol puede utilizarse como combustible único realizando modificaciones a los motores, o en mezclas con la gasolina desde un 10% hasta mezclas mucho más altas como el E-85 (15% de gasolina y 85% de etanol) que puede utilizarse en los vehículos denominados FFV (Flexible Fuel Vehicle), equipados con un sensor de combustible que detecta la proporción etanol/gasolina, adaptando los sistemas de inyección e ignición a las características de la mezcla. Estos vehículos están disponibles en países como Estados Unidos, Brasil o Suecia.

En algunos países se prefiere utilizar mezclas de etanol con nafta después de transformar el etanol en ETBE, producto principal de la reacción en la que interviene una molécula de etanol y otra de isobuteno (55% isobuteno + 45% etanol = ETBE). El ETBE es una alternativa al MTBE (metil terciario butil éter; 64% Isobuteno + 36% Metanol = MTBE) que actualmente se está utilizando como producto oxigenado sustitutivo del tetraetilo de plomo para mejorar el índice de octano. El ETBE tiene un índice de octano y un poder calorífico ligeramente superior al MTBE y su rendimiento de fabricación, a partir del isobuteno, es más elevado.

El ETBE se puede producir en las mismas instalaciones en las que ahora se obtiene el MTBE, y en los países de la UE se acepta su incorporación como oxigenante de las gasolinas hasta un porcentaje del 10%, sin que su contenido deba declararse como una característica especial para su venta, y siendo su empleo totalmente aceptado por los fabricantes de automóviles. Su desventaja frente al MTBE es el mayor costo del etanol obtenido por fermentación frente al metanol de origen petroquímico, lo que hace que en la actualidad el ETBE sea más caro de producir que su antecesor el MTBE (Ballesteros, 2001), si no se toman en cuenta las externalidades ambientales negativas de este último

Para mejorar la competitividad del bioetanol frente a los combustibles derivados del petróleo se deben reducir los costos de producción, y para ello, se necesita reducir el precio de las materias primas, ya que estas suponen alrededor del 60% del costo final del etanol (WB Draft, 2005). Es necesario desarrollar nuevos cultivos y considerar la biomasa secundaria y los residuos orgánicos como recursos complementarios para la producción de biocombustibles. La utilización de biomasa lignocelulósica es, a mediano plazo, la opción más prometedora para la

obtención de etanol combustible a bajos costos, posibilitando que este producto pueda ser adoptado por la industria.

## 2. LA BIOMASA COMO FUENTE DE OBTENCION DEL ETANOL

El etanol puede ser obtenido sintéticamente a partir del petróleo, o por conversión de materiales derivados de la biomasa, a través de la fermentación. Hoy en día, alrededor del 93% del etanol es producido a través de la fermentación de algún tipo de biomasa, y un 7% por métodos sintéticos (Rhodes & Fletcher, 1996). El método de fermentación utiliza generalmente tres etapas: 1) la obtención de una solución de azúcares fermentables derivados de biomasa, 2) la fermentación de esos azúcares en etanol, y 3) la separación y purificación del etanol, generalmente por destilación.

### BIOMASA

Bajo el término biomasa se incluye toda la materia orgánica que tiene su origen inmediato en un proceso biológico (Fernández, 1995). La formación de biomasa vegetal está basada en el proceso de fotosíntesis que a partir de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico, y de una fuente energética de irradiación (luz), lleva a cabo un proceso de síntesis en los vegetales terrestres y algas, que da lugar a moléculas orgánicas con alto contenido de energía química. La producción de biomasa a escala global en el planeta es muy alta, estimándose que *la fotosíntesis fija anualmente 220 mil millones de toneladas de peso seco de biomasa, lo que supone unas diez veces la demanda energética mundial.*

Atendiendo a su origen, la biomasa se puede clasificar en:

- *Biomasa natural*, producida en los ecosistemas naturales. Aunque es una de las principales fuentes energéticas en los países en vías de desarrollo, no es la más adecuada para un aprovechamiento energético masivo, ya que podría originar una rápida degradación de los ecosistemas.
- *Biomasa cultivada* con fines energéticos y no alimentarios (leñosa o herbácea). Se pueden diferenciar dos tipos, los orientados a la producción de materiales leñosos con especies arbóreas de crecimiento rápido como álamo, pinos, eucaliptos y los orientados a la producción de especies vegetales anuales, como por ejemplo el cardo cynara.
- *Biomasa residual*, generada como residuo en los procesos productivos de los sectores agrícola, forestal e industrial, y residuos urbanos. Los residuos agrícolas proceden de los cultivos leñosos y herbáceos, destacándose los producidos en los cultivos de cereales. También se deben incluir los residuos de la industria agrícola resultantes del acondicionamiento y selección de los granos cosechados, como las cascarillas de arroz y girasol. Por su parte, los de origen forestal proceden de los tratamientos silvícolas de mejora y mantenimiento de las masas forestales, y los generados en el procesamiento industrial de la madera. También se puede considerar en este grupo a la fracción orgánica de los residuos domésticos e industriales, los cuales no sólo no tienen valor económico en el contexto en que se generan, sino que suelen provocar problemas ambientales en su gestión y eliminación.

### Los azúcares en la biomasa

El grado de viabilidad de la tecnología de la conversión de la biomasa en etanol depende de la naturaleza de la materia prima de la que se parte:

- Azúcares Monoméricos o Diméricos

- Celulosa y Hemicelulosa
- Almidones de grano

### **Azúcares monoméricos o diméricos**

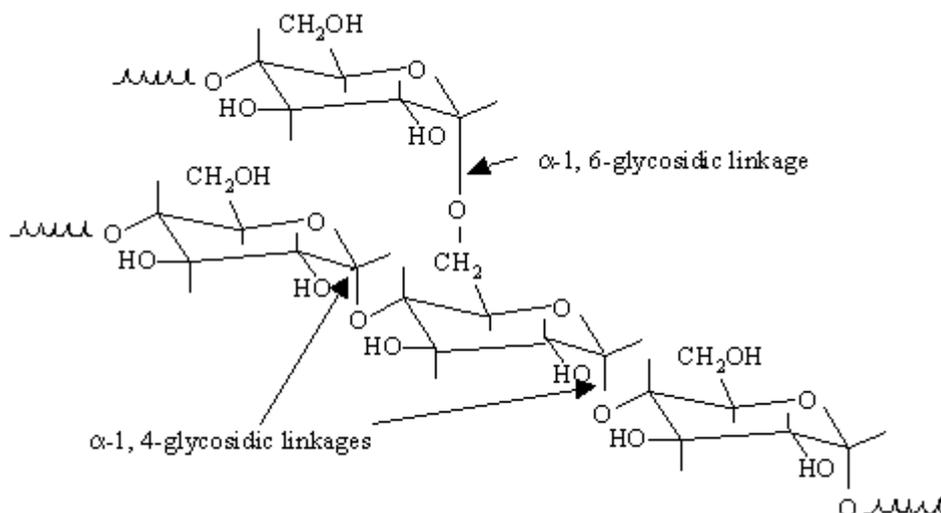
El proceso menos complicado para la producción del etanol es a partir de biomasa que contiene azúcares monoméricos o diméricos (disacáridos), los que se pueden fermentar directamente a etanol. La fermentación involucra a microorganismos que utilizan los azúcares fermentables como alimento, y en el proceso producen etanol y otros co-productos. Esos microorganismos pueden utilizar típicamente azúcares de seis carbonos, y uno de los más comúnmente usados es la glucosa. Por lo tanto la biomasa conteniendo altos niveles de glucosa, o alguno de sus precursores (como por ejemplo el disacárido sacarosa), es la más fácilmente transformable. En el caso de las levaduras, como el *Saccharomises cereviceae*, la molécula de sacarosa es clivada por la enzima *invertasa* en dos moléculas de glucosa, como paso previo a la fermentación.

Las levaduras son los micro-organismos que se utilizan más comúnmente para llevar a cabo la fermentación de azúcares, aunque también pueden hacerlo otros hongos, y bacterias. Es de destacar que las levaduras no pueden utilizar azúcares de 5 carbonos como fuente de alimentación, como sí lo pueden hacer algunas bacterias. En teoría, 100 gramos de glucosa producirán 51,4 g de etanol y 48,8 g de CO<sub>2</sub>, pero en la práctica, no existe un rendimiento del 100%.

La *caña de azúcar* y las *remolachas* son los ejemplos clásicos de la biomasa que contienen cantidades sustanciales del disacárido *sacarosa*. Hasta los años 30, el etanol de grado industrial fue producido a nivel mundial vía la fermentación de la melaza, derivada del azúcar proveniente de esos cultivos. Hoy en día, el alto costo del azúcar de estos cultivos ha hecho que estas fuentes de producción pierdan terreno contra otras fuentes y tecnologías (Goldemberg, 1993). *En el único país en que el etanol de esta fuente es competitivo con los precios actuales del petróleo es en Brasil*, donde por cuestiones tanto de desarrollo de distintas variedades de caña de azúcar, como por las características del terreno cultivable y la especial climatología imperante, el precio de la materia prima no tiene la relevancia que tiene en otros países y latitudes (WB Draft, 2005).

### **Almidón**

Los azúcares se encuentran más comúnmente en la forma de biopolímeros, los que se deben procesar químicamente para obtener azúcares simples. *En los Estados Unidos, el etanol utilizado hoy como combustible, se deriva casi enteramente del almidón* (un biopolímero de la glucosa) *contenido en el maíz*. El almidón consiste en moléculas de glucosa encadenadas juntas por uniones  $\beta$ -glucosídicas. Estos acoplamientos en cadenas ocurren vía enlaces  $\alpha$ -1,4 con ramificaciones vía enlaces  $\alpha$ -1,6.



### Estructura del almidón

La estructura polimérica de la glucosa en el almidón tiende a ser amorfa. Una consecuencia del amorfismo de este polímero, es que esta propiedad lo hace más fácilmente atacable por los sistemas enzimáticos humanos y animales. La capacidad de producir comercialmente los azúcares del almidón, es el resultado de uno de los ejemplos más tempranos de la tecnología enzimática industrial moderna -la producción y el uso de  $\alpha$ -amilasas, de glicoamilasas y de glucosa-isomerasas en el procesamiento del almidón-. Aproximadamente 25,5 kg de granos de maíz pueden producir entre 9,4 y 10,9 litros de etanol puro, dependiendo de la tecnología que se utilice para su producción.

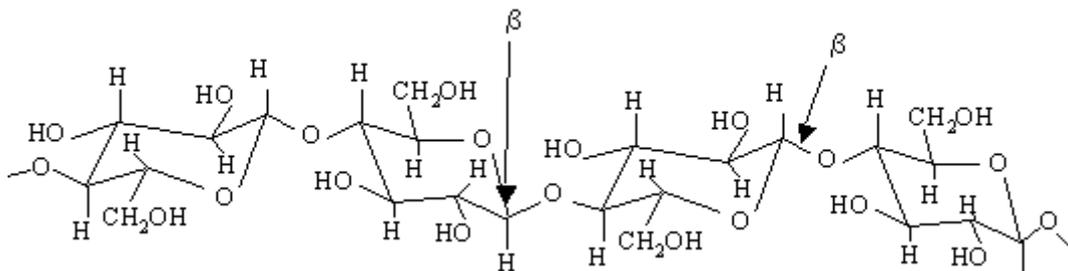
### Compuestos celulósicos

La celulosa es la forma más común del carbono en la biomasa. Es también un biopolímero de la glucosa. Algunos ejemplos de materiales celulósicos: papel, cartón, maderas, residuos agrícolas (bagazos de caña de azúcar, maíz, paja del trigo, y arroz). Los recursos celulósicos son abundantes y se encuentran ampliamente distribuidos, por ejemplo, los bosques representan cerca del 80% de la biomasa mundial. El hecho de ser un recurso relativamente abundante, y generalmente ubicado fuera de las cadenas alimenticias, hace de los materiales celulósicos una materia prima relativamente poco costosa para la fabricación de etanol industrial. Estos materiales están compuestos principalmente por lignina, hemicelulosa, y celulosa. La función de la lignina es proveer un soporte estructural para la planta, y por lo tanto el contenido de lignina varía con el tipo de planta, siendo su contenido más alto, por ejemplo, en los árboles que en los pastizales. La lignina no contiene azúcares, pero encierra a la celulosa y hemicelulosa que sí los contienen, haciendo difícil alcanzar a estas últimas para hidrolizar sus azúcares. Las hexosas y pentosas presentes en la celulosa y hemicelulosa se encuentran anidadas en largas cadenas, pero estas cadenas difieren en su estructura con las cadenas de almidón. Estas características estructurales junto al encapsulamiento provisto por la lignina hacen más dificultosa la hidrólisis a azúcares mono y disacáridos, que en el caso de los materiales con almidón. Es de destacar que la lignina presenta buenas características como combustible en sí misma.

### Celulosa

En el caso de la celulosa, las moléculas de la glucosa son encadenadas por enlaces  $\beta$ -glucosídicos. Los enlaces  $\beta$  de la celulosa forman las cadenas lineales que son altamente estables y muy resistentes al ataque químico, debido al alto grado de energía de las uniones del hidrógeno

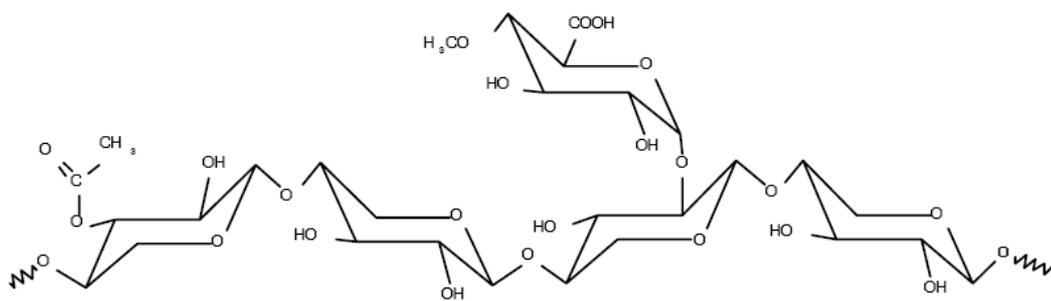
entre las cadenas de la celulosa (véase el cuadro más abajo). Cuando la molécula de celulosa está completamente extendida, y toma forma de cinta aplanada con los grupos OH sobresaliendo lateralmente, se pueden formar puentes de hidrógeno inter, e intramoleculares. La superficie de la cinta, compuesta por átomos de hidrógeno unidos directamente al carbono, es hidrofóbica. Estas dos características de la estructura molecular son las responsables de su estructura supramolecular, y determina muchas de las propiedades físicas y químicas de la celulosa. Esta unión de hidrógeno entre las cadenas de la celulosa hace los polímeros más rígidos, impidiendo la flexión de las moléculas, la que debe ocurrir para facilitar la ruptura por hidrólisis de las uniones glucosídicas. En esta cuestión radica principalmente el obstáculo a vencer, para el uso de celulosa en la obtención de etanol en forma masiva y económica.



**Estructura de la celulosa**

### Hemicelulosa

Otra forma de polímeros del azúcar encontrados en la biomasa es la hemicelulosa. La hemicelulosa consiste en cadenas cortas y ramificadas de azúcares. Contiene azúcares de cinco carbonos (generalmente D-d-xilosa y L-l-arabinosa) y azúcares de seis carbonos (D-galactosa, d-glucosa y D-d-manosa), así como ácido urónico. Su naturaleza ramificada hace que la hemicelulosa sea amorfa, y relativamente fácil de hidrolizar a sus azúcares constitutivos. Por hidrólisis la hemicelulosa de las maderas duras, rinde principalmente productos altos en xilosa (un azúcar de cinco carbonos). En cambio la hemicelulosa contenida en maderas blandas rinde principalmente formas de seis carbonos.

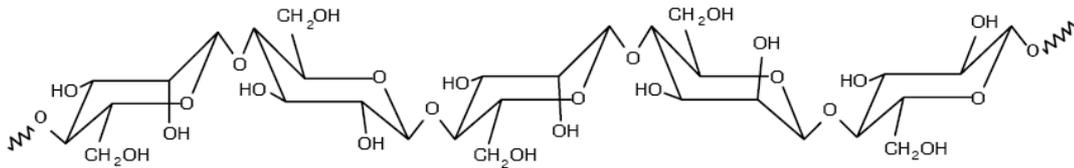


**Estructura del O-acetil-4-O-metilglucuronoxilano**

En estado natural existe en forma amorfa con un grado de polimerización que no excede el número de 200 monómeros. Existen dos tipos de hemicelulosas que se encuentran tanto en las maderas duras como en las blandas: los xilanos y los glucomanos. En las maderas duras, las hemicelulosas predominantes son los xilanos, un polímero de unidades de  $\beta$ -xilopiranosas unidas por enlaces  $\beta$ -1,4 que presenta ligeras ramificaciones. En los xilanos, los grupos hidróxilo

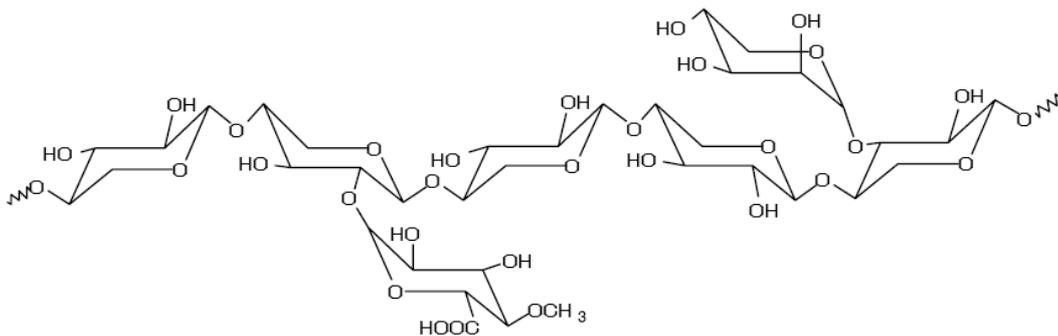
pueden estar sustituidos por grupos 4-O-metilglucurónico unidos por enlaces  $\alpha$ -1,2, y por grupos acetilo unidos a través de enlaces éster a posiciones 2 y 3 del anillo de pentosa.

Los glucomananos de maderas duras son polímeros lineales de glucosa y manosa unidos por enlaces  $\beta$ -1,4 y con predominio de las manosas, las que no presentan ramificaciones ni grupos sustituyentes laterales.



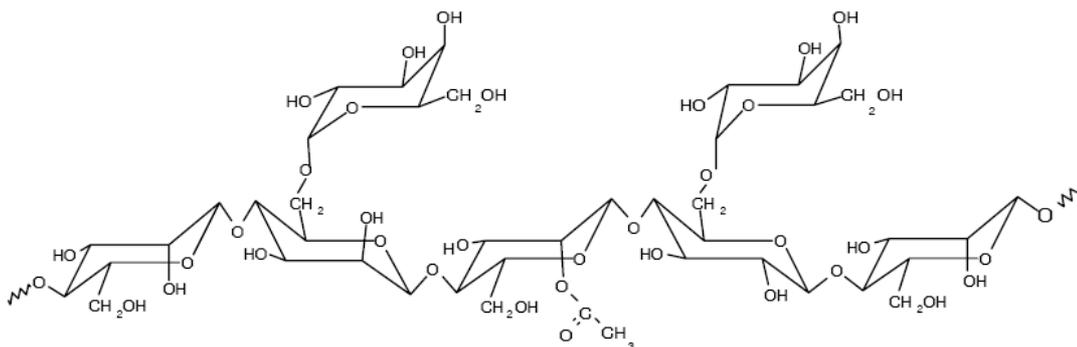
#### Estructura del glucomanano

En los xilanos de maderas blandas el esqueleto del polímero es idéntico al de maderas duras, los sustituyentes son los grupos 4-O-metilglucurónico, unidos por enlaces  $\alpha$ -1,2 y restos de arabinosa unidas por enlaces  $\alpha$ -1,3.



#### Estructura del arabino-4-O-metilglucuronoxilano

Los glucomananos de maderas blandas, con mayor cantidad de manosa que los de maderas duras, tienen dos tipos de sustituyentes: los grupos O-acetil unidos por enlaces éster a las posiciones 2 y 3 del esqueleto del azúcar, y la galactosa unida por enlaces  $\alpha$ -1,6. Estos glucomananos se denominan galactoglucomananos.



### Estructura del O-acetil-galactoglucomanano

Las tres formas generales en la que se presentan los azúcares en la biomasa, hacen que exista una gama diversa de métodos para acceder a los azúcares, la que se ha reflejado en la historia de la producción del etanol. Los azúcares simples (mono y disacáridos) son las fuentes más viejas y fáciles de utilizar como materia prima para la fermentación al etanol, seguidas en segunda instancia por el almidón, hoy en día a la sazón, la opción preferida de la materia de base para el etanol industrial, o para su uso como combustible. Pero las cosechas de granos con almidón tienen valor más alto para los usos alimentarios debido a que muchos animales (incluyendo a los seres humanos) pueden digerir fácilmente el almidón, pero no así la celulosa que requiere de un sistema digestivo altamente adaptado como es el de los rumiantes. Por lo tanto, el almidón continuará probablemente sirviendo a su papel alimentario, como único, o uso predominante. Las dos formas restantes, celulosa y hemicelulosa, son las formas más frecuentes de carbón en la naturaleza, presentando por ello un alto potencial para la producción masiva de etanol, aunque algunas de ellas presenten características que dificultan su uso para estos fines.

## BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

En orden a ampliar la base disponible de recursos para obtener azúcares fermentables, e identificar fuentes de materias primas de un costo más bajo, se ha centrado la atención en el uso de la biomasa sin almidón, y no relacionada con la alimentación, tal como la proveniente de árboles, hierbas y de materiales de desecho. La producción de etanol a partir de celulosa, reconoce tres principales fuentes de materia prima: materiales forestales, residuos agrícolas y residuos urbanos. Aquí se pondrá énfasis en los dos primeros. Es de destacar que para utilizar los residuos urbanos como fuente de materia prima, hay que utilizar un sistema de selección previo de esos residuos.

Los tres componentes principales de estas dos fuentes de la biomasa son celulosa, hemicelulosa y lignina, de los cuales la celulosa y la hemicelulosa fueron descritos más arriba. Los porcentajes de celulosa, hemicelulosa, y el contenido de la lignina en biomasa, se presentan en la Tabla 1. Los porcentajes para el contenido en azúcares de 5 y 6 carbonos en maderas duras, maderas blandas, y residuos agrícolas se proporcionan en la Tabla 2. La combinación de la hemicelulosa y la lignina proporcionan una envoltura protectora alrededor de la celulosa, que debe ser modificada o quitada para obtener su hidrólisis eficiente.

