



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**UNIDAD TICOMÁN**

**-MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS  
NATURALES-**

Tesis de Maestría:

**“VIABILIDAD DEL USO DE BIOCOMBUSTIBLES PARA EL  
TRANSPORTE EN MÉXICO”**

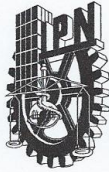
Presenta:

**KARLA CRISTAL VALADES RODRÍGUEZ**

Realizada bajo la dirección y asesoría

Dr. Miguel García Reyes

México D.F. Abril 2010



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 14:30 horas del día 28 del mes de Septiembre del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA Ticomán para examinar la tesis titulada:

"Viabilidad del uso de Biocombustibles para el transporte en México"

Presentada por el alumno:

Valades  
Apellido paterno

Rodríguez  
Apellido materno

Karla Cristal  
Nombre(s)

Con registro: 

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| B | 0 | 7 | 1 | 5 | 4 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|


aspirante de:

Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales

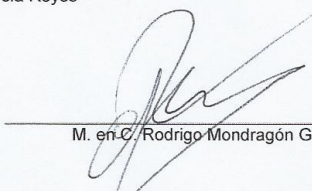
Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.


### LA COMISIÓN REVISORA

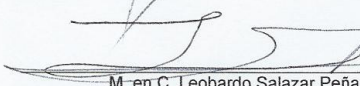
Director(a) de tesis

  
Dr. Cayetano Miguel García Reyes

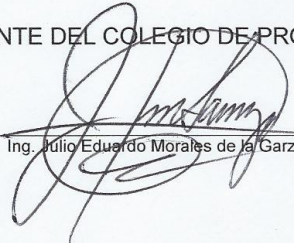
  
Dr. Daniel Romo Rico

  
M. en C. Rodrigo Mondragón Gúzman

  
Dr. Arturo Ortiz Ubilla

  
M. en C. Leobardo Salazar Peña

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
Ing. Julio Eduardo Morales de la Garza



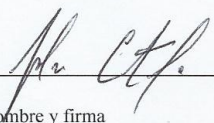


**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México el día 24 del mes Febrero del año 2011, el (la) que suscribe C. Karla Cristal Valades Rodríguez, alumno (a) del Programa de Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales, con número de registro B071548, adscrito a SEPI ESIA, Ticomán, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Cayetano Miguel García Reyes y cede los derechos del trabajo intitulado “Viabilidad del uso de Biocombustibles para el transporte en México”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: [kvalades@hotmail.com](mailto:kvalades@hotmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
\_\_\_\_\_  
Nombre y firma

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres ya que siempre sembraron en mi el deseo de lucha y perseverancia por lograr lo anhelado, por su apoyo, por su ejemplo y por su continuo estímulo por seguir superándome, por sus sabios consejos para esforzarme más en mis estudios.

A mi esposo por la comprensión, por los momentos difíciles y alegrías que hemos compartido, que nos hace crecer y valorar la vida, por su apoyo incondicional y el cariño que siempre me ha brindado.

