



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

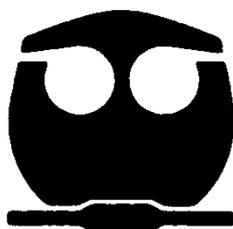
FACULTAD DE QUÍMICA

**TESIS: “ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE ETANOL  
COMO ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**María del Pilar Pertierra Rodríguez**



México D.F.

2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor Celestino Montiel Maldonado

**VOCAL:** Profesor Pedro Roquero Tejada

**SECRETARIO:** Profesor Martín Rivera Toledo

**1er. SUPLENTE:** Profesor Hugo Flores Puebla

**2° SUPLENTE:** Profesor Juvenal Flores de la Rosa

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:** LABORATORIO DE  
SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS (FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM)

**ASESOR DEL TEMA:** CELESTINO MONTIEL MALDONADO

(nombre y firma)

**SUSTENTANTE (S):** MARÍA DEL PILAR PERTIERRA RODRÍGUEZ

(nombre (s) y firma (s) )

## ÍNDICE

### INTRODUCCIÓN

<b>I. OBJETIVOS GENERALES</b> .....	1
<b>II. MARCO TEÓRICO</b> .....	2
<b>1. PRINCIPALES APLICACIONES DEL ETANOL EN LA INDUSTRIA.USO DEL ETANOL COMBUSTIBLE Y BIOETANOL COMBUSTIBLE</b> .....	2
<b>2. BIOCOMBUSTIBLES EN EL ÁMBITO INTENACIONAL</b> .....	3
<b>3. HIDROCARBUROS EN MÉXICO</b> .....	5
3.1. Situación energética actual .....	5
3.2. Productos oxigenantes.....	7
3.3. Escenarios propuestos para la introducción de biocombustibles en México 2006-2012 .....	11
<b>4. CULTIVOS AGRÍCOLAS UTILIZADOS COMO ENERGÉTICOS</b> .....	12
<b>4.1 DISPONIBILIDAD SUPERFICIAL</b> .....	12
<b>4.2 PROCESOS TECNOLÓGICOS</b> .....	14
4.2.1 Caña de azúcar .....	14
4.2.2 Maíz.....	19
<b>5. PRODUCTIVIDAD Y EFICIENCIA AGROINDUSTRIAL DEL BIOETANOL A PARTIR DE DIFERENTES CULTIVOS</b> .....	25
<b>6. DATOS ECONÓMICOS</b> .....	27
<b>6.1. COSTOS DE PRODUCCIÓN</b> .....	27
<b>6.2. MERCADO PARA EL ETANOL COMBUSTIBLE EN MÉXICO</b> .....	29
<b>7. EMISIONES ATMOSFÉRICAS RESULTADO DE LA COMBUSTIÓN DE LA MEZCLA ETANOL-GASOLINA</b> .....	34
<b>III. SELECCIÓN DE MATERIA PRIMA Y MÉTODO MÁS VIABLE DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL PARA SER IMPLEMENTADO EN MÉXICO</b> .....	37
<b>IV. BIOMASA LIGNOCELULÓSICA: MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL</b> .....	39
<b>1. COMPOSICIÓN DE LA LIGNOCELULOSA</b> .....	39
1.1 LIGNINA .....	40
1.2 CELULOSA.....	41
1. 3 HEMICELULOSA .....	41

<b>2. RENDIMIENTOS Y RAZONES ENERGÉTICAS DE BIOMASA</b>	
<b>LIGNOCELULÓSICA</b> .....	42
2.1 BAGAZO DE CAÑA .....	43
2.2 RASTROJO DE MAÍZ .....	51
<b>3. RESUMEN DEL ANÁLISIS SOBRE LA FACTIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN MÉXICO</b> .....	52
<b>4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE BAGAZO COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL</b> .....	53
<b>V. MOTIVACIÓN</b> .....	55
<b>VI. HIPÓTESIS</b> .....	57
<b>VII. METODOLOGÍA</b> .....	58
<b>VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	62
1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS COMPONENTES DEL PROCESO .....	62
2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO SIMULADO POR BLOQUES .....	63
3. BALANCE DE MATERIA POR CORRIENTE DE PROCESO .....	64
3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....	67
4. HIPÓTESIS VS RESULTADOS .....	68
<b>IX. CONCLUSIONES</b> .....	69
<b>X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	

## **I N T R O D U C C I Ó N**

El presente trabajo reúne a lo largo de sus capítulos, información obtenida de fuentes diversas analizada con el propósito de desarrollar una conclusión acerca de la producción de bioetanol para ser empleado como alternativa o complemento de los combustibles fósiles.

La información es analizada desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, haciendo mayor énfasis en el análisis para la selección de la materia prima y el proceso más adecuado para su producción.

De acuerdo a la investigación realizada, se plantean tres diferentes escenarios a ser considerados como una primera etapa de introducción del bioetanol al mercado mexicano como parte de la mezcla de gasolina, dejando como otro tema de estudio el análisis de la sustitución total de la gasolina obtenida a partir de combustibles fósiles, por bioetanol combustible.

En los últimos capítulos se describe la simulación del proceso de producción de bioetanol a partir de la materia prima seleccionada, para analizar la viabilidad de acuerdo a la demanda y disponibilidad de materia prima reportadas para este fin.

Con base a los resultados obtenidos y al análisis de la información estudiada, se establece finalmente una conclusión, la cual entre otros puntos nos permite darnos cuenta de la viabilidad del proceso, los requerimientos y las consecuencias. Así mismo, nos lleva a reflexionar sobre el tema de “energías alternativas” dejando muy claro que la sustitución de combustibles fósiles deberá ser paulatina y a través de diferentes fuentes como los biocombustibles, la energía solar, eólica, nuclear, del hidrógeno, por mencionar algunas, pero no así a través de una sustitución total a través de una sola, ya que de esta forma ningún recurso sería suficiente para satisfacer la demanda energética del país.

## **I. OBJETIVOS GENERALES**

1. Analizar la viabilidad de los procesos de producción de bioetanol a partir de diferentes materias primas.
2. Seleccionar y evaluar el proceso más adecuado para su producción e introducción en México como uso alternativo a combustibles fósiles.
3. Realizar la simulación de una planta productora de bioetanol a partir del proceso seleccionado.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **1. PRINCIPALES APLICACIONES DEL ETANOL EN LA INDUSTRIA. USO DEL ETANOL COMBUSTIBLE Y BIOETANOL COMBUSTIBLE**

De las principales industrias consumidoras de etanol destacan la farmacéutica, perfumera y química, donde esta última lo utiliza primordialmente como fuente para la producción de ácido acético y etileno o como solvente. Para cubrir los volúmenes requeridos, la obtención de etanol proviene en su mayor parte del petróleo y del etileno, por lo que su costo está directamente vinculado a los precios en el mercado de éstos.

El etanol también puede ser usado para otros fines:

- *Como mezcla con gasolina en diferentes proporciones*
- *Como etanol hidratado*
- *Como etanol anhidro*
- *Como suplemento en motores diesel*

Bajo estas premisas, cabe reconocer la importancia del etanol como combustible para ser considerado dentro de las nuevas tecnologías energéticas, dada la disminución de reservas, así como alzas en la demanda y costos de los combustibles fósiles.

La idea de producir bioetanol surge como propuesta dentro de los biocombustibles para sustituir el producido a partir de petróleo. La producción de bioetanol suele emplear materias primas azucaradas o amiláceas, como respectivamente son la caña de azúcar y el maíz, que son las alternativas más conocidas y adoptadas en las plantas agroindustriales existentes hoy día. Sin embargo, existe una amplia gama de cultivos agrícolas que representan fuentes posibles de materia prima para la producción de etanol, como se muestra en la tabla siguiente:

**Tabla 1.1** Fuentes de materia prima para producción de etanol

Producto básico a ser transformado en bioetanol	Ejemplos
<b>Azúcares</b>	<i>Sacarosa de cultivos sacáridos:</i> caña de azúcar, remolacha, sorgo dulce <i>Azúcares invertidos y glucosas:</i> melazas y otros residuos agroindustriales, como lactosas
<b>Almidón</b>	<i>Granos de cereales:</i> maíz, sorgo, trigo, cebada <i>Productos procesados:</i> harina de trigo, cascarilla de maíz <i>Raíces almidonadas:</i> yuca, papa, alcachofa
<b>Celulosa</b>	<i>Residuos lignocelulósicos:</i> aserrín, paja, residuos boscosos, residuos agrícolas, lejía celulósica <i>Residuos urbanos e industriales:</i> papel, fracciones

## 2. BIOCOMBUSTIBLES EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL

La preocupación del hombre por promover el desarrollo sustentable y vivir en un planeta más limpio y sano lo ha llevado a explorar y a desarrollar nuevas fuentes de energía y sobre todo la producción de combustibles no contaminantes que sustituyan a los actuales de origen fósil.

En el ámbito internacional, el empleo de los biocombustibles data desde hace varias décadas, pues fueron los carburantes de los primeros motores; sin embargo, su uso se abandonó con la aparición de las gasolinas, aunque se siguen empleando como oxigenantes o sustitutos de estas.

En la actualidad, son varios los países que se están sumando a la producción de este tipo de combustibles, en particular aquellos que no cuentan con la suficiente oferta de combustibles de origen fósil, y por consecuencia, dependen de las importaciones para su abastecimiento. Sin embargo, los fuertes incrementos que han registrado los precios internacionales de este tipo de combustibles, sobre todo a partir de 1970, han llevado a estos países a buscar sustitutos de menor costo.

De los países que han impulsado el uso doméstico de los biocombustibles,

hay dos que destacan tanto por los volúmenes producidos, como por las inversiones realizadas para su promoción. Estos son Brasil, donde se utiliza la caña de azúcar para producir etanol y el gobierno ha estado trabajando en conjunto con las principales armadoras de autos de ese país para utilizar una mayor cantidad de etanol en los automóviles, y Estados Unidos, que obtiene el combustible principalmente a partir del procesamiento del maíz. También destaca Canadá, que produce biodiesel a partir de los residuos de la industria maderera; Argentina que trabaja en un proyecto para obtener biodiesel a partir del procesamiento del girasol; Sudáfrica que está obteniendo biocombustible a través del maíz y la destilación de la caña de azúcar; y otros países que realizan investigaciones e inversiones para fomentar la producción de este tipo de combustibles, entre los que destacan Francia, Australia, Nueva Zelanda, Bolivia y Perú. Cabe mencionar que, en la mayoría de los casos, de manera paralela a las iniciativas de los gobiernos, el poder legislativo en estos países ha generado un marco legal para impulsar estas iniciativas.

En México, la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos - actualmente en proceso de revisión-, dicta como objetivos promover y desarrollar el uso de los bioenergéticos como elementos clave para contribuir a lograr la autosuficiencia energética del país; impulsar la producción agrícola y el empleo productivo a partir de la bioenergía; orientar la agroindustria para la instalación de plantas para el procesamiento de los productos agropecuarios que pudieran ser empleados en la producción de etanol y otros bioenergéticos; promover y fomentar la producción y desarrollo de biocombustibles de uso automotriz; fomentar la producción, distribución y comercialización de bioenergéticos, provenientes de biomasa; proporcionar los apoyos técnicos y presupuestales que se requieran para el desarrollo de bioenergéticos; fomentar la creación de cadenas productivas relacionadas con los biocombustibles; establecer las bases para impulsar y proporcionar apoyos a la producción, tecnificación, comercialización y empleo de los bioenergéticos; y coadyuvar al desarrollo rural del país, estableciendo acciones de impulso a la productividad y competitividad a partir de la

diversificación energética [2].

Para evaluar la sustentabilidad de la producción y uso de bioetanol en México se deben considerar los impactos sociales, económicos y ambientales más importantes relacionados a: la biomasa como materia prima, uso de suelo, la producción agrícola, la conversión industrial a etanol y el uso final del mismo.

### **3. HIDROCARBUROS EN MÉXICO**

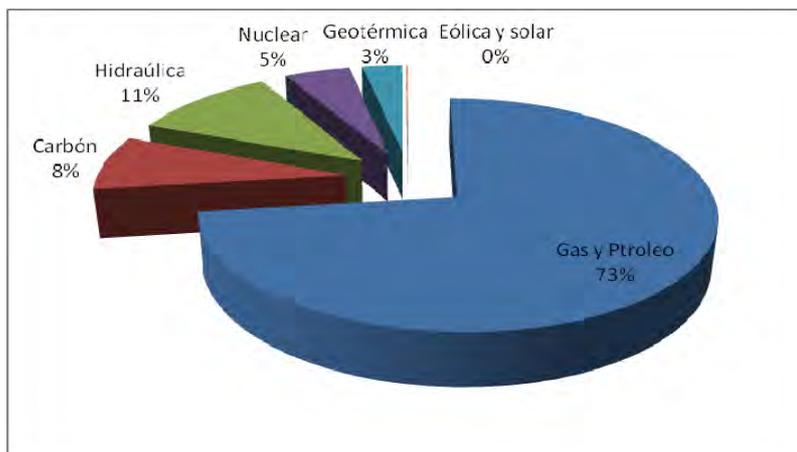
#### **3.1. Situación energética actual**

Para establecer la factibilidad del empleo de biocombustibles se necesitan conocer las necesidades de suministro tanto de gasolinas, diesel y compuestos oxigenados, tomando como referencia los pronósticos de ventas de éstos en los últimos años y así establecer los volúmenes de biocombustibles que podrían requerirse en México.

El sector energético del país tiene un papel decisivo, ya que en él se sustenta en gran medida su desarrollo económico y social y abarca desde la generación de electricidad e hidrocarburos, donde el petróleo crudo ocupa el mayor nivel de participación, como insumos para la economía y la prestación de servicios públicos.

En el año 2004 México ocupó la sexta posición mundial en cuanto a la producción de petróleo crudo, por detrás de Arabia Saudita, Rusia, Estados Unidos, Irán y China, y la onceava como productor de gas natural. Las reservas probadas de petróleo crudo, incluyendo condensados, se situaron en 13,401 millones de barriles (ocupando el catorceavo lugar del ranking mundial) y las de gas natural en 15 billones de pies cúbicos en enero del mismo año.

Aunque estos datos revelan una importante reserva de energía (crudo), nos encontramos con una demanda creciente de productos energéticos terminados (para uso doméstico, gasolinas, etc.) que el país es incapaz de cubrir únicamente con su producción nacional y deben ser importados. Por otro lado, la falta de diversificación de la oferta energética es también preocupante, ya que el 90% del consumo de energía primaria corresponde a los hidrocarburos y entre ellos casi el 72% al petróleo crudo. La biomasa (que incluye leña y bagazo de caña) ocupa únicamente un 3.4% de la oferta energética. Con excepción de la hidroenergía, otras fuentes de energía renovable como la geotermia o energía eólica participan en un pequeño porcentaje en la producción de electricidad primaria.

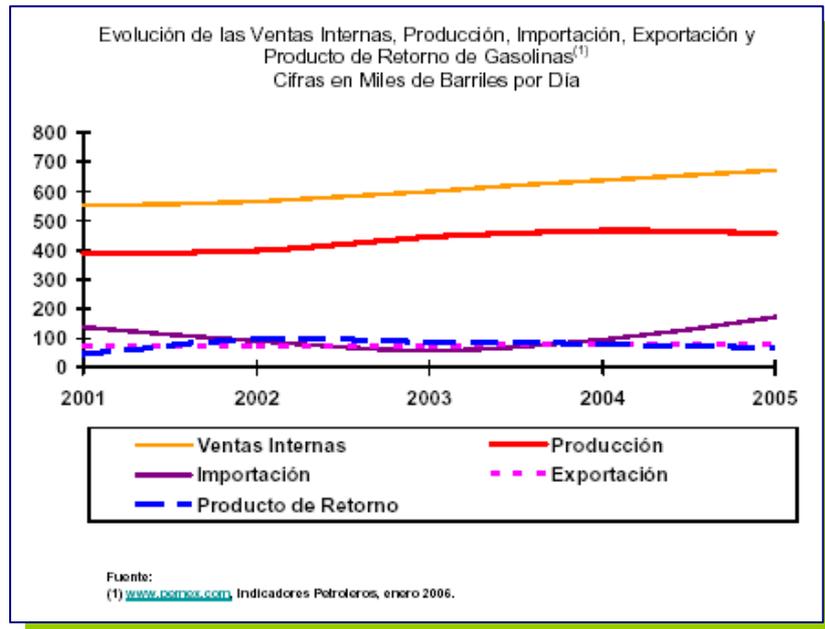


**Figura 2.0** Fuentes de energía en México <sup>1</sup>

El sector transporte, que es el principal consumidor de energéticos, con el 46.17% del valor total, consume principalmente gasolinas y diesel (90.5%), siendo cubierta la diferencia (9.5%) con querosenos, combustóleo, gas LP y electricidad.

La evolución de la demanda de gasolinas en el período 2000 al 2005 fue de 5.1%, que expresado en términos del volumen producido, corresponde a un cambio de 69 a 113 MBD (en esta cifra se incluye el MTBE). Simultáneamente, las importaciones registraron un aumento de 5.7%, siendo el crudo pesado tipo Maya el 41% del petróleo total procesado en el Sistema

Nacional de Refinerías. Un resumen de la evolución de ventas, producción, importación, exportación y producto de retornos se presenta en la figura 2.1.

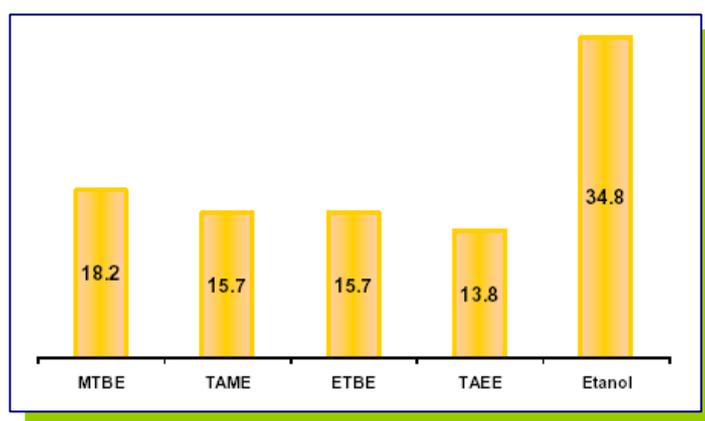


**Figura 2.1** Evolución de la oferta y demanda de gasolinas<sup>1</sup>

### 3.2. Productos oxigenantes

Los oxigenantes son utilizados en las gasolinas para incrementar el número de octanaje y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> e hidrocarburos no quemados. Originalmente, la materia prima en la producción de oxigenantes era el metil terbutil éter (MTBE). Debido a la existencia de fugas en la red de transporte de la gasolina mezclada con MTBE, se tomó cuenta del impacto nocivo que tuvo éste sobre los mantos acuíferos. Como consecuencia, el gobierno de Estados Unidos prohibió su uso en todas sus gasolinas, mientras que en México se promovió la instalación de tanques contenedores con doble pared. Sin embargo, la sustitución de MTBE por otra materia es la opción más adecuada para evitar este problema, proponiéndose el uso etanol para producir nuevos oxigenantes como etil terbutil éter y teramil etil éter (ETBE y TAEE).