**Tabla 1.** Niveles típicos de celulosa, hemicelulosa y lignina en la biomasa.

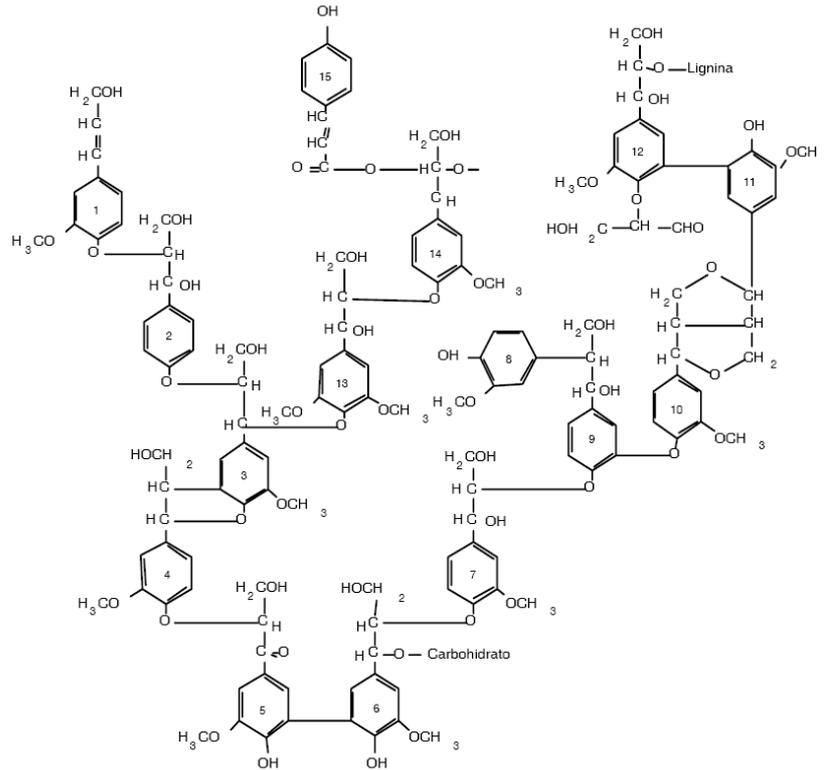
<b>Componentes</b>	<b>Porcentaje de peso seco</b>
Celulosa	40-60%
Hemicelulosa	20-40%
Lignina	10-25%

**Tabla 2.** Composición de azúcares en distintas fuentes de biomasa.

<b>Material</b>	<b>Azúcares de 6 Carbonos</b>	<b>Azúcares de 5 Carbonos</b>	<b>Lignina</b>
Maderas Duras	39-50%	18-28%	15-28%
Maderas Blandas	41-57%	8-12%	24-27%
Residuos Agrícolas	30-42%	12-39%	11-29%

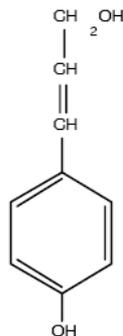
### **Lignina**

La lignina es la tercera fracción mayoritaria de la biomasa lignocelulósica. Se trata de un polímero tridimensional amorfo formado por la polimerización deshidrogenante de unidades de fenilpropano, ligadas por diferentes tipos de enlaces, que se alternan de manera desordenada. Los monómeros que forman la lignina son los denominados alcoholes cinamílicos (diferenciados entre sí por las diferentes sustituciones que presenta el anillo aromático). Así, el alcohol p-cumarílico que da lugar a las unidades p-hidroxifenilo (unidades H) no presenta ningún sustituyente; el alcohol coniferílico que da lugar a las unidades guayacilo (unidades G) presenta un grupo metoxilo en la posición 3 del anillo aromático, y el alcohol sinapílico que da lugar a las unidades siringilo (unidades S), presenta dos grupos metoxilo en posiciones 3 y 5 de dicho anillo.

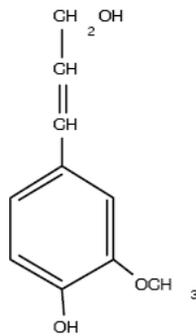


### Estructura de la lignina

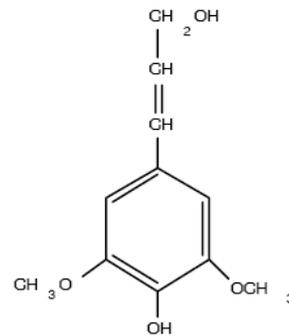
La polimerización de estos precursores durante la formación de la pared celular se produce mediante la sucesión de una etapa enzimática, y una etapa química. En la primera, los precursores son oxidados por peroxidasa de la pared dando radicales fenoxilo (Higuchi, 1990) que, a continuación y durante la etapa química, reaccionan al azar entre ellos. En este proceso se originan una gran variedad de formas resonantes que pueden reaccionar unas con otras, razón por la que la lignina no presenta una única estructura (Hernández, 1997). Las uniones pueden ser de tipo condensado (enlaces C-C), o de tipo no condensado (enlace aril-alquil éter), en las que intervienen tanto los anillos aromáticos como las cadenas propílicas (Adler, 1977). Los enlaces que van a condicionar una alta condensación de la lignina son los enlaces C-C que sólo pueden establecerse entre unidades H o G, ya que las unidades S al tener dos grupos metoxilo en posiciones 3 y 5, no pueden establecer este tipo de enlaces.



Alcohol p-cumarílico  
Unidad p-hidroxifenilo



Alcohol coniferílico  
Unidad guayacilo



Alcohol sinapílico  
Unidad siringilo

#### Alcoholes cinamílicos precursores de la lignina

La proporción de las tres unidades que forman la lignina y el tipo de enlace, difiere según el tipo de planta, así como del grupo taxonómico, tejido, o capa de la pared celular, estado de desarrollo, y condiciones ambientales. Así, se puede hacer una diferenciación de la lignina dependiendo del grupo taxonómico (Hernández, 1997). La lignina de gimnospermas (maderas blandas) está formada mayoritariamente por unidades de tipo guayacilo, mientras que la lignina de las angiospermas leñosas (maderas duras) está formada por unidades guayacilo, y siringilo. Esta alta proporción de unidades derivadas del alcohol sinapílico en las maderas duras determina la estructura y características de este tipo de lignina, ya que la presencia de los dos grupos metoxilo en posiciones 3 y 5 del anillo aromático reduce la formación de enlaces tipo éter, y sobre todo los enlaces C-C, lo que se traduce en una reducción del grado de polimerización, y en un menor grado de condensación. De esta forma, las maderas duras son más fáciles de deslignificar que las maderas blandas.

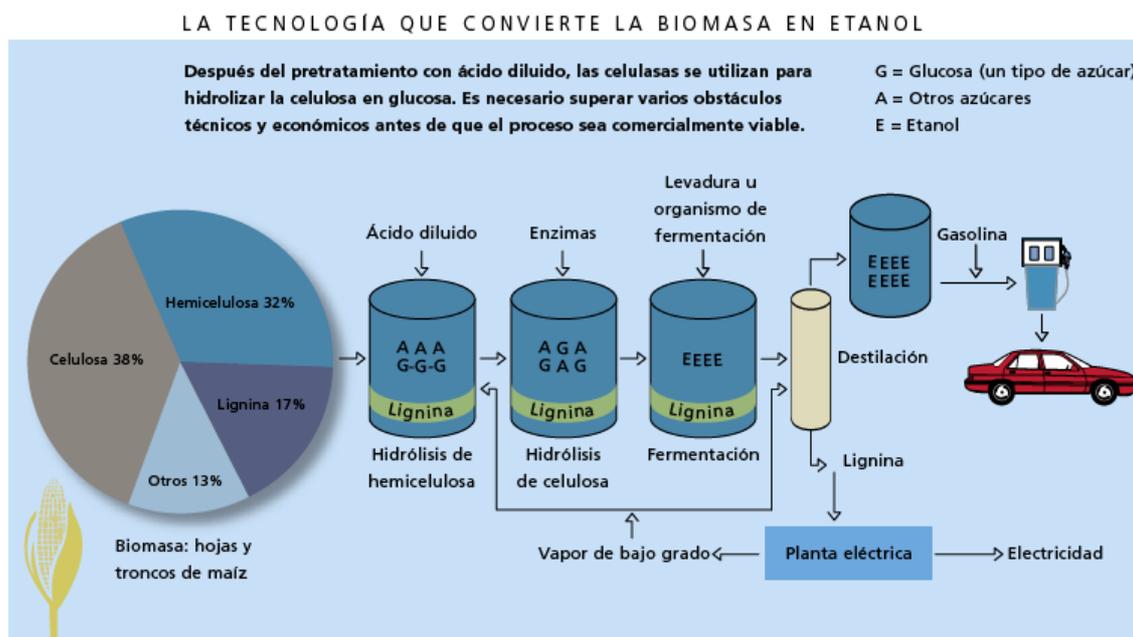
La lignina a menudo es conocida como "carbón limpio", es decir el carbón libre de sulfuro, porque es la porción de las plantas antecesora del carbón. *La lignina permanece, sin cambios, como material residual después de que los azúcares presentes en la biomasa se han fermentado al etanol. El uso económico de este subproducto es crítico a la viabilidad financiera de la tecnología del etanol-biomasa.* El valor energético de la lignina depende de la fuente de biomasa, y varía entre 9000 y 12000 Btu/lb. Esta lignina puede ser utilizada para generar energía térmica durante el proceso de obtención del etanol. Alrededor de 4000 toneladas de lignina son generadas por cada 3,78 millones de litros de etanol. También puede ser procesada, dependiendo de la calidad de la misma, en productos de alto valor económico como plastificantes, polímeros conductores de electricidad, o resinas fenólicas para ser utilizadas en la industria de tableros (California Energy Commission Report, 2001).

La estructura cristalina de la celulosa la hace altamente insoluble y resistente al ataque químico, mientras que la hemicelulosa contiene algunos azúcares de cinco carbonos que no pueden ser fermentados a alcohol por las levaduras, los organismos que tradicionalmente se han utilizado para la fermentación. No obstante ello, se han encontrado algunos métodos para relativizar estos problemas (van Zyl, 1988; Perego, 1990).

### 3. PROCESOS DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

La biomasa lignocelulósica presenta una estructura compleja, compuesta de varias fracciones, que deben ser procesadas por separado para asegurar una conversión eficiente de estos materiales a etanol. Como ya fue descrito la fracción mayoritaria de la biomasa es la celulosa, compuesta por largas cadenas de glucosa unidas por enlaces  $\beta$ -1,4 que, a su vez, se agrupan en estructuras superiores de gran cristalinidad. Esta estructura cristalina es la que dificulta la hidrólisis de la celulosa para la obtención de azúcares fermentables.

La hidrólisis de la celulosa puede realizarse mediante procesos ácidos, o enzimáticos. En Oliva Domínguez (2004) se encuentra una extensa recopilación y descripción de los distintos procesos de hidrólisis de la celulosa.



#### Hidrólisis ácida

La hidrólisis ácida consiste en un proceso químico que, mediante el empleo de catalizadores ácidos, transforma las cadenas de polisacáridos que forman la biomasa (hemicelulosa y celulosa) en sus monómeros elementales. La hidrólisis ácida de los materiales ligno-celulósicos es un proceso conocido desde 1819 (Larsson, 2000), y que alcanzó su mayor desarrollo durante las dos Guerras Mundiales, períodos en los que la escasez de petróleo hizo que se empleara masivamente la madera para la producción de etanol. Durante este período se desarrollaron numerosos procesos que cayeron posteriormente en desuso por razones económicas. Este tipo de hidrólisis puede realizarse empleando diferentes clases de ácidos: sulfuroso, clorhídrico, sulfúrico, fosfórico, nítrico y fórmico (Galbe & Zacchi, 2002). Sin embargo, sólo los ácidos clorhídrico y sulfúrico han sido empleados a escala industrial. Los procesos industriales de hidrólisis ácida pueden agruparse en dos tipos: los que emplean ácidos concentrados, y los que utilizan ácidos diluidos.

Los procesos que implican ácidos concentrados operan a baja temperatura pudiendo obtenerse altos rendimientos de hidrólisis (superiores al 90% de la glucosa potencial). A pesar de esto, la gran cantidad de ácido empleado en la impregnación del material a tratar y lo costoso de su recuperación, unido a los efectos corrosivos de los ácidos concentrados, que obliga a altas

inversiones en los equipamientos, hacen que el proceso no sea rentable. Además, tiene el problema asociado de que es necesaria una costosa etapa de neutralización antes de la fermentación (Keller, 1996). Sin embargo, los procesos que utilizan ácidos concentrados han adquirido un renovado interés debido a nuevos métodos que mejoran la economía de recuperación de los ácidos; hoy son desarrollados por varias compañías como Masada Resource Group (Birmingham, Ala), Arkenol (Mission Viejo, California), y APACE (Australia) (Katzen, 1997).

Los procesos que emplean ácidos diluidos tienen su principal ventaja en el relativamente bajo consumo de ácidos. Sin embargo, se requieren relativamente altas temperaturas para alcanzar rendimientos aceptables de conversión de celulosa a glucosa.

El máximo rendimiento en glucosa se consigue a altas temperaturas y tiempos de residencia cortos. Este tipo de procesos operan a una temperatura de 240 °C, una concentración de ácido de 1 % (p/v) y un tiempo de reacción de 6-12 segundos. Aún así, bajo estas condiciones, los mejores rendimientos alcanzados están en torno al 60% del rendimiento teórico (Wyman, 1996). Las temperaturas que se emplean en estos procesos originan, por un lado, una mayor corrosión de los equipos empleados y, por otro, un aumento de la tasa de degradación de los azúcares hemicelulósicos, que puede afectar la posterior etapa de fermentación.

Con el objeto de disminuir la degradación de los azúcares originados en la hidrólisis, se puede utilizar un proceso en dos etapas. En la primera etapa y bajo condiciones más suaves, se produce la hidrólisis de la hemicelulosa, que por su estructura resulta más fácilmente hidrolizable. Esto permite que, durante la segunda etapa, y bajo unas condiciones más severas, se produzca la hidrólisis de la celulosa, evitándose la degradación de los azúcares hemicelulósicos producidos en la primera etapa. Mediante los procesos en dos etapas es posible conseguir hasta un 98% de recuperación de los azúcares hemicelulósicos a partir de maderas blandas. Sin embargo, los rendimientos en glucosa no superan el 50% (Nguyen *et al.*, 1999). En Estados Unidos, BCI comercializa la tecnología de hidrólisis en dos etapas con ácido diluido. En la primera etapa se produce la hidrólisis de la hemicelulosa en unas condiciones suaves (170-190 °C) y, en la segunda etapa, se hidroliza la celulosa en unas condiciones más severas (200-230 °C) (Wyman, 1999). Las altas temperaturas que se requieren para la hidrólisis de la celulosa hacen que se originen productos de degradación de los azúcares, que además de disminuir el rendimiento del proceso, pueden afectar a la posterior etapa de fermentación (Taherzadeh, 1999; 1997b).

En Suecia, la Bioalcohol Fuel Foundation, junto con St. Lawrence de Canadá, y Tennessee Valley Authority de Estados Unidos, desarrollaron un proceso en dos etapas con ácido diluido, conocido como el proceso CASH (O'Boyle *et al.*, 1991). Se basa en una primera hidrólisis a temperatura moderada impregnando la madera con dióxido de azufre, seguido de una segunda hidrólisis utilizando ácido clorhídrico diluido (Galbe & Zachi, 2002).

### **Hidrólisis enzimática**

La hidrólisis enzimática es un proceso catalizado por un grupo de enzimas denominadas genéricamente celulasas que son en realidad, una mezcla de distintas actividades enzimáticas cuya acción conjunta produce la degradación de la celulosa (Underkofler, 1969). Las plantas superiores, algunos invertebrados y principalmente microorganismos (hongos y bacterias), son productores de este tipo de enzimas. Las celulasas de origen fúngico, principalmente de los géneros *Trichoderma*, *Phanerochaete* y *Fusarium* han sido las más estudiadas por la capacidad de estos microorganismos de producirlas en grandes cantidades y de forma extracelular, facilitando su separación en los medios de cultivo (Grohmann, 1991).

El complejo celulolítico de hongos está formado por distintos componentes que actúan sinérgicamente. Este sistema enzimático tiene tres tipos diferentes de actividad cuya denominación y mecanismo de acción son los siguientes (Montenecourt & Eveleigh, 1979):

1. Endo- $\beta$ -glucanasas
  - a.  $\beta$ -1,4-glucanglucanohidrolasa (EC 3.2.1.4.)
2. Exo- $\beta$ -glucanasas.
  - a.  $\beta$ -1,4-glucancelobiohidrolasas (EC 3.2.1.91.)  
Celobiohidrolasa (CBH)
  - b.  $\beta$ -1,4-glucanglucanohidrolasas (EC 3.2.1.74.)  
Glucohidrolasa (GGH)
3.  $\beta$ -glucosidasa (EC 3.2.1.21.).

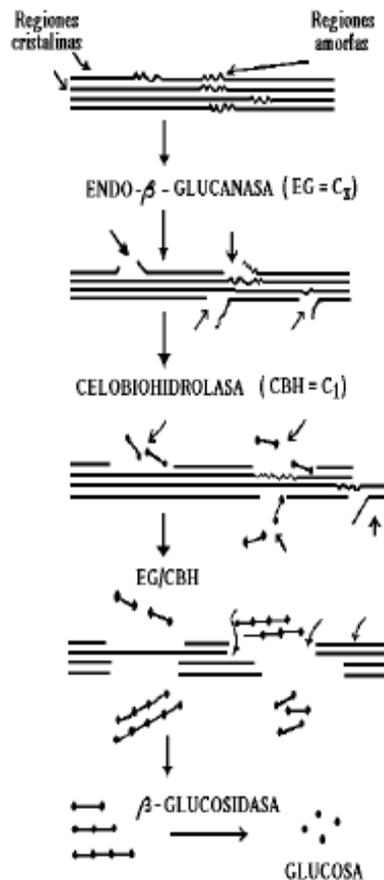
La endoglucanasa actúa al azar en el interior del polímero, hidrolizando enlaces  $\beta$ -1,4 y generando nuevos finales de cadena no reductores. Puede actuar sobre celo dextrinas, y derivados sustituidos como carboximetilcelulosa (CMC), e hidroximetilcelulosa (HMC), así como celulosa amorfa, pero no actúa ni sobre celulosa cristalina ni sobre celobiosa. Supone, aproximadamente, un 20% del total de proteínas del complejo.

La celobiohidrolasa actúa sobre los extremos no reductores de la cadena generados por la endoglucanasa, liberando moléculas de celobiosa. Esta enzima tiene actividad sobre celulosa cristalina y amorfa, y sobre celo dextrinas, pero no actúa sobre derivados sustituidos ni sobre celobiosa; constituye del 50 al 80% del complejo celulolítico.

La glucohidrolasa se encuentra en pequeña proporción y actúa sobre los extremos no reductores liberando unidades de glucosa. Tiene actividad sobre celulosa amorfa, celo-oligosacáridos, y CMC.

La  $\beta$ -glucosidasa hidroliza celobiosa y oligosacáridos de pequeño tamaño, y es absolutamente necesaria para evitar la fuerte inhibición que sobre las endo y exo-glucanasas produciría la celobiosa si se acumulara en el medio de reacción.

Un esquema del mecanismo de acción de las celulasas se representa en la siguiente figura.



Si se añaden celulasas al material lignocelulósico la hidrólisis de la celulosa es demasiado lenta, debido a la asociación de ésta con la lignina, que constituye una barrera física a la penetración de las enzimas. Otros factores como la porosidad (área superficial accesible), el estado cristalino de la celulosa, el grado de polimerización, y el contenido en lignina y hemicelulosa, dificultan la accesibilidad de las celulasas reduciendo la eficiencia de la hidrólisis. Todos estos factores hacen necesaria una etapa de pre-tratamiento, previa a la hidrólisis de la celulosa, que altere la estructura del material lignocelulósico, facilitando la acción de las enzimas (Wilson, 1989).

## PRETRATAMIENTO DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

Los objetivos fundamentales del pre-tratamiento van encaminados a reducir el estado cristalino de la celulosa, disociar el complejo celulosa-lignina, aumentar el área superficial del material, y disminuir la presencia de aquellas sustancias que dificulten la hidrólisis. Además, un pretratamiento eficaz debe reunir otras características como bajo consumo energético, bajos costos de inversión, utilización de reactivos baratos y fácilmente recuperables, y debe ser aplicable a diversos sustratos. Por su naturaleza, los pretratamientos se pueden dividir en cuatro grupos: físicos, fisico-químicos, químicos y biológicos (Sun & Cheng, 2002).

## **Pretratamientos físicos**

### ***Trituración mecánica***

La trituración de los materiales lignocelulósicos mediante una combinación de astillado y molienda, reduce el estado cristalino de la celulosa, aumenta la superficie específica y la densidad aparente, facilitando la hidrólisis posterior. Existen diferentes tipos de molinos (molino de bolas, martillos, cuchillas, rodillos). Los molinos de bolas vibratorias se han mostrado más efectivos que los molinos de bolas ordinarios en la reducción de la cristalinidad y aumento de digestibilidad de astillas de abeto y álamo (Millet *et al.*, 1976). Este tipo de pretratamiento tiene el inconveniente de su alto consumo energético que depende, tanto del tamaño final de partícula al que se muele el material, como del tipo de material a pretratar (Cadoche & López, 1989).

### ***Radiación de alta energía***

Este tipo de irradiación rompe los enlaces  $\beta$ -glucosídicos y los enlaces entre la celulosa y la lignina (Khan *et al.*, 1986). Sin embargo, este tipo de pretratamiento es de difícil aplicación técnica debido a la baja densidad de los materiales a tratar, y las altas dosis requeridas, que obligan al diseño de instalaciones muy complejas y de alto costo.

## **Pretratamientos físico-químicos**

### ***Explosión por vapor***

El material lignocelulósico se somete a temperaturas entre 190-230 °C, mediante la inyección directa de vapor saturado, durante un intervalo de tiempo entre 1 y 10 minutos. Tras el tiempo de tratamiento se somete el material a una rápida despresurización. El efecto del pretratamiento sobre la biomasa es una combinación de alteraciones físicas (desagregación y ruptura de las fibras), y químicas (despolimerización y rotura de enlaces). El efecto mecánico está causado por la rápida despresurización que provoca una evaporación del agua interna, creando fuerzas que producen la separación de las fibras, principalmente de las regiones más débiles (celulosa amorfa). El efecto químico se debe a la hidrólisis de los restos acetilos de las hemicelulosas produciendo ácido acético, que a la temperatura del proceso, cataliza la hidrólisis de la hemicelulosa (auto-hidrólisis). Durante el tratamiento se destruyen parcialmente los enlaces lignina-carbohidratos. Como resultado, se obtiene un producto fibroso cuya celulosa es más accesible a la hidrólisis enzimática. La hemicelulosa se despolimeriza en mayor o menor medida dependiendo de las condiciones del tratamiento, siendo fácilmente recuperada por lavado. La lignina, prácticamente sin alterar, puede ser extraída y utilizada con diferentes fines. Las variables más importantes en el pre-tratamiento de explosión por vapor son la temperatura, el tiempo de residencia, el tamaño de partícula, y la humedad (Duff & Murray, 1996).

La explosión por vapor ha sido reconocida como un método muy efectivo para el pretratamiento de maderas duras y residuos agrícolas (Marchesault, 1993). Este pre-tratamiento se ha aplicado a diferentes materiales como álamo (Ramos *et al.*, 1992; Excoffier *et al.*, 1991; Ballesteros *et al.*, 1998), eucalipto (Ramos *et al.*, 1992), pino (San Martín *et al.*, 1995; Ballesteros *et al.*, 2000; Negro *et al.*, 2003a), paja de arroz (Moniruzzaman, 1995; 1998), residuos herbáceos (Ballesteros *et al.*, 2002), residuos oleícolas (Fernández-Bolaños *et al.*, 1998; 2001), y bagazo (Martín *et al.*, 2002), entre otros. Sin embargo, este pre-tratamiento se ha mostrado menos efectivo con las maderas blandas debido a su estructura mucho más rígida, y su mayor contenido en lignina. Además, el contenido de grupos acetilados es mucho menor que en las maderas duras, con lo que el proceso de auto-hidrólisis no ocurre en la misma medida. En el

caso de las maderas blandas, es deseable añadir un catalizador ácido. El ácido sulfúrico ha sido el más estudiado por su costo y efectividad (Torget *et al.*, 1990; 1991; 1996; Nguyen *et al.*, 1998; 1999; 2000; Tenborg *et al.*, 1998; 2001). El SO<sub>2</sub> también ha sido empleado en numerosos trabajos (Clark & Mackie, 1987; Clark *et al.*, 1989; Ramos *et al.*, 1992; Stenberg *et al.*, 1998; 2000a). Tiene la ventaja de no ser tan corrosivo como el sulfúrico, es fácil y rápido de introducir en el material, siendo su principal desventaja la alta toxicidad. Una diferencia muy importante que se produce al utilizar en el pre-tratamiento uno u otro catalizador es la diferente fermentabilidad de las fracciones obtenidas tras el pretratamiento. Así, el material obtenido tras el tratamiento con sulfúrico muestra una baja fermentabilidad debido a las altas concentraciones de productos tóxicos que se forman (Palmqvist, 1996; 1997; 1999a; 1999b; 2000).

Entre las ventajas del pretratamiento con explosión por vapor debe citarse que el tamaño de partícula del material requerido (15-30 mm) es considerablemente superior a los utilizados en otros pretratamientos, reduciéndose costos en la molienda (Ballesteros, 2001). Además, no emplea catalizadores ácidos (en el caso de las maderas duras), con lo que se reducen los efectos medioambientales.

Entre sus limitaciones se encuentran, la destrucción de una parte de los xilanos de las hemicelulosas, la incompleta rotura de la matriz lignina-carbohidratos, y la generación de compuestos que pueden resultar tóxicos para los microorganismos empleados en el proceso de fermentación tras la hidrólisis enzimática. Debido a la formación de estos compuestos, el material pretratado debe ser lavado con agua para eliminar estos productos inhibitorios (McMillan, 1994).

La identificación de los compuestos de degradación de las distintas fracciones que forman la biomasa lignocelulósica originados durante la explosión por vapor, así como el aprovechamiento de la fracción líquida obtenida tras el pre-tratamiento para minimizar las necesidades de agua y reducir la cantidad de agua residual generada en el proceso, son parte de los objetivos de este trabajo.

Para maximizar la recuperación de azúcares en el pre-tratamiento de explosión por vapor se requieren diferentes condiciones para la recuperación de los azúcares celulósicos y hemicelulósicos. Algunos autores (Stenberg *et al.*, 1998a; 1998b; Tenborg *et al.*, 1998) han sugerido un pre-tratamiento en dos etapas, empleando sulfúrico en condiciones suaves en una primera etapa, seguido de una impregnación con SO<sub>2</sub> bajo unas condiciones más severas. De esta forma, es posible conseguir un incremento de un 7% en el rendimiento global de azúcares después de la hidrólisis enzimática, comparándolo con los procesos en una etapa. La explosión por vapor en dos etapas tiene una serie de ventajas como un mayor rendimiento en etanol, mejor aprovechamiento de la materia prima, y menor consumo de enzimas en la fase de hidrólisis (Wilson, 1989). Sin embargo, es necesario una evaluación económica para determinar si estas ventajas justifican una explosión a vapor adicional (Galbe & Zacchi, 2002).

### ***Proceso de explosión por vapor con amoniaco (AFEX)***

Es un proceso similar a la explosión por vapor en el que el material es impregnado con amoniaco líquido (1 a 2 kg amoniaco/kg biomasa seca) a una temperatura en torno a los 90 °C, y un tiempo aproximado de 30 minutos. Transcurrido este tiempo el material es sometido a una rápida descompresión (Sun & Cheng, 2002).

Este tipo de pre-tratamiento ha sido empleado con diferentes tipos de sustratos como alfalfa, paja de trigo (Mes-Hartree *et al.*, 1988), astillas de álamo (Tengerdy Nagy, 1988), bagazo (Holtzapple *et al.*, 1991), residuos sólidos urbanos, papel residual (Holtzapple *et al.*, 1992) y paja de cebada, y arroz (Vlasenko *et al.*, 1997). La diferencia con la explosión por vapor

y otros tipos de pre-tratamiento ácidos, es que en este proceso no se solubiliza la hemicelulosa. La composición del material sometido a un proceso AFEX es prácticamente la misma que la del material original. Utilizando materiales con bajo contenido en lignina (hasta un 15%), se han obtenido rendimientos de hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa del 90%, después del pre-tratamiento. Sin embargo, este proceso no es tan efectivo con biomásas con un mayor contenido en lignina. En estos casos, los rendimientos de hidrólisis posteriores han sido inferiores al 50% (McMillan, 1994).

Como ventajas del proceso pueden citarse que no se producen inhibidores que puedan afectar a las posteriores etapas del proceso de producción de etanol, y no requiere pequeños tamaños de partícula para aumentar su eficiencia. Con objeto de reducir costos, y como medida protectora del medioambiente, el amoníaco debe ser reciclado después del pre-tratamiento.

### ***Explosión con CO<sub>2</sub>***

Es un proceso similar a la explosión por vapor o al proceso AFEX. La explosión con dióxido de carbono se basa en el hecho que el CO<sub>2</sub> forma ácido carbónico, lo que aumenta la tasa de hidrólisis. Este proceso ha sido empleado en el pre-tratamiento de alfalfa, obteniendo un rendimiento de hidrólisis del 75% a las 24 horas (Dale & Moreira, 1982). Aunque los rendimientos obtenidos son relativamente bajos comparados con la explosión por vapor y el proceso AFEX, los estudios realizados con bagazo de caña y papel reciclado, demostraron que este proceso es más barato que la explosión con amoníaco, y no origina los compuestos inhibitorios que se originan durante la explosión por vapor (Zheng *et al.*, 1998).

### **Pretratamientos químicos**

El objetivo de estos pre-tratamientos es solubilizar la fracción de lignina, y modificar la estructura de la celulosa facilitando la acción de las enzimas. Entre los pre-tratamientos químicos se encuentran los tratamientos con agua caliente líquida, oxidación húmeda, ozono, álcalis, ácidos, solventes orgánicos, y agentes oxidantes.

#### ***Tratamiento con agua caliente líquida***

Consiste en someter a la biomasa a la acción de agua caliente en torno a una temperatura de 220 °C durante un tiempo determinado (van Walsun *et al.*, 1996). El reactor debe estar presurizado para mantener el agua en estado líquido. Durante este pre-tratamiento se recuperan la mayoría de las pentosas (Negro *et al.*, 2003b), y se obtiene un hidrolizado que no muestra inhibición en el posterior proceso de fermentación (Laser *et al.*, 2002; Allen, 2001).

#### ***Oxidación húmeda***

El material lignocelulósico se somete a la acción de agua a elevadas temperaturas en presencia de oxígeno (Schmidt & Thomsen, 1998). Este tratamiento tiene la ventaja de no generar prácticamente productos de degradación como el furfural, y HMF (Klinke *et al.*, 2002; Varga *et al.*, 2003).

#### ***Tratamientos con ozono***

El ozono ha sido utilizado para degradar la lignina y la hemicelulosa de numerosos materiales lignocelulósicos como paja de trigo, bagazo, pino, algodón y aserrín de álamo (Vidal & Molinier, 1988). La degradación se limita fundamentalmente a la lignina ya que la hemicelulosa es atacada ligeramente, y la celulosa apenas si se ve afectada. El tratamiento con ozono tiene una serie de ventajas como la eliminación efectiva de la lignina, no origina productos tóxicos que afecten a los procesos posteriores, y la reacción se produce a una

temperatura ambiente y presión atmosférica. Sin embargo, la gran cantidad de ozono empleado hace de este proceso un método caro.

### ***Hidrólisis con álcalis***

El tratamiento con NaOH diluido produce un hinchamiento de la biomasa, lo que conduce a un aumento del área superficial interna, un descenso del nivel de cristalización, una separación de las uniones estructurales entre la lignina y los carbohidratos, y una rotura de la estructura de la lignina. El mecanismo de la hidrólisis alcalina de la biomasa parece estar basada en la saponificación de los enlaces ésteres intramoleculares que unen los xilanos de la hemicelulosa y otros componentes, como por ejemplo la lignina u otros componentes de la hemicelulosa (Sun & Cheng, 2002). La efectividad de este pre-tratamiento depende del contenido de lignina del material a tratar. Así, por ejemplo, se ha conseguido aumentar la digestibilidad de sustratos como paja con un contenido de lignina del 18% (Bjerre *et al.*, 1996), y de maderas duras, pero no de maderas blandas con un contenido de lignina superior al 26% (Millet *et al.*, 1976).

### ***Tratamiento con solventes orgánicos***

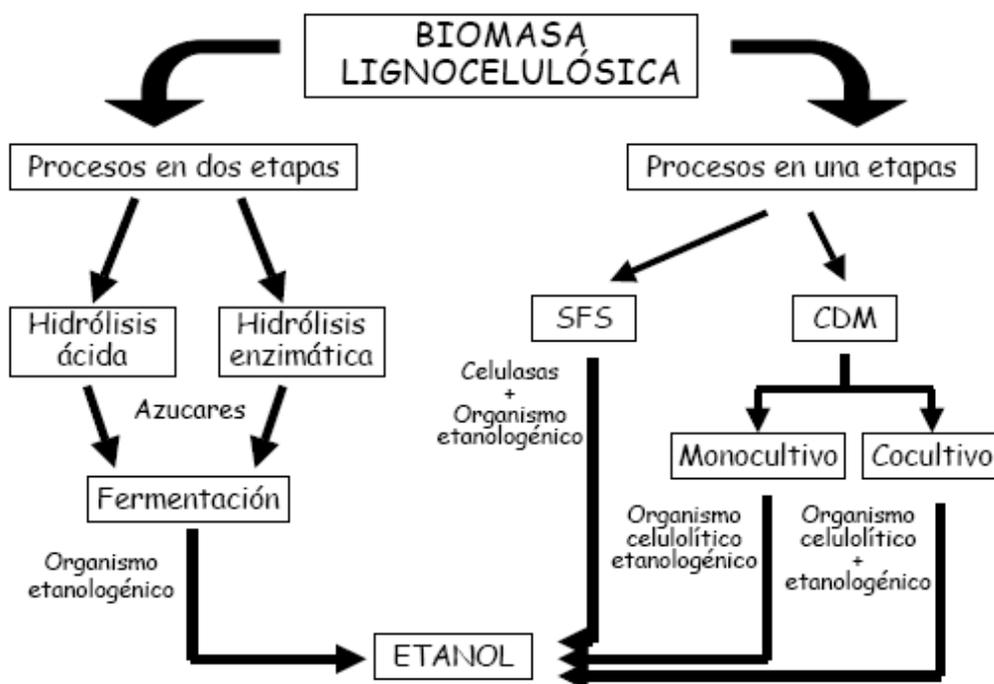
Se emplea una mezcla de solventes orgánicos o acuosos junto con un catalizador ácido (clorhídrico o sulfúrico) para romper los enlaces internos de la lignina y la hemicelulosa. Entre los solventes orgánicos empleados en el proceso se encuentran: metanol, etanol, acetona y etilenglicol (Thring *et al.*, 1990) (O'Boyle A., 1991), También pueden emplearse ácidos orgánicos como el ácido oxálico, acetilsalicílico y salicílico. Con objeto de reducir costos y de evitar problemas en la posterior etapa de fermentación, se deben reciclar los solventes.

### **Pretratamientos biológicos**

En este tratamiento el material lignocelulósico se somete a la acción de determinados micro-organismos, como los hongos de la podredumbre blanca, marrón o blanda. El objetivo es degradar la lignina y la hemicelulosa, eliminando las barreras que protegen la celulosa y haciéndola más accesible al posterior ataque enzimático. Los hongos de la podredumbre marrón atacan principalmente la celulosa, mientras que los de la podredumbre blanda y blanca atacan la celulosa y la lignina. Los de la podredumbre blanca se han mostrado como los más efectivos en el tratamiento biológico de los materiales lignocelulósicos (Fan *et al.*, 1987). Las ventajas del pre-tratamiento biológico son el bajo requerimiento energético, y las suaves condiciones ambientales en la que se produce el proceso. Como inconveniente debe citarse que la tasa de hidrólisis es demasiado lenta. Entre todos los hongos estudiados destaca el de la podredumbre blanca *Phanerochaete chrysosporium* que durante el metabolismo secundario, en respuesta a limitaciones de carbono y nitrógeno, produce enzimas como la lignina peroxidasa y la peroxidasa dependiente de magnesio, que degradan la lignina (Boominathan & Reddy, 1992).

## **PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA CELULOSA EN ETANOL**

Los procesos conversión de celulosa en etanol pueden dividirse en dos grandes grupos, según se realicen en una o dos etapas.



Vías de producción de etanol

### Procesos en dos etapas

En los procesos en dos etapas la hidrólisis (ácida o enzimática) y la fermentación se realizan por separado (HFS). En los procesos que utilizan la vía enzimática, una parte de la biomasa pretratada se utiliza como sustrato para la obtención de las enzimas. Una vez producidas las enzimas del complejo celulolítico, se extraen del medio, y se añaden al resto del material pretratado en un reactor de hidrólisis. La glucosa obtenida en este reactor pasa a otro, donde se realiza la fermentación mediante la acción de los microorganismos. La ventaja de este proceso es que, al estar separadas la etapa de hidrólisis y de fermentación, ambas pueden realizarse en sus condiciones óptimas. La etapa de hidrólisis se realiza a la temperatura óptima de la enzima (en torno a los 50 °C), mientras que la de fermentación se realiza a la temperatura óptima del microorganismo productor de etanol. La principal desventaja del proceso de HFS es que la glucosa y celobiosa liberadas durante la etapa de hidrólisis enzimática, inhiben las enzimas implicadas en el proceso, obteniéndose bajos rendimientos.

Si en lugar de enzimas como catalizadores de la hidrólisis se emplea una hidrólisis ácida, es necesario neutralizar los hidrolizados antes de la fermentación. Además, la generación de productos de degradación durante la hidrólisis puede afectar al microorganismo encargado de realizar la fermentación.

### Procesos en una etapa

En los procesos en una etapa, la hidrólisis y fermentación se realizan en el mismo reactor. La principal ventaja de estos procesos es que se reduce la inhibición por producto final que se produce en la operación en dos etapas, ya que la presencia de microorganismos fermentadores, junto con las enzimas celulolíticas reducen la acumulación de azúcar en el fermentador. Por ello se consiguen mayores tasas de hidrólisis que en el proceso de hidrólisis y fermentación por separado, necesitándose una menor cantidad de enzimas, y obteniéndose como resultado un aumento de los rendimientos de etanol (Ballesteros, 2000). Otra ventaja es que se realiza en un

mismo reactor con lo cual se reducen los costos de inversión. El problema de este proceso es que las condiciones óptimas de pH y temperatura de las etapas de hidrólisis y fermentación, son diferentes. Por ello es necesario realizar el proceso en unas condiciones que sean compatibles con ambas etapas. Puesto que la temperatura óptima de hidrólisis está próxima a los 50 °C, y que las levaduras productoras de etanol convencionales trabajan en torno a los 37 °C, es aconsejable la utilización de microorganismos termo-tolerantes cuando se quieran realizar procesos de obtención de etanol en una sola etapa.

Los procesos en una etapa se pueden dividir en dos grupos: procesos en los que el mismo microorganismo produce las enzimas y realiza la fermentación, proceso conocido como conversión directa por el microorganismo (CDM); y procesos de sacarificación y fermentación simultánea (SFS), en los que se emplean celulasas provenientes de un microorganismo celulolítico (normalmente un hongo), junto con la presencia de un microorganismo productor de etanol.

En los procesos CDM se pueden emplear monocultivos, en los que un único microorganismo hidroliza y fermenta los azúcares a etanol. Se han empleado bacterias del género *Clostridium* (Zeikus 1980; Ng *et al.*, 1981; 1982; Ahring *et al.*, 1996). Los rendimientos en etanol son bajos debido a la formación de subproductos, a la baja tolerancia del microorganismo al etanol, y al crecimiento limitado del microorganismo en los hidrolizados debido a la existencia de productos tóxicos. También pueden emplearse co-cultivos en los que se utilizan dos microorganismos. Uno de ellos realiza la hidrólisis de la celulosa (*Clostridium thermocellum*) y una bacteria etanologénica fermenta los azúcares producidos (Zeikus *et al.* 1983).

En la actualidad el proceso de SFS es el que ofrece las mejores perspectivas. Las celulasas provienen de hongos celulolíticos, normalmente *Trichoderma reesei*, y el microorganismo fermentador es una levadura.

### **Utilización de levaduras termo-tolerantes en los procesos de obtención de etanol**

La producción de etanol es un proceso exergónico. En un proceso industrial de producción de etanol, el empleo de levaduras termo tolerantes evitaría problemas asociados con el sobrecalentamiento de los fermentadores, y evitaría el enfriamiento con la consiguiente reducción de los costos de producción (Gera *et al.*, 1997), y las paradas debidas a sobrecalentamiento que a menudo se producen en países donde la temperatura ambiente es alta, y el enfriamiento de los fermentadores no es posible (Kiran Sree *et al.*, 2000). Otras ventajas de la utilización de altas temperaturas en el proceso de producción de etanol son el aumento de la productividad, la reducción de los riesgos de contaminación, y una mayor facilidad en la recuperación del producto.

Además de las ventajas mencionadas, la utilización de levaduras termo tolerantes en un proceso de producción de etanol sería muy ventajosa en un proceso de SFS ya que esto permitiría trabajar cerca de la temperatura óptima de la enzima. Entre las levaduras más citadas en la bibliografía como capaces de realizar la fermentación alcohólica por encima de los 40 °C, se encuentran especies pertenecientes a los géneros *Candida* (Ghose *et al.*, 1984), *Saccharomyces* (Hacking *et al.*, 1984; Kiran Sree *et al.*, 2000) y *Kluyveromyces* (Hughes *et al.*, 1984; Banat *et al.*, 1992; Ballesteros *et al.*, 1991; Farrel *et al.*, 1998; Banat *et al.*, 1998). *K. marxianus* ha sido una de las levaduras más utilizadas en los procesos de Sacarificación y Fermentación Simultánea (SFS) (Barron *et al.*, 1995; Nilsson *et al.*, 1995; Boyle *et al.*, 1997; Lark *et al.*, 1997), utilizando diferentes sustratos como madera de álamo (Ballesteros *et al.*, 1998), abeto (Bollók *et al.*, 2000), residuos de la industria olivarera, y residuos de papeleras (Ballesteros *et al.*, 2001; 2002).

## **Avances biotecnológicos en el proceso de fermentación**

Sin duda, uno de los mayores retos para aumentar el rendimiento del proceso de transformación de la biomasa lignocelulósica en etanol, es la fermentación de todos los azúcares presentes en la biomasa (C<sub>5</sub> y C<sub>6</sub>). *Como los azúcares de cinco carbonos comprenden un alto porcentaje de los azúcares disponibles en los materiales lignocelulósicos, la capacidad de recuperar y fermentar los mismos en etanol es importante para la eficiencia y economía del proceso. Se está trabajando intensamente en la obtención de microorganismos modificados genéticamente que puedan transformar la xilosa y la arabinosa en etanol.* Recientemente, se ha utilizado tecnología de DNA para dotar a algunos microorganismos de la propiedad de fermentar azúcares de cinco carbonos con alta eficiencia (Ho, 1998). Un ejemplo de ello es la cepa bacteriana de la especie *Escherichia coli*, desarrollada por la Universidad de Florida (EUA), que puede fermentar azúcares de seis y cinco carbonos al mismo tiempo, el que ha sido registrado bajo la patente US 5.000.000 (Ethanol production by *Escherichia coli* strains co-expressing *Zymomonas* PDC and ADH genes).

Otros investigadores han desarrollado microorganismos con la propiedad de fermentar al menos una parte de los azúcares presentes. En ese sentido se ha puesto el foco en las bacterias más que en otros tipos de organismos, debido a la velocidad con que las mismas pueden llevar a cabo la fermentación (por ejemplo minutos en comparación de horas para las levaduras) (Olsson & Hahn-Hägerdal, 1993; 1995; 1996; Beall, 1992). Las bacterias de las especies de *Clostridium* (Küsel, 1999; Leschine, 1995; Tiedge, 1984) pueden degradar grandes cantidades de celulosa, y otros polisacáridos de origen vegetal en medios anóxicos.

Como ejemplos podemos citar la introducción de operones que codifican enzimas para la asimilación de xilosa y de la ruta de las pentosas fosfato en *Zymomona mobilis* (Zhang *et al.*, 1995), cepas recombinantes de *E. coli* con genes de *Z. mobilis* para una conversión más eficiente de piruvato a etanol (Dien *et al.*, 2000), introducción en cepas de *E. coli* de material recombinante para la producción de endoglucanasa (Wood, 1997) y la introducción de plásmidos con genes de xilosa reductasa y xilitol deshidrogenasa de *P. stipitis* en *Saccharomyces spp.* para la co-fermentación eficiente de glucosa y xilosa (Ho *et al.*, 1998). La cepa *K. marxianus* CECT 10875 utilizada en este trabajo ofrece buenas perspectivas ya que, aunque no es capaz de producir etanol, puede crecer sobre xilosa y presenta actividad xilosa reductasa y xilitol deshidrogenasa (Negro *et al.*, 2002).