Con relación al octanaje, la mejora que el etanol induce en la gasolina depende de la composición de la gasolina-base, generalmente afectando más el RON (Research Octane Number) que el MON (Motor Octane Number), implicando que la gasolina-base puede ser un producto de precio inferior, que llega a cumplir las especificaciones sólo con la adición de etanol; cuando más baja la calidad de la gasolina base, más sensible es el efecto del etanol.



**Figura 3.1.** Contenido Máximo de Oxígeno de distintos éteres<sup>1</sup>

Respecto a la presión de vapor, es un parámetro que debe ser especificado adecuadamente para permitir arranque en frío sin problemas y al mismo tiempo, sin excesiva volatilidad de la gasolina y consecuente elevación de las emisiones evaporativas. La presencia de etanol tiende a aumentar la presión de vapor de la mezcla, con un máximo para 5% de etanol, reduciéndose después lentamente en la medida en que crece el contenido de alcohol. Así, típicamente, para 5% de etanol, la presión de vapor aumenta a 7 kPa, mientras que al 10%, a 6.5 kPa. Este efecto impone un ajuste en la composición de la gasolina base, la cual debe presentar un contenido más bajo de fracciones livianas, como butanos y pentanos. Usualmente las gasolinas con fracciones más pesadas son de menor calidad y de menor precio.

Cabe mencionar que la mezcla de éteres (ETBE y TAAE) con gasolinas, no requiere de infraestructura adicional, porque éstos se

pueden producir e incorporar en las refinerías, minimizando de esta forma los costos que se incurrirían al sustituir el metanol por el etanol y los correspondientes para la modificación de las instalaciones existentes (MTBE y TAME). Sin embargo, el mezclado de gasolinas con alcohol no puede ser llevado a cabo en las refinerías, por lo que se deberán considerar las inversiones necesarias para poder realizar esta operación en cada una de las terminales de almacenamiento y distribución; esto representa una erogación por cada instalación de 6.7 millones de dólares.

La NOM-086 (086SEMARNAT-SENER-SCFI-2005), publicada en el Diario Oficial de la Federación, establece que las gasolinas, en particular la PEMEX Magna comercializada en las Zonas Metropolitanas de Guadalajara (ZMG), de Monterrey (ZMMTY) y del Valle de México (ZMVM) -cuyas demandas son del 30% de la oferta nacional-, y toda la gasolina súper (denominadas PEMEX Premium (con índice de octano mínimo 92) consumida en el resto del país, deben contener un aditivo oxigenante que permita hasta 2.7% de oxígeno en peso.

En el caso particular de las gasolinas PEMEX Magna y Premium que se comercializan en ZMG y ZMVM, se debe contemplar la reducción en el volumen producido como consecuencia de la adición del oxigenante, satisfaciendo el rango especificado de 6.5 a 7.8 psi de la PVR, a lo largo de todo el año.

Sin embargo, en términos de presión de vapor de la gasolina, el etanol presenta valores de más del doble con respecto al MTBE, y de 9 veces para el TAME y TAEE, así como de más de 4 veces para el ETBE. Lo anterior hace necesario reducir la gasolina base a utilizar en su mezcla para poder cumplir con la especificación vigente conforme al oxigenante empleado, teniéndose el mayor impacto cuando el valor de la PVR se mantiene fijo, como es el caso de las ZMG y ZMVM.

**Tabla 3.1** Propiedades de los oxigenantes para el mezclado de gasolinas<sup>6</sup>

Producto	Gasolina regular <sup>[6]</sup>	MTBE <sup>[6]</sup>	ETBE <sup>[6]</sup>	Alcohol anhidro <sup>[6]</sup>	TAME	TAAE
Presión de vapor (psi)	9.0	7.8	4.0	20 - 28	-	--
Índice de octano ((R+M)/2)	87	110	112	115	-	-
Temperatura de ebullición (°C)	60 - 70	55	72	79	-	-
Solubilidad en agua (%)	1.5	4.5	0.8	100	-	-
<i>Efectos sobre gasolina al 2% en peso de oxígeno</i>						
Volumen (%)	-	11	12.9	5.7	-	-
Cambio en PVR (psi)	-	0.1	-0.4	1.3	-	-
<i>Valor de Mezclado <sup>[1]</sup></i>						
Octano, (R+M)/2 <sup>(1)</sup>		110	111	115	105	100
PVR (psi) <sup>(2)</sup>	-	8.0	4.0	18.0	2.0	2.0

(1) R = Research Octane Number; M = Motor Octane Number.

(2) PVR corresponde a un contenido de oxígeno de 2.7 % en peso en la gasolina terminada.

En suma, en el período 2000-2005, la demanda nacional de compuestos oxigenados para atender los requerimientos especificados pasó de 17.9 a 23.0 MBD, lo que representa un incremento de 28.5 por ciento, cuando su capacidad de producción fue de 15.6 MBD. Esto se traduce a un déficit cercano a 7.4 MBD, los cuáles fueron suministrados vía importaciones.

En 2005 fueron consumidos 23 mil barriles por día de estos componentes. En términos de requerimientos de alcohol, para su obtención (en la actualidad se usa metanol), se demandan de 0.3 a 0.4 barriles por cada barril de éter. Por lo tanto, el suministro de metanol diario es de 6,240 barriles. <sup>[1]</sup>

En base a estos requerimientos, la alternativa que están siguiendo los refinadores en el entorno mundial es analizada al considerarse la sustitución de éteres a base de metanol, por combustibles renovables con el empleo del bioetanol en su producción.

Como se muestra en la figura 3.2 de las producciones, demandas e importaciones de gasolinas y oxigenantes para el año 2006. <sup>[6]</sup>

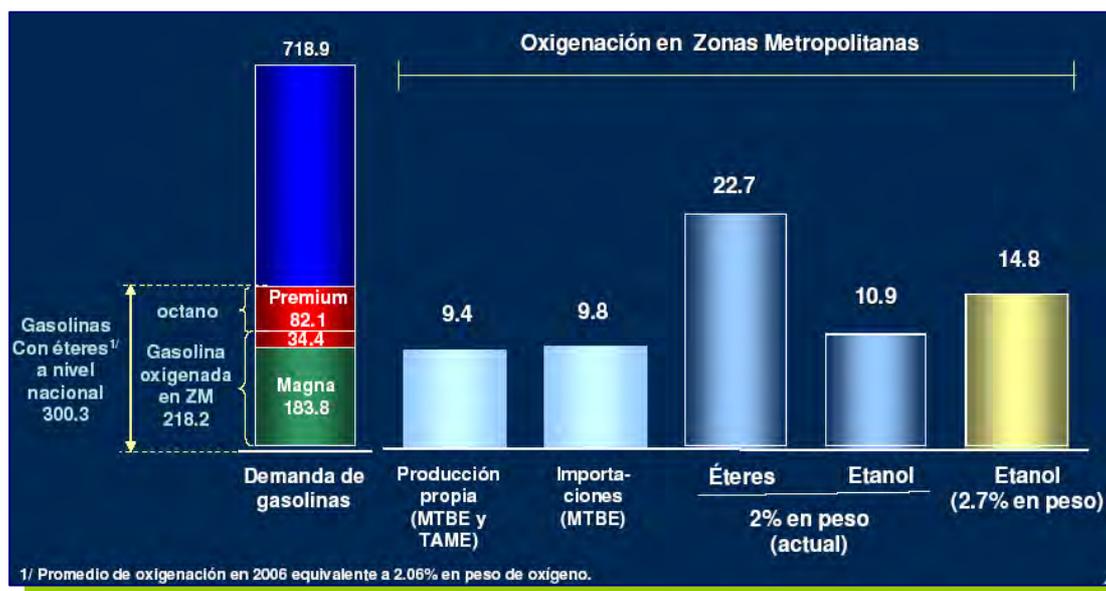


Figura 3.2 Consumo de éteres en México en el 2006 (MBD)<sup>[6]</sup>

### 3.3. Escenarios propuestos para la introducción de biocombustibles 2006-2012

**Escenario No.1:** Sustitución de la producción nacional de MTBE y TAME (a base de metanol) por ETBE y TAEE (a base de etanol), manteniendo las importaciones de MTBE necesarias para satisfacer la demanda de gasolinas oxigenadas de las Zonas Metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y Valle de México.

**Escenario No. 2:** Eliminación del empleo de éteres en la formulación de gasolinas, manteniéndose la exigencia de oxigenación de gasolinas de 2% en peso en las Zonas Metropolitanas, lo que se lograría a través del empleo de etanol.

**Escenario No.3a:** En éste se incorporaría, además del empleo de etanol como oxigenante, la sustitución del 10 % del volumen de las ventas nacionales solamente en las gasolinas actualmente no oxigenadas, cerca de 60% del mercado.

**Escenario No.3b:** Mezcla de etanol en 10% del volumen de todas las gasolinas consumidas en México, correspondiendo a un nivel de oxigenación de 3.5% en peso. Este valor es el más utilizado con frecuencia en los diversos países que utilizan dicho biocombustible.

A partir de los escenarios propuestos para la introducción de etanol combustible en México, en la tabla 3.2 se presentan los pronósticos de los valores de demanda y ahorro de divisas para el año 2010, asumiendo un incremento anual del 3%.

**Tabla 3.2** Escenarios para introducción del etanol combustible en México, valores para 2010

Escenario	Demanda de etanol (mil m <sup>3</sup> /año)	Ahorro de divisas por la reducción importación de gasolina y MTBE (mil US\$)
1. Sustitución de la producción nacional de MTBE por ETBE, en la capacidad de producción	411.9	185,355
2. Sustitución total de los éteres por etanol a 5.7% en 44% de la gasolina (2% de oxígeno)	1,110.6	499,500
3b. Mezcla de 10% de etanol en toda gasolina del país (3.5% de oxígeno)	4,406.3	1,982,835

## 4. CULTIVOS AGRÍCOLAS UTILIZADOS COMO ENERGÉTICOS

### 4.1 DISPONIBILIDAD SUPERFICIAL

De la superficie total del país, una proporción cercana al 16% se encuentra como superficie susceptible de cultivarse en la tecnología del riego o del temporal. Los principales cultivos cíclicos y sus producciones en el año 2004 fueron el maíz de grano, sorgo en grano, trigo, frijol, cártamo y cebada (en orden descendiente de producción). Sin embargo, la producción de éstos actualmente no es capaz de autoabastecer la demanda alimenticia, por lo que en el período 2004-2005 fueron importadas 6 millones de toneladas de maíz

(26% de la demanda del país), 2.9 de sorgo, 3.7 de trigo (68% de la demanda del país), 0.55 de arroz, 3.5 de soya. La tendencia en las importaciones de estos productos, proyectada al período 2015-16, considerando sólo maíz, trigo y sorgo, alcanzarán los 13.5 millones de toneladas del primero, 5 millones del segundo y 3.3 millones de toneladas del último.

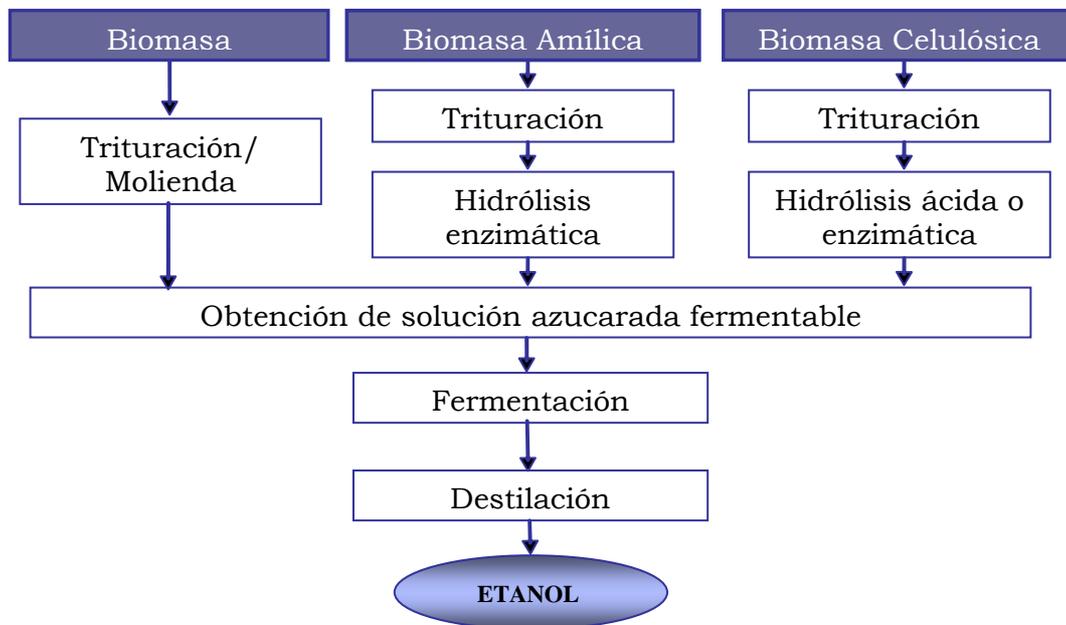
De los cultivos perennes, la caña de azúcar tiene una producción de 50,893 miles de toneladas, con un valor de 20,205 millones de pesos. Este es, por mucho, el cultivo con más alta retribución para la nación, el cual hasta ahora tiene propósitos exclusivos a la producción de azúcar.

En virtud de las características de producción agrícola, costo de materia prima, potencial de producción, competencia con la producción de alimentos, capacidad de provisión de servicios de extensión agrícola, la demanda asociada de recursos naturales para producción agrícola, (particularmente suelos fértiles y agua), además de la existencia de coproductos y subproductos resultantes de su procesamiento con valor alimentario, industrial o energético, se debe realizar el análisis de cultivos mexicanos propensos a ser transformados en bioetanol.

Tomando en cuenta estos factores, los cultivos más atractivos son la caña de azúcar, el maíz, el sorgo y la yuca. El caso de la remolacha puede presentar un singular nicho de interés en México, relacionado con la disponibilidad de vapor de baja presión de la Central Geotermoeléctrica de “Cerro Prieto”, localizada en la zona del Valle del Mexicali, en donde se cree en la posibilidad de expandir ese cultivo.

## 4.2 PROCESOS TECNOLÓGICOS

Las rutas tecnológicas empleadas de producción de etanol con base en la clasificación de materias primas son simplificadas en la siguiente figura. Cabe reiterar que procesos empleando materias primas celulósicas todavía se encuentran en desarrollo, con buenas perspectivas a mediano plazo; las biomazas azucaradas y amiláceas, respectivamente representadas por la caña de azúcar y el maíz son de inmediato interés. El bagazo representa una fuente de energía en el procesamiento de la caña y se debe considerar también los usos alternativos de ese producto.

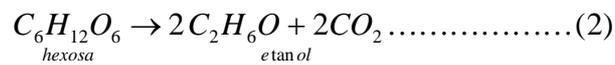


**Figura 4.1.** Procesos para producción de etanol<sup>1</sup>

### 4.2.1 Caña de azúcar

Esencialmente dos reacciones son necesarias para convertir la sacarosa en etanol: una hidrólisis de la sacarosa, con producción de hexosas, que constituyen las mieles o melazas y pueden dar origen a mostos fermentables y la fermentación alcohólica, con auxilio de levaduras del tipo *Saccharomyces Cerevisiae*. Diversas alternativas pueden ser adoptadas

para la producción de etanol a partir de este cultivo, desde la fermentación directa del jugo de la caña hasta el empleo de soluciones acuosas de mieles finales o intermediarias, o mezclas de mieles y jugo.



Usualmente en los ingenios de azúcar, posterior a la producción del jarabe por concentración del jugo de la caña, se realizan hasta tres sucesivas cristalizaciones, obteniéndose tres niveles de azúcares y mieles: A, B y C respectivamente; siendo la miel C considerada como agotada y de la cual no se recupera más sacarosa, sin embargo contiene aún 50% de material fermentable. El contenido total de azúcares de la melaza utilizada para preparar el mosto, cantidad usualmente evaluada según el contenido de los “azúcares reductores totales” (suma de la sacarosa y las hexosas), es un factor para la decisión de la desviación de sacarosa para fabricación de azúcar o etanol. Según la experiencia brasileña, la conversión de glucosas en etanol es aproximadamente 1.67 kg de azúcares reductores totales por litro de etanol anhidro, y el contenido de sacarosa y de fibra respectivamente es de 13.5% y 13.2%, según los valores observados en las últimas cinco zafras para los ingenios mexicanos.

Con el objetivo de aumentar la producción relativa de etanol, aparte de emplear jugo directo, pueden ser adoptados procedimientos más complejos: el uso de mostos para combinar jugo directo o jugo pobre de los filtros, y parte de las melazas intermediarias, con lo que se pretende simultáneamente reducir consumo de servicios auxiliares e insumos químicos, ampliando los beneficios de la integración productiva etanol/azúcar.

Otro factor importante en la producción de caña de azúcar es el dióxido de carbono capturado durante el proceso, el cual puede ser ofertado en el mercado en aproximadamente 10 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> absorbido. Si se piensa en una producción de 966 toneladas de tallos en su vida útil de siete cortes en 8 años, equivalentes a 1,256 toneladas de caña integral por hectárea, se alcanzaría teóricamente 512 toneladas de CO<sub>2</sub>, igual a \$7,040 pesos por hectárea por año o \$58.30 peso por tonelada de caña. <sup>1</sup>

### **Producción de etanol de melazas agotadas (miel C)**

Para condiciones típicamente observadas en los ingenios mexicanos son producidos cerca de 37.5 kg de miel C o miel final con 85° Brix, por tonelada de caña procesada (CNIAA, 2006). El grado Brix corresponde al porcentual en peso de sólidos solubles en la miel, así, apenas utilizando las melazas agotadas resultantes de la fabricación de azúcar, entre 6 y 12 litros de etanol pueden ser producidos por tonelada de caña procesada, como mínimo.

### **Producción de etanol de melazas intermediarias (miel B)**

Cuando hay interés en producir más etanol que en el caso anterior, se disminuye proporcionalmente la cantidad de sacarosa convertida en edulcorante y se desvía más melaza hacia la producción de etanol, en ese caso produciendo en el ingenio solamente los azúcares A y B, y destinando la miel B, a veces llamada de miel rica, para la producción de éste.

Se debe reiterar que esta alternativa permite una amplia gama de perfiles productivos, dependiendo directamente del contenido de azúcares que presenta la melaza enviada para la destilería.

Se puede esperar una producción de 61 kg de miel B por tonelada de caña procesada, con 82° Brix y un contenido de azúcares reductores totales (ART) en el intervalo de 49 a 60%. Utilizando una melaza con esas características se espera una producción de etanol anhidro de 280 litros por tonelada de miel, resultando por tanto 17.1 litros de producto.

### Producción de etanol de jugo directo de caña

Para incrementar la producción de etanol, se desvía progresivamente más jugo de caña hasta la situación en que no se produce ningún azúcar. En el contexto de los ingenios mexicanos, a partir de una tonelada de caña con 13 a 14% de sacarosa se estima obtener de 75 a 80 litros de alcohol anhidro, significando una recuperación de ART de la caña entre 82 y 85%. En ese caso, se espera que el consumo de vapor sea 10% inferior al requerido para la producción de azúcar, debiendo mantenerse el tratamiento térmico del jugo y el ajuste del nivel de concentración adecuado para mejorar las condiciones en la fermentación. Un esquema representativo de un ingenio en Brasil [1] que produce etanol a partir de melazas intermediarias se presenta a continuación.

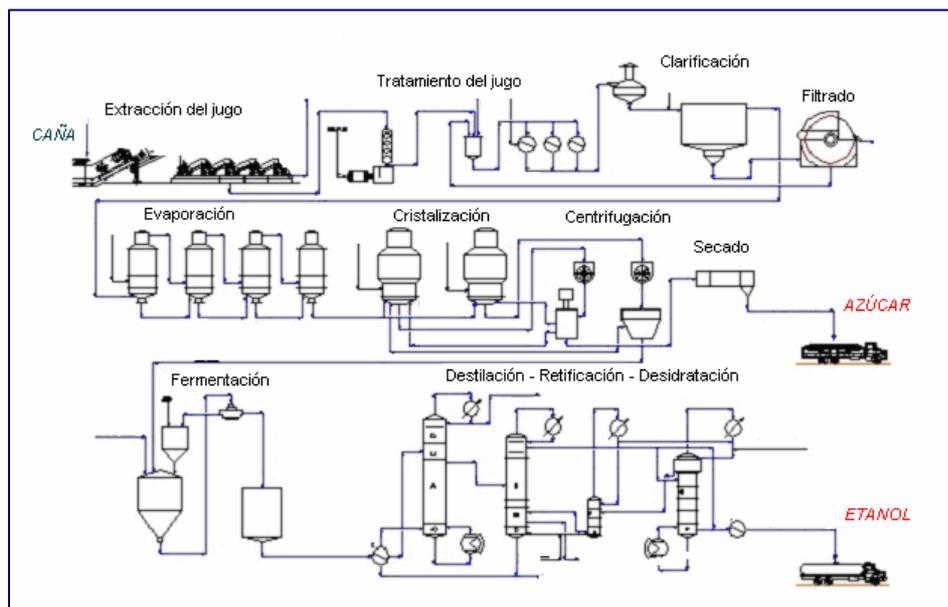


Figura 4.2. Esquema de un ingenio para la producción de combinada de azúcar y etanol<sup>1</sup>

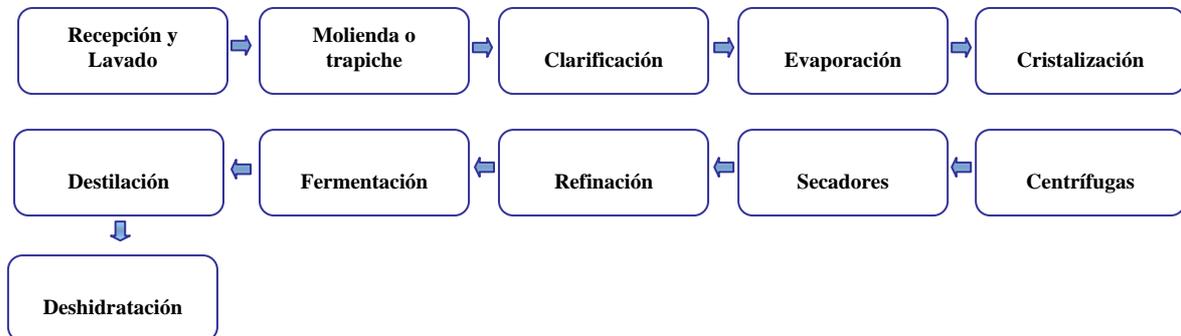
## **Reducción de etanol de jugo directo de caña y de residuos celulósicos**

En este caso, el bagazo excedente en los ingenios -resultante de la racionalización energética en los procesos de producción y uso de vapor-, así como los residuos de cosecha (puntas y hojas de caña), son materiales lignocelulósicos o compuestos de celulosa, hemicelulosa y lignina, y son propuestos como un proceso alternativo que permitiría mayores volúmenes de etanol por unidad de materia prima procesada. Sin embargo, el principal reto de este proceso es romper la lignina, la cual no contiene azúcares y envuelve las células vegetales con una capa que dificulta la obtención de celulosa y hemicelulosa. Éstas son utilizadas para producir soluciones fermentables que puedan transformarse en etanol. Por lo que la biomasa lignocelulósica requiere de un pretratamiento e hidrólisis, ya sea hidrólisis ácida (con ácido diluido o concentrado), hidrólisis enzimática o procesos termoquímicos.

Posteriormente, la celulosa liberada es típicamente sometida a hidrólisis enzimática con celulasas exógenas, lo cual hace que se obtenga una solución de azúcares fermentables que contiene principalmente glucosa, así como pentosas (xilosas) resultantes de la hidrólisis inicial de la hemicelulosa. Estos procesos se encuentran aún en desarrollo, esperando se vuelvan más eficientes en un horizonte de 10 años.

Actualmente se considera representativa una eficiencia de conversión y recuperación de celulosa en 76%, que asociada a una conversión fermentativa de 75%, aumenta la producción a 336 litros de etanol anhidro por tonelada de celulosa. Por tonelada de bagazo con 50% de humedad, pueden producirse, a partir de la celulosa, 123 litros de etanol anhidro y a partir de la hemicelulosa, 63 litros de ese biocombustible. En general 166 kg de material celulósico, resulta por tonelada de caña procesada, 18 litros adicionales de etanol, que sumados a producción de

etanol de jugo de los colmos, significa un total de 98 litros de etanol anhidro.

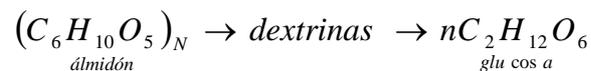


**Figura 4.3** Diagrama general de flujo de proceso de la producción de etanol a partir de caña

#### 4.2.2 Maíz

El maíz amarillo, cuyos granos contienen entre 60 a 68% de almidón, es la materia prima mayormente utilizada en la producción de etanol en los Estados Unidos. Para obtener etanol a partir de almidón es necesario romper las cadenas de ese polisacárido y así tener jarabe de glucosa, el cual se puede convertir en etanol mediante las levaduras, al igual que para la caña. Aunque se pueden utilizar procesos ácidos, la ruta enzimática es preponderante. Inicialmente se hace una hidrólisis enzimática, empleando la alfa-amilasa obtenida de bacterias *termorresistentes* como *Bacillus licheniformis* o *B. amyloliquefaciens*, lo que la hace ideal para la primera etapa de la hidrólisis de las suspensiones de almidón, que tienen que ser llevadas a temperaturas entre 90 -110°C, justo cuando ocurre el rompimiento de los gránulos de almidón, condición necesaria para el tratamiento enzimático. El contenido de enzimas utilizado depende de su grado de actividad, pero es usualmente cerca de 0.06 a 0.08%. Bajo ese nivel de temperatura ocurre también una esterilización de la materia prima, reduciendo la presencia de bacterias perjudiciales para la fermentación.

El producto de la etapa de licuefacción es una solución de almidón que contiene dextrinas (oligosacáridos compuestos por varias unidades de glucosa) y pequeñas cantidades de glucosa. El almidón licuado se somete entonces a sacarificación a menores temperaturas (60-70°C) con glucoamilasa (0.06 a 0.12%) obtenida de *Aspergillus niger* o de especies de *Rhizopus*, la cual hidroliza las dextrinas hasta glucosa, según la siguiente reacción:



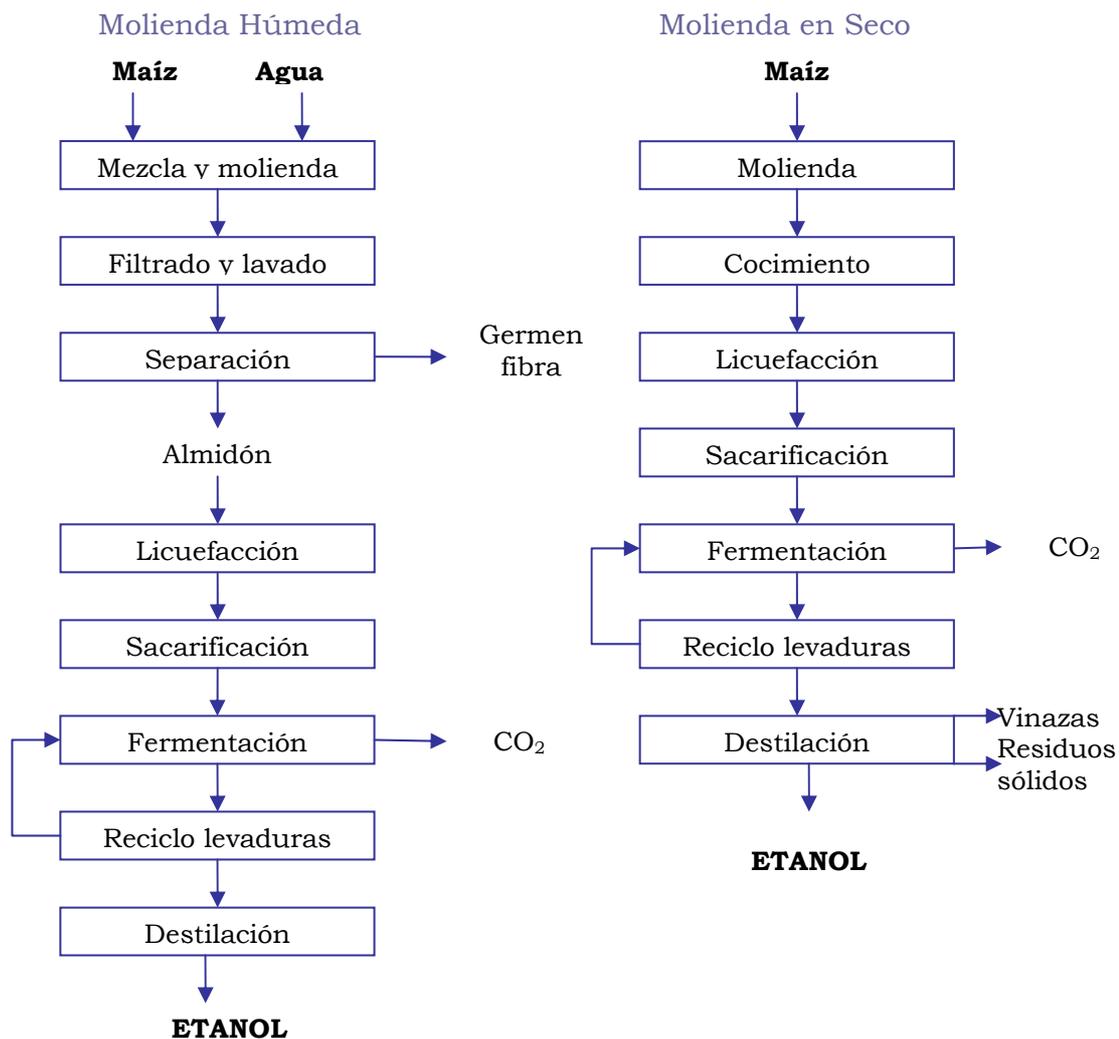
De cada kg de almidón sacarificado se pueden obtener teóricamente 1.11 kg de glucosa, lo que implica una relación estequiométrica de 9:10. Una vez obtenida la glucosa se realiza la fermentación directa por medio de la adición de levadura para la producción de etanol, como se muestra en la siguiente reacción. En condiciones teóricas, para cada kg de almidón podrían ser producidos 0.716 litros de etanol anhidro. Asumiendo un contenido de 66% de almidón en el maíz en grano seco, podrían teóricamente producirse hasta 416 litros de etanol por tonelada de maíz. Considerando las eficiencias de sacarificación, fermentación y destilación, respectivamente 95, 90 y 98%, llegase a 0.631 litros por kg de almidón o cerca de 400 litros de etanol por tonelada de maíz en condiciones reales.



En términos prácticos, el proceso empieza con la molienda del cereal, para reducirlo a un tamaño de partícula fina y extraer el almidón de los granos de maíz. Existen dos tipos de proceso en uso, húmedo y seco. El proceso en seco es preferido para producción de etanol por demandar menos equipos y menos energía, resultando costos comparativamente más bajos que el proceso húmedo.

En el proceso húmedo se obtiene del grano, además de almidón, fibra, gluten, germen y aceite, que son subproductos de alto valor. Los rendimientos de etanol pueden llegar a 403 litros por tonelada de maíz. En el proceso en seco no se fracciona el grano en sus componentes y todos sus nutrientes entran al proceso y son concentrados en un subproducto de destilación empleado para alimentación animal llamado granos secos de destilería (DDG, Dried Distillers Grains), cuyo valor de mercado puede compensar parcialmente los costos del proceso. Cuando los DDG se mezclan con solubles concentrados provenientes de la evaporación de las vinazas se obtienen los granos secos de destilería con solubles (DDGS). Los rendimientos de alcohol para el proceso en seco son de 395 a 405 litros por t de maíz.

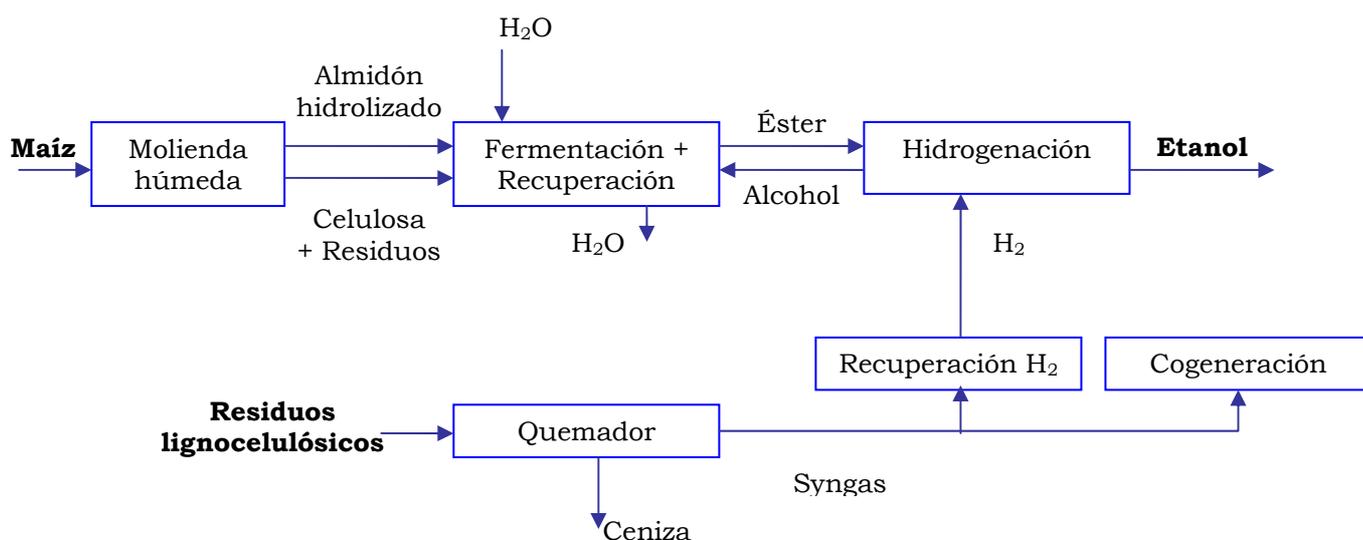
En el proceso en seco, el maíz es inicialmente limpiado de piedras y metales, pasando por molinos de martillo y siguiendo para los tanques de licuefacción continua, adonde se ajusta el pH a 6 y se mezcla con el condensado de los evaporadores y la enzima (alfa-amilasa), manteniéndose a una temperatura de 88° C. En esa etapa se puede agregar urea para mejorar las condiciones de fermentación. En seguida a licuefacción, el material es calentado hasta 110° C durante 20 minutos, enfriado a 60° C y pasado a la etapa de sacarificación en tanques continuos, donde recibe la enzima (glucoamilasa) y ácido sulfúrico para ajustar el pH a 4.4. El tiempo de residencia para sacarificación es de 6 horas. El mosto resultante es enfriado a 32° C y alimenta los fermentadores continuos en cascada (Continuous Stirred Tank Reactor – CSTR), donde cumple un tiempo de residencia de 46 horas. Modernamente, la sacarificación y fermentación ocurren simultáneamente en el mismo reactor. La temperatura de fermentación es mantenida debajo de 34° C mediante la circulación del mosto en intercambiadores de calor. La concentración de etanol en la salida del proceso de fermentación es 12% en volumen. Los esquemas simplificados para estos procesos son indicados en la Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Procesos de fabricación de etanol a partir de maíz

En Estados Unidos se han realizado más estudios sobre la producción de etanol a partir de esta materia prima. Nuevas propuestas de producción han nacido a partir del conocimiento de las limitantes existentes en el proceso convencional de fermentación directa. Usualmente, la lignina y otros materiales no fermentables, cuyo contenido energético es del 40% respecto a la biomasa, puede utilizarse únicamente para ser quemado y generar vapor o electricidad para la planta utilizando la energía liberada en la combustión; sin embargo, esta energía no puede ser usada directamente en la producción de etanol. El método ZeaChem<sup>[5]</sup> propone una fermentación indirecta que busca preservar los carbohidratos en el producto final, permitiendo a la lignina contribuir con su energía vía hidrogenación.