## **Avances a nivel internacional en la producción de etanol a partir de fuentes lignocelulósicas**

Actualmente, la empresa Iogen Corporation (Ottawa, Canadá) produce más de un millón de galones anuales de etanol a partir de la celulosa contenida en la paja del trigo, avena y cebada, el que es producido en una planta con fines de demostración. Varias plantas de etanol existentes en los Estados Unidos se están dedicando a desarrollar proyectos de investigación y demostrativos de la tecnología, así como el Departamento de Energía de Estados Unidos tiene un programa dedicado al desarrollo de etanol a partir de fibras celulósicas, que en general se destinan hoy en día para la alimentación del ganado. Las compañías dedicadas a la elaboración y producción de enzimas, incluyendo Genencor Internacional y Novozymes, han conducido proyectos de investigación en colaboración con el mencionado Departamento de Energía para reducir perceptiblemente el costo de las enzimas necesarias para el proceso, así como para aumentar sus vidas y durabilidades.

Una búsqueda bibliográfica sobre las empresas que se encuentran fabricando etanol de celulosa, o se encuentran próximas a fabricarlo, se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Información sobre las empresas que elaboran etanol a partir de celulosa.

Compañía	Localización	Materia Prima	Producción	
			anual (m <sup>3</sup> )	Inicio (año)
BC Internacional <sup>1</sup>	Jenning, Louisiana, USA.	Bagazo y arroz	80000	2002
BCI Collins Pine <sup>1</sup>	Chester, California, USA.	Residuos de madera	80000	2002
BCI Gridley <sup>1</sup>	Oroville, California, USA.	Paja de arroz	80000	2002
Arkenol-Sacto <sup>1</sup>	Sacramento, California, USA.	Paja de arroz	15000	2001
Etanol Partners Masada <sup>1</sup>	Middletown, Nueva York, USA.	Residuos urbanos	25000	2001
Etanol Partners Masada <sup>1</sup>	Birmingham, Alabama, USA.	Residuos urbanos	51000	2002
Sealaska <sup>1</sup>	South East Region, Arkansas, USA.	Residuos de maderas blandas	30000	2003
Iogen Corp-Shell-VW <sup>2</sup>	Alemania	Paja de trigo	¿?	2008/10
Abengoa Bioenergía <sup>3</sup>	Salamanca, España.	Residuos agrícolas	5000	2006
BCI <sup>4</sup>	Dedham, Massachusetts, USA.	Bagazo	75600	2002
Iogen <sup>4</sup>	Ottawa, Canadá.	Residuos agrícolas	378000	2004
PureVision Technology <sup>4</sup>	Ft. Lupton, Colorado, USA.	Madera	Piloto	2002

Fuentes: 1. Bryan & Bryan Inc. (2000); 2. Iogen Corp. World Biofuels; 3. Abengoa Bioenergía; 4. Janick & Whipkey (2002).

#### 4. LAS MATERIAS PRIMAS DE FUENTE CELULÓSICA

Al igual que el etanol de maíz, aquél que puede ser obtenido con material celulósico vegetal, constituye una opción de materia prima renovable y doméstica para la elaboración de combustibles. *Una ventaja importante que presenta la producción con celulosa, y que la diferencia de la producción con maíz, es que el empleo de la celulosa permite instalar una planta de producción de energía eléctrica como parte del proceso de disposición de los desechos, con potencial adicional para desplazar el uso de combustibles fósiles. Si a ello se le suma la menor demanda energética para producir la materia prima se puede concluir que la producción del etanol basada en la celulosa tiene un importante potencial para reducir emisiones de gases de efecto invernadero. En efecto, se ha calculado que mientras ambos tipos de etanol pueden reemplazar el consumo de idénticas proporciones de combustibles fósiles (hasta un 95%), el de base celulósica puede generar una reducción total de emisiones de gases de efecto invernadero de más del 100% mientras que el basado en maíz solamente las puede reducir un 20% (NCEP, 2004). Esto ocurre a pesar de que en el momento de uso final, todos los combustibles basados en biomasa son neutrales para el carbono si se asume que la materia prima se obtiene con un manejo que observa el principio del rendimiento sostenido (un equivalente al carbono liberado en la combustión es absorbido por el crecimiento de la biomasa). Entonces, las diferencias que se reportan se explican por las diferentes necesidades de energía para producir la biomasa, cosecharla y procesarla a biocombustible, contabilizando el adicional positivo de la co-generación de energía eléctrica en el caso de la celulosa.* La industria forestal de producción de pulpa para papel ya ofrece ejemplos operativos de esta estrategia de disposición de los residuos con generación de electricidad, tanto en el nivel internacional como en el nacional (e.g. Alto Paraná SA).

Otra virtud del etanol de base celulósica que se puede señalar es su alta compatibilidad con la tecnología que se emplea actualmente para impulsar motores vehiculares, y la infraestructura instalada a ese propósito. Además, si se considera que buena parte de la materia prima puede constituirse con los residuos de otras actividades, los costos económicos y ecológicos de la provisión de materia prima deberían ser sustancialmente menores que en el caso del maíz. Por último, si se usan materiales leñosos o fibrosos cultivados (aunque sea parcialmente) también existe el potencial de secuestrar más carbono en la biomasa o en el suelo, lo que dependerá del uso de la tierra que el modelo de producción primaria reemplace (e.g. tenderá a ser máximo si se reemplaza un cultivo agrícola por una plantación forestal).

*Una de las principales barreras que todavía deben ser removidas para su adopción es el costo de producción.* La respuesta tecnológica aún no está madura, y aún cuando ha reducido los costos a un tercio en los últimos 20 años, el costo actual no resulta competitivo con el de los combustibles convencionales. Sin embargo, distintas estimaciones señalan que alrededor del año 2010 la innovación tecnológica permitirá alcanzar un costo competitivo, y que cuando la tecnología de conversión esté completamente madura, los costos serán incluso menores que los necesarios para competir (NCEP, 2004).

El otro aspecto que todavía plantea interrogantes deviene de la solución que se adopte para el abastecimiento de materias primas fibrosas o leñosas. Para el abastecimiento se pueden emplear básicamente tres estrategias: el empleo exclusivo de los residuos de otras actividades (agrícolas y forestales, primarias e industriales), el empleo de materia prima proveniente de tierras cultivadas con el propósito de producir fibras (tanto agrícolas como forestales) y, finalmente, una combinación de ambas. Además de las diferencias en el costo de la materia prima para estas opciones, que jugarán un papel crítico para la viabilidad del proyecto, las otras preocupaciones que se pueden señalar son de orden ecológico y social. En efecto, la provisión de

materia prima mediante cultivos implica la necesidad de asignar superficies significativas de tierra para esa finalidad, lo que necesariamente resultará en cambios en el uso actual de esas tierras. Lógicamente, el impacto de dichos cambios dependerá del modelo de producción adoptado, y de la región seleccionada para desarrollar el proyecto. Por su parte, si se emplean residuos (agrícolas o forestales) que actualmente se dejan en descomposición en el campo luego de la cosecha, se estará incrementando la exportación de biomasa (incluyendo nutrientes) con relación a la situación actual, con un impacto potencial sobre la productividad del suelo (*e.g.* contenido de materia orgánica, fertilidad). Finalmente, si se emplean residuos de procesos industriales es posible que se compita por la materia prima con otras actividades industriales que dependen de ellos (*e.g.* los residuos del aserrado de la madera son empleados para producir pasta celulósica y tableros de partícula o fibra).

De las opciones que se señalaron para la provisión de materias primas, en las secciones siguientes se analizarán con cierto detalle las relacionadas con el empleo de materias primas forestales.

### **El sector forestal primario**

De acuerdo con los inventarios forestales que se realizaron recientemente (SAGPyA, 2001; SAyDS, 2002), la Argentina contaba en el año 1998 con un patrimonio de 33,2 Mha de bosque nativo que se completaba con un patrimonio de bosques cultivados de 0,78 Mha. A los fines de este trabajo resulta de interés el subsector relacionado con la materia prima cultivada (*i.e.* las plantaciones), razón por la cual se detallarán algunas de las características más sobresalientes del mismo (y en lo que sigue, a menos que se indique lo contrario, la información se referirá exclusivamente a este subsector).

A partir del inventario correspondiente y con información oficial, Braier (2004a) realizó una actualización de la superficie cultivada para el año 2002 que revelaba el incremento del área total hasta alcanzar un total de 1,12 Mha. En gran medida este patrimonio ha sido creado con apoyo del estado mediante distintos mecanismos de incentivo económico (desde créditos fiscales hasta subsidios directos), los cuales han estado vigentes de manera más o menos consistente casi durante los últimos 30 años. Incluso las clases de edad de las plantaciones suelen reflejar los vaivenes de estas políticas. Aunque el patrimonio ha crecido notablemente en el último período, aún es sustancialmente menor al de otros países de Latinoamérica (Chile y Brasil en términos absolutos, Uruguay en términos relativos). La ubicación geográfica y la composición específica de este patrimonio se puede observar en la Tabla 4.

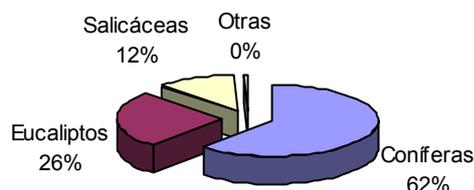
**Tabla 4.** Distribución de las superficies (kha) con plantaciones forestales por especies y provincias en el año 2002. Fuente: Braier (2004<sup>a</sup>).

Provincia	Pinos	Eucaliptos	Salicáceas	Otras	Total	Proporción
Misiones	313,7	24,9	0,0	46,3	384,9	34,5
Corrientes	232,5	95,8	0,0	0,8	329,0	29,5
Entre Ríos	11,7	90,0	15,9	13,4	131,1	11,7
Buenos Aires	6,9	36,9	47,8	8,1	99,8	8,9
Patagonia <sup>1</sup>	48,3	0,0	19,6	0,7	68,6	6,1
NOA <sup>2</sup>	6,9	16,1	0,2	0,8	23,9	2,1
Centro <sup>3</sup>	34,2	12,1	2,5	0,0	48,8	4,4
Resto	1,7	3,0	23,4	1,4	29,5	2,6
<b>Total</b>	<b>656,0</b>	<b>278,8</b>	<b>109,4</b>	<b>71,4</b>	<b>1115,7</b>	
<b>Proporción</b>	<b>58,8</b>	<b>25,0</b>	<b>9,8</b>	<b>6,4</b>		<b>100,0</b>

1. Neuquén, Río Negro, Chubut y Santa Cruz. 2. Jujuy, Salta y Tucumán. 3. Santa Fe, Córdoba y La Pampa.

De acuerdo con estos datos, más de 3/4 partes del área con plantaciones están concentradas en las tres provincias mesopotámicas y la proporción prácticamente alcanza el 85% si se le agregan la superficie correspondiente a la provincia de Buenos Aires. En lo relativo a la composición específica, las especies del género *Pinus spp.* son las más cultivadas y más que duplican la superficie cultivada con distintos eucaliptos (*Eucalyptus spp.*). Juntas explican más de las 4/5 partes del total y si se agregan las salicáceas (los álamos del género *Populus spp.* y los sauces del género *Salix spp.*) la proporción alcanza casi el 95%. Esta preponderancia de los pinos y eucaliptos en el patrimonio era más marcada en 1998 si se considera que el volumen total en pie alcanzaba unos 94 Mm<sup>3</sup>, de los cuales más del 90% correspondían a estos géneros, con los pinos también duplicando en volumen a los eucaliptos (SAGPyA, 2001). En el inventario también se reveló que más de la mitad de las plantaciones eran propiedad de las industrias (grandes y pequeñas en conjunto) mientras que cerca del 80% de los predios registrados presentaban un área de al menos 1000 ha, datos que están sugiriendo que los emprendimientos son de cierta escala. De acuerdo con Okita (2003) habría más de 15 mil productores, y el sector estaría empleando unas 41 mil personas.

La serie estadística correspondiente al quinquenio 1998-2002 informa que el peso promedio de madera cosechada en bosques cultivados resultó ser de 5,9 millones de toneladas (5900 Gg) (SAGPyA, 2003). Siempre de acuerdo con los promedios, más del 95% de esta madera se comercializó como madera rolliza y la participación relativa de las especies sigue aproximadamente la distribución de las superficies (Figura 1). En cuanto al origen geográfico, la Provincia de Misiones



**Figura 1.** Distribución relativa promedio del período 1998-2002 de los tres géneros más importantes en la cosecha. Fuente: elaboración propia con datos de SAGPyA (2003). Coníferas incluye la cosecha de *Araucaria angustifolia* y la participación de Otras no alcanza un dígito significativo.

representa casi 2/3 partes del total, mientras que los segundos distritos (Corrientes, Entre Ríos y Buenos Aires) representan 1/4 del total. Dado que se han informado valores y proporciones promedio conviene destacar que la cosecha del último período informado (2002) fue la mayor de la serie con 7,4 millones de toneladas (7400 Gg). Estas tendencias crecientes se acentuaron en el año 2003, último con estadísticas publicadas y en el que se cosecharon 7,84 millones de toneladas (7840 Gg) en total, 97,6% de los cuales se comercializaron como rollizos con una participación creciente de los pinos en desmedro de los eucaliptos si se la compara con la serie quinquenal (Tabla 5). Como se puede observar, el intercambio de material rollizo con el exterior es prácticamente despreciable.

**Tabla 5.** Composición del consumo aparente de rollizos (en toneladas) por especies para el año 2003. Fuente: SAGPyA (2003).

	<b>Pinos</b>	<b>Eucaliptos</b>	<b>Salicáceas</b>	<b>Otras<sup>1</sup></b>	<b>Total</b>
Cosechas	5376070	1154771	908157	212174	7651172
Importaciones	0	0	0	0	0
Exportaciones	17	37687	25	129	37858
<b>Consumo aparente</b>	<b>5376053</b>	<b>1117084</b>	<b>908132</b>	<b>212045</b>	<b>7613314</b>
<b>Proporción (cosechas)</b>	<b>70,3</b>	<b>15,1</b>	<b>11,9</b>	<b>2,8</b>	<b>100,0</b>

1. Incluye *Araucaria angustifolia*.

### La industria forestal

De acuerdo con la encuesta anual de la industria de la madera y el papel (SAGPyA, 2003), en nuestro país había en el año 2003 más de 100 emprendimientos industriales ligados con el sector de las plantaciones forestales sin contabilizar la industria del aserrío. En Okita (2003) se ha estimado que la cantidad de aserraderos instalados en el país sería alrededor de 2.200. De acuerdo con esta fuente, el empleo total del sector alcanzaría unas 141 mil personas. En la Tabla 6 se presenta la información más relevante de las industrias (excluyendo el aserrío). La capacidad ociosa de este subsector oscila entre el 10% (tableros de fibra) y el 40% (tableros de partícula e impregnación). En la industria del pulpado la capacidad ociosa es de apenas el 14%

**Tabla 6.** Principales características de las industrias forestales argentinas (excluyendo la industria del aserrío) en el año 2003. Fuente: elaboración propia con datos de SAGPyA (2003).

<b>Industria</b>	<b>Cantidad estimada de industrias</b>	<b>Personal ocupado</b>	<b>Capacidad instalada</b>	<b>Producción</b>
			(m <sup>3</sup> /año)	(m <sup>3</sup> /año)
Tableros de fibra	4	570	641000	578109
Tableros de partícula	5	651	729000	454943
Tableros compensados	15	1302	117261	84818
Impregnación	29	288	222103	133620
			(t/año)	(t/año)
Pasta celulósica			1040126	894217
Papel y cartón	65	10195	1683146	1212280

En la Tabla 7 se presentan las demandas industriales de materia prima rolliza como tal (*i.e.* no se incluyen las demandas de madera en otras formas como chips o aserrín) correspondientes al año 2003. Como se observa, la industria del aserrío consume aproximadamente la mitad de los rollizos mientras que la industria celulósica consume alrededor de un tercio de los rollizos como tales. El 17% restante es demandado por todas las industrias de tableros. El destino de la materia prima de las distintas especies por industrias indica que los rollizos de pino se usan principalmente como material aserrable y pulpable, mientras que la mayor parte de los rollizos de eucaliptos y salicáceas se destinan a la industria celulósica y a la producción de tableros. Las otras especies se usan principalmente para la producción de material aserrado. Analizando la información por industria se puede destacar que para la producción de pastas se usan principalmente pinos como materia prima (alrededor de dos tercera partes del total), lo que también ocurre con el material aserrado y los tableros de fibra (en ambos casos aproximadamente cuatro quintas partes del total). La producción de tableros de partículas demanda principalmente materia prima de latifoliadas -salicáceas > eucaliptos- (juntas representan más del 90% de la demanda) y lo propio ocurre con la industria de los tableros compensados -eucaliptos > salicáceas- (juntas representan alrededor de tres cuartas partes del total). La participación de otras especies es marginal en todas las industrias (en ningún caso superan el 5% del total demandado).

**Tabla 7.** Distribución por industria y por especie del consumo aparente de rollizos como tales (en miles de toneladas o Gg) en el año 2003. Fuente: elaboración propia con datos de SAGPyA (2003) y SAyDS (2005).

<b>Industria</b>	<b>Pinos</b>	<b>Eucaliptos</b>	<b>Salicáceas</b>	<b>Otras</b>	<b>Total</b>	<b>Proporción</b>
Pastas celulósicas	1537	573	416	0	2526	33,2
Tableros de partícula	27	135	238	0	401	5,3
Tableros de fibra	516	124	0	15	655	8,6
Tableros compensados <sup>1</sup>	44	148	62	10	264	3,5
Aserrío <sup>2</sup>	3252	136	192	187	3767	49,5
<b>Total</b>	<b>5376</b>	<b>1117</b>	<b>908</b>	<b>212</b>	<b>7613</b>	<b>100,0</b>

1. Incluye faqueado y laminado. Se han considerado las demandas de rollizos como tales a las que se les han agregado las demandas de láminas expresadas por su equivalente en materia prima rolliza (considerando una eficiencia del 55% en el procesamiento).

2. Se ha asumido que la demanda de la industria del aserrío es el residuo entre el total y el consumo informado por las demás industrias en la Encuesta Anual de la Industria Maderera y del Papel y el Censo de la Industria de la Madera.

### **Materia prima forestal para el etanol de base celulósica**

Para determinar la cantidad de materia prima forestal necesaria se ha tomado como demanda de referencia la ya señalada necesidad de 400 km<sup>3</sup> de etanol para producir un corte del 10% sobre una demanda estabilizada de naftas del orden de los 4 Mm<sup>3</sup>. Considerando un coeficiente de conversión técnica de 0,3 m<sup>3</sup> de etanol/Mg de materia seca de madera (o su inverso de 3,33 Mg de materia seca de madera/m<sup>3</sup> de etanol) se puede determinar la necesidad anual de madera en el orden de 1,33 millones de toneladas (1330 Gg).

En principio existen dos opciones para el abastecimiento de una cierta demanda de materia prima para la producción de etanol. Una primera opción es adquirir la madera y/o los residuos de los procesos industriales en el mercado. La segunda opción es crear un patrimonio forestal mediante plantaciones para abastecer las necesidades de materia prima.

La primera opción, de resultar factible, tendría la ventaja de complementarse con actividades pre-existentes y permitiría la instalación de la planta de procesamiento de manera inmediata. Para ello es importante entonces determinar la factibilidad de esta opción. En una primera aproximación, se puede observar que la demanda planeada de 1,33 millones de toneladas tendría un impacto significativo en el sector puesto que en la actualidad se cosechan unos 8 millones de toneladas de madera rolliza cada año. Sin embargo, para determinar la factibilidad de esta opción se deben considerar las tendencias a mediano y largo plazo de la actividad forestal. Afortunadamente, en un detallado estudio (Braier, 2004) se han publicado estimaciones del comportamiento de todos los actores de la cadena foresto-industrial que permiten pronosticar el estado del sector en el año 2020. Para pronosticar la oferta de madera en dicho estudio se ha desarrollado un modelo de programación lineal que maximiza las ganancias de los forestadores, y les determina las mejores combinaciones de superficies cultivadas, cosechadas, especies, rotaciones, etc. La característica interesante del modelo es que prevé restricciones realistas como una superficie máxima susceptible de ser forestada en un año cualquiera, y que las cosechas de cada año están condicionadas por la demanda. El análisis se ha desarrollado para las cuencas productivas (o núcleos) más importantes de la actualidad: Misiones (pinos), Río Uruguay (eucaliptos), Delta del Paraná (salicáceas).

En la provincia de Misiones, el modelo indica que si no hay techo impuesto por la demanda y aún cuando no se puedan plantar más de 40 mil ha, hacia el año 2020 se estarían ofreciendo unos 20 Mm<sup>3</sup>, que es aproximadamente cuatro veces la cosecha actual de la provincia, y permitiría cuadruplicar la producción de todas las industrias. Si se impone un techo dado por la demanda es necesario proyectarla en el futuro. Para ello se han considerado las industrias instaladas actualmente, y sus proyectos de ampliación. Sin embargo, para lograr una oferta equilibrada con la demanda fue necesario incorporar un proyecto de pulpa ficticio (consumiendo alrededor de 1,5 millones de toneladas), y adelantar su instalación en el tiempo. Aunque se logró un resultado más equilibrado, en este escenario todavía la oferta superaba a la demanda hacia el año 2014. También es importante destacar que las plantaciones de pino de Corrientes (mayormente localizadas en el norte de la provincia y con buenas oportunidades de integración con Misiones) no fueron incluidas en esta optimización, lo que pone aún más de relieve la sobreoferta de madera de esta especie que esta cuenca muy probablemente ofrecerá en los próximos 20 años. Las Tablas 8 y 9 permiten apreciar la composición actual de los patrimonios forestales de Misiones y Corrientes y su distribución por clases de edad.

**Tabla 8.** Distribución de las superficies (kha) con plantaciones forestales en la provincia de Misiones por clases de edad (años) y por especies en el año 2002. Fuente: elaboración propia con datos de Braier (2004a) y SAGPyA (2001).