Este método consta de tres procesos químicos. En el primero una fermentación homoacetogénica se utiliza para producir ácido acético a partir de homoacetógenos, que son microorganismos fermentadores de azúcares de 5 y 6 carbonos. En el segundo paso, el ácido acético es esterificado con un alcohol para producir éster. Por último, el éster se hidrogena con el producto del quemador alimentado con biomasa (lignina y productos no fermentables) y se produce etanol y alcohol residual, el cual se recicla a la segunda etapa. El resultado neto de la ruta de producción indirecta presenta una mejora del 50% en rendimiento respecto a la ruta directa (3 moles de etanol por mol de azúcar de 6 carbonos vs. 2 moles de etanol por mol de azúcar de 6 carbonos). Este proceso se ilustra en el siguiente esquema.



**Figura 4.4.** Diagrama de flujo de producción indirecta de etanol a partir de maíz según ZeaChem <sup>5</sup>

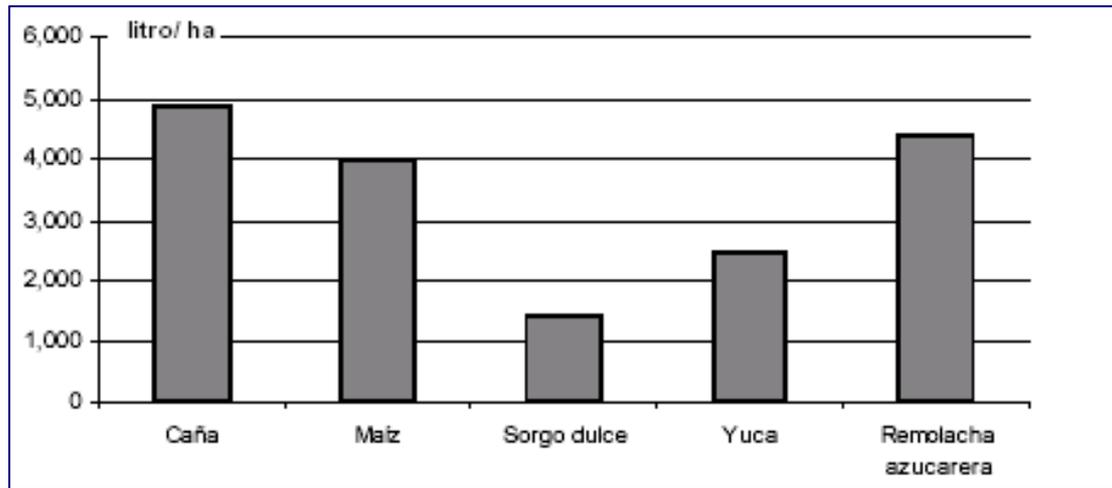
Otros cultivos energéticos son la yuca, sorgo y remolacha. En la siguiente tabla se muestra una síntesis de los procesos estudiados para la fabricación de etanol respecto a su productividad, consumo energético y otros productos resultantes de dichos procesos.

**Tabla 4.1.** Síntesis de los procesos de fabricación de etanol<sup>6</sup>

Materia prima	Proceso	Productividad (litro etanol/ t)	Consumo energético	Otros productos
<b>Caña de azúcar</b>	miel pobre (C)	8.8	Autosuficiente	112 kg azúcar
	miel rica (B)	17.1	Autosuficiente	92 kg azúcar
	jugo directo	80	Autosuficiente	menos relevante
	jugo directo + hidrólisis de residuos lignocelulósicos	(80+18) 98	Autosuficiente	menos relevante
<b>maíz</b>	vía seca	398	electr.: 0.21 kWh/litro comb.: 10.2 MJ/litro	321 kg granos secos de de destilería y solubles DDGS
<b>sorgo</b>	similar a caña	35	Autosuficiente	menos relevante
<b>yuca</b>	similar al maíz	170	comb.: 26 a 31 MJ/litro	menos relevante
<b>remolacha</b>	similar a caña	86	electr.: 0.08 kWh/litro comb.: 6.7 MJ/litro	51 kg de residuos

## 5. PRODUCTIVIDAD Y EFICIENCIA AGROINDUSTRIAL DEL BIOETANOL A PARTIR DE DIFERENTES CULTIVOS

El resumen de productividad agroindustrial de etanol para diferentes cultivos se muestra en la siguiente gráfica:



**Figura 5.1.** Productividad agroindustrial de etanol para diferentes cultivos <sup>1</sup>

Los procesos de transformación de biomasa propuestos para las condiciones de México, presentan razones energéticas (energía obtenida/energía fósil consumida) variables de 1 a 10.

**Tabla 5.1** Razones energéticas para la producción de etanol a partir de diferentes materias primas

Biomasa	Razón de Energía Fósil <sup>(1)</sup>
Trigo	~ 2
Remolacha	~ 2
Maíz	~ 1.5
Caña de azúcar	~ 8

(1)(energía obtenida) / (energía fósil consumida)<sup>1</sup>

Los impactos causados por el uso de energía fósil se muestran en la siguiente tabla, para la mezcla 10% etanol-gasolina; el % se refiere al total de energía consumida para cada categoría. Así, el etanol proveniente de la caña de azúcar reemplaza el 10% de la gasolina y el 1.8% de la electricidad utilizada en el país, además del 1% de los combustibles (diesel, gas natural y combustible de petróleo).

**Tabla 5.2** Impactos causados por el uso de energía fósil<sup>1</sup>

Producto	Gasolina sustituida % total gasolina	Electricidad sustituida % total electricidad	(D+GN+CP) usado, % total (D+GN+CP)
Caña de azúcar	10	1	1
Maíz	10		7
Remolacha azucarera	10		5
Sorgo dulce	10		2
Trigo	10		5
Mandioca	10		1

## 6. DATOS ECONÓMICOS

### 6.1. COSTOS DE PRODUCCIÓN

Para evaluar la factibilidad económica de un combustible es esencial conocer los costos de producción, siendo los asociados a la materia prima y a su procesamiento los que ocupan el mayor porcentaje. Estos han sido determinados utilizando estimaciones efectuadas en el contexto nacional o en condiciones similares.

Respecto a las materias primas que se analizan en este trabajo, que son: caña de azúcar, maíz, sorgo, yuca, y remolacha azucarera, se realizó el análisis de costos.

**Tabla 6.1** Resumen de Costos Primos<sup>1</sup>

Cultivo	Costo primo/ L Bioetanol
Caña guarapo-riego	2.63
Caña entera-riego	1.53
Caña guarapo-temporal	2.96
Caña entera-temporal	1.71
Maíz- riego	1.96
Trigo grano-riego	2.96
Trigo paja	0.87
Trigo combinado: grano-paja	1.93
Remolacha-riego	2.22
Sorgo-temporal	1.35
Yuca temporal	2.84
Sorgo Dulce riego	1.8
Sorgo Dulce Temporal	1.85

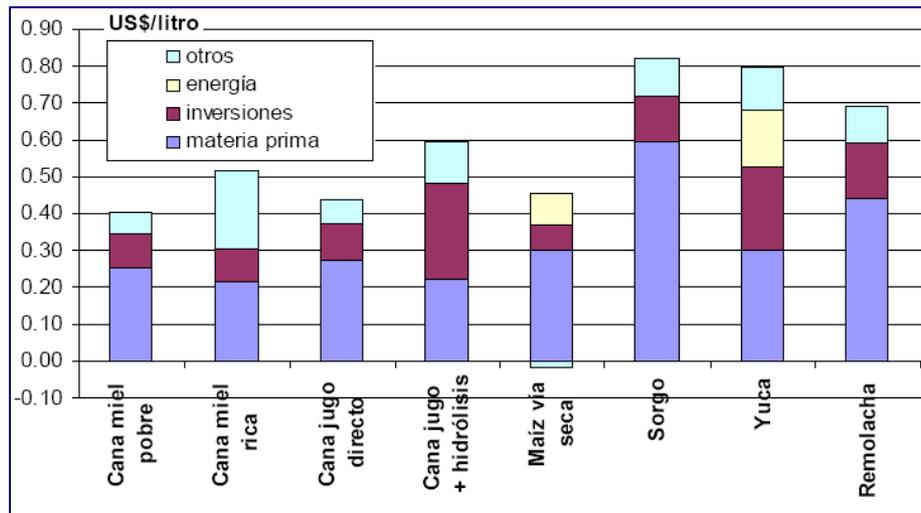


Figura 6.1. Composición de los costos de producción de etanol (US\$/litro) <sup>(1)</sup>

Tabla 6.2 Inversión industrial total (tecnologías innovadoras)

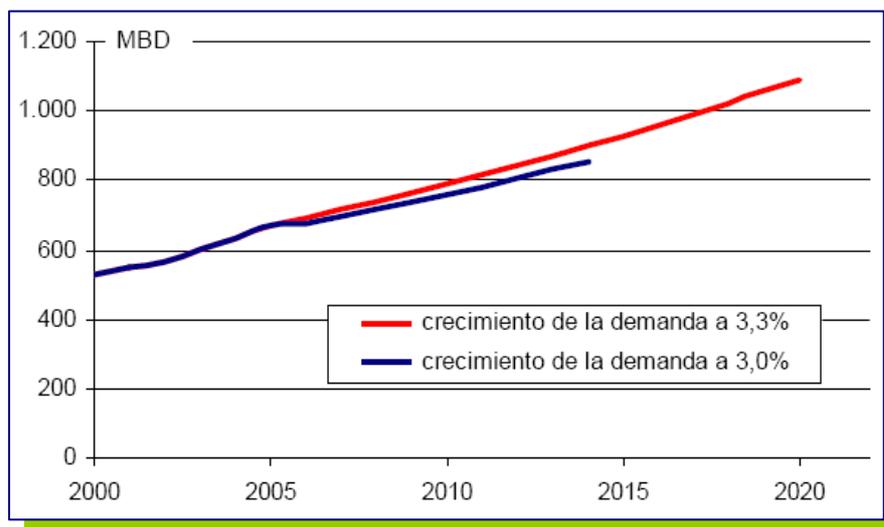
Materia prima y tecnología	Caña jugo + hidrólisis	Sorgo	Yuca	Remolacha
Escenario	Inversión industrial (millones de US\$)			
1. Sustitución de la producción nacional de MTBE por ETBE	790	325	585	390
2. Sustitución total de los éteres por etanol a 5,7% en volumen	1,580	725	1,305	870
3. Mezcla de 10% de etanol en volumen en toda gasolina del país	6,320	3,025	5,445	3,630

Los costos variables (dependen del volumen de etanol producido) son: mano de obra para los ciclos de zafra, materiales y productos químicos, energía eléctrica, combustible, entre otros. Entre los costos fijos (no dependen del volumen de etanol) se encuentran: inversiones, tasas y reparación.

<sup>1</sup> En todas esas evaluaciones se adoptó como promedio para 2005 y para los primeros meses de 2006, una tasa de cambio respectivamente de 10.89 y 10.70 pesos mexicanos por dólar (CEFP, 2006).

## 6.2. MERCADO PARA EL ETANOL COMBUSTIBLE EN MÉXICO

La demanda potencial de etanol en México es más afectada por los escenarios de introducción del biocombustible que por las expectativas de evolución de la demanda en el mercado combustible.



**Figura 6.2** Estimaciones de evolución de la demanda de gasolina en México<sup>1</sup>

### Factibilidad económica de la producción y uso de bioetanol en México

A continuación se aborda la dimensión de los parques productores de etanol para México, para las diferentes tecnologías de producción, especificadas por los módulos productivos, y escenarios de demanda, permitiendo estimar el nivel de inversión y requerimientos de tierra para suministrar la cantidad necesaria de materia prima. Se efectúa un análisis económico para la producción de etanol en México, considerando los escenarios anteriores, basándose en los costos estimados para producción y los precios de paridad evaluados precedentemente. No se considero la posibilidad de comercio internacional de etanol combustible. Al final se presenta un análisis de sensibilidad de los principales parámetros que afectan los precios del etanol, de modo a robustecer la eventual toma de decisiones sobre la oportunidad y factibilidad económica del etanol combustible para México.

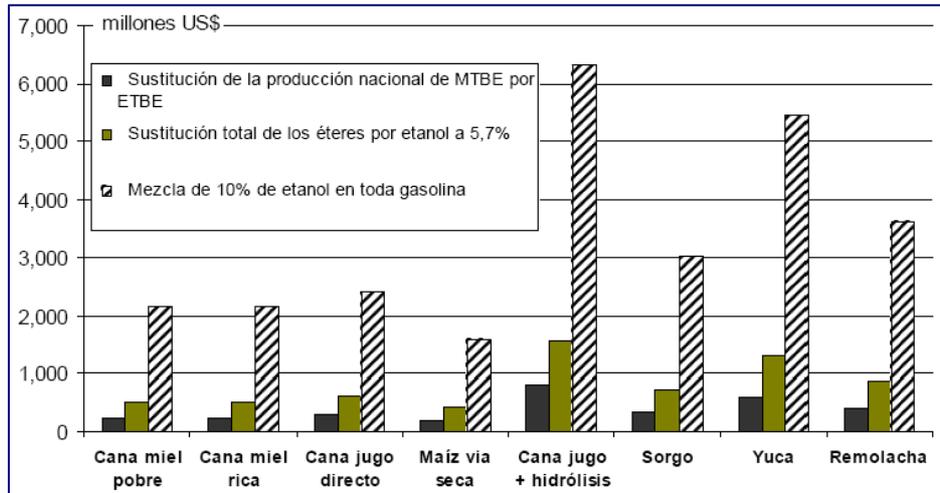


Figura 6.3. Inversiones industriales necesarias<sup>1</sup>

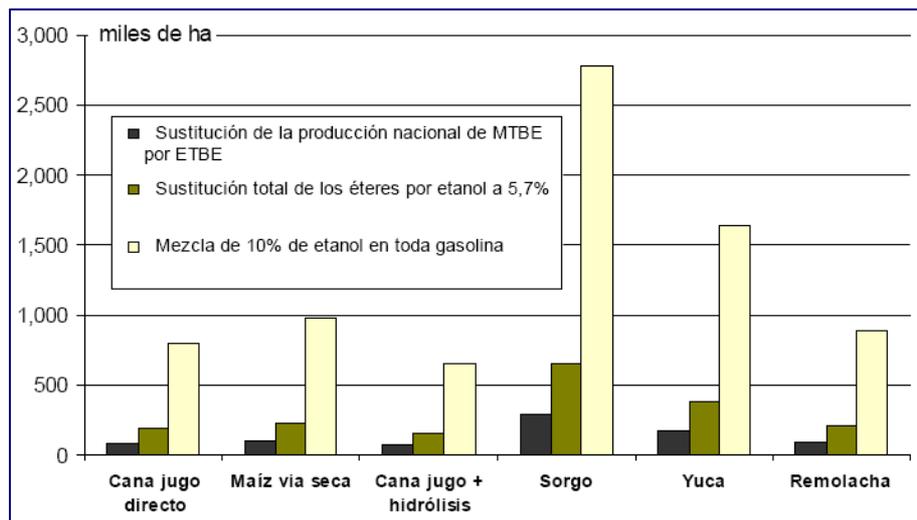


Figura 6.4. Superficies de cultivo necesarias para producción de bioetanol<sup>1</sup>

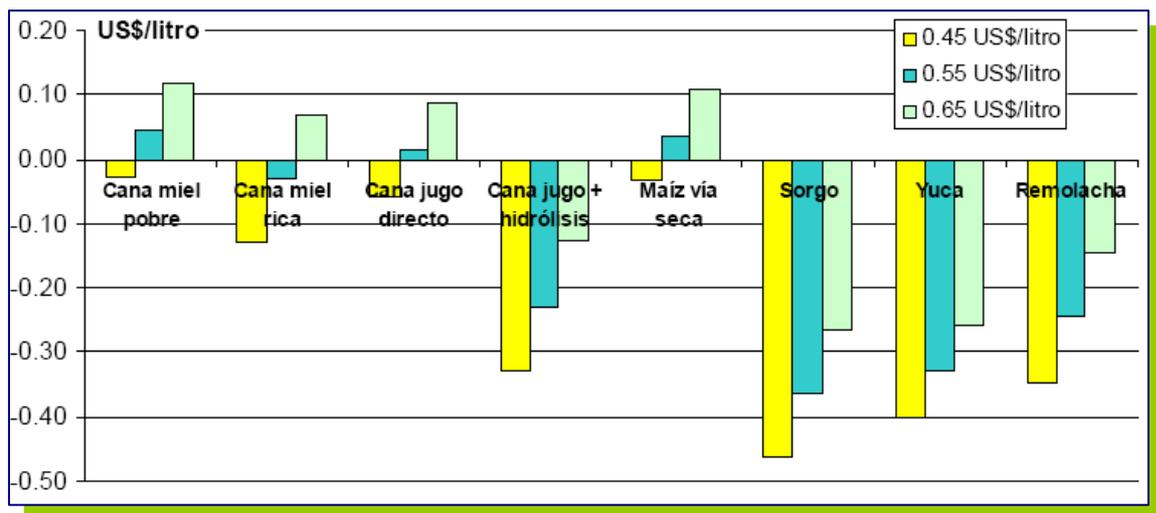
**Tabla 6.5** Superficie de cultivo requerida (tecnologías innovadoras)<sup>1</sup>

Materia prima y tecnología	Caña jugo + hidrólisis	Sorgo	Yuca	Remolacha
Productividad agrícola (t/ha)	61	40	14	51
Productividad industrial (litro/t)	98	35	170	86
Escenario	Superficie de cultivo (miles de ha)			
1. Sustitución de la producción nacional de MTBE por ETBE	69	294	173	94
2. Sustitución total de los éteres por etanol a 5,7% en volumen	153	651	383	208
3. Mezcla de 10% de etanol en volumen en toda gasolina del país	652	2,784	1,637	889

Las inversiones más bajas se asocian a tecnologías conocidas. El maíz se destaca en ese sentido, principalmente por el largo período de utilización de la unidad industrial, posible debido al almacenamiento de los granos y operación durante todo el año. Luego vienen las destilerías anexas a ingenios azucareros, en donde la inversión más importante, para extracción del jugo de la caña, ya está hecha. En seguida se presentan las destilerías autónomas. La alternativa de más alto costo es la producción por jugo directo asociada a hidrólisis de residuos celulósicos, que implicaría en inversiones arriba de 4 veces más elevadas, comparativamente al caso del maíz.

Se estima que el efecto de escala en las inversiones para producción de etanol puede ser importante y explica la tendencia de crecimiento de las capacidades unitarias instaladas. Particularmente para el caso del maíz, se consideró que triplicar la capacidad de una planta puede llevar a reducciones de costo entre 15 y 20%.