<b>Clases de edad</b>	<b>Pinos</b>	<b>Eucaliptos</b>	<b>Salicáceas</b>	<b>Otras</b>	<b>Total</b>	<b>Proporción</b>
≤ 6	60,1	4,8	0,0	8,9	73,7	19,1
7-12	73,1	4,3	0,0	2,9	80,3	20,9
13-18	65,4	12,0	0,0	15,0	92,4	24,0
19-24	86,4	2,2	0,0	6,4	95,1	24,7
≥ 25	28,7	1,7	0,0	13,1	43,5	11,3
<b>Total</b>	<b>313,7</b>	<b>24,9</b>	<b>0,0</b>	<b>46,3</b>	<b>384,9</b>	
<b>Proporción</b>	<b>81,5</b>	<b>6,5</b>	<b>0,0</b>	<b>12,0</b>		<b>100,0</b>

**Tabla 9.** Distribución de las superficies (kha) con plantaciones forestales en la provincia de Corrientes por clases de edad (años) y por especies en el año 2002. Fuente: elaboración propia con datos de Braier (2004a) y SAGPyA (2001).

Clases de edad	Pinos	Eucaliptos	Salicáceas	Otras	Total	Proporción
≤ 6	32,0	13,2	0,0	0,1	45,3	13,8
7-12	53,6	21,5	0,0	0,0	75,1	22,8
13-18	52,7	26,8	0,0	0,0	79,5	24,1
19-24	66,4	28,8	0,0	0,7	95,9	29,2
≥ 25	27,8	5,5	0,0	0,0	33,3	10,1
<b>Total</b>	<b>232,5</b>	<b>95,8</b>	<b>0,0</b>	<b>0,8</b>	<b>329,0</b>	
<b>Proporción</b>	<b>70,6</b>	<b>29,1</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>		<b>100,0</b>

En el caso de los eucaliptos, la cuenca en realidad se constituye con las plantaciones sobre la margen del Río Uruguay e incluye la mayor parte de las plantaciones de Corrientes y todas las de Entre Ríos. En las Tablas 9 y 10 se puede observar la distribución por especies y clases de edad para los eucaliptos en esta cuenca, en las que resulta evidente las rotaciones más cortas que se emplean en la práctica. En Braier (2004) también se reporta un pronóstico de comportamiento de la oferta y la demanda hasta el año 2020 que, a diferencia del descrito para los pinos en Misiones, no implica un ejercicio de optimización que maximiza los retornos para los propietarios, sino más bien un ejercicio de simulación. El pronóstico sugiere que hacia el año 2005 la oferta superará a la demanda en el segmento de los materiales triturables, y que a partir del 2008 ocurrirá lo propio con el material de calidad apta para el aserrío. Es decir, también se está pronosticando un exceso de oferta que no podrá ser consumido por las industrias instaladas, aún considerando sus potenciales ampliaciones, las que fueron relevadas en el estudio.

**Tabla 10.** Distribución de las superficies (kha) con plantaciones forestales en la provincia de Entre Ríos por clases de edad (años) y por especies en el año 2002. Fuente: elaboración propia con datos de Braier (2004a) y SAGPyA (2001).

Clases de edad	Pinos	Eucaliptos	Salicáceas	Otras <sup>1</sup>	Total	Proporción
≤ 6	4,1	31,2	5,5	4,6	45,4	34,6
7-12	2,2	37,7	6,7	4,0	50,6	38,6
13-18	1,9	9,8	3,7	1,9	17,3	13,2
19-24	2,1	6,0	0,0	1,9	10,0	7,6
≥ 25	1,4	5,4	0,0	1,0	7,8	6,0
<b>Total</b>	<b>11,7</b>	<b>90,0</b>	<b>15,9</b>	<b>13,4</b>	<b>131,1</b>	
<b>Proporción</b>	<b>8,9</b>	<b>68,7</b>	<b>12,1</b>	<b>10,2</b>		<b>100,0</b>

1. Las proporciones no se especificaron para 1998 de modo que los valores se asignaron arbitrariamente para minimizar los desvíos con respecto a las proporciones totales.

Finalmente, al analizar el caso de la cuenca del Delta del Paraná, basada en el empleo de salicáceas en las provincias de Entre Ríos y Buenos Aires, se vuelve a usar el modelo de

optimización de los beneficios para los productores forestales (Braier, 2004). En este núcleo no se estableció una restricción por la demanda y se hicieron dos supuestos importantes, por un lado se asumió que el ritmo anual de plantaciones (incluyendo los rebrotes) sería de 4500 ha, y por otro, se supuso que el patrimonio era prácticamente idéntico al informado en la Tabla 4, y cuya descripción por clases de edad se ha detallado en las Tablas 10 y 11.

**Tabla 11.** Distribución de las superficies (kha) con plantaciones forestales en la provincia de Buenos Aires por clases de edad (años) y por especies en el año 2002. Fuente: elaboración propia con datos de Braier (2004a) y SAGPyA (2001).

<b>Clases de edad</b>	<b>Pinos</b>	<b>Eucaliptos</b>	<b>Salicáceas</b>	<b>Otras</b>	<b>Total</b>	<b>Proporción</b>
≤ 6	2,4	12,6	16,3	2,8	34,0	34,0
7-12	0,7	7,2	14,0	1,4	23,2	23,3
13-18	0,7	5,5	11,2	1,2	18,5	18,5
19-24	2,6	4,7	3,1	1,2	11,6	11,6
≥ 25	0,7	6,9	3,3	1,7	12,6	12,6
<b>Total</b>	<b>6,9</b>	<b>36,9</b>	<b>47,8</b>	<b>8,1</b>	<b>99,8</b>	
<b>Proporción</b>	<b>6,9</b>	<b>37,0</b>	<b>47,9</b>	<b>8,1</b>		<b>100,0</b>

En base a los resultados del modelo y con las observaciones indicadas, el estudio señala que la cuenca puede ofrecer a partir del año 2010 la posibilidad de sostener un nuevo proyecto de tableros de partículas, que se adicione a las industrias actualmente instaladas en la región. Esto se podría realizar con una oferta sostenida para todo el período de casi 800 mil toneladas de material astillable, y unas 100 mil toneladas de material aserrable que potencialmente ofrecerá residuos para otros usos. Sin embargo, de las tres cuencas analizadas es la que más ha mostrado signos de estancamiento en el pasado reciente, y que por lo tanto, ofrece menos atractivos para el futuro próximo. Sin embargo, su cercanía con el mayor centro de consumo nacional la convierten naturalmente en una opción que no puede descartarse con facilidad.

Para completar el análisis de factibilidad de la opción de cubrir la demanda con materia prima comprada en el mercado, resta cuantificar la disponibilidad de residuos del procesamiento industrial. En la Tabla 12 se presentan los resultados de una estimación de la disponibilidad potencial de residuos de madera generados por las industrias forestales.

**Tabla 12.** Generación y uso de residuos de madera (en miles de toneladas o Gg) por parte de las distintas industrias forestales para el año 2003. Fuente: elaboración propia con datos de SAGPyA (2003) y SAyDS (2005).

	<b>Pinos</b>	<b>Eucaliptos</b>	<b>Salicáceas</b>	<b>Otras</b>	<b>Total</b>
<b>Generado</b>					
Aserrío <sup>1</sup>	1463	61	86	84	1695
Tableros compensados <sup>1</sup>	20	67	28	5	119
<b>Total</b>	<b>1483</b>	<b>128</b>	<b>114</b>	<b>89</b>	<b>1814</b>
<b>Actualmente empleado</b>					
Pastas celulósicas <sup>2</sup>	853	0	4	0	858
Tableros de partícula <sup>3</sup>	12	60	106	0	179
Tableros de fibra <sup>3</sup>	66	16	0	2	83
<b>Total</b>	<b>931</b>	<b>76</b>	<b>111</b>	<b>2</b>	<b>1120</b>
<b>Potencialmente disponible</b>	<b>552</b>	<b>52</b>	<b>4</b>	<b>87</b>	<b>694</b>

1. Se ha supuesto una eficiencia de transformación de los rollizos consumidos por cada industria a producto final del 55% y que todo el remanente constituye residuo generado.

2. Se ha supuesto que todos los residuos que la industria informa como consumo en Misiones son de pinos y en Buenos Aires y Entre Ríos son de salicáceas.

3. Se ha supuesto que los residuos que la industria informa como consumo se distribuyen por especies siguiendo las mismas proporciones que se observan en el consumo de rollizos como tales que ha hecho la misma industria.

De acuerdo con los supuestos expresados, las estimaciones indican un uso relativamente intenso de los residuos generados por la industria. En efecto, el peso de residuos de madera que la industria informa como consumo de materia prima para sus procesos (poco más de 1,1 millón de toneladas) representa un 15% del peso total reportado como consumo aparente de rollizos (en este caso luego de descontar las exportaciones, las que no alcanzan valores significativos, *cf.* Tabla 5). Por su parte, las casi 700 mil toneladas estimadas como potencialmente disponibles estarían representando apenas el 9% del consumo aparente. Si se considera la composición específica, es claro que la mayor parte del material potencialmente disponible es de coníferas y, dada la distribución geográfica del cultivo de esta especie en nuestro país, casi todo este material estaría concentrado en el norte de la Mesopotamia (Misiones y Corrientes, principalmente). El material potencialmente disponible del resto de las especies no alcanza valores de importancia, y solamente el originado en el procesamiento de eucaliptos es probable que presente algún grado de concentración geográfica (en el centro de la Mesopotamia, en las provincias de Entre Ríos y Corrientes).

Complementariamente, se puede considerar la generación de residuos producidos por la industria que procesa madera del bosque nativo. De acuerdo con las estimaciones hechas por SAyDS (2005), en el aserrado de maderas nativas durante el 2003 se habrían producido unas 327 mil toneladas (asumiendo una eficiencia en la transformación del 55%) en todo el país. Para estimar su ubicación geográfica conviene destacar que del total de madera cosechada del bosque nativo en ese año (medido en peso), prácticamente el 85% se ha originado en las provincias de Chaco, Misiones y Formosa (en ese orden de importancia). En definitiva, la oferta total potencial

de residuos de madera (tanto de bosques cultivados como nativos) en la región constituida por las provincias de Misiones, Corrientes, Chaco y Formosa, podría superar las 825 mil toneladas.

La opción de crear un patrimonio forestal mediante plantaciones para abastecer las necesidades de materia prima de una planta de producción de etanol tiene como principal desventaja económica que requerirá un tiempo de espera hasta que las plantaciones puedan abastecer a la planta. Dicha desventaja se puede atemperar si se elige una ubicación geográfica para el proyecto que permita utilizar otras fuentes de materia prima mientras se establecen las plantaciones. Para determinar las necesidades de tierra para distintas ubicaciones y con distintas especies se han elegido combinaciones probadas que permitirían minimizar los riesgos. La información sobre productividad para cada especie junto con la densidad específica, son las que determinarán las necesidades mínimas de tierra para desarrollar un proyecto que permita sostener el nivel de cosecha deseado (prácticamente 1,35 millones de toneladas) a largo plazo. También se ha supuesto un adicional de tierra para considerar otras necesidades (caminos, infraestructura, conservación, etc). En la Tabla 13 se presentan los resultados de esta estimación para los mismos núcleos geográficos que ya se han descrito con anterioridad.

**Tabla 13.** Superficie (en kha) necesaria para cubrir una demanda de 1,35 Mt de madera con distintas especies en distintos núcleos geográficos. Se presentan los incrementos medios anuales (en  $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ ) y los rendimientos por unidad de área en la cosecha (en  $Mg \cdot ha^{-1}$ ). Fuente: elaboración propia con datos de Okita (2003).

Núcleo	Especie	Incremento medio anual	Rendimiento	Superficie	
				Necesaria	Disponible
Mesopotamia norte <sup>1</sup>	<i>Pinus taeda</i>	35	335	131	511
	<i>Pinus elliotti</i>	30	287	153	
	<i>Eucalyptos grandis</i>	42	171	123	39
	<i>Araucaria angustifolia</i>	18	306	229	42
Mesopotamia Centro <sup>2</sup>	<i>Pinus taeda</i>	35	335	131	47
	<i>Eucalyptus grandis</i>	30	287	153	171
Delta del Paraná <sup>3</sup>	<i>Populus deltoides</i>	22	90	235	64
Pampa húmeda <sup>4</sup>	<i>Eucalyptus globulus</i>	30	172	153	37
	<i>Eucalyptus tereticornis</i>	25	191	110	

1. Misiones y Corrientes: la superficie disponible de pinos no está discriminada por especie, se ha supuesto que un 15% del área con eucaliptos de Corrientes y que un 85% del área con pinos de Corrientes están en este núcleo y se ha supuesto que el 90% de la superficie de otras especies de Misiones corresponde a *Araucaria angustifolia*.

2. Corrientes y Entre Ríos: se ha supuesto que un 85% del área con eucaliptos de Corrientes y que un 15% del área con pinos de Corrientes están en este núcleo.

3. Entre Ríos y Buenos Aires: se ha supuesto que toda el área con salicáceas corresponde a la especie señalada.

4. Buenos Aires: la superficie disponible de eucaliptos no está discriminada por especie.

Estos resultados indican que, para las combinaciones más convencionales de especie y ubicación geográfica, sería necesario un mínimo de 120 mil ha si se usa *Eucalyptus grandis* (en el núcleo Mesopotamia norte). Mientras tanto la máxima necesidad de superficie, en el orden de las 230 mil ha, se da con las especies menos productivas de las elegidas (*Populus deltoides* y *Araucaria angustifolia*). Una mención en particular requiere el caso del *Eucalyptus tereticornis*.

En todos los casos se puede apreciar la relación inversa entre la productividad, medida por el incremento medio en volumen para una edad de rotación pre-establecida como óptima, y los requerimientos de área. Sin embargo, la elección de una madera pesada tiende a producir una sustancial disminución del requerimiento de área (compárese la productividad semejante que tiene *Populus deltoides*, de madera más liviana, y el *Eucalyptus tereticornis*, de madera más pesada, junto con sus requerimientos de área muy diferentes). Lo que debe considerarse es la aptitud de la madera que provee la especie candidata, puesto que muy probablemente algunas especies con maderas pesadas tendrán altos contenidos de lignina, lo que potencialmente puede comprometer la eficiencia de conversión a etanol y no significar una gran ventaja en los requerimientos de área.

Por último, simplemente para aproximar la magnitud del proyecto involucrado en relación al nivel de actividades existentes en cada núcleo seleccionado, se ha incorporado la información sobre la superficie forestada siguiendo la descripción de los núcleos señalada. Si se usa como criterio la pre-existencia de una actividad bien establecida, las elecciones naturales serían las plantaciones de pino en Mesopotamia norte, y las de eucaliptos en el núcleo Mesopotamia centro. Esto facilitaría la transición del proyecto desde el abastecimiento de madera mediante la compra en el mercado, hacia el autoabastecimiento. En todas las demás combinaciones de especies y localizaciones geográficas, este criterio debería ser evaluado particularmente puesto que el patrimonio actual no cubrirá totalmente la demanda para biocombustibles en ningún escenario, sin intervenciones. Sin embargo, esto puede constituir una ventaja si se desea impulsar una actividad más intensa y diversificada para algunas áreas que no se están desarrollando integralmente.

### **Biomasa originada en la agricultura como materia prima**

El análisis de las posibilidades de utilización de biomasa proveniente de la agricultura o sus residuos, tanto en el sector primario como en el procesamiento industrial, se realiza partiendo de la premisa de que “renovable no necesariamente es sustentable”. En tal sentido, en el análisis de factibilidad deberían evaluarse los impactos relativos a la producción de alimentos, a la biodiversidad, a los recursos suelo y agua, a otros usos del suelo y las prácticas agrícolas, a la tasa de extracción de biomasa en relación con el balance de nutrientes del suelo, a los riesgos de erosión.

Las principales fuentes de biomasa celulósica con potencial destino a la producción de etanol son, por una parte, los cultivos energéticos destinados a tal fin y, por otra parte, la biomasa residual.

En el primero de los casos, la *biomasa cultivada*, se presenta una competencia directa entre la producción de alimentos y la de energía, dado que las tierras a utilizar en un cultivo energético generalmente son de productividad análoga a las agrícolas. De todos modos, en el nivel local, puede existir una conveniencia en la implantación de este tipo de cultivos. De igual manera, cuestiones de competitividad atentan contra su factibilidad, ya que los costos de oportunidad de uso de la tierra con otras actividades determinantes de la rentabilidad del establecimiento, como el cultivo de soja, son altos. Además, la productividad anual de biomasa se ve disminuida si la producción es sustentable, dentro de un marco de rotaciones con los debidos períodos de descanso del suelo.

Es diferente en el caso de plantear cultivos adaptados en zonas áridas, que si bien son recursos de biomasa de menor productividad, pueden provenir de pastizales naturales que, con un manejo adecuado, resultaría en una productividad rentable. En este sentido, es conocido el caso del *switchgrass* (*Panicum virgatum*) en Estados Unidos, un pasto perenne y nativo de ese país, muy prolífico y sin grandes requerimientos nutricionales. Su productividad ronda las 15

toneladas.ha<sup>-1</sup> y se calcula que puede proveer cerca de 185 GJ de energía química bruta por año por tonelada y, más específicamente, la producción de etanol rinde 57 GJ.ha<sup>-1</sup>. Mientras tanto, la producción de etanol a partir de maíz tiene un rinde de 21,4 GJ.ha<sup>-1</sup> (Samson *et al.*, 2005).

En este sentido, es de destacar que cuando la biomasa proviene de otras fuentes de celulosa que no son granos, tanto el balance energético como el rendimiento energético final es mayor, así como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Argonne National Laboratory, 2005). Por lo expuesto, se considera entonces necesario un estudio de las posibles fuentes de biomasa posibles de ser cultivada en nuestro país y las especies autóctonas, sobre todo el caso de cultivos perennes, ya que en ese caso se reducen notablemente las labores, beneficiando el balance energético, económico, y de emisiones.

En el segundo de los casos, la *biomasa residual*, como la paja de trigo y lino, rastrojo de maíz, tallos de algodón y hojas de caña de azúcar, se debe considerar que una parte de los residuos agrícolas deben ser incorporados al suelo para mantener las condiciones de fertilidad y textura en niveles adecuados. Otra parte puede ser destinada a su utilización energética, aunque hay que tener en cuenta que la explotación agrícola tradicional en nuestro país es de tipo extensivo, por lo que la recolección de los residuos se encarece demasiado, quitándole valor económico al mismo. Además, su densidad es muy baja, lo que obliga a movilizar grandes volúmenes, y recurrir a procesos de densificación para su posterior conversión en energía útil. La relación residuos/cosecha tiene valores de 4,88 para algodón, 1,86 para lino y 1,33 para trigo.

Consideración especial merece en nuestro país la quema de rastrojos, una práctica que se realiza para facilitar las posteriores labores agrícolas, y tiene por finalidad que no existan residuos en descomposición del cultivo anterior durante el crecimiento del cultivo subsiguiente. Además de ser una fuente de emisiones de metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos del nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) hacia la atmósfera, la quema de rastrojos genera inmovilización de nutrientes (principalmente nitrógeno) por la flora bacteriana encargada de descomponer los rastrojos del cultivo previo. Los cultivos cuyos rastrojos son quemados en nuestro país son algodón, lino, trigo y caña de azúcar (quemándose un 3%, 50%, 3% y 9-20% de los residuos, respectivamente) (Fundación Bariloche, 2005). La quema de rastrojos es una práctica poco frecuente en la pradera pampeana, principal productora de cultivos de la Argentina (aunque las superficies de trigo y sobre todo lino han disminuido notablemente); pero es habitual en el NEA y el NOA. En estas regiones es común quemar rastrojos de algodón y de caña de azúcar. En este sentido, se debería analizar en detalle si la tecnología actual de cosecha de estos dos últimos cultivos permitiría recuperar los residuos, para minimizar los costos de recolección, y poder derivarlos a un centro de acopio.

Un tercer aspecto a tratar, es el de los *recursos agroindustriales*. También aquí se trata de residuos de los procesos de industrialización de productos agropecuarios, que pueden ser empleados con fines energéticos. En muchos de los casos, la energía producida con su utilización, resultaría suficiente para abastecer todo el proceso de elaboración. Ejemplos característicos de este tipo de aprovechamiento son la fabricación de azúcar a partir de la caña, en cuyo caso el bagazo puede alimentar las calderas del ingenio, o ser destinado a producir alcohol, o el procesado de arroz y girasol, en el cual la cáscara puede ser fuente de celulosa; sin olvidar otros como el marlo del maíz, la cáscara de maní, etc. Durante 2004 se consumieron unas 4500 toneladas de marlos de maíz, y unas 233 mil toneladas de cáscara de girasol por parte de auto-productores para generar energía eléctrica (Secretaría de Energía, 2006); así como 514 mil toneladas de bagazo.

Estos datos sugieren que si se aprovecha la biomasa para generar energía aún con los precios subsidiados de la electricidad y el gas, el costo de oportunidad de desviar esa biomasa a

generación de etanol sería relativamente menor. En todos los casos, es necesario un estudio actualizado específico de los volúmenes disponibles y los que se aprovechan, ya que en el caso del bagazo, los ingenios han vuelto a utilizarlo como fuente de energía en sus calderas; lo propio ocurre con la cáscara de girasol, hoy utilizadas por las cementeras, e incluso ha vuelto a ser una opción para las mismas aceiteras, aunque no hay registros estadísticos. Por lo tanto, es necesaria una cuantificación de volúmenes, acompañada de mayores precisiones en la localización, grado de dispersión y destino actual de esta biomasa.