Buscando complementar el análisis precedente, para las tecnologías asociadas a la caña y el maíz, se efectuó un breve estudio de sensibilidad del costo del etanol frente a variaciones de los principales parámetros que afectan ese valor, como las inversiones y los costos de energía. En las gráficas siguientes se observa como, de una manera general, variaciones en el precio de la materia prima afecta bastante el precio final del etanol. Eso es más evidente para los contextos en donde la inversión no es tan relevante, sea porque se trata de una destilería anexa, casos del uso de las mieles, sea porque el factor de utilización reduce el peso relativo de las inversiones, como para el maíz. Para el caso en que se incluye la hidrólisis, ocurre exactamente al revés, con las inversiones siendo el factor más importante. Otro punto a comentar es la manera cómo afectan los coproductos : para la miel rica de caña, el azúcar que se deja de producir es una pérdida, y por lo tanto, altos precios significan mayores pérdidas, mientras para el maíz, buenos precios para el grano seco destilado (DDG, por sus siglas en inglés) representan un descuento adicional en el precio, sin indicar impactos relevantes.



**Figura 6.5.** Resultado neto de la producción de etanol, para las materias primas y tecnologías estudiadas, en el escenario de referencia.<sup>1</sup>

Del análisis se puede concluir que México presenta condiciones adecuadas para promover la producción y uso de etanol combustible, con potenciales ventajas económicas, sociales y ambientales. Desde el punto de vista de la demanda, la adopción del etanol ofrece la posibilidad de sustituir o disminuir el consumo de gasolina y componentes oxigenantes (MTBE y TAME), productos importados en volúmenes crecientes. Además, esos aditivos son compuestos ambientalmente cuestionados y progresivamente prohibidos en diversos estados de Estados Unidos. Por el lado de la oferta, condiciones favorables de clima y disponibilidades de tierra, conjugadas a oportunidad de dinamizar actividades agroindustriales y mejorar la participación de fuentes renovables en la matriz energética, son algunos de los factores que tienden a impulsar el etanol combustible en la realidad mexicana.

Los estudios realizados dejan algunas respuestas y nuevas cuestiones. Un primer tema a ser explorado y definido se refiere a las materias primas a utilizar para producción de etanol. Entre las diversas posibilidades se destacan las melazas, el jugo directo de caña y el maíz, por su productividad, costos y conocimiento agronómico en México. Por los resultados económicos no es posible afirmarse categóricamente que la caña representa una opción superior al maíz, no obstante la menor disponibilidad de tierras bajo riego, la importancia en usos alimentarios y la dependencia de maíz importado sean aspectos estratégicos a reducir el interés en ese cultivo para fines bioenergéticos. Además, para el maíz se adoptaran indicadores bastante optimistas, comparativamente a los adoptados para la caña. Otros cultivos también pueden ser considerados, pero siempre en nichos específicos pues todavía carecen de mejor fundamentación y los resultados obtenidos no son exactamente estimulantes. En síntesis, sobre esto punto, es importante enfocar las materias primas de manera no restrictiva pero teniendo en cuenta experiencias previas y datos económicos.

La cuestión anterior incide necesariamente en los precios de las materias primas, un tema crucial para el sustentado desarrollo del etanol en México.

Por gran participación en los precios finales y por ende en la competitividad, es esencial establecer maneras de ampliar la producción de materias primas a bajos precios, mediante incrementos de productividad y otros mecanismos, sin los cuales la sustentabilidad económica del etanol en México estará siempre perjudicada.

## 7. EMISIONES ATMOSFÉRICAS RESULTADO DE LA COMBUSTIÓN DE LA MEZCLA ETANOL-GASOLINA

Para el escenario de la mezcla 10% etanol-gasolina, las emisiones gases invernadero para el ciclo de vida de la producción del etanol y su uso, y las emisiones evitadas en México son: ,

**Tabla 7.1** Emisiones de Gases de Invernadero<sup>1</sup>

Materia prima	kg CO2 eq./ L etanol anhidro	Mitigación México; Escenario 3 106 t CO2 eq./año
Maiz	1.8	3.9
Caña de azúcar	0.43	10.6
Remolacha	1.4	5.4
Sorgo	0.7	8.2
Trigo	1.8	3.9

Las emisiones de la mezcla etanol-gasolina llevan menos CO, HC, tóxicos (benceno, xileno, tolueno), y casi nada de azufre. Las emisiones de aldehídos (formaldehído y acetaldehído) siempre han permanecido por abajo del límite y presentan menor toxicidad y reactividad fotoquímica que las emisiones del diesel y la gasolina.

Las emisiones de NOX aumentan un poco. Aumentan de 1 a 1.2 psi en RVP, hasta el contenido de oxígeno de aproximadamente 5% en volumen. Más contenido de O2 lleva a una lenta disminución del RVP.

Los oxigenantes se consideran según su solubilidad en agua, su tasa de

degradación en el ambiente, exposiciones humanas anticipadas, la toxicidad a la vida acuática y los efectos a la salud humana.

La mezcla etanol-gasolina es relativamente no dañina, el etanol se degrada fácilmente en el ambiente, la exposición humana es muy baja y no tienen impactos adversos en la salud. Sin embargo, es posible que el etanol en agua desplaze al oxígeno expandiendo los bencenos, toluenos, etilbencenos y xilenos (BTEX's).

No hay información acerca del derrame de ETBE o TAME, aunque si tiene ventajas sobre el MTBE por sus propiedades fisicoquímicas. El riesgo de contaminación del agua de subsuelo por goteo de los tanques subterráneos no es sustancialmente menor.

Las cuestiones relevantes relacionadas a la protección ambiental por la producción de materia prima ya han sido evaluadas. Un parámetro importante es el uso o no de sistemas de riego, esto impacta en el suministro de agua y puede provocar erosión del suelo, salinización y contaminación del agua del subsuelo y de la superficie.

La expansión agrícola implicaría el uso de tierras degradadas . El conocimiento de los impactos ambientales de estas cosechas alrededor del mundo (erosión del suelo con agua y viento, el uso de agroquímicos: fertilizantes, pesticidas, herbicidas, el uso de agua y la contaminación) y la gran experiencia en México con algunos de ellos, ayuda a establecer límites considerando condiciones locales.

## VENTAJAS

Algunas ventajas del uso de bioetanol en la mezcla de gasolina:

- Creación de empleos. Introducir 10% de etanol en la gasolina requeriría doblar el número de empleos en la agroindustria de la caña de azúcar, o 45% más empleos en la industria del maíz.
- Desarrollo de la economía rural. El equipo utilizado para la producción de etanol y la generación de poder y calor pueden tener un índice de nacionalización mexicana de casi el 100%, creando empleos y fortaleciendo la industria.
- Ampliación de las infraestructuras sociales en zonas rurales
- Mejora de la seguridad energética
- Conservación de los recursos petrolíferos
- Mejor gestión del agua
- Expansión de la agricultura a tierras más secas
- Ahorro en los intercambios exteriores
- Motivación a la comunidad científica y tecnológica
- Incentivos a la industria de bienes de producción
- Mejor del medio ambiente local y global
- El equipamiento para la fabricación de etanol y la generación combinada de calor y electricidad, (bagazo de caña tendrían índice nacional del 100% en México, creando empleos y fortaleciendo la industria)
- Es una forma efectiva y buena ambientalmente hablando de complementar los suministros de gasolina.
- La miscibilidad de la gasolina y etanol es buena.
- La durabilidad de la gasolina no se ve afectada por el etanol.
- Se mantiene el desempeño y durabilidad del automóvil.
- El manejo de los vehículos se mantiene o se mejora.
- La corrosión de materiales metálicos en el vehículo no se ven afectadas.

### **III. SELECCIÓN DE MATERIA PRIMA Y MÉTODO MÁS VIABLE DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL PARA SER IMPLEMENTADO EN MÉXICO**

El análisis de disponibilidad, conocimiento agronómico, tecnología de producción de etanol, posibilidad de integración productiva y uso de subproductos de las materias primas propuestas en este documento, nos arroja diferentes escenarios donde en cada uno encontramos un producto óptimo a ser transformado en bioetanol.

Respecto a su disponibilidad, destacan la caña de azúcar, la remolacha azucarera y la yuca. Respecto a precio de materia prima, la biomasa celulósica, como la paja de trigo, el cogollo (puntas de la caña) y las hojas de caña, sin embargo, las tecnologías para producción de etanol a partir de estos materiales aun están en desarrollo y sólo se cuenta con una fábrica piloto llamada Iogen en Canadá más aún, sus perspectivas comerciales aún están en proceso de estudio.

Un factor que justificaría limitar la evaluación de las materias primas de interés apenas a la caña y el maíz es la disponibilidad de información sobre tecnología, costo y beneficio de su proceso. Sin embargo, estamos conscientes de las necesidades primarias del país en base a su alimentación y considerando que el maíz es el principal producto de consumo, no podemos seleccionar éste como materia prima para producir etanol a pesar del basto conocimiento y avances tecnológicos sobre su producción.

Para México la caña de azúcar es el producto más atractivo respecto a disponibilidad agrícola, conocimiento de tecnología de conversión a etanol y costo. Fue, primeramente, la materia prima selecta para estudiar y simular según el objetivo de este proyecto. Sin embargo, durante el presente Informe de Gobierno del actual Presidente de la República, la Ley de Promoción de Bioenergéticos fue vetada por inferir en las metas principales

de alimentación sobre los cultivos de caña y maíz. Por lo que se tuvo la necesidad de seleccionar un proceso real y próximo de producción, de encontrar un sustituto atractivo, inspeccionando nuevas y diferentes tecnologías sobre la producción de bioetanol, encontrando gran potencial en a la **biomasa lignocelulósica**.

Cabe mencionar que a pesar de no ser seleccionadas en este momento la caña y el maíz, los residuos de su cosecha son la fuente inmediata de producción de bioetanol según el análisis realizado. Por consiguiente, sigue siendo necesario promover la inversión en el sector agrícola para que sean cultivadas más hectáreas, con mejores tecnologías y así tener mayor producción de estos productos. De esta forma, en un futuro próximo, se tendrán los valores requeridos de materia prima para volver factible la producción de etanol en base a maíz y caña de azúcar para alcanzar los volúmenes demandados de biocombustible en los tres escenarios mencionados.

A continuación se realiza un breve análisis y justificación del uso de la biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol, donde se destaca el uso del bagazo de caña como residuo óptimo para la transformación a éste.

#### **IV. BIOMASA LIGNOCELULÓSICA: MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL**

La única manera de aprovechar los beneficios de los biocombustibles sin ejercer presión sobre los alimentos es sacar la comida del panorama. Si bien los granos de maíz y el jugo de caña son las fuentes tradicionales de etanol, también se puede fabricar con tallos, hojas e incluso aserrín: productos vegetales secundarios que suelen desecharse, quemarse o reinvertirse en la tierra. Son sustratos más económicos pero más complejos que la glucosa y sacarosa, y pueden ser convertidos en productos útiles mediante procesos de fermentación. Desde el punto de vista económico, se requiere que el residuo agroindustrial se encuentre concentrado en ciertas localidades, y cuyo transporte sea mínimo. Estos materiales están compuestos principalmente por lignocelulosa, también llamados biocombustibles de segunda generación.

##### **1. COMPOSICIÓN DE LA LIGNOCELULOSA**

La biomasa lignocelulósica es obtenida de los residuos del campo y municipales que contienen polímeros provenientes de paredes celulares de plantas. Está formada de polímeros de carbohidratos muy complejos que no tienen un uso como alimento, estos complejos son la hemicelulosa, celulosa y lignina. La celulosa es una cadena de moléculas de glucosa que se ensambla para darle rigidez y estructura a la planta, se encuentra ligada débilmente a una matriz de hemicelulosa y ésta a su vez se encuentra ligada fuertemente a la lignina, la cual es el agente que adhiere las paredes celulares y da flexibilidad y rigidez a la planta.

La composición de la biomasa varía respecto a la materia prima como se muestra a continuación.

**Tabla III. 1.1** Composición de diferentes materiales lignocelulósicos<sup>(10)</sup>

Material	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina
Rastrojo de maíz	28.1	36.5	10.4
Bagazo de caña	20.4	41.3	14.9
Periódico	16	61	21
Residuos municipales Procesados	25	47	12

Los componentes de la biomasa lignocelulósica son explicados con mayor detalle a continuación.

### 1.1 LIGNINA

Es un polímero aromático, heterogéneo, ramificado, donde no existe ninguna unidad repetida definidamente, tiene una estructura compleja de diversas unidades fenil-propano, unidas por éter y enlaces carbono-carbono. La lignina contribuye a la rigidez mecánica de la pared celular. Tiene un alto contenido energético y sólo algunos microorganismos son capaces de descomponerla, por lo que es altamente resistente a una conversión bioquímica.

## 1.2 CELULOSA

La celulosa corresponde a la biomolécula más abundante de la biomasa terrestre. Es un homopolisacárido rígido, insoluble, que contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de glucosa, formado por la unión de moléculas de  $\beta$ -glucosa mediante enlaces  $\beta$ -1,4-O-glucosídico. Este compuesto constituido por hexosas y al ser hidrolizado produce glucosa. La celulosa tiene una estructura lineal o fibrosa, en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, haciéndolas impenetrables al agua, lo que hace que sea insoluble en agua, y originando fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales, dándole estructura y sostén a la planta.

## 1.3 HEMICELULOSA

Las poliosas o hemicelulosas son heteropolisacáridos de más alta masa molar que la celulosa, que se encuentran constituidos por diferentes unidades de monosacáridos: pentosas, hexosas y ácidos urónicos, enlazados entre sí por enlaces glicosídicos, formando estructuras ramificadas y en general amorfas. Entre estos monosacáridos destacan la glucosa, la galactosa o la fructosa. Forma parte de las paredes de las diferentes células de los tejidos del vegetal, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina. La hemicelulosa se caracteriza por ser una molécula con ramificaciones, como lo es el ácido urónico, capaz de unirse a las otras moléculas mediante enlaces que constituyen la pared rígida que protege a la célula de la presión ejercida sobre esta por el resto de las células que la rodean. Otros componentes clave contenidos en la hemicelulosa son el glucano, el xilano y el arabinan.

Para la conversión a etanol se requiere un proceso complejo de pretratamiento para poder liberar los polisacáridos de la lignina y poder

transformarlos en azúcares fermentables. Una vez obtenidos los azúcares, éstos son convertidos a etanol por medio de enzimas y posteriormente son concentradas soluciones de etanol diluido a etanol anhidro mediante el proceso descrito en las siguientes secciones.

## 2. RENDIMIENTOS Y RAZONES ENERGÉTICAS DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

De acuerdo con la Junta de Energía Mundial, la conversión de tan sólo el 5% de la biomasa mundial (aproximadamente 13.5 billones de toneladas) a etanol sería suficiente para cubrir el 26% de las necesidades energéticas mundiales. Diversos estudios demuestran que en comparación con el etanol a base de maíz, el etanol de celulosa ofrece de 3 a 4 veces mayor reducción en los gases de invernadero.<sup>15</sup>

Un análisis comparativo entre las materias primas provenientes de residuos lignocelulósicos y otros cultivos energéticos que demuestre el balance de energía fósil, el cual, representado por la cantidad de energía entregada por el etanol entre la energía de entrada de combustible fósil, resulta en la tabla expuesta a continuación.

**Tabla III.2.1** Balances de energía para etanol y gasolina<sup>(10)</sup>

Combustible y Materia Prima	Balance de energía fósil
Lignocelulosa	2 – 36
Caña de azúcar	~ 8
Trigo	~ 2
Maíz	~ 1.5
Gasolina	~ 0.8

Estas razones nos muestran que la eficiencia más alta es obtenida a partir de la biomasa lignocelulósica y reitera la propuesta de tomar ésta como la materia prima óptima para nuestro proceso.

Los rendimientos de producción de etanol obtenidos a partir de diferentes

tipos de biomasa por tonelada en base seca serán aquellos que nos den la pauta para tomar la decisión de materia prima lignocelulósica a usar para nuestro proceso.

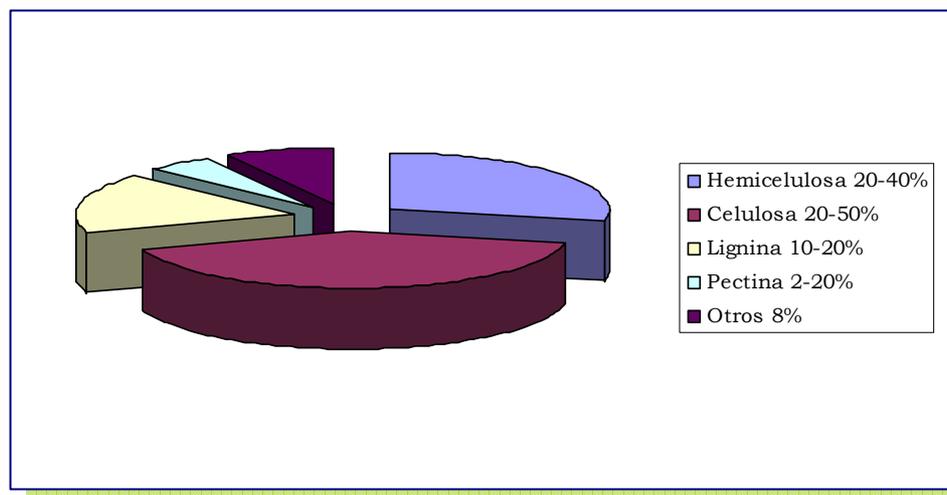
**Tabla III.2.2** Rendimiento de etanol/ ton base seca

Materia prima	Litros de etanol
Bagazo de caña	424
Rastrojo de maíz	428
Paja de arroz	416
Residuos forestales	310
Aserrín	382

Observando que el rastrojo de maíz y bagazo de caña son las materias primas de mayor conversión, se hace un breve análisis de ambos residuos agrícolas para hacer la selección final.

## 2.1 BAGAZO DE CAÑA

Se llama así a todos los residuos obtenidos después de haber hecho una extracción del jugo de azúcar en un ingenio cañero. Así como los residuos que son dejados en el campo después de ser cosechada la caña equivalentes a un 30% de biomasa, dichos que son quemados con el propósito de eliminar insectos o tener mejor acceso al área. La composición promedio del rastrojo de caña se ejemplifica en el siguiente gráfico.