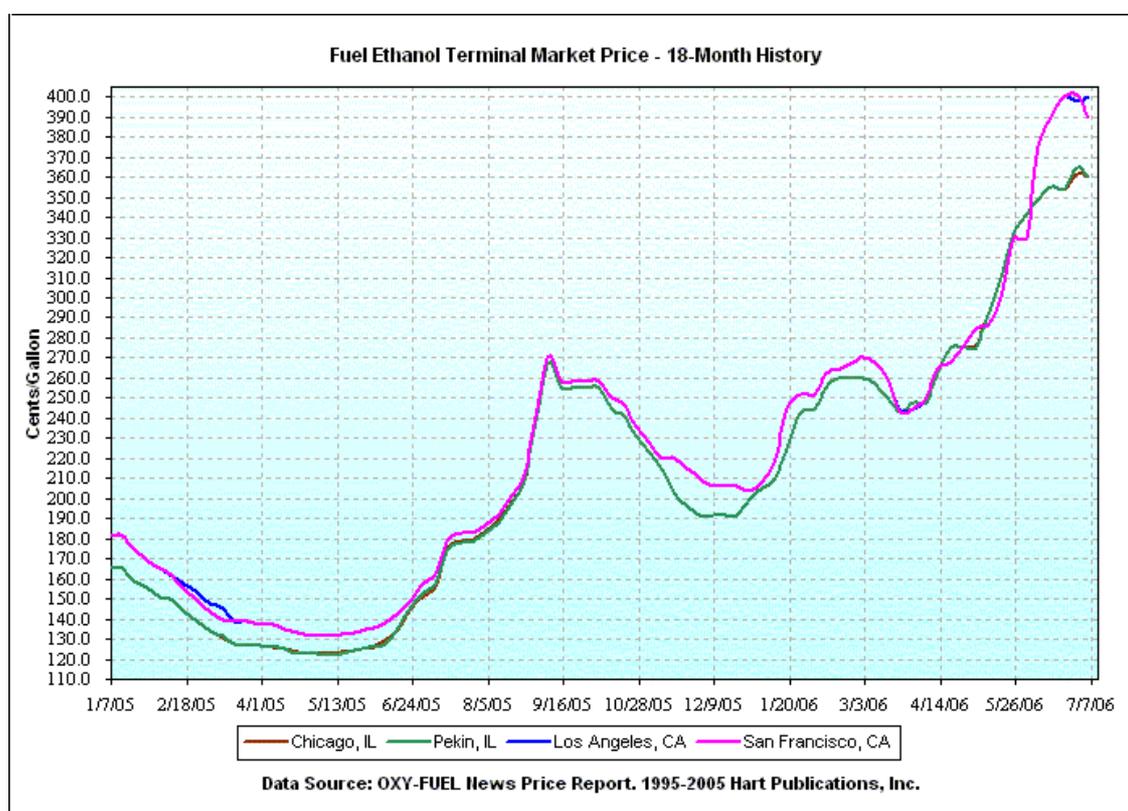
En cualquier caso, debe considerarse que, a diferencia de la biomasa proveniente de la forestación, los residuos de cultivos agrícolas siguen la dinámica propia que afectan las superficies destinadas a los diferentes cultivos: coyuntura de mercado, competitividad, etc.; por lo que al momento de evaluar y proyectar en el tiempo la provisión de biomasa proveniente de este sector, debe computarse un mayor riesgo en la prognosis.

## 5. VISIÓN COMPARADA DE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE ETANOL

Tradicionalmente en Argentina se ha obtenido etanol a partir de la fermentación de melazas de caña de azúcar, fermentación de cereales (principalmente maíz y trigo). Sin embargo, aún no se ha llevado a cabo la fermentación de materiales lignocelulósicos. Será conveniente entonces realizar una comparación entre las ventajas o desventajas económicas, energéticas, ambientales y sociales para los distintos métodos para de obtención de etanol. Es de destacar que no existen estudios actuales que reflejen íntegramente estas comparaciones entre diferentes métodos de obtención, para el caso de la producción de etanol en Argentina. Máxime si se tiene en cuenta que el proceso lignocelulósico de obtención nunca se ha llevado a cabo, tanto a escala piloto como industrial en nuestro país.

### Aspectos económicos

Para hacer una comparación económica es necesario tomar en cuenta, entre otros, los costos de producción y recolección de la materia prima, su transporte a la planta, los costos de elaboración del etanol –tomando en consideración los distintos procesos industriales-, los de disposición o tratamiento de los residuos generados en el proceso y las ganancias que pueden aportar en cada caso los posibles subproductos derivados del proceso. Si bien es importante la comparación económica entre las diferentes metodologías de obtención, desde el punto de vista fáctico y debido a los precios internacionales que está alcanzando en la actualidad el etanol (causado fundamentalmente por su rápida difusión como combustible sustituto de combustibles fósiles y por su propiedad de reciclado del CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera terrestre con efecto neutro sobre la generación de gases de efecto invernadero- esa importancia se encuentra hoy en día relativizada. En la siguiente gráfica se muestra la variación del precio del etanol durante los últimos 18 meses.

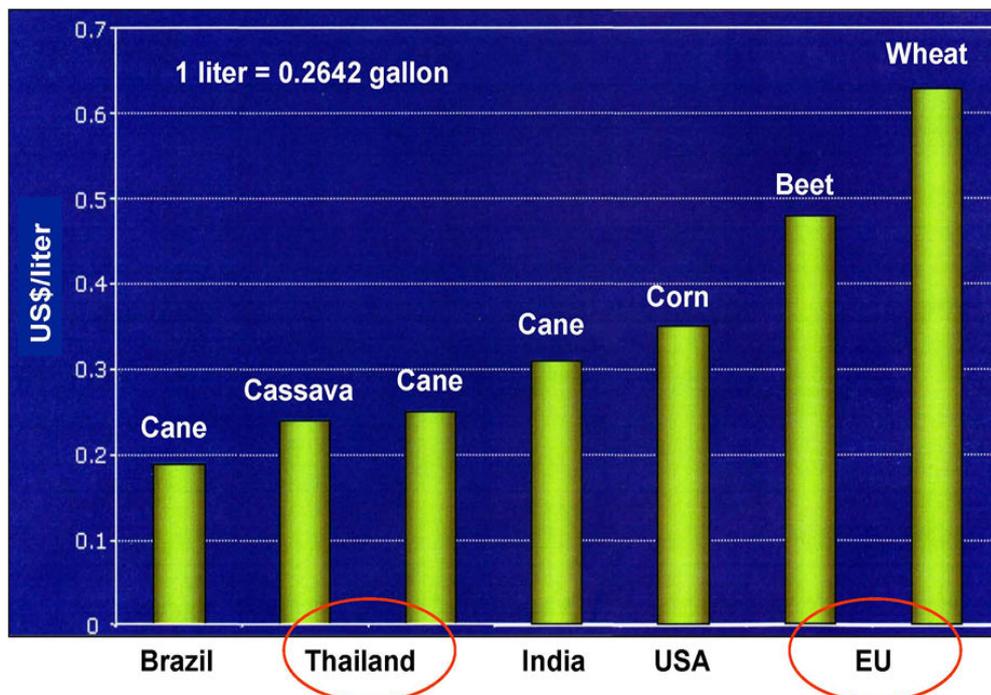


Como se puede observar, si bien el precio promedio sufre permanentes fluctuaciones, actualmente se sitúa en alrededor de U\$S 1,00/l de etanol, valor que se explica fundamentalmente por los altos precios del petróleo y el aumento de la demanda internacional por este biocombustible. En comparación con estos precios internacionales del etanol, el costo de producción en Argentina se encuentra muy por debajo de los mismos, pudiendo por lo tanto dejar buenos márgenes de ganancia utilizando cualquiera de las distintas materias primas o métodos de obtención.

Según el trabajo que realizó el licenciado Gustavo Vergagni en el año 2004, el costo de producir un litro de etanol a partir de almidón de maíz en nuestro país era de U\$S 0,29/l, en similitud con el precio de producción en USA de U\$S 0,29/l (Fulton & Hodges, 2004). De acuerdo a lo calculado por el Ing. Alejandro Albanese (2005) del IPE, el costo promedio de producción del etanol de caña en Argentina es de U\$S 0,24/l, siendo este costo superior al de Brasil (U\$S 0,14 a 0,20/l) y menor al de Australia (U\$S 0,27/l) (NAE, 2005).

Si bien en nuestro país no se produce etanol con origen en materiales lignocelulósicos, el costo estimado actual del mismo en Estados Unidos es de U\$S 0,34/l (ver gráfico más abajo), utilizando el método de hidrólisis ácida y la lignina como fuente de energía para el proceso, estimándose que en un futuro mediano se reducirá a alrededor de U\$S 0,18/l (Graf & Koehler, 2000) mediante la aplicación de hidrólisis enzimática y una reducción en el costo de la madera del 58%. Es de destacar que esos costos se estimaron para el costo de madera en el hemisferio norte (U\$S 2,4/GJ), y por lo tanto están relativamente sobreestimados para los verdaderos costos de la madera a nivel local. Por ejemplo, los costos actuales para Brasil (U\$S 1,16/GJ con una producción de 45 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y una distancia media de transporte de 22 km) (Albanese, 2005) son equivalentes a los esperados a futuro mediano en Estados Unidos (año 2020), que resultan en una estimación del etanol lignocelulósico a U\$S 0,18/litro.

## 2004 - Ethanol Cost of Production



Source: F.O.Licht, Coimex

Como se puede apreciar, los costos de producción de etanol a partir de cualquiera de los distintos métodos y fuentes de obtención pueden generar buenos márgenes de ganancia con los actuales precios del etanol en los diferentes mercados internacionales y con los precios de las naftas en nuestro país. Sin embargo es de destacar que el costo de producción del etanol a partir de maíz ha alcanzado, a raíz de la madurez de la tecnología que se usa en la actualidad para su producción, un piso que difícilmente pueda ser reducido más allá del 10% en el futuro mediano, (Graf & Koehler, 2000). Todo lo contrario de lo que se espera para el etanol a partir de fuentes lignocelulósicas, en el que se esperan fuertes reducciones de costos a partir de desarrollos biotecnológicos en proceso de implementación, con los que se espera mejorar tanto el rendimiento final de producción como la velocidad del proceso.

### Aspectos energéticos

Para el análisis de la producción de biocombustibles se debe tener en cuenta el balance final, a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, entre la energía que se debe emplear para producirlo y aquella obtenida al final de todos los procesos involucrados. Se plantean dos maneras de evaluar la eficiencia energética: *eficiencia energética a lo largo del ciclo de vida* (que es la energía del combustible final obtenido en relación con la energía primaria total utilizada) y la *relación energía fósil* (que es la relación entre la energía que produce el combustible obtenido y la energía total fósil consumida para su producción). En otras palabras, una forma de evaluar la sostenibilidad de un biocombustible es el balance energético (la diferencia entre la energía insumida por el proceso de producción del biocombustible y la energía entregada por el mismo). La otra forma de evaluar la sostenibilidad es utilizando la Relación con Combustible Fósil (FER por sus siglas en inglés, Energía del Biocombustible/Energía Fósil utilizada). Así los distintos métodos de obtención a partir de distintas materias primas presentan diferentes relaciones de FER. Valores por arriba de 1 (uno) representan renovabilidad positiva mientras que los valores por debajo de 1 (uno) representan renovabilidad negativa. En la siguiente tabla se presentan valores comparativos del etanol de distintas materias primas con otras fuentes energéticas.

	Etanol					
	Lignocelulósico <sup>1</sup>	Maíz <sup>1</sup>	Caña de azúcar <sup>2</sup>	Carbón <sup>1</sup>	Nafta <sup>1</sup>	Electricidad <sup>1</sup>
<b>FER</b>	10,31	1,76	6,95	0,98	0,81	0,41

1. Michael Wang, Argonne National Laboratory; 2 Jerónimo Cárdenas, EEA Obispo Colombes

Si bien existen discrepancias entre distintos estudios realizados, en particular los que involucran al etanol obtenido de caña de azúcar y la utilización o no del bagazo como fuente energética, las diferentes fuentes de obtención de etanol analizadas presentan en general índices de renovabilidad positivos. Las marcadas diferencias de FER positivas a favor del etanol de materiales lignocelulósico y de caña de azúcar en contraposición con el derivado del maíz se deben fundamentalmente al aprovechamiento de los subproductos lignina y bagazo como fuentes energéticas durante el proceso de obtención del etanol y no a sustanciales diferencias (aunque las hay) en el nivel de captura de la radiación solar primaria por los diferentes cultivos. En ese sentido el nivel de captura de radiación solar primaria favorece al cultivo de caña de azúcar que se considera tres veces superior al del maíz o a cultivos de madera.

Usando la otra forma, es decir midiendo el balance energético neto, los valores para el etanol obtenido a partir del maíz muestran valores positivos de hasta 23160 Btu/galón (Dr. Michael Graboski). Para el caso del etanol de caña de azúcar el valor es de sólo 77150 Btu/galón

(Carlos Eduardo Vaz Rossell, Projeto Etanol, MCT/NIPE). En el caso del etanol lignocelulósico el balance energético alcanza a 60000 Btu/galón (Argonne National Laboratory). Si bien las tres fuentes de obtención de etanol comparadas presentan balances energéticos positivos, estos estudios demuestran que también existen marcadas diferencias positivas en el balance energético del etanol de caña y lignocelulósico con respecto del etanol de maíz.

### **Aspectos ambientales**

El etanol tiene como principal ventaja sobre los combustibles fósiles su renovabilidad. En general su uso reduce las emisiones comunes a toda combustión (CO, NO<sub>x</sub>, hidrocarburos aromáticos, material particulado, etc.) y se considera que sus emisiones netas de C son cero, ya que el C emitido durante su combustión fue previamente fijado desde la atmósfera en la biomasa del cultivo que le dio origen a través de la fotosíntesis.

En la evaluación del impacto de la sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles deben considerarse también todos los aspectos relevantes comprendidos durante el “ciclo de vida” (insumos para la producción de materia prima o la extracción del material crudo, fuentes de energía consumida, emisiones gaseosas y líquidas y residuos sólidos generados) y también debe considerarse su impacto sobre los recursos naturales, la biodiversidad y los impactos globales y locales en el suelo, agua y aire. Con respecto a las emisiones contaminantes producidas durante el ciclo de vida, debe analizarse el efecto de su uso sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de contaminantes del aire, agua y residuos sólidos.

### ***Impactos globales y locales sobre el recurso aire, gases efecto invernadero***

Los gases de efecto invernadero se generan en dos fases a través del ciclo de vida del etanol, su producción y su consumo. Por tratarse del mismo producto, no existen diferencias entre la generación de gases efecto invernadero durante el consumo de etanol proveniente de distintas fuentes y/o tecnologías de producción. En la fase de producción sí existen diferencias marcadas que dependen tanto del tipo de cultivo y grado de intensidad del mismo, como de los métodos de producción y requerimientos o no de combustibles fósiles para su transformación de materia prima a producto. En ese sentido la utilización de cultivos intensivos, como son el del maíz o la caña de azúcar, presentan un impacto mayor que la utilización de residuos agrícolas o forestales y de bosques implantados. Ello es debido a que los sistemas de siembra y recolección de la caña de azúcar y el maíz son demandantes tanto para el suelo como para dos recursos como son el agua y el aire (emisiones gaseosas durante la siembra y la cosecha).

El etanol celulósico reduce las emisiones de gases efecto invernadero con respecto a los combustibles fósiles en un 85%, en tanto que el proveniente de maíz sólo lo hace en un 18-29%. En el caso de la caña de azúcar ello depende fundamentalmente de la utilización o no del bagazo y otros residuos de la caña (hojas y puntas) como fuente de energía durante el proceso productivo, así como de los tratamientos de la caña de azúcar pre y post-cosecha (quemado previo a la cosecha y reducción de los residuos de la cosecha por quema a cielo abierto).

Otro efecto importante de los cultivos intensivos como son la caña y el maíz es el uso de fertilizantes. Estudios llevados a cabo por el Argonne National Laboratory demuestran que los fertilizantes nitrogenados son una fuente importante de generación de NO<sub>x</sub> y particularmente de N<sub>2</sub>O. Efectivamente, dependiendo del tipo de suelo y de las condiciones de siembra y manejo de los cultivos, se calcula que entre 1 y 3% del nitrógeno presente en el fertilizante es convertido a N<sub>2</sub>O y volcado a la atmósfera, porcentaje que es importante sobre todo por las áreas de cultivo necesarias y que el N<sub>2</sub>O tiene una potencia de 530 como gas de efecto invernadero (1 molécula de N<sub>2</sub>O equivale a 530 de CO<sub>2</sub>). En el caso del etanol del maíz y considerando la generación de

gases efecto invernadero a través de su ciclo de vida, la contribución del N<sub>2</sub>O puede alcanzar una participación de hasta un 25% de todas las emisiones con efecto invernadero.

### ***Impactos locales sobre el recurso agua***

La agroindustria azucarera es una de las más contaminantes de las cuencas acuíferas del país. También es una de las que aprovechan de manera más eficiente la energía solar. No se han implantado sistemas de control que garanticen el uso eficiente del bagazo, por un lado, y la disminución de la contaminación ambiental, por el otro. Para la producción de azúcar, alcohol de caña y papel de bagazo, que son básicamente los únicos productos actualmente usados de este recurso, se requiere la utilización de enormes cantidades de agua y energía que proviene principalmente de la combustión (generalmente ineficiente) del bagazo y de combustibles fósiles. En la fabricación de azúcar se desechan las aguas que provienen del lavado de la caña, de la clarificación del jugo, conocidas como cachazas, de la limpieza de los evaporadores, calentadores y purgas de calderas, de los sistemas de enfriamiento, etc. En la producción del alcohol etílico se tienen como desechos las aguas de enfriamiento de condensadores y de las tinajas de fermentación, los fondos de éstos y las vinazas o residuos de las torres de destilación. De todas las aguas residuales provenientes de los complejos azucareros/alcoholeros, las que son más contaminantes por su concentración de material orgánico biodegradable y no biodegradable son las vinazas (residuos de la fermentación), que se producen en una proporción de 12 a 15 litros por cada litro de alcohol destilado. Por su volumen, aún cuando la concentración de materia orgánica e inorgánica no sea tan alta, las aguas de lavado de la caña son casi tan contaminantes como las vinazas.

En cambio, en la producción de etanol a partir del maíz el consumo de agua por unidad de etanol ha disminuido notablemente en los últimos años. Antiguamente las plantas consumían más de 15 partes de agua por una de etanol, pero en la actualidad ese rango ha disminuido y presenta valores que van de 11 a 1:1, con promedios de 4,7 partes de agua por parte de etanol (USDA, 2002). En este método para la obtención de etanol, el uso del agua es de importancia, particularmente en los procesos de molienda, licuefacción, fermentación y destilación. Los líquidos residuales de las plantas contienen compuestos orgánicos que deben ser tratados dentro de la planta, o en una etapa ex-situ de procesamiento de efluentes. Actualmente existen plantas que poseen una tecnología “efluente cero”, lo que les permite ubicarse en zonas rurales cerca de las fuentes de materia prima. Una manera de degradar en forma sostenible los compuestos orgánicos en estos líquidos residuales es la utilización de digestores anaeróbicos, que remueven del 85 al 95% los compuestos orgánicos. El proceso produce gas metano que puede ser usado como fuente alternativa de energía y por lo tanto reducir los costos de tratamiento de efluentes y de la producción de etanol en general.

Las plantas de etanol lignocelulósico generan efluentes líquidos con alto contenido en materia orgánica, sólidos suspendidos y baja DBO y DQO. La cantidad de efluentes varía de acuerdo al tamaño de la planta, el proceso de tratamiento de efluentes y la cantidad de reciclado de los efluentes. En el caso de utilizar un quemador de lignina como fuente de recuperación y uso de energía para el proceso, los efluentes líquidos se reducen en gran medida, así como sus contenidos en materia orgánica y sólidos suspendidos (los que se queman en gran medida). Inclusive se puede alcanzar el reciclado completo de los contaminantes más comunes, pudiendo destinar los efluentes líquidos al volcado a cloacas o cuerpos de agua superficiales (California Energy Commission, 1999). Es de destacar que la instalación de un quemador-recuperador de energía alimentado a lignina aumenta considerablemente los costos de instalación de la planta.

## Aspectos sociales

De acuerdo con lo establecido por la ley 26093, para el año 2010 serán necesarios al menos 200 mil m<sup>3</sup> de etanol al año para satisfacer el corte de las naftas con al menos un 5% de biocombustibles allí establecido. Los ingenios de todo el país elaboraron aproximadamente 190 millones de litros de alcohol durante el año 2005 (120 millones en Tucumán y 70 millones en Jujuy y Salta), estimándose que el volumen para el año 2006 alcanzará los 200 millones de litros. De ese total, alrededor de la mitad se consume en el mercado interno (alcoquímicos y bebidas) y el resto se exporta.

Es de destacar que actualmente el mismo no se utiliza prácticamente como combustible líquido, por lo que seguramente será necesario aumentar fuertemente la producción de etanol para satisfacer esta nueva necesidad. Por lo tanto, el desarrollo en la producción de etanol tiene reservado -para el futuro inmediato y mediano- un papel importante, involucrando el abanico de opciones estratégicas que constituirán el espectro productivo que dará abasto al requerimiento de este nuevo combustible en el plano local, a la par que concurrirá a alimentar un mercado internacional de creciente demanda de energía de fuentes renovables.

Los impactos sociales en el nivel rural y urbano derivados de la utilización de cultivos intensivos son conocidos en Argentina. Este tipo de cultivo altamente mecanizado y dependiente de la tecnología ha provocado un desplazamiento de la mano de obra de campo, favoreciendo el despoblamiento de los sectores rurales y actuando como elemento expulsor de ese tipo de mano de obra hacia las zonas urbanas en busca de trabajo. Este aspecto debe considerarse seriamente a la hora de tomar decisiones estratégicas en cuanto al desarrollo de un nuevo tipo de agroindustria como es la producción masiva de biocombustibles. De acuerdo a lo detallado más arriba, Argentina se encuentra en el punto de partida de este tipo de agroindustria y debe tomar en cuenta experiencias anteriores, locales y de otros países. Son conocidos los problemas sociales que ha acarreado el cultivo de soja transgénica con el método de siembra directa, que con su hegemonía produjo -a partir del año 1990- la expansión del modelo concentrador de la tierra. Este modelo produjo la desaparición y el desplazamiento de casi 200 mil pequeños productores rurales entre 1990 y 2001 y se encuentra aún en expansión sobre todo el territorio nacional. Como ejemplo del impacto social de este tipo de monocultivo basta mencionar que cada hectárea de monte frutal perdida elimina en la cadena productiva más de 60 puestos de trabajo. Cada hectárea de soja apenas produce, en cambio, un sólo puesto de trabajo (Rubió, 2005).

Problemas similares afronta hoy en día Brasil, principal productor mundial de etanol, ante el incremento de la demanda internacional de este biocombustible. Varios países (Estados Unidos, Japón, la UE y China) han expresado su intención de adquirir etanol a ese país. De concretarse la misma (Japón planea adquirir 4 millones de litros de etanol anuales y China y la UE planean compras aún mayores), las implicancias en el corto plazo son que se producirá un pronunciado avance de la superficie cultivada con caña de azúcar, con los impactos sociales y ambientales que ello acarrea. Los fuertes movimientos especulativos en la agricultura ejercen presiones para que los pequeños y medianos productores de alimentos básicos (porotos, maíz, mandioca, entre otros) vendan sus propiedades a los grandes latifundistas, provocando el éxodo rural hacia las ciudades. Otro importante problema que causan los monocultivos como los de caña de azúcar y soja es la deforestación. Hoy en día la deforestación en el Chaco Seco del norte argentino presenta tasas que superan cinco veces la media mundial (Rubió, 2005).