**Figura III.2.1.** Composición del bagazo de caña de azúcar<sup>10</sup>

### 2.1.1 PRODUCCIÓN DE BAGAZO EN MÉXICO

El bagazo de caña en nuestro país se encuentra concentrado en los ingenios de los estados de Veracruz, Jalisco y Morelos, entre otros. Por zafra se producen aproximadamente 14.1 millones de toneladas de bagazo, los cuales se encuentran concentrados en aproximadamente 60 ingenios. Generalmente, el bagazo de caña es almacenado y luego suministrado en las calderas para genera vapor para orientarlo al proceso, o bien para generar electricidad. También la industria mexicana utiliza el bagazo de caña para la producción de papel. En promedio, el bagazo mexicano contiene 42% de celulosa, 28% de hemicelulosa. Técnica y económicamente, para transformarlo a etanol es recomendable llevar a cabo una hidrólisis química de la fracción hemicelulósica, generando jarabes que contienen xilosa, arabinosa y glucosa, en una relación de 80, 5 y 15%, y una hidrólisis enzimática de la fracción celulósica, para generar glucosa y celobiosa.

Utilizando esta tecnología pueden ser convertidos 7.05 millones de litros de etanol por día o equivalente al 7% en volumen de la gasolina consumida por día en nuestro país. El 3% de etanol en volumen es el necesario para que la gasolina tenga el equivalente oxigenante que actualmente usa PEMEX. Es decir, la conversión del bagazo de caña nacional en etanol alcanzaría para oxigenar el 100% del consumo de gasolina nacional y habría aún excedentes de 4 millones de litros de etanol por día, los cuales podrían ser utilizados como combustible. Un escenario más realista sería utilizar aproximadamente 6.05 millones de toneladas de bagazo por año para producir el equivalente a los 300 millones de litros de etanol necesarios para oxigenar toda la gasolina nacional y evitar el uso de éteres terbutílicos.

Las hectáreas de caña de azúcar cosechadas en México representan 1.76% de la superficie total cultivable del país. El promedio del rendimiento en campo de cosecha de caña en México es de 70 toneladas por hectárea, mientras que en Brasil se llegan a obtener hasta 120. Considerando que se pudiesen obtener cosechas promedio de 105 ton/ha (50% más que el

actual), se requeriría de un 3.7% más de las superficie cultivable del país, para así poder proveer, en volumen, el 50% del combustible usado en autotransporte nacional. En este caso no sería necesario procesar la caña para obtener azúcar cristalina, únicamente con moler y obtener las mieles de la misma, se podrían obtener una corriente de jarabe de sacarosa y el bagazo de caña, este último para ser procesado para obtener azúcares fermentables, y posteriormente fermentar en conjunto o por separado ambas corrientes con enzimas eficientes capaces de aumentar los rendimientos. Considerando este ejemplo, se demuestra el potencial que tiene la industria de la caña de azúcar para solventar problemas del país en el ramo energético.

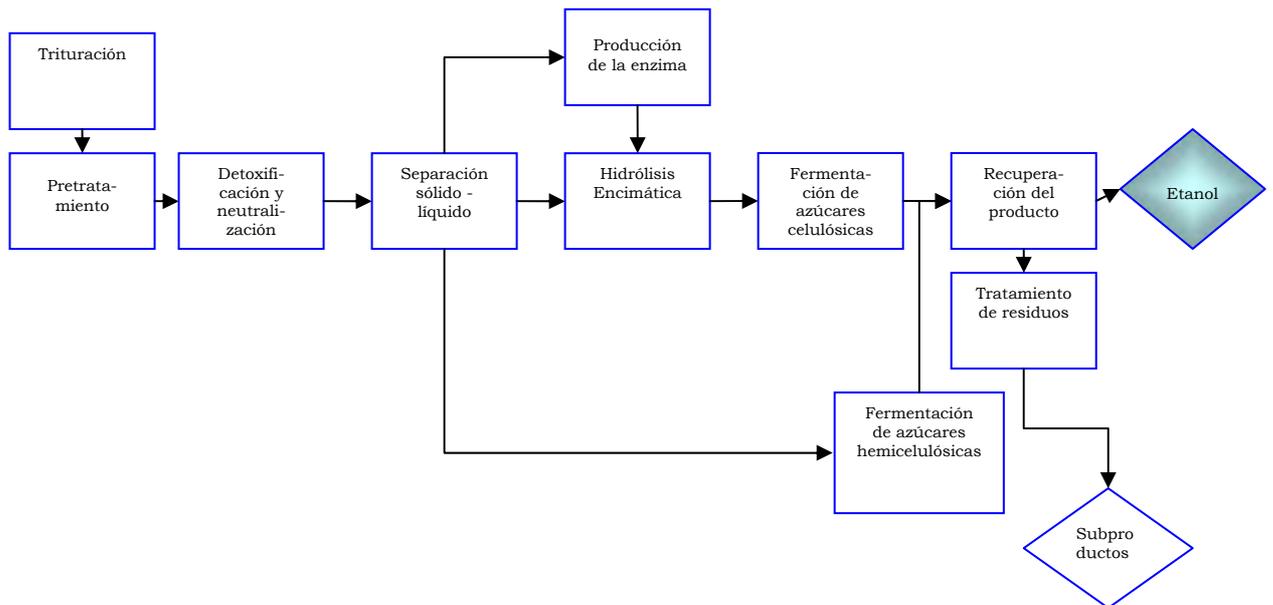
Evaluaciones tecnicoeconómicas para evaluar la viabilidad de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña indican que en México económicamente es factible producir etanol anhidro mediante las tecnologías mencionadas, obteniendo un costo de producción de 0.36 dólares por litro de etanol, siendo los factores que afectan mayoritariamente este valor el precio del bagazo, el rendimiento de conversión de azúcares en etanol, la adición de nutrientes a los medios de fermentación, el consumo de energía durante las etapas de destilación y secado de etanol, y la adición de enzimas durante la etapa de sacarificación y fermentación simultánea. Estos resultados indican que es necesario el mejoramiento de microorganismos y de procesos para reducir los costos de producción.

**Tabla III. 2.3** Estadísticas de la caña de azúcar y bagazo en México en el período 2005/2006 <sup>(9)</sup>

Concepto	Unidad	2005/2006
Superficie industrializada	Has	658,776
Caña por hectárea	Tons	71.79
Precio por ton de caña	\$/Ton	386.13
Bagazo obtenido	Tons	13,742,927
Unidades en operación	Ingenios	57.00
Duración	Días	164.00
Bagazo en caña	%	29.05
Humedad en bagazo	%	51.04
Sacarosa en bagazo	%	2.39
Bagazo empacado	Tons	235,344

## 2.1.2 DESCRIPCIÓN DE PROCESO INDUSTRIAL DE CONVERSIÓN DE BAGAZO DE CAÑA A BIOETANOL

**Figura III.2.2.** Diagrama de flujo simplificado del proceso de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar



Para la conversión a etanol se requiere un proceso complejo de pretratamiento para transformar los polímeros en azúcares fermentables. Una vez obtenidas las azúcares estos son convertidos en etanol por medio de levaduras o bacterias y posteriormente se concentran soluciones de etanol diluido para producir etanol anhidro. En general la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica se compone de cinco pasos:

1. Pretratamiento de la biomasa
2. Hidrólisis de celulosa y hemicelulosa
3. Fermentación
4. Separación (Destilación y absorción)
5. Tratamiento de efluentes

El bagazo lavado y triturado es alimentado al pretratamiento empezando por un evaporador de baja presión a aproximadamente 100°C. Este vapor remueve los no condensables que pueden ocupar espacio en el reactor y permite que aproximadamente un tercio del calor requerido por las reacciones de prehidrólisis sea dado por el vapor.

Durante la etapa de prehidrólisis la mayor parte de la hemicelulosa y una pequeña porción de la celulosa que contiene el bagazo, se convierten en azúcares solubles; esta conversión es producto de reacciones de hidrólisis catalizadas por ácido sulfúrico diluido (1.1%) a una temperatura igual a 190°C y 12.1 atm de presión. Estas condiciones también solubilizan parte de la lignina contenida en la materia prima y exponen a la celulosa para la hidrólisis enzimática subsecuente. También se forman productos degradados de las azúcares, principalmente furfural. Las reacciones son las siguientes:

**Tabla III. 2.3** Reacciones en la etapa de Prehidrólisis

Reacción	Reactivo	Conversión (%)
$(Glucan)_n + nH_2O \rightarrow nGlucosa$	Glucan	8.4
$(Xilan)_n + nH_2O \rightarrow nXilosa$	Xilan	97.5
$(Arabinan)_n + nH_2O \rightarrow nArabinosa$	Arabinan	97.5
$(Xilan)_n \rightarrow nFurfural + 2nH_2O$	Xilan	5
$(Arabinan)_n \rightarrow nFurfural + 2nH_2O$	Arabinan	5
$(Lignina)_n \rightarrow nLignina\ soluble$	Lignina	5
$Acetato \rightarrow Ac.Acético$	Acetato	100

Después del reactor de prehidrólisis, el líquido hidrolizado y los sólidos son flasheados en frío a 1 atm, lo cual vaporiza una gran cantidad de agua, algo de acético (7.8%) y la mayoría del furfural (61%). La remoción de estos aldehídos heterocíclicos es benéfica, ya que pueden ser tóxicos para los microorganismos utilizados en la fermentación. El vapor del flash (100°C) es utilizado para precalentar la alimentación a la columna de destilación hasta 95°C, quedando completamente condensado.

Después de un tiempo de residencia de 15 minutos en el tanque flash, la pulpa del hidrolizado con 21% de sólidos insolubles es lavada y prensada para separar la porción líquida del hidrolizado que contiene ácido sulfúrico y reducir la toxicidad de la corriente que será fermentada. La prensa neumática logra la separación sólido-líquido forzando el paso de aire comprimido (125 psig) a través de la pulpa de biomasa y el medio filtrante para eliminar el líquido lo más posible y maximizar el contenido de sólidos de la torta en el filtrado. En seguida se lava la torta y el líquido es enfriado a 50°C para el proceso de aumentar su pH.

El pH del líquido se eleva hasta a 10 utilizando hidróxido de calcio, en seguida se neutraliza a un pH de 4.5 (pH de fermentación) y se precipita. Después de un tiempo de residencia de 4 horas que permita la formación de cristales de tamaño adecuado para poder ser filtrado en el ciclón rotatorio y mezclado posteriormente con los sólidos (celulosa) y agua antes de ser enviados a la etapa de sacarificación y co-fermentación.

La hidrólisis o sacarificación ocurre primero y separada de la fermentación. La enzima celulasa y el hidrolizado son añadidos a un tren de cinco contenedores de un millón de galones. El tiempo de residencia es de 36 horas a 65°C. La celulasa es de hecho una colección de encimas compuesta por: (1) endoglucanasas, que atacan al azar a la fibra de celulosa para reducir la polimerización rápida; (2) exoglucanasas, las cuales atacan las terminaciones de las fibras de celulosa, permitiéndole hidrolizar altamente celulosa cristalina; (3)  $\beta$ -glucosidasa, la cual hidroliza la celubiosa a glucosa. Ésta es alimentada a una rapidez de 12 IFPU (unidades internacionales de filtrado de papel) por gramo de celulosa.

La pulpa sacarificada contiene 12.6% de azúcares, incluyendo 7% de glucosa y 4% de xilosa. Ésta es enfriada a 41°C y se envía el 10 % al área de producción de la semilla, el cual opera por lotes, cada uno dura 24 horas.

**Tabla III. 2.4** Reacciones en la etapa de Sacarificación

Reacción	Reactivo	Conversión (%)
$(Glucan)_n + nH_2O \rightarrow nGlucosa$	Glucan	95

La simulación de la hidrólisis de la celulosa es modelada para ocurrir en los contenedores de sacarificación hasta que se logre entender mejor que proporción de la hidrólisis ocurre en la fermentación.

Para la fermentación se utiliza la bacteria *Z. mobilis* como biocatalizador para transformar la glucosa, la arabinosa y la xilosa en etanol. Esta bacteria crece en un tren de cinco contenedores.

**Tabla III. 2.5** Reacciones en la etapa de Fermentación

Reacción	Reactivo	Conversión (%)
$Glucosa \rightarrow 2Etanol + 2CO_2$	Glucosa	95
$Glucosa + CSL + 0.018DAP \rightarrow 6Z.mobilis + 2.4H_2O + 0.3O_2$	Glucosa	2
$Glucosa + 2H_2O \rightarrow 2Glicerol + O_2$	Glucosa	0.4
$Glucosa + 2CO_2 \rightarrow 2Ac.succinico + O_2$	Glucosa	0.6
$Glucosa \rightarrow 3Ac.Acético$	Glucosa	1.5
$Glucosa \rightarrow 2Ac.Lácico$	Glucosa	0.2
$3Xilosa \rightarrow 5Etanol + 5CO_2$	Xilosa	85
$Xilosa + 0.835CSL + 0.015DAP \rightarrow 5Z.mobilis + 2H_2O + 0.25O_2$	Xilosa	1.9
$3Xilosa + 5H_2O \rightarrow 5Glicerol + 2.5O_2$	Xilosa	0.3
$Xilosa + H_2O \rightarrow Xilitol + 0.5O_2$	Xilosa	4.6
$3Xilosa + 5CO_2 \rightarrow 5Ac.Succinico + 2.5O_2$	Xilosa	0.9
$2Xilosa \rightarrow 5Ac.Acético$	Xilosa	1.4
$3Xilosa \rightarrow 5Ac.Lácico$	Xilosa	0.2

\*CSL (licor de maíz) y el DAP (difosfato de amonio) son fuentes de nitrógeno requerido para el crecimiento de la *Z. mobilis*.

Además de que las azúcares se fermenten a etanol, también se convierten en otros productos debido a la presencia de organismos contaminantes.

Al final del tren de fermentación hay un tanque recolector donde el fermentado permanece 4 horas antes de pasar a la destilación

La destilación y absorción por tamizado molecular son operaciones utilizadas para recuperar el etanol (99.5%) del fermentado. La destilación se lleva a cabo en dos columnas, la primera llamada columna del fermentado, remueve el CO<sub>2</sub> disuelto y la mayoría del agua; la segunda (torre rectificadora) concentra el etanol hasta casi una composición azeotrópica.

El agua de la mezcla azeotrópica es removida por una absorción de tamizado molecular en fase vapor. La regeneración de estas columnas requiere que una mezcla de etanol y agua sea reciclada a la destilación para la recuperación.

### 2.2.3 CONVERSIÓN DE BAGAZO DE CAÑA A ETANOL

Haciendo una integración de todas las posibles formas de obtención de etanol a partir de la caña de azúcar se tendría que se producirían 300L/ton de caña distribuidos de la siguiente forma:

**Tabla II.2.4** Integración de procesos de conversión de etanol a partir de caña de azúcar\*

1 ton de caña de azúcar	L de etanol
112 kg de azúcar	150
300 kg de bagazo	127
40 kg de melaza	23
<b>Total</b>	<b>300</b>

\*Estos porcentajes de conversión pueden variar según la tecnología empleada durante la fermentación; en este caso se considera la más alta

conversión encontrada hasta el momento de redactar este trabajo, y es llevando a cabo la fermentación con la bacteria acellerasa, recientemente desarrollada por DANISCO.

## 2.2 RASTROJO DE MAÍZ

El rastrojo de maíz consiste de tallos, hojas, mazorcas y residuos que permanecen en el campo después de la cosecha del maíz. Si es dejado en el campo, su putrefacción crea una capa de materia orgánica que reduce la erosión y protege el suelo durante vientos o intensas lluvias.

El rastrojo contiene considerables cantidades de celulosa, un polímero de glucosa beta-ligado que es mucho más difícil romper en monómeros de glucosa que el alfa-ligado contenido en el almidón. Además contiene hemicelulosa, que es un polímero mucho más complejo de varios azúcares. Las azúcares predominantes en la hemicelulosa son la xilosa y la arabinosa, las cuales pueden ser fermentadas a etanol por medio de un microorganismo adecuado. El rendimiento máximo del rastrojo a etanol es de 107 galones por tonelada seca.

El proceso de producción de etanol es básicamente el mismo que para el bagazo de caña, únicamente cambian las composiciones de los compuestos lignocelulósicos en la alimentación. La producción de bioetanol a partir del rastrojo de maíz ha sido mucho más desarrollada que cualquier otro tipo de biomasa. En Estados Unidos el National Renewable Energy Laboratory (NREL) ha estudiado este proceso desde hace 10 años y constantemente ha realizado mejoras en la eficiencia del mismo. Se cuentan actualmente con plantas piloto de estudio y también comerciales que ya obtienen etanol a partir del rastrojo de maíz. En Canadá la empresa IOGEN también realiza investigación a nivel laboratorio y comercial sobre este proceso.

Igualmente otros laboratorios se dedican al desarrollo e investigación de enzimas específicas para la transformación de biomasa lignocelulósica. Los esfuerzos científicos están dirigidos al mejoramiento de microorganismos y procesos para reducir los costos de producción de etanol a partir de la biomasa. Para este fin se requeriría de microorganismos más tolerantes a las condiciones adversas del proceso y capaces de hidrolizar la celulosa y parte de la hemicelulosa. La última enzima lanzada al mercado fue la Accellerase 1000 (15 de octubre del 2007), capaz de reducir la biomasa celulósica de lignocelulosa a azúcares fermentables, pudiendo participar simultáneamente en las etapas de sacarificación y fermentación sin la necesidad de que se utilicen enzimas diferentes para cada proceso, incrementa la velocidad de reacción en la sacarificación y mejora el rendimiento, a parte de ser versátil con respecto a la materia prima que se alimente al proceso (bagazo de caña, rastrojo de maíz, pulpa de madera).

### **3. RESUMEN DEL ANÁLISIS SOBRE LA FACTIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN MÉXICO**

En esta sección se realiza una estimación del potencial en México para la producción de etanol desde el punto de vista técnico a partir de los productos lignocelulósicos, considerándose el potencial estimado de la generación de éstos, sin considerar para el presente trabajo, la ampliación de las tierras de cultivo de maíz y caña de azúcar.

**Tabla III.3.1** Cultivos en México, residuos lignocelulósicos y posible producción anual de etanol<sup>[10]</sup>

Materia Prima	Superficie cosechada (Miles de ha)	Producción anual (millones toneladas)	Producción de etanol (Millones de litros/año)	Energía anual (PJ)
Maíz	8436	22.0	5,490	116
Melaza		1.92	480	10
Azúcar	680	5.36	2,533	53
Bagazo		14.4	2,375	50
Madera	16300	22.5-62.3	7421 - 20,550	156 – 436
Rastrojo de maíz		105.45	3,230	68
Rastrojo de sorgo		10.1	3,093	65
Residuos forestales		2.0	660	14
RSM (papel)		4.5	743	16
		<b>Total</b>	26025-39,154	548.1-828

\*Los valores de conversión reportados en esta tabla no consideran el empleo de la última tecnología desarrollada hasta el momento de redactar este trabajo.