Del mismo modo, es conveniente profundizar algo más en el conocimiento de las fortalezas y debilidades que en el campo social presenta la producción de etanol. Se considera que cuando deviene de fuente celulósica puede representar una fortaleza en ciertas regiones que enfrentan problemas socio-económicos, específicos y locales. En la Mesopotamia argentina la

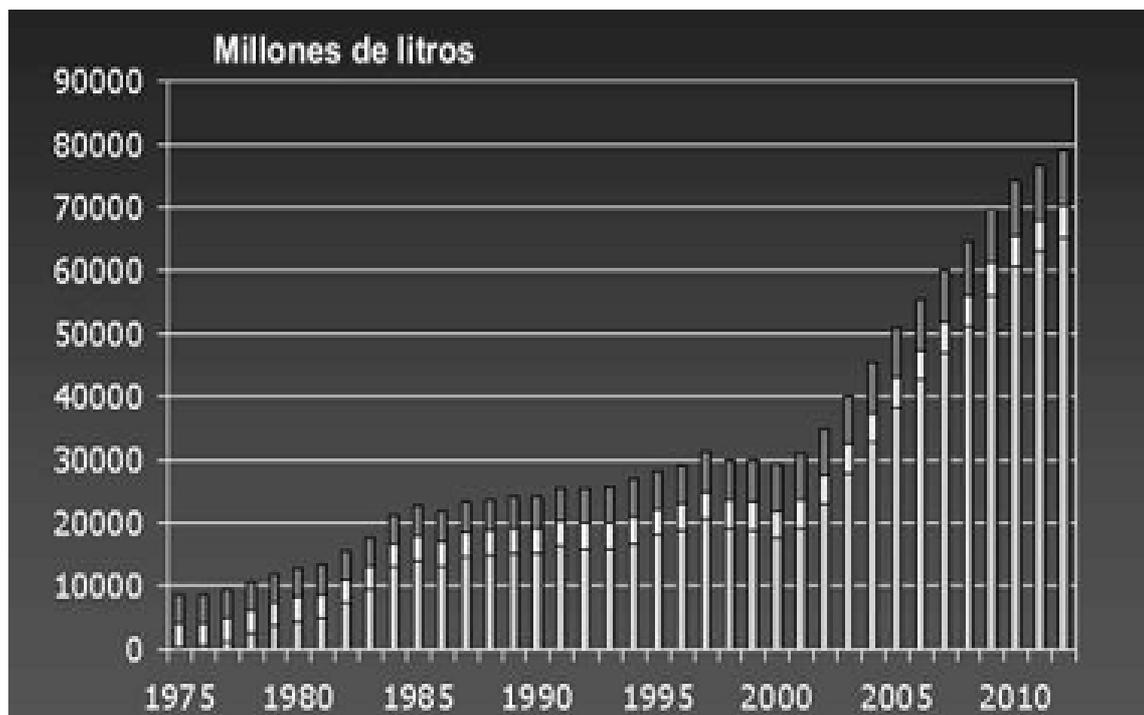
utilización del bosque implantado –un recurso importante y en expansión en la zona- para generar etanol puede ser un uso alternativo para la producción maderera, incluso en reemplazo de la fabricación de pasta de celulosa. La fabricación de pasta de celulosa por fábricas que se están instalando en la ciudad uruguaya de Fray Bentos ha causado una fuerte perturbación socio-económica en la ciudad de Gualaguaychú debido al daño ambiental que potencialmente producirá la actividad de esas industrias en la zona, en donde el turismo es relevante a nivel socio-económico. Es por ello que resulta conveniente el desarrollo de productos alternativos a la pasta de celulosa y que presenten un impacto social y ambiental menos relevante. La instalación de un polo productivo de etanol en la zona, actividad con menor impacto ambiental que la fabricación de pasta de celulosa, presentaría ventajas adicionales como la sustitución de combustibles fósiles por combustibles renovables y contribuirá en forma económicamente rentable al cumplimiento de la ley 26093. Esta alternativa podría resultar una fortaleza y un desafío para los aspectos socioeconómicos, además de una oportunidad sustentable para la Mesopotamia.

## 6. CONCLUSIONES

Con los adelantos continuados en la tecnología del tratamiento previo, la fermentación, la recolección y la logística del almacenaje, la producción comercial del etanol a partir de celulosa comienza a ser económicamente factible. Mientras que hoy en día el etanol se produce típicamente a partir de melazas de caña de azúcar y del almidón contenido en granos tales como maíz y sorgo, también puede ser producido a partir de la celulosa. La celulosa es el componente principal de las paredes de célula de las plantas y es el compuesto orgánico más abundante en la tierra. Existen dificultades para obtener la hidrólisis de la celulosa en azúcares usables para la producción del etanol. Empero, *la fabricación a partir de la celulosa amplía los tipos y la cantidad de materias primas disponibles para la producción del etanol*. Esto incluye muchos materiales hasta ahora considerados como residuos que requieren disposición tales como tallos de maíz, paja de arroz, virutas de madera o bien las cosechas de cultivos energéticos, tanto de árboles como de hierbas de crecimiento rápido.

Para cumplir con lo establecido por la ley 26093, la producción de etanol en Argentina deberá al menos duplicarse para el año 2010. Esto significa un aumento de 200 millones de litros por año, nada más que para satisfacer el mercado interno. La producción actual es de 190 millones litros por año, generados en su gran mayoría a partir de melazas de caña de azúcar. Del total de la producción actual el 75% se genera en ingenios de la provincia de Tucumán y el resto en Jujuy y Salta.

Debido a la situación internacional del precio del petróleo, a los compromisos asumidos por la Unión Europea con relación al aumento de la proporción de biocombustibles en los combustibles líquidos para el año 2010, y a las necesidades de Japón - país que depende de importaciones para su abastecimiento de combustibles líquidos- de reducir sus emisiones de gases con efecto invernadero, es esperable un aumento considerable en la demanda internacional de etanol, la que se presenta gráficamente a continuación (CEPAL, Costos y precios para etanol combustible en América Central, citado en Albanese, 2006).



Este aumento de la demanda seguramente tendrá su correlato en el precio internacional del etanol. *Estas presunciones establecen un panorama optimista para aquellos países productores de etanol con costos de producción competitivos y capacidad de aumento de su producción, siendo Argentina uno de ellos. La cuestión que este panorama plantea es el camino que nuestro país debe elegir para aprovechar esta oportunidad.* Como hemos descrito hasta el momento la producción nacional de etanol depende en forma casi exclusiva de la caña de azúcar, con menor proporción del maíz, y otras materias primas. Las previsiones actuales prevén que el aumento de la producción de etanol puede ser cubierto a partir de melazas de caña de azúcar en sólo el 50%, y el resto deberá provenir de otras fuentes. Ello establece la oportunidad y el desafío de desarrollar otras fuentes de materias primas y otras metodologías para la producción, ante la necesidad de abastecer el mercado interno, y bajo la presión de la demanda internacional que seguramente ofrecerá precios ventajosos para viabilizar su exportación.

Hasta el momento Argentina, además de la producción a partir de melazas de caña de azúcar, tiene experiencia en la producción de etanol a partir de maíz, y otros cereales, con metodologías y procesos de producción maduros, con costos de producción competitivos en el nivel internacional, pero que han alcanzado un piso (como se mencionó más arriba). *Debido a la madurez tecnológica, en el futuro la reducción de esos costos de producción del etanol a partir de cereales dependerá del nivel de siembra y cosecha de los cereales, del aumento de la eficiencia de producción de los mismos, o de la obtención de etanol como subproducto de la integración vertical de la producción ganadera.* En ese sentido, han surgido propuestas de inversiones para integrar en forma vertical la producción de lácteos, utilizando maíz para fortalecer la alimentación del ganado, y obteniendo como subproductos etanol, biogas y energía eléctrica por cogeneración (e.g. inversiones propuestas por el grupo Soros). Como se ha detallado antes, *los recursos lignocelulósicos como materia prima para la obtención de etanol, han venido despertando el interés a nivel internacional por sus posibilidades de producción masiva del etanol, y por lo tanto, de contar con combustibles limpios a partir de fuentes que no compiten con la producción de alimentos.* Esta fuente de producción de etanol no ha sido investigada con profundidad hasta el momento en nuestro país.

Desde el punto de vista económico, a nivel internacional, existe actualmente una vía de producción de etanol probada a partir de materiales lignocelulósicos (*vía hidrólisis ácida en dos etapas con utilización de lignina como fuente de generación de energía*), con costos de producción calculados en U\$S 0,34/litro, y por lo tanto, competitivos con los del costo del etanol a partir del maíz. Cuando madure la tecnología en el futuro mediato, migrando a la hidrólisis enzimática, y con los procesos de sacarificación y fermentación simultánea (SFS), esos costos se reducirán sensiblemente, y también serán competitivos con los costos del producto elaborado con caña de azúcar.

Como se mencionara más arriba, la producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos presenta ventajas ambientales con respecto a los otros métodos de obtención comparados (caña de azúcar y maíz), es competitivo en el aspecto de aprovechamiento energético con la variante materia prima maíz, y en términos de sustentabilidad y renovabilidad energética, es superior a cualquiera de los otros métodos con los que se ha comparado. También desde el punto de vista social sería conveniente este tipo de desarrollo productivo, por lo menos en la Mesopotamia. *Precisamente, en esa región existe una interesante producción actual, que se estima será aún mayor en el futuro mediato, de recursos lignocelulósicos generados por la actividad forestal y que podría aprovecharse para la producción de etanol.* Dada la disponibilidad de recursos que se ha relevado, en esta región es factible iniciar la etapa de producción industrial de etanol de manera más o menos inmediata. La región también ofrece la posibilidad de resolver el problema del abastecimiento de la materia prima con distintas especies

(eucaliptos y pinos, principalmente), con distintas estrategias (utilizando residuos o fibras vírgenes, con madera comprada en el mercado o de producción propia, entre otras), y con todas las combinaciones que se crean convenientes puesto que la principal ventaja es la disponibilidad de opciones abiertas. Se trata de una región en la que la actividad forestal se desarrolla intensamente desde largo tiempo atrás y está madura, con las ventajas que esto implica en materia de conocimientos, experiencias y servicios disponibles localmente.

En síntesis, *la producción de etanol a partir de celulosa puede contribuir a aumentar el volumen de etanol que se produce actualmente en Argentina, e inclusive puede dar lugar a su exportación como biocombustible.* La producción de etanol celulósico también ofrecerá la oportunidad de diversificar las materias primas para su obtención, posibilitará el desarrollo de nuevos puestos de trabajo, así como puede contribuir a fomentar el desarrollo económico por fuera de la cadena tradicional de los granos y cultivos de azúcar, ofreciendo la ventaja de su producción en diferentes localidades del país a partir de recursos localmente disponibles. La producción del etanol celulósico también proporcionará reducciones adicionales de las emisiones de gases de efecto invernadero.

## 7. DESAFÍOS

Si bien, como se mencionara más arriba, la producción comercial del etanol a partir de celulosa comienza a ser económicamente factible, existen todavía desafíos que una vez solucionados permitirán su producción con reducciones sustanciales en los actuales costos de producción. Entre esos desafíos figuran:

- La posibilidad de utilizar hidrólisis enzimática de celulosa y hemicelulosa
- Poder realizar fermentación -en simple etapa- de todos los tipos de azúcares (de 5 y 6 carbonos) presentes en los materiales lignocelulósicos
- La reducción de los actuales tiempos de fermentación mediante el empleo de bacterias etanolgénicas en lugar de levaduras
- El desarrollo de fermentadores adaptados a este tipo de materia prima que puedan funcionar en forma continua, en lugar de la fermentación en batch.

Como se puede apreciar, la mayor parte de los mismos se encuentran en el campo del desarrollo de la producción biológica (producción de sistemas enzimáticos) y la biotecnología. La mayoría de estos desafíos están siendo encarados por diversas instituciones y laboratorios en el extranjero y seguramente estarán disponibles en el plazo inmediato o mediano (2010-2012) a un costo que seguramente reflejará la inversión realizada en la obtención de las correspondientes patentes. Empero, consideramos que todos ellos pueden ser desarrollados por el sistema tecnológico nacional, que tiene una remarcable experiencia científica en biología molecular y biotecnología, a través de las distintas instituciones científico-tecnológicas que lo componen (INTA, INTI, Universidades Nacionales, CONICET, etc.). Este desarrollo nacional no sólo contribuirá a abaratar los costos involucrados en la producción del etanol de origen lignocelulósico en el país, aumentando también su competitividad a nivel internacional, sino que también permitirá la posibilidad de exportar esa tecnología a otros países y regiones. Ello sin duda favorecerá el desarrollo de energías renovables mediante la interrelación entre países SUR-SUR, o inclusive SUR-NORTE, cuya implementación se recomienda y enfatiza desde la Comisión para el Desarrollo Sustentable de Naciones Unidas. Un ejemplo claro de las posibilidades que abre este tipo de desarrollo lo ofrece Brasil, que ha profundizado en los últimos 30 años el desarrollo del etanol a partir de caña de azúcar, y hoy en día se encuentra exportando tanto el etanol de ese origen como la tecnología más eficiente para su producción a países como Japón, China y la Unión Europea.

### **Instituciones nacionales relevadas**

Durante el relevamiento de capacidades nacionales en temas afines al presente trabajo se tomó contacto con dos instituciones localizadas en la provincia de Tucumán, las cuales han venido investigando y desarrollando tecnologías agropecuarias e industriales aplicadas al aprovechamiento integral del cultivo de la caña de azúcar: Procesos Industriales Microbiológicos (PROIMI), que se desempeña en la esfera del CONICET, y la Estación Experimental Agropecuaria Obispo Colombes, dependiente del Gobierno de la provincia. Ambas instituciones llevan adelante programas que, por sus contenidos y complementariedad con la producción de etanol de caña de azúcar, consideramos pueden ser de importancia para un desarrollo tecnológico nacional de etanol a partir de fuentes lignocelulósicas.

En el **PROIMI** se contactó al funcionario de la institución Dr. Adrián Faustino SIÑERIZ. El PROIMI ha llevado a cabo los siguientes proyectos I+D:

- Convenio celebrado entre la empresa italiana AGRIMONT s.p.s. (grupo Montedison) y el CONICET (con PROIMI como unidad ejecutora) para el escalamiento de un proceso de fermentación alcohólica con *Zymomonas mobilis* floculantes aisladas en Tucumán. Este convenio permitió la instalación de una refinería de etanol.
- Asesoramientos y puesta en marcha de los Laboratorios de Cancrosis en Cítricos NOA y NEA.
- Convenio realizado entre la empresa BIOSIDUS, CERELA y PROIMI para la obtención del pro-biótico BIOFLORA, un ejemplo de transferencia del sector científico al sector industrial.

Entre sus líneas de investigación se destacan:

- Biología molecular
- Fermentación alcohólica
- Control biológico
- Cultivo continuo de microorganismos
- Estudios de factores antimicrobianos
- Estudios del uso biológico de residuos lignocelulósicos para alimentación animal y para otros procesos fermentativos
- Fermentación metánica y tratamiento de efluentes
- Mejoramiento genético de cepas industriales de levaduras
- Producción de enzimas por cepas de *Bacillus spp.*: amilasas, dextranasas, lipasas, proteasas, inulinasas, esterases
- Recuperación y purificación de biomoléculas
- Utilización de bacterias lácticas de interés industrial
- Obtención por métodos biotecnológicos de enzimas de interés en tecnología de alimentos con especial referencia a los usados en la producción de vino. Cepas recombinantes de hongos filamentosos y levaduras.

En la **Estación Experimental Agropecuaria Obispo Colombres** se contactó al funcionario Ingeniero Jerónimo Cárdenas. La Estación está dedicada al desarrollo de los siguientes programas de tipo tecnológico:

- Manejo de caña verde
  - Objetivo: generar y/o adaptar las mejores alternativas de manejo con residuos en superficie.
  - Alcances: crear las condiciones de manejo para la progresiva eliminación de la quema, priorizando la cosecha en verde.
- Manejo y utilización de recursos genéticos: Introducción de germoplasma extranjero y cuarentena sanitaria
  - Objetivos: introducir variedades y/o clones promisorios (de origen comercial o básico) desde otros centros de mejoramiento de caña de azúcar del mundo y evaluarlos en la Estación de Cuarentena con respecto a la presencia de

enfermedades y plagas foráneas. Una vez superadas las pruebas cuarentenarias dichos materiales se incorporan al Banco de Germoplasma y al plantel de progenitores del Subprograma de Mejoramiento.

- Manejo y utilización de recursos genéticos: Colección y selección de progenitores
  - Objetivo 1: conservar clones y variedades destacados para garantizar la disponibilidad de variabilidad genética.
  - Objetivo 2: evaluar y seleccionar un conjunto de progenitores destacados, los que a través de cruzamientos dirigidos generen poblaciones con elevada probabilidad de identificar genotipos de productividad sobresaliente
- Buenas prácticas de manufactura
  - Estudios tendientes a establecer la ubicación y análisis de puntos críticos de control en fábricas azucareras tucumanas, es decir aquellos puntos donde la contaminación ambiental y la incidencia en el producto final sean mayores.
- Evaluación y mejoras energéticas en la industria azucarera
  - Objetivos: proponer soluciones que mejoren la eficiencia energética, tanto de las operaciones generadoras de vapor como de las consumidoras de energía térmica, contribuyendo a disminuir y/o eliminar el empleo de combustibles fósiles y reducir el impacto ambiental. Estudiar esquemas de mínimo consumo de vapor en fábrica. Proponer estrategias para llevar estos esquemas a la práctica.
- Racionalización del manejo de aguas y efluentes industriales
  - Objetivos: afianzar los trabajos para la minimización de los consumos de agua y energía en ingenios, vinculando a esto la caracterización y evaluación de la generación y descarga de los efluentes producidos. Definir los puntos críticos de contaminación, proponiendo operaciones de racionalización, recirculación, reuso y reorganización de los flujos a fin de lograr la racionalización planteada.
- Generación de software para la industria
  - Objetivos: lograr un módulo que permita al planificador de operaciones batch (SIOVA), reasignar los tiempos de arranque en función del cambio en el consumo de vapor al sector cocimiento. Completar la documentación técnica y ayudas para los programas SIOVA Y CALCO.
- Aprovechamiento energético de la biomasa residual de la cosecha de la caña verde
  - Objetivos: evaluar el aprovechamiento como combustible de la biomasa residual de cosecha de la caña verde. Estudiar alternativas para el uso de la energía remanente.
- Servicios a la Industria y Sistema de Gestión de la Calidad
  - Objetivos: brindar los servicios que la industria del medio y la región demandan, atendiendo problemas de diferente naturaleza (control de performance de instrumentos y equipos, cálculos de balances de masa y energía, evaluación de las condiciones de proceso, estudio del rendimiento energético de generadores de vapor, entre otros), priorizando la asistencia a las

empresas aportantes de la Estación Experimental Agropecuaria Obispo Colombes.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adler E. 1977. Lignin chemistry: past, present and future. *Wood Sci. Technol.* 11: 169-218.
- Ahring BK, Jensen KT, Bjerre AB & AS Schimdt. 1996. Pretreatment of wheat straw and xylose and xylan into ethanol by thermophilic anaerobic bacteria. *Bioresource Technol.* 58: 107-113.
- Albanese A. 2006. Etanol, ¿por qué invertir en Argentina? Presentación en el 5° Foro Nacional de Biocombustibles (7° Fiesta Nacional de la Siembra Directa). Monte Buey, Córdoba.
- Allen SG, Schulman D, Lichwa J, Antal MJ, Laser M & LR Lynd. 2001. A comparisson between hot liquid water and steam fractionation of corn fiber. *Ind. Eng. Chem. Res.* 40: 2934-2941.
- Argonne National Laboratory. 2005. Ethanol study: key points. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. US Department of Energy.
- Ballesteros I, Ballesteros M, Cabañas A, Carrasco J, Martín C, Negro MJ, Saez F & R Saez. 1991. Selection of thermotolerant yeasts for simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of cellulose to ethanol. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 28/29: 307-315.
- Ballesteros I, Oliva JM, Ballesteros M & J Carrasco. 1993. Optimization of the simultaneous saccharification and fermentation process using thermotolerant yeasts. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 39/40: 201-211.
- Ballesteros I, Oliva JM, Carrasco J, & M Ballesteros. 1994. Effect of media supplementation on ethanol production by simultaneous saccharification and fermentation process. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 45/46: 283-293.
- Ballesteros M, Ballesteros I, Oliva JM, Carrasco JE, Cabañas A. & AA Navarro. 1998. Effects of surfactants and Zeolites on Simultaneous Saccharification and Fermentation of Steam-Exploded Poplar Biomass to Ethanol. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 70/72: 369-381.
- Ballesteros I, Oliva JM, Navarro AA, González A, Carrasco JE & Ballesteros M. 2000. Effect of chip size on steam explosion pretreatment of softwood. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 84/86: 97-110.
- Ballesteros I. 2000. Obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica mediante un proceso de sacarificación y fermentación simultánea (SFS). Tesis doctoral. Universidad de Alcalá de Henares.
- Ballesteros I, Oliva JM, Saez F & M Ballesteros. 2001. Ethanol production by simultaneous saccharification and fermentation of olive oil extraction. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 91/93: 237-252.
- Ballesteros I, Oliva JM, Negro MJ, Manzanares P & M Ballesteros. 2002. Enzymic hydrolysis of steam exploded herbaceous agricultural waste (*Brassica carinata*) at different particule sizes. *Process Biochem.* 38: 187-192.
- Ballesteros M. 2001. Biocombustibles para el transporte. En: *Tecnologías energéticas e impacto ambiental*. JEN-CIEMAT 1951-2001: 357-369. McGraw-Hill.
- Ballesteros M, Oliva JM, Manzanares P, Negro MJ & I Ballesteros. 2002. Ethanol production from paper material using a simultaneous saccharification and fermentation system in a fed-batch basis. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 18: 559-561.

- Barron N, Marchant L, McHale L & AP McHale. 1995. Studies on the use of a thermotolerant strain of *Kluyveromyces marxianus* in simultaneous saccharification and ethanol formation from cellulose. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 43: 518-520.
- Beall DS, Ingram LO, Ben-Bassat A, Doran JB, Fowler DE, Hall RG & BE Wood. 1992. Conversion of hydrolysates of corn cobs and hulls into ethanol by recombinant *Escherichia coli* B containing integrated genes for ethanol production. *Biotechnol. Lett.* 14: 857-862.
- Bjerre AB, Olesen AB & T Fernqvist T. 1996. Pretreatment of wheat straw using combined wet oxidation and alkaline hydrolysis resulting in convertible cellulose and hemicellulose. *Biotechnol. Bioeng.* 49: 568-577.
- Bollók M, Reczey K, & G Zacchi. 2000. Simultaneous saccharification and fermentation of steam-pretreated spruce to ethanol. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 84-86: 69-80.
- Boominathan K & CA Reddy. 1992. cAMP-mediated differential regulation of lignin peroxidase and manganese-dependent peroxidase production in the white-rot basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 12: 5586-5590.
- Boyle M, Barron N & AP McHale. 1997. Simultaneous saccharification and fermentation of straw to ethanol using the thermotolerant yeast *Kluyveromyces marxianus* IMB3. *Biotechnol. Lett.* 19: 49-51.
- Braier G. 2004. Tendencias y perspectivas del sector forestal al año 2020 – Argentina. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Informe Nacional 1. SAyDS – SAGPyA – FAO. 71 pp.
- Braier G. 2004. Tendencias y perspectivas del sector forestal al año 2020 – Argentina. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Informe nacional complementario. SAyDS – SAGPyA – FAO. 220 pp.
- Cadoche L & GD López. 1989. Assessment of size reduction as a preliminary step in the production of ethanol from lignocellulosic wastes. *Biol. Wastes.* 30: 153-157.
- California Energy Commission. 1999. Evaluation of biomass to ethanol California fuel potencial.
- California Energy Commission. 2001. Costs and benefits of a biomass-to-ethanol production industry in California.
- Clark TA & KL Mackie. 1984. Fermentation inhibitors in wood hydrolysates derived from the softwood *Pinus radiata*. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 34: 101-110.
- Clark TA, Mackie KL, Dare PH & AG McDonald. 1989. Steam explosion of the softwood *Pinus radiata* with sulfur dioxide addition (II). *J. Wood Chem. Technol.* 9:135-166.
- Comisión Europea. 2001. Libro Verde: hacia una estrategia europea de seguridad en el abastecimiento energético. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo.
- COM 2001. Directiva 547. Resolución del Parlamento Europeo del 12 Marzo de 2003.
- Duff SJB & WD Murray. 1996. Bioconversion of forest products industry waste cellulosic to fuel ethanol. *Bioresour. Technol.* 55: 1-33.
- Excoffier G, Toussaint B & MR Vignon. 1991. Saccharification of steam-exploded poplar wood. *Biotechnol. Bioeng.* 38: 1308-1317.

- Fan LT, Gharpuray MM & YH Lee. 1987. Cellulose hydrolysis biotechnology monographs 57. Springer, Berlín.
- Fernández J. 1995. La biomasa como fuente de energía y productos no alimentarios. En: La biomasa como fuente de energía y productos para la agricultura y la industria. Serie ponencias. Editorial CIEMAT. Madrid.
- Fernández-Bolaños J, Felizón B, Brenes M, Guillén R & A Heredia. 1998. Hydroxytyrosol and Tyrosol as the main compounds found in the phenolic fraction of steam-exploded olive stones. *J. Am. Oil. Chem. Soc.* 75: 1643-1649.
- Fernández-Bolaños J, Felizón B, Heredia A, Rodríguez R, Guillén R & A Jimenez. 2001. Steam-explosion of olive stones: hemicellulose solubilization and enhancement of enzymatic hydrolysis of cellulose. *Bioresour. Technol.* 79: 53-61.
- Fulton L & A Hodges. 2004. Biofuels for transport: an international perspective. IEA/EET.
- Fundación Bariloche. 2005. Inventario nacional de gases de efecto invernadero. 2000. Tomo III. Fundación Bariloche.
- Galbe M & G Zacchi. 2002. A review of the production of ethanol from softwood. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 59: 618-628.
- Goldemberg J, Monaco L & I Macedo. 1993. The Brazilian Fuel-Alcohol Program. En: Johansson T, Kelly H, Reddy A & R Williams (Eds.). *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Island Press, Washington DC.
- Graf A & T Koehler. 2000. Oregon cellulose-ethanol study, an evaluation of the potential for ethanol production in Oregon using cellulose-based feedstocks. Oregon Office of Energy.
- Grohmann K & M Himmel. 1991. Chapter 1: Enzymes for fuels and chemical feedstocks. p. 2-11. En: Leatham GF & ME Himmel (Eds.). *ACS Symposium Series #460: Enzymes in Biomass Conversion*. American Chemical Society, Washington DC.
- Hernández M. 1997. Decoloración de efluentes alcalinos de industrias papeleras por *Streptomyces spp.*: aspectos químicos y enzimáticos. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá de Henares.
- Higuchi T. 1990. Lignin biochemistry: biosynthesis and biodegradation. *Wood Sci. Technol.* 24: 23-63.
- Ho NWY, Chen Z & AP Brainard. 1998. Genetically engineered *Saccharomyces* yeast capable of effective cofermentation of glucose and xylose. *Appl. Environ. Microbiol.* 64: 1852-1859.
- Holtzapfel MT, Jun JH, Ashok G, Patibandla SL & BE Dale. 1991. The ammonia freeze explosion (AFEX) process: a practical lignocellulose treatment. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 28/29: 59-74.
- Holtzapfel MT, Lundeen JE & R Sturgis. 1992. Pretreatment of lignocellulosic municipal solid waste by ammonia fiber explosion (AFEX). *Appl. Biochem. Biotechnol.* 34/35: 5-21.
- Hughes DB, Tudroszen NJ & CJ Moye. 1984. The effect of temperature on the kinetics of ethanol production by a thermotolerant strain of *Kluyveromyces marxianus*. *Biotechnol. Lett.* 6: 1-6.
- Janick J & A Whipkey (Eds.). 2002. Trends in new crops and new uses. ASHS Press, Alexandria, VA.

- Katzen RA. 1997. Sixty year journey through conversion of biomass to ethanol. En: Ramos LP (Ed.). Proceedings of the Fifth Brazilian Symposium on the Chemistry of lignins and other woods components. Curitiba, Brasil 6: 334-339.
- Keller FA. 1996. Integrated bioprocess development for bioethanol production. En: Wyman CE (Ed.). Handbook on bioethanol: production and utilization. Taylor and Francis, Bristol. 351-357.
- Khan AW, Labrie JP, & J McKewn. 1986. Effect of electron-beam irradiation pretreatment on the enzymatic hydrolysis of softwood. *Biotechnol Bioeng.* 28: 1449-1453.
- Kiran Sree N, Sridhar M, Suresh K, Banat IM & L Venkateswar Rao L. 2000. Isolation of thermotolerant, osmotolerant, flocculating *Saccharomyces cerevisiae* for ethanol production. *Bioresour. Technol.* 72: 43-46.
- Küsel K, C Wagner & HL Drake. 1999. Enumeration and metabolic product profiles of the anaerobic microflora in the mineral soil and litter of a beech forest. *FEMS Microbiol. Ecol.* 29: 91-103.
- Lark N, Xia Y, Qin CG, Gong CS & GT Tsao. 1997. Production of ethanol from recycled paper sludge using cellulase and yeast *Kluyveromyces marxianus*. *Biomass Bioenergy* 12: 135-143.
- Larsson S. 2000. Ethanol from lignocellulose-fermentation inhibitors, detoxification and genetic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for enhanced resistance. Tesis doctoral. Lund, Suecia.
- Larsson S, Quintana-Sáinz A, Reimann A, Nilvebrant NO & LJ Jönsson. 2000. The influence of lignocellulose-derived aromatic compounds on oxygen-limited growth and ethanolic fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 84-86: 617-632.
- Laser MS, Schulman D, Allen SG, Lichwa J, Antal MJ & LR Lynd. 2002. A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. *Bioresour. Technol.* 81: 33-44.
- Leschine SB. 1995. Cellulose degradation in anaerobic environments. *Annu. Rev. Microbiol.* 49: 399-426.
- Marchesault RM, Malhotra SL, Jones AV & A Perovic. 1983. The wood explosion process: characterization and uses of lignin/cellulose products. En: Soltes (Eds.). Wood and agricultural residues. Academic Press, Nueva York. 401-413.
- Martín C, Galbe M, Nilvebrant NO & LJ Jönsson. 2002. Comparisson of the fermentability of enzymatic hydrolyzates of sugarcane bagasse pretrated by steam explosion using different impregnating agents. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 98/100: 699-716.
- McMillan JD. 1994. Pretreatment of lignocellulosic biomass. En: ME Himmel, JO Baker & RP Overend (Eds.). Enzymatic conversion of biomass for fuel production. American Chemical Society, Washinton. 292-324.
- Mes-Hartree M, Dale BE & WK Craig. 1988. Comparison of steam and amonia pretreatment for enzymatic hydrolysis of cellulose. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 29: 462-468.
- Moniruzzaman M. 1995. Saccharification and alcohol fermentation of steam-exploded rice straw. *Bioresour. Technol.* 55: 111-117.

- Moniruzzaman M & LO Ingram. 1998. Ethanol production from dilute acid hydrolysate of rice hulls using genetically engineered *Escherichia coli*. J. Ind. Microbiol. Biotechnol. 20: 943-947.
- Montenecourt B & DE Eveleigh. 1979. Production and characterization of high yielding cellulase mutants of *Trichoderma reesei*. TAPPI Annual Meeting Proceeding, Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Atlanta. 101-108.
- Montgomery DC. 1997. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, New York.
- NAE. 2005. Cadernos NAE. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidencia da República Nº 2. Brasília, Brasil.
- NCEP (National Commission on Energy Policy). 2004. Ending the energy stalemate: a bipartisan strategy to meet America's energy challenges. National Commission on Energy Policy, Washington DC. 128 pp.
- Negro MJ, Manzanares P, Ballesteros I, Oliva JM, Cabañas A & M Ballesteros. 2002. Sugars utilization by the thermotolerant yeast *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875 for ethanol production. 12<sup>th</sup> European conference on biomass for energy, industry and climate protection. 1: 516-519.
- Negro MJ, Manzanares P, Ballesteros I, Oliva JM, Cabañas A & M Ballesteros. 2003a. Changes in various physical/chemical parameters of *Pinus radiata* wood after steam explosion pretreatment. Biomass Bioenergy (En prensa).
- Negro MJ, Manzanares P, Ballesteros I, Oliva JM, Cabañas A & M Ballesteros. 2003b. Study of pretreatment conditions to enhance ethanol production from poplar biomass. Appl. Biochem. Biotechnol. (En prensa).
- Ng T, Bassat A & JG Zeikus. 1981. Ethanol production by thermophilic bacteria: fermentation of cellulosic substrates by cocultures of *Clostridium thermocellum* and *Clostridium thermohydrosulfuricum*. Appl. Environ. Microbiol. 6: 1337-1343.
- Nguyen QA, Tucker MP, Boynton BL, Keller FA & DJ Schell. 1998. Dilute acid pretreatment of softwood. Appl. Biochem. Biotechnol. 70/72: 77-87.
- Nguyen QA, Tucker MP, Keller FA, Beaty DA, Connors KM & FP Eddy. 1999. Dilute acid hydrolysis of softwoods. Appl. Biochem. Biotechnol. 77-79: 133-142.
- Nguyen QA, Tucker MP, Keller FA & FP Eddy. 2000. Two-stage dilute-acid pretreatment of softwoods. Appl. Biochem. Biotechnol. 84-86: 561-576.
- Nilsson U, Barron N, McHale L & AP McHale. 1995. The effects of phosphoric acid pretreatment on conversion of cellulose to ethanol at 45 °C using the thermotolerant yeast *Kluyveromyces marxianus* IMB3. Biotechnol. Lett. 17: 985-988.
- O'Boyle A, Good D, Potts D, Fein JE, Griffith R, Beck MJ, Dahlgren D & T Wallin. 1991. The CASH process. The Swedish Ethanol Foundation (Bioalcohol Fuel Foundation).
- OCEBA. 2006. Información en página electrónica del Ministerio de Infraestructura Vivienda y Servicios Públicos. Gobierno de la Provincia de Buenos Aires.
- Okita (Fundación Okita). 2003. Estudio sobre cadenas productivas seleccionadas en la República Argentina. Industria de la madera y el mueble. Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) - Secretaría de Industria Comercio y Minería.

- Oliva Domínguez JM. 2004. Efecto de los productos de degradación originados en la explosión por vapor de biomasa de chopo sobre *Kluyveromyces marxianus*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- Olsson L & B Hahn-Hägerdal. 1993. Fermentative performance of bacteria and yeasts in lignocellulosic hydrolysates. *Process Biochem.* 28: 249-257.
- Olsson L, Hahn-Hägerdal B & G Zacchi. 1995. Kinetics of ethanol production by recombinant *Escherichia coli* KO11. *Biotechnol. Bioeng.* 45: 356-365.
- Olsson L & B Hahn-Hägerdal. 1996. Fermentation of lignocellulosehydrolysates for ethanol production. *Enzyme Microbiol. Technol.* 18: 312-331.
- Palmqvist E, Hahn-Hägerdal B, Galbe M, & G Zacchi. 1996a. The effect of watersoluble inhibitors from steam-pretreated willow on enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation. *Enzyme Microbiol. Technol.* 19: 470-476.
- Palmqvist E, Hahn-Hägerdal B, Szengyel Z, Zacchi G & K Réczey. 1997. Simultaneous detoxification and enzyme production of hemicellulose hydrolysates obtained after steam pretreatment. *Enzyme Microbiol. Technol.* 20: 286-293.
- Palmqvist E, Grage H, Meinander NQ & B Hahn-Hägerdal. 1999a. Main and interaction effects of acetic acid, furfural, and p-hydroxybenzoic acid on growth and ethanol productivity of yeasts. *Biotechnol. Bioeng.* 63: 46-55.
- Palmqvist E, Almeida JS & B Hahn-Hägerdal. 1999b. Influence of furfural on anaerobic glycolytic kinetics of *Saccharomyces cerevisiae* in batch culture. *Biotechnol. Bioeng.* 62: 447-454.
- Palmqvist E & B Hahn-Hägerdal. 2000. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibition and detoxification. *Biores. Technol.* 74: 17-24.
- Perego P, Converti A, Palazzi E, Del Borghi M & G Ferraiolo. 1990. Fermentation of hardwood hemicellulose hydrolysate by *Pachysolen tannophilus*, *Candida shehatae* and *Pichia stipitis*. *J. Ind. Microbiol.* 6: 157-164.
- Ramos LP, Breuil C & JN Saddler. 1992. Comparison of steam pretreatment of eucalyptus, aspen and spruce wood chips and their enzymatic hydrolysis. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 34/35: 37-48.
- Rhodes A & D Fletcher. 1996. *Principles of Industrial Microbiology*. Pergamon Press, New York.
- Rubió G. 2005. Los biocombustibles: situación actual, análisis y perspectivas de la producción en Mercosur y del comercio con la UE. FAO.
- San Martín R, Pérez C & R Briones. 1995. Simultaneous production of ethanol and kraft from pine using steam explosion. *Bioresour. Technol.* 53: 217-223.
- SAGPyA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos). 2001. Inventario de plantaciones forestales y establecimiento de un banco de datos. Informe Final (versión digital). Proyecto Forestal de Desarrollo - SAGPyA. Disponible en: [www.sagpya.gov.ar](http://www.sagpya.gov.ar).
- SAGPyA. 2003. Estadísticas de la actividad forestal (sector forestal, encuesta anual de la industria de la madera, comercio exterior, etc.). Dirección de Forestación - SAGPyA. Disponible en: [www.sagpya.gov.ar](http://www.sagpya.gov.ar).

- SAyDS (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable). 2002. Primer inventario nacional de bosques nativos. Cartografía y superficie de bosque nativo de Argentina. Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas - SAyDS.
- SAyDS. 2005. Anuario de estadística forestal - Especies nativas 2003. Dirección de Bosques - SAyDS.
- Schmidt AS & AB Thomsen. 1998. Optimization of wet oxidation pretreatment of wheat straw. *Bioresour. Technol.* 64: 139-151.
- Secretaría de Energía. 2006. Balance energético nacional. Serie 1970/2004. Secretaría de Energía de la Nación.
- Stenberg K, Tenborg C, Galbe M, Zacchi G, Palmqvist E & B Hahn-Hägerdal. 1998a. Recycling of process stream in ethanol production from softwood based on enzymatic hydrolysis. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 70-72: 697-708.
- Stenberg K, Tenborg C, Galbe M & G Zacchi. 1998b. Optimisation of steam pretreatment of SO<sub>2</sub> impregnated mixed softwood for ethanol production. *J. Chem. Tech Biotechnol.* 71: 299-308.
- Stenberg K. 1999. Ethanol from softwood. Process development based on steam pretreatment and SSF. Tesis doctoral. Lund, Suecia.
- Stenberg K, Bollók M, Reczey K, Galbe M & G Zacchi. 2000a. Effect of substrate and cellulose concentration on simultaneous saccharification and fermentation of steampretreated softwood for ethanol production. *Biotechnol. Bioeng.* 68: 204-210.
- Stenberg K, Galbe M & G Zacchi. 2000b. The influence of lactic acid formation on the simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of softwood to ethanol. *Enzyme Microbiol. Technol.* 26: 71-79.
- Sun Y & Cheng J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology* 83: 1-11.
- Taherzadeh MJ, Eklund R, Gustafsson L, Niklasson C & G Lidén. 1997b. Characterization and fermentation of dilute-acid hydrolyzates from wood. *Ind. Eng. Chem. Res.* 36: 4659-4665.
- Taherzadeh MJ. 1999. Ethanol from lignocellulose: physiological effects of inhibitors and fermentation strategies. Tesis doctoral. Goteborg, Suecia.
- Taherzadeh MJ, Niklasson C & G Lidén. 1999. Conversion of dilute-acid hydrolyzates of spruce and birch to ethanol by fed-batch fermentation. *Biores. Technol.* 69: 59-66.
- Tenborg C, Stenberg K, Galbe M, Zacchi G, Larsson S & B Hahn-Hägerdal. 1998. Comparison of SO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> impregnation of softwood prior to steam pretreatment on ethanol production. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 70/72: 3-15.
- Tenborg C, Galbe M & G Zacchi. 2001. Reduced inhibition of enzymatic hydrolysis of steam pretreated softwood. *Enzyme Microbiol. Technol.* 28: 835-844.
- Tengerdy RP & Nagy JG. 1988. Increasing the feed value of forestry waste by ammonia freeze explosion treatment. *Biol. Wastes.* 25: 149-153.
- Thring RW, Chornet E & RP Overend. 1990. Recovery of a solvolytic lignin: effects of spent liquor/acid volume ratio, acid concentration and temperature. *Biomass* 23: 289-305.

- Tiedge JM, Sexstone AJ, Parkin TB & NP Revsbech. 1984. Anaerobic processes in soil. *Plant Soil* 76: 197-212
- Torget R, Werdene P, Himmel M & K Grohmann. 1990. Dilute acid pretreatment of short rotation woody and herbaceous crops. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 24/25: 115-126.
- Torget R, Walter P, Himmel M & K Grohmann. 1991. Dilute acid pretreatment of corn residues and short rotation woody crops. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 28/29: 75-86.
- Torget R, Hatzis C, Hayward TK & GP Philippidis. 1996. Optimization of reverse-flow, two-temperatures dilute-acid pretreatment to enhance biomass conversion to ethanol. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 57/58: 85-101.
- van Walsun GP, Allen SG, Spenser MJ, Laser MS, Antal MJ & LR Lynd. 1996. Conversion of lignocelulosics pretreated with liquid hot water to ethanol. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 57/58: 157-170.
- Underkofler LA. 1969. Chapter 21: Development of a Commercial Enzyme Process: Glucoamylase. En: Hajny GJ & ET Reese (Eds.). *Cellulases and Their Applications. Advances in Chemistry Series N° 95.* American Chemical Society, Washington DC. 343-358.
- USDA (United States Department of Agriculture). 2002. Ethanol cost of production survey. Office of Energy Policy and New Uses. USDA.
- van Zyl C, Prior BA & JC Du Preez. 1988. Production of ethanol from sugar cane bagasse hemicellulose hydrolysate by *Pichia stipitis* CBS 5776. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 17: 357-369.
- Varga E, Schmidt AS, Reczey K & AB Thomsen. 2003. Pretreatment of corn stover using wet oxidation to enhance enzymatic digestibility. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 104: 37-50.
- Vergagni G. 2004. La industria del etanol a partir del maiz. *Maizar. V&A Desarrollos Empresarios.* Septiembre del 2004.
- Vidal PF & J Molinier. 1988. Ozonolysis of lignin - improvement of in vitro digestibility of poplar sawdust. *Biomass* 16: 1-17.
- Vlasenko EY, Ding H, Labavitch JM & SP Shoemaker. 1997. Enzymatic hydrolysis of pretreated rice straw. *Biores. Technol.* 59: 109-119.
- von Sivers M, Zacchi G, Olsson L & B Hahn-Hägerdal. 1994. Cost analysis of ethanol production from willow using recombinant *Escherichia coli*. *Biotechnol. Prog.* 10: 555-560.
- WB Draft. 2005. Potential for Biofuels for Transport in Developing Countries (unpublished).
- Wilson JJ, Deschatelets L & NK Nishikawa. 1989. Comparative fermentability of enzymatic and acid hydrolysates of steam pretreated aspenwood hemicellulose by *Pichia stipitis* CBS 5776. *Appl. Microbiology Biotechnology* 31: 592-596.
- Wood BE, Beall DS & LO Ingram. 1997. Production of recombinant bacterial endoglucanase as a co-product with ethanol during fermentation using derivatives of *Escherichia coli* KO11. *Biotechnol. Bioeng.* 55: 547-555.
- Wyman C. 1991. The DOE/SERI Ethanol from Biomass Program. En: Texeira R & B Goodman (Eds.). *Ethanol Annual Report FY 1990.* Solar Energy Research Institute (actualmente National Renewable Energy Laboratory). Golden, Colorado.

- Wyman CE. 1996. Ethanol production from lignocellulosic biomass: overview. En: Wyman CE (Ed.). Handbook on bioethanol: production and utilization. Taylor and Francis, Bristol. 1-18.
- Wyman CE. 1999. Production of low cost sugars from biomass: progress, opportunities and challenges. En: Overend RP & E Chornet (Eds.). Proceeding of the 4<sup>th</sup> Biomass Conference of the Americas. Biomass - A growth opportunity in green energy and value-added products. Pergamon, Oxford. 867-872.
- Zeikus JG, Ng TK, Ben-Bassat A & RJ Lamed. 1983. Use of co-cultures in the production of ethanol by the fermentation of biomass. US Patent 4.400.470
- Zeikus JG. 1980. Chemical and fuel production by anaerobic bacteria. Ann. Rev. Microbiol. 34: 423-464.
- Zhang M, Eddy C, Deanda K, Finkelstein M & S Picataggio. 1995. Metabolic engineering of a pentose metabolism pathway in a ethanologenic *Zymomonas mobilis*. Science 267: 240-243.
- Zheng YZ, Lin HM & GT Tsao. 1998. Pretreatment for cellulose hydrolysis by carbon dioxide explosion. Biotechnol. Prog. 14: 890-896.