Tomando en cuenta el rendimiento de conversión a etanol, la razón energética, la producción actual y potencial del país, así como los costos de producción de etanol en base a las distintas fuentes de biomasa lignocelulósica, el bagazo de caña resulta el compuesto más viable para ser transformado.

#### 4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE BAGAZO COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

##### Ventajas

- La caña de azúcar tiene una gran capacidad de almacenar carbono de la atmósfera mediante su proceso fotosintético y desarrollar una biomasa (entre 190 y 200 tons) con la cual se puede obtener sacarosa.
- El 100% de la energía térmica y eléctrica del proceso se puede

generar por la combustión de los residuos no fermentables, teniendo además un excedente del 12% de la energía consumida por el proceso al utilizar el biogas desprendido.

- Reutilización de materiales que son desecho de otras actividades.
- Menores precios de materia prima.
- La producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica es mayor comparada con los cultivos comunes como maíz y caña, los cuales sólo podrían llegar hasta una producción máxima cuando choquen con los intereses alimenticios del país.
- Las emisiones de gases de efecto invernadero a partir de maíz generan entre 2.75 y 3.0 unidades de energía fósil para producir una unidad de energía renovable, mientras que la producción a partir de maíz requiere 0.95 unidades de energía fósil por unidad de energía renovable.<sup>(14)</sup>

### **Desventajas**

- El costo de inversión en la infraestructura de la planta de producción
- El costo de transporte de materia prima si la planta no se encuentra dentro del ingenio azucarero.
- El potencial técnico de la obtención de etanol del bagazo compite directamente con el uso del bagazo como combustible para generación de electricidad de procesos o para la producción de celulosa.

## **V. MOTIVACIÓN**

La preocupación del hombre por promover el desarrollo sustentable y vivir en un planeta más limpio y sano lo ha llevado a desarrollar nuevas fuentes de energía entre las que destacan los combustibles no contaminantes o biocombustibles para sustituir a los actuales de origen fósil y disminuir las emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes minimizando los efectos adversos en los ecosistemas.

Dada la incertidumbre de la disponibilidad de combustibles fósiles se ha vuelto indispensable el desarrollo de tecnologías biológicas sustentables para la producción de energéticos. La producción de etanol como combustible dentro de las nuevas tecnologías energéticas, ha tenido un enorme desarrollo desde los 80's. Por esta razón, es indispensable conocer los diferentes procesos industriales de obtención de bioetanol a nivel mundial así como sus características principales, funcionamiento, rendimiento y costos de producción, para así poder evaluar la opción más conveniente a la situación económica actual del país. Lo anterior con el fin de contener el futuro agotamiento del petróleo y evitar una crisis energética, manteniendo una autosuficiencia energética nacional.

Orientar la agroindustria hacia la instalación de plantas para el procesamiento de los productos agropecuarios que pudieran ser empleados en la producción de etanol y otros bioenergéticos; promover y fomentar la producción y desarrollo de biocombustibles de uso automotriz; fomentar la producción, distribución y comercialización de bioenergéticos provenientes de biomasa; fomentar la creación de cadenas productivas relacionadas con los biocombustibles; establecer las bases para impulsar y proporcionar apoyos a la producción, tecnificación, comercialización y empleo de los bioenergéticos; y coadyuvar al desarrollo rural del país, estableciendo acciones de impulso a la productividad y competitividad a partir de la diversificación energética, son

algunas razones que nos motivan en la realización del estudio de la producción de bioetanol como alternativa a los combustibles fósiles en nuestro país.

Para cualquiera de los escenarios de introducción del etanol como alternativa energética, es indispensable realizar el análisis de cultivos mexicanos propensos a ser transformados en bioetanol en virtud de la demanda de recursos naturales asociados a la competencia de la producción de alimentos.

Sustituir el uso de MTBE con mezclas de gasolina-etanol y posteriormente sustituir gradualmente a la gasolina con etanol o hidrógeno.

## VI. HIPÓTESIS

Retomando el análisis de la demanda y producción de etanol necesaria a partir del bagazo para cubrir los escenarios propuestos para la introducción de biocombustibles en México, expuestos en el capítulo 3, sabiendo que la producción de bagazo en México corresponde a 13.742 millones de toneladas, valores de producción reportados por la Unión Nacional de Cañeros para el año 2005/2006, y considerando que se pueden obtener 424 L de etanol por tonelada de bagazo, realizamos un cálculo sencillo de la demanda estimada y la producción de bagazo, obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla III. 5.2** Tabla comparativa demanda-producción de etanol a partir de bagazo

Producción de bagazo	ton/año	13,742,927
Etanol a partir de bagazo	L/año	5,827,001,048
Demanda escenario 1	L/año	411,900,000
Demanda escenario 2	L/año	1,110,600,000
Demanda escenario 3b	L/año	4,406,300,000

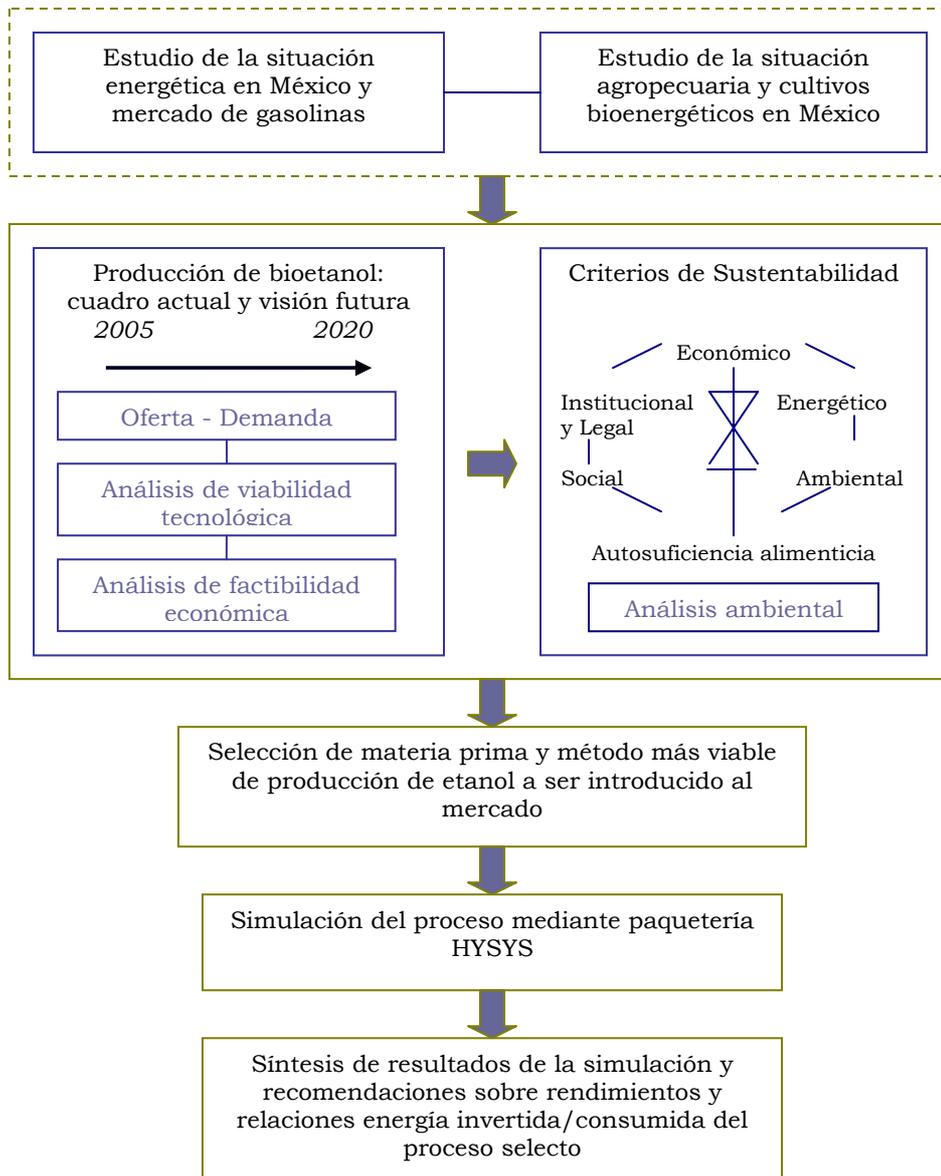
\*Considerando que en el proceso se empleara la última tecnología con una conversión de bagazo a etanol de 424L/ton de bagazo seco.

Basándonos en éstos, las hipótesis son las siguientes:

- Es posible cubrir las demandas de los todos los escenarios con la producción anual de bagazo de caña en México.
- La planta simulada es capaz de producir 36,760 L/h de etanol a partir de 102 toneladas de bagazo húmedo.
- Para cubrir la demanda de etanol de cada escenario con plantas procesadoras de 102 ton de bagazo/h se necesitan 1.3 plantas para el escenario 1, 3.5 plantas para el escenario 2, y 14 para el escenario 3.

## VII. METODOLOGÍA

La estrategia de trabajo que se siguió se ejemplifica en el siguiente diagrama de bloques:



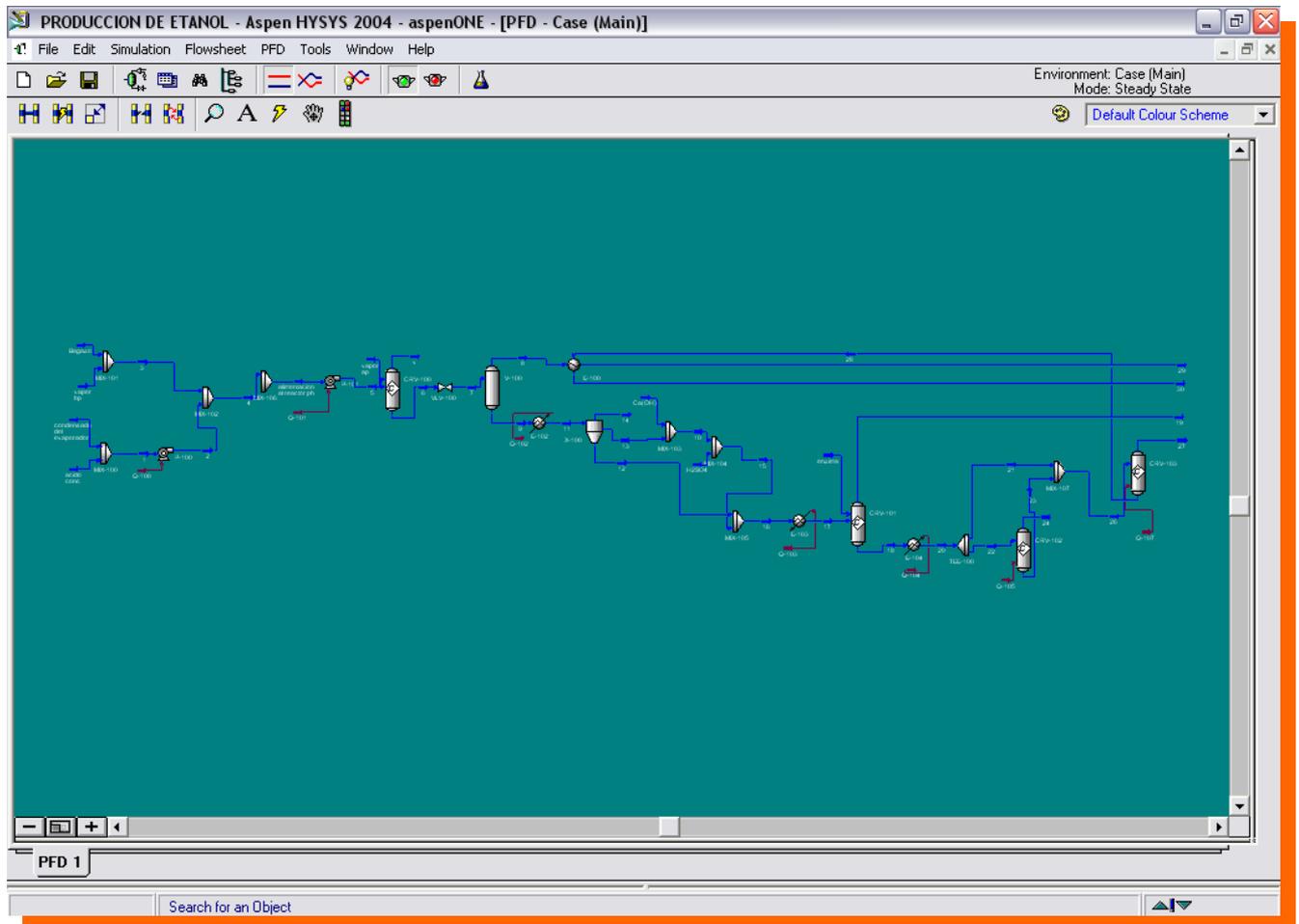
Los pasos necesarios que llevaron a cabo para la realización de la simulación del proceso seleccionado están totalmente interrelacionados con la estructura del Simulador de Procesos que seleccionó para tal propósito.

Selección del simulador de procesos a utilizar: ASPEN HYSYS 2004 fue el simulador utilizado para reproducir la planta de producción de etanol a partir de bagazo de caña de azúcar.

Los criterios de selección fueron los siguientes:

- Disponibilidad del simulador en el laboratorio de Simulación y Optimización de Procesos de la Facultad de Química de la UNAM.
- Ambiente de simulación amigable.
- Presenta la opción de introducir al sistema los componentes que no incluye su base de datos, alimentando únicamente propiedades físicas básicas como peso molecular y densidad (obtenidas de la referencia No. 13).
- Cuenta con métodos de cálculo y convergencia adecuados para calcular las propiedades de los componentes agregados.
- Permite reproducir los fenómenos físico químicos ocurridos a condiciones particulares durante el proceso industrial de producción de etanol a partir de bagazo de caña, simulando las operaciones unitarias en equipos equivalentes a los reales.
- Ofrece la posibilidad de optimizar el proceso.

El ambiente de simulación se muestra en la siguiente figura:



**Figura VII.1.** Diagrama de flujo de proceso en el ambiente de simulación

Se tomo como base la simulación del proceso de producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica reportado en la referencia número 13.

Cada una de las operaciones unitarias simuladas en cada etapa del proceso, se indican en un diagrama de flujo en la sección siguiente. Todos los reactores se simularon como reactores estequiométricos ingresando en cada uno, la información de las reacciones químicas correspondientes a cada etapa indicada en el capítulo IV. Las operaciones unitarias de separación se llevaron a cabo con la ecuación de estado de Peng Robinson.

El alcance de la simulación no considera la destilación del azeótropo etanol-agua, ya que el análisis o estudio de esta parte del proceso en particular, no forma parte de los objetivos del presente trabajo, pretendiendo únicamente obtener un resultado cuantitativo sobre el bioetanol producido mediante el proceso simulado, con el fin de contar con los datos necesarios para poder desarrollar la conclusión.

Los resultados reportados a continuación provienen de una sola simulación corrida para el estudio de los 3 escenarios planteados bajo las condiciones definidas. El estudio o análisis de la simulación del proceso bajo un juego de diferentes condiciones sería objeto de otro trabajo.

## VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

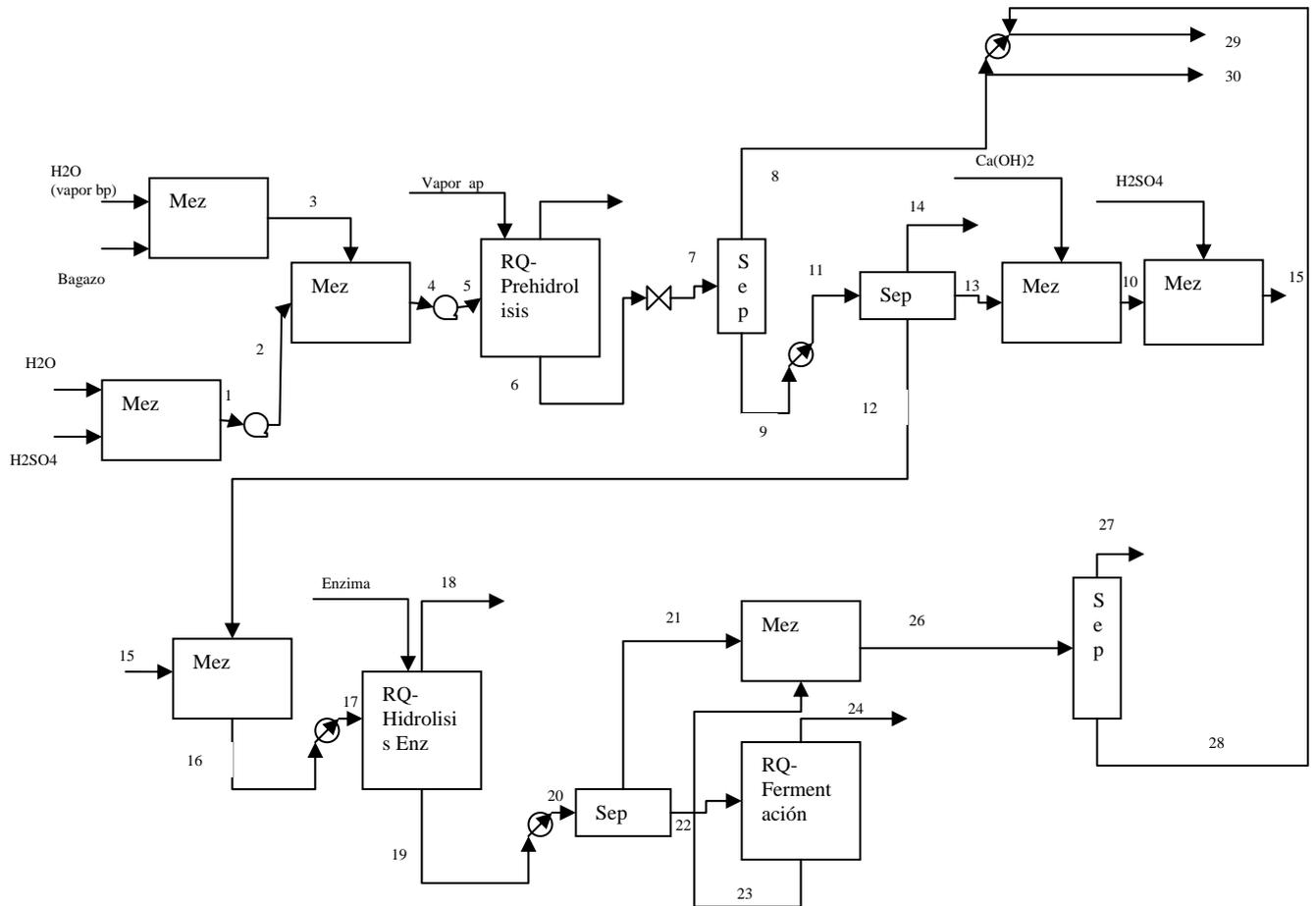
En esta sección se presentan la tabla de propiedades físicas de los componentes que se agregaron a la base de datos del simulador, el diagrama de flujo del proceso simulado por bloques que indican la operación unitaria simulada y las corrientes que participan en cada paso, así como las tablas de propiedades físicas de los componentes que se agregaron a la base de datos del simulador, el balance de materia por corriente y la discusión de resultados.

### 1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS COMPONENTES

Las propiedades de los compuestos que no se encontraron en la base de datos del simulador utilizado, fueron obtenidas a partir del reporte del NREL(13) y fueron agregados a la base del sistema HYSYS, donde se propusieron como compuestos hipotéticos, los cuales requieren únicamente de la especificación de su peso molecular y su densidad.

Componente	PM	$\rho$ (kg/L)
Arabinosa	150.14	1580
Glucosa	180.16	1181
Xilosa	150.132	1525
Glucan	162.1436	1440
Arabinan	132	1300
Xilan	132.117	1300
Lignina	122.493	1060

## 2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESOSIMULADO POR BLOQUES



### 3. BALANCE DE MATERIA POR CORRIENTE

Componente	unidades	1	2	3	4	5	6
Temperatura	°C	73.09	73.10	73.95	73.62	73.83	169.10
Presión	atm	3.00	3.60	1.00	1.00	13.00	13.00
Fracción vapor		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujo total	kg/h	100,360.00	100,360.00	141,473.00	241,833.00	241,833.00	263,086.29
Furfural	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	742.86
Agua	kg/h	98,265.00	98,256.00	54,049.80	152,305.80	152,305.80	180,798.73
Arabinosa	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4,679.11
Glucosa	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	357.99
Xilosa	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3,466.71
H2SO4	kg/h	2,104.00	2,104.00	0.00	2,104.00	2,104.00	2,104.00
Glucan	kg/h	0.00	0.00	38,356.22	38,356.22	38,356.22	35,134.30
Arabinan	kg/h	0.00	0.00	4,467.94	4,467.94	4,467.94	127.34
Xilan	kg/h	0.00	0.00	16,553.88	16.00	16,553.88	471.79
Lignina	kg/h	0.00	0.00	19,205.00	553.88	19,205.71	19,205.71
Ca(OH)2	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sol.solubles	kg/h	0.00	0.00	8,839.00	8,839.00	8,839.45	8,839.45
Etanol	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6,792.99
CO2	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	365.31
Ac.láctico	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
enzima	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Componente	unidades	7	8	9	10	11	12
Temperatura	°C	98.08	98.08	98.08	49.49	50.00	50.00
Presión	atm	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fracción vapor		0.17	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujo total	kg/h	263,086.29	38,231.17	224,855.12	152,937.26	224,855.12	74,312.86
Furfural	kg/h	742.86	195.32	547.54	511.72	547.54	35.83
Agua	kg/h	180,798.73	32,390.06	14,408.67	138,697.83	148,408.67	9,710.84
Arabinosa	kg/h	4,679.11	0.00	4,679.11	4,372.96	4,679.11	306.17
Glucosa	kg/h	357.99	0.00	357.99	334.57	357.99	23.42
Xilosa	kg/h	3,466.71	0.01	3,466.70	3,239.87	3,466.70	226.84
H2SO4	kg/h	2,104.00	0.00	2,104.00	1,966.33	2,104.00	137.67
Glucan	kg/h	35,134.30	0.00	35,134.30	3.01	35,134.30	35,131.29
Arabinan	kg/h	127.34	0.00	127.34	0.01	127.34	127.33
Xilan	kg/h	471.79	0.00	471.79	0.04	471.79	471.75
Lignina	kg/h	19,205.71	0.00	19,205.71	1.65	19,205.71	19,204.07
Ca(OH)2	kg/h	0.00	0.00	0.00	2,395.00	0.00	0.00
Sol.solubles	kg/h	8,839.45	0.00	8,839.45	0.76	8,839.45	8,838.69
Etanol	kg/h	6,792.99	5,280.67	1,512.32	1,413.37	1,512.32	98.96
CO2	kg/h	365.31	365.12	0.19	0.18	0.19	0.01
Ac.láctico	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
enzima		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

*“Análisis de la Producción de Bioetanol como Alternativa a los Combustibles Fósiles”*

Componente	unidades	13	14	15	16	17	18
Temperatura	°C	50.00	50.00	49.30	49.54	65.00	97.19
Presión	atm	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fracción vapor		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujo total	kg/h	150,542.26	0.00	154,122.26	228,435.12	228,435.12	221,884.68
Furfural	kg/h	511.72	0.00	511.72	547.54	547.52	491.65
Agua	kg/h	138,697.83	0.00	138,697.83	148,408.67	148,408.67	136,819.18
Arabinosa	kg/h	4,372.95	0.00	4,372.95	4,679.11	4,679.11	0.00
Glucosa	kg/h	334.57	0.00	334.57	357.99	357.99	37,522.36
Xilosa	kg/h	3,293.87	0.00	3,239.87	3,466.70	3,466.70	3,466.70
H2SO4	kg/h	1,966.33	0.00	3,151.33	3,289.00	3,289.00	3,289.00
Glucan	kg/h	3.01	0.00	3.01	35,134.30	35,134.30	1,686.45
Arabinan	kg/h	0.01	0.00	0.01	127.34	127.34	127.34
Xilan	kg/h	0.04	0.00	0.04	471.79	471.79	471.79
Lignina	kg/h	1.65	0.00	1.65	19,205.71	19,205.71	19,205.71
Ca(OH)2	kg/h	0.00	0.00	2,395.00	2,395.00	2,395.00	2,395.00
Sol.solubles	kg/h	0.76	0.00	0.76	8,839.45	8,839.45	8,839.45
Etanol	kg/h	1,413.37	0.00	1,413.37	1,512.32	1,512.32	746.05
CO2	kg/h	0.18	0.00	0.18	0.19	0.19	0.00
Ac.láctico	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
enzima		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Componente	unidades	19	20	21	22	23	24
Temperatura	°C	97.19	41.00	41.00	41.00	41.22	41.22
Presión	atm	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fracción vapor		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Flujo total	kg/h	13,374.70	221,884.68	199,696.21	22,188.47	20,214.86	1,973.60
Furfural	kg/h	55.89	491.65	442.48	49.16	48.84	0.33
Agua	kg/h	7,873.24	136,819.18	123,137.26	13,681.92	13,617.12	64.80
Arabinosa	kg/h	4,679.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Glucosa	kg/h	0.00	37,522.36	33,770.13	3,752.24	375.22	0.00
Xilosa	kg/h	0.00	3,466.70	3,120.03	346.67	63.33	0.00
H2SO4	kg/h	0.00	3,289.00	2,960.10	328.90	328.90	0.00
Glucan	kg/h	0.00	1,686.45	1,517.80	168.64	168.64	0.00
Arabinan	kg/h	0.00	127.34	114.60	12.73	12.73	0.00
Xilan	kg/h	0.00	471.79	424.61	47.18	47.18	0.00
Lignina	kg/h	0.00	19,205.71	17,285.14	1,920.57	1,920.57	0.00
Ca(OH)2	kg/h	0.00	2,395.00	2,155.50	239.50	239.50	0.00
Sol.solubles	kg/h	0.00	8,839.45	7,955.50	883.84	883.94	0.00
Etanol	kg/h	766.27	746.05	671.45	74.61	1,816.57	126.99
CO2	kg/h	0.19	0.00	0.00	0.00	3.90	1,781.48
Ac.láctico	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
enzima		0.00	6,824.00	6,141.60	682.40	682.40	0.00

*“Análisis de la Producción de Bioetanol como Alternativa a los Combustibles Fósiles”*

Componente	unidades	26	27	28	29	30	acido conc.
Temperatura	°C	41.00	41.59	41.59	96.08	95.00	20.00
Presión	atm	1.00	1.00	1.00	1.00	4.00	3.40
Fracción vapor		0.00	1.00	0.00	0.45	0.00	0.00
Flujo total	kg/h	219,911.07	19,055.67	200,855.30	38,231.17	200,855.30	2,104.00
Furfural	kg/h	491.32	3.05	488.27	195.32	488.27	0.00
Agua	kg/h	136,754.38	367.34	136,117.04	32,390.06	136,117.04	0.00
Arabinosa	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Glucosa	kg/h	34,145.35	0.00	1,707.27	0.00	1,707.27	0.00
Xilosa	kg/h	3,189.37	0.00	478.41	0.01	478.41	0.00
H2SO4	kg/h	3,289.00	0.00	3,289.00	0.00	3,289.00	0.00
Glucan	kg/h	1,686.45	0.00	1,686.45	0.00	1,686.45	0.00
Arabinan	kg/h	127.34	0.00	127.34	0.00	127.34	0.00
Xilan	kg/h	471.79	0.00	471.79	0.00	471.79	0.00
Lignina	kg/h	19,205.71	0.00	19,205.71	0.00	19,205.71	0.00
Ca(OH)2	kg/h	2,395.00	0.00	2,395.00	0.00	2,395.00	0.00
Sol.solubles	kg/h	8,839.45	0.00	8,839.45	0.00	8,839.45	0.00
Etanol	kg/h	2,488.02	1,279.33	19,185.11	5,280.67	19,185.11	0.00
CO2	kg/h	3.90	17,135.95	40.47	365.12	40.47	0.00
Ac.láctico	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
enzima	kg/h	6,824.00	0.00	6,824.00	0.00	6,824.00	0.00
Componente	unidades	al. al reactor ph	bagazo	Ca(OH)2	condensado	enzima	H2SO4
Temperatura	°C	73.62	74.00	20.00	74.00	20.00	20.00
Presión	atm	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	3.40
Fracción vapor		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujo total	kg/h	241,833.00	129,966.00	2,395.00	98,256.00	6,824.00	1,185.00
Furfural	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Agua	kg/h	152,305.80	42,542.80	0.00	98,256.00	0.00	0.00
Arabinosa	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Glucosa	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Xilosa	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H2SO4	kg/h	2,104.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1,185.00
Glucan	kg/h	38,356.22	38,356.22	0.00	0.00	0.00	0.00
Arabinan	kg/h	4,467.94	4,467.94	0.00	0.00	0.00	0.00
Xilan	kg/h	16,553.88	16,553.88	0.00	0.00	0.00	0.00
Lignina	kg/h	19,205.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca(OH)2	kg/h	0.00	0.00	2,395.00	0.00	0.00	0.00
Sol.solubles	kg/h	8,839.45	19,205.71	0.00	0.00	0.00	0.00
Etanol	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ac.láctico	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
enzima	kg/h	0.00	0.00	0.00	0.00	6,824.00	0.00

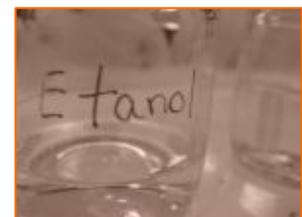
Componente	unidades	v	vapor ap	vapor bp
Temperatura	°C	169.10	268.00	73.33
Presión	atm	13.00	13.00	1.30
Fracción vapor		1.00	1.00	1.00
Flujo total	kg/h	15,980.72	37,234.00	11,507.00
Furfural	kg/h	21.72	0.00	0.00
Agua	kg/h	6,027.65	37,234.00	11,507.00
Arabinosa	kg/h	0.00	0.00	0.00
Glucosa	kg/h	0.00	0.00	0.00
Xilosa	kg/h	0.13	0.00	0.00
H2SO4	kg/h	0.00	0.00	0.00
Glucan	kg/h	0.00	0.00	0.00
Arabinan	kg/h	0.00	0.00	0.00
Xilan	kg/h	0.00	0.00	0.00
Lignina	kg/h	0.00	0.00	0.00
Ca(OH)2	kg/h	0.00	0.00	0.00
Sol. solubles	kg/h	0.00	0.00	0.00
Etanol	kg/h	1,947.20	0.00	0.00
CO2	kg/h	7,984.03	0.00	0.00
Ac. láctico	kg/h	0.00	0.00	0.00
enzima	kg/h	0.00	0.00	0.00

#### 4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

El resultado de la simulación en HYSYS, nos indica que una planta productora de etanol que procesa aproximadamente 102ton/h de bagazo de caña, es capaz de producir 34,441L/h de etanol.



102 ton/h



34,441 L/h

## 5. HIPÓTESIS VS RESULTADOS

Hipótesis	Hipótesis	Resultados
Se cubre demanda escenario 1	sí	sí
Se cubre demanda escenario 2	sí	sí
Se cubre demanda escenario 3	sí	sí
Etanol producido (L/h)	36,760	34,441
Plantas requeridas escenario 1	1.3	1.4
Plantas requeridas escenario 2	3.5	3.7
Plantas requeridas escenario 3	14	15

Tomando como referencia los datos teóricos investigados y comparándolos con los resultados obtenidos de la simulación, queda evidencia de que el simulador utilizado fue adecuado para reproducir la planta de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar. Lo anterior nos expresa la confiabilidad de los resultados obtenidos en este proyecto.

## **IX. CONCLUSIONES**

A partir de la investigación realizada y los resultados obtenidos de la simulación del proceso se llegan a las siguientes conclusiones:

- La materia prima adecuada para la producción de bioetanol en México es el bagazo de caña de azúcar.
- La producción anual de bagazo es suficiente para producir la demanda de etanol para los tres escenarios propuestos para la introducción del mismo en nuestro país como combustible alternativo a los fósiles.
- Una planta procesadora de 102 ton/h de bagazo es capaz de producir 34,334 L/h de bioetanol, es decir 338 L de etanol/ton de bagazo seco.
- Para cubrir la demanda del escenario 1 se requieren 1.4 plantas que operen 24 horas los 365 días del año.
- Para cubrir la demanda del escenario 1 se requieren 3.7 plantas que operen 24 horas los 365 días del año.
- Para cubrir la demanda del escenario 1 se requieren 15 plantas que operen 24 horas los 365 días del año.
- Aunado a la producción de bioetanol a partir del bagazo de caña, es necesario el planeamiento de la obtención del alcohol a partir de otras materias primas lignocelulósicas, que tienen las mismas ventajas de selección. Así como continuar la investigación de nuevas fuentes de bioenergía para la producción de combustibles como algas que sólo requieren luz y CO<sub>2</sub> para su crecimiento, el dimetilfurano que tiene una mayor densidad de energía que la gasolina y es un nuevo proceso catalítico que transforma la biomasa en un combustible líquido conveniente para el sector del transporte.

Afirmar que ésta propuesta es viable en nuestro país es algo aventurero si sólo nos basamos en el hecho de que contamos con la materia prima necesaria para cubrir la demanda de etanol. Haría falta realizar un estudio profundo de los aspectos de logística, políticos, sociales y económicos; ya que éstos son muy específicos y diferentes en cada país.

## X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SENER/ BID/ GTZ: *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México (Comp.)* (2006), México, D.F. pp 7-413.
2. Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (2006) –en revisión -. En Gaceta del Senada No. 171. 3° Año de Ejercicio. Segundo Periodo Ordinario. Senado de la República LX Legislatura.
3. Díaz Gutiérrez Luis, Rodríguez Martínez Nicolás, Garfias Vásquez Francisco Javier (2005). *Economics on the use of oxigenates*. J. Mex. Chem. Soc. 2005, 49(3), 298-301.
4. Solar Energy Information Data Bank: *A guide to Commercial-Scale Ethanol Production and Financing* (2002). Books for Business. New York – Hong Kong. Cap. I, IV y V.
5. U.S. Department of Energy Office of Industrial Technologies Inventions and Innovation Program (2005): *An Indirect Route for Ethanol Production by ZeaChem Inc*. Lakewood, CO.
6. Favela Fierro Rodrigo (abril, 2007). *Cambios a la infraestructura y operaciones de PEMEX Refinación para formular gasolina con etanol*. Seminario: “Retos para el Desarrollo de Biocombustibles en México”. Centro Mario Molina. México, D.F.
7. McAloon Andrew, Taylor Frank, Yee Winnie, et.al. (2000). Technical Report: *Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks*. National Renewable Energy Laboratory.

8. Anden A., Ruth M., Isben K., et.al (2002). Technical Report: *Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis for Corn Stover*. National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado.
9. Unión Nacional de Cañeros, A. C. CNPR. Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 1997-2006.
10. García Bustamante Carlos Alberto (2007). Escenarios de emisiones atmosféricas del etanol al usarse como oxigenante de las gasolinas en la ZMVM. Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Energía, UNAM, Temixco, México. Pp 48-120.
11. Martínez Jiménez Alfredo (mayo, 2005). *Uso y Beneficio de los Biocombustibles*. Foro: “Calidad del Aire en el Distrito Federal y Cambio Climático”. México, D. F.
12. DOE. Departamento de Energía de Estados Unidos. Página de cálculo de rendimiento en conversión de etanol para materias lignocelulósicas. [http://www1.eere.energy.gov/biomasa/ethanol\\_yield\\_calculator.html.2007](http://www1.eere.energy.gov/biomasa/ethanol_yield_calculator.html.2007).
13. Wooley Robert J., Putsche Victoria (1996). *Development of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuel Components*. NREL. Colorado, EUA.
14. Barnés de Castro Francisco (octubre, 2007). *“Implicaciones del uso de Bioetanol en México”*. XLVII Convención Nacional del IMIQ. Veracruz, México.
15. U. S. Department of Energy (2006). *“Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol, a Joint Research Agenda”*. Maryland, EUA.

16. Schifter I., Vera M., Díaz L., et al. *“Environmental Implications on the Oxygenation of Gasoline with Ethanol in the Metropolitan Area of Mexico City”*. Environmental Science and Technology. 35 (10): 1893-1904, 2001.
  
17. Agrobio México, A. C. *“¿Etanol Carburante a partir de bagazo de caña?”*. Claridades Agropecuarias 155 (07): 33-39, julio 2006.