# ÍNDICE

|   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| Índice de Figuras   | 5             |
| Índice de Tablas  | 6             |
| Índice de Gráficas  | 8             |
| <b>RESUMEN</b>  | 9             |
| <b>SUMMARY</b>  | 9             |
| <b>CAPITULO 1      GENERALIDADES</b>  | <b>11</b>     |
| 1.1      INTRODUCCIÓN   | 11            |
| 1.2      ANTECEDENTES   | 13            |
| <b>CAPITULO 2      SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL</b>   | <b>15</b>     |
| 2.1      SITUACIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO   | 25            |
| 2.2      CRISIS EN RESERVAS Y EXPLORACIÓN EN MÉXICO   | 27            |
| <b>CAPITULO 3      BASE DE ESTUDIO DEL BIOETANOL</b>  | <b>30</b>     |
| 3.1      GENERALIDADES DEL BIOETANOL  | 31            |
| 3.1.1      Entorno físico   | 33            |
| 3.2      AGRO CLIMATOLOGÍA  | 34            |
| 3.2.1      El clima de la República Mexicana  | 36            |
| 3.2.2      Temperatura de México  | 39            |
| 3.2.3      La precipitación pluvial en la República Mexicana  | 40            |
| 3.2.4      La evapotranspiración  | 41            |
| 3.3      USO DE SUELO   | 42            |
| 3.3.1      Cultivos energéticos en México   | 43            |
| 3.3.2      Principales regiones agrícolas en México   | 46            |
| 3.3.3      Los fertilizantes  | 48            |
| <b>CAPITULO 4      CONSIDERACIONES GENERALES DE LAS MATERIAS<br/>PRIMAS SELECCIONADAS PARA LA OBTENCIÓN DEL<br/>BIOETANOL</b> | <b>51</b>     |
| 4.1      CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO   | 51            |
| 4.1.1      Composición de la caña de azúcar   | 52            |
| 4.1.2      Regiones cañeras de la República Mexicana  | 53            |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1.3 | Precios de la caña de azúcar  | 57 |
| 4.1.4 | Contexto nacional de la caña de azúcar  | 60 |
| 4.1.5 | Contexto internacional de la caña de azúcar   | 63 |
| 4.1.6 | Costos de producción  | 66 |
| 4.1.7 | El costo primo de la caña de azúcar en la producción de Bioetanol                         | 66 |
| 4.2   | PAJA DE TRIGO   | 67 |
| 4.2.1 | Composición de la paja de trigo   | 69 |
| 4.2.2 | Procedimiento experimental, hidrólisis ácida para la paja de trigo                        | 69 |
| 4.2.3 | Costos de producción de la paja de trigo en Valle de Mexicali, B.C.                       | 74 |
| 4.2.4 | El costo primo de la paja de trigo en la producción de Bioetanol                          | 74 |
| 4.2.5 | El costo primo integrado de trigo grano más paja  | 75 |
| 4.3   | LA REMOLACHA AZUCARERA  | 75 |
| 4.3.1 | Composición de la raíz de remolacha   | 76 |
| 4.3.2 | Costo de producción de la remolacha (Valle de Mexicali) por hectárea y por tonelada, 2008 | 77 |
| 4.3.3 | El costo primo de la remolacha azucarera en la producción de Bioetanol                    | 78 |
| 4.4   | GRANO DE SORGO  | 79 |
| 4.4.1 | Composición del grano de sorgo  | 80 |
| 4.4.2 | Costo de producción   | 81 |
| 4.4.3 | El costo primo del sorgo de temporal en la producción de Bioetanol                        | 82 |
| 4.5   | LA YUCA   | 82 |
| 4.5.1 | Composición química de las raíces % en peso   | 84 |
| 4.5.2 | Costo de producción de la yuca  | 84 |
| 4.5.3 | Costo primo de la yuca en la producción de Bioetanol                                      | 85 |
| 4.6   | SORGO DULCE   | 86 |
| 4.6.1 | Composición de la planta completa   | 87 |

|                     |  |     |
|---------------------|--|-----|
| 4.6.2               | Costos de producción   | 88  |
| 4.6.3               | Costo primo del sorgo dulce en la producción de Bioetanol              | 89  |
| <b>CAPITULO 5</b>   | <b>PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL</b>                        | 92  |
| 5.1                 | ETAPAS EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOETANOL                         | 93  |
| 5.2                 | PROCESOS GENERALES PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL                      | 98  |
| 5.3                 | BALANCE ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL                       | 103 |
| 5.4                 | PROCESO UTILIZADO PARA LA CAÑA DE AZÚCAR                               | 104 |
| 5.4.1               | Producción de Bioetanol de melazas agotadas (miel tipo C)              | 107 |
| 5.4.2               | Producción de Bioetanol de melazas intermedias (miel tipo B)           | 109 |
| 5.4.3               | Producción de Bioetanol de jugo directo de caña y residuos celulósicos | 114 |
| 5.5                 | PROCESO UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA YUCA                             | 117 |
| 5.6                 | PROCESO UTILIZADO PARA EL SORGO Y REMOLACHA AZUCARERA                  | 120 |
| 5.7                 | LOGÍSTICA Y COMERCIALIZACIÓN   | 124 |
| <b>CAPITULO 6</b>   | <b>COSTOS PARA LA PRODUCCION DE BIOETANOL EN MÉXICO</b>                | 126 |
| 6.1                 | COSTOS PARA LA CAÑA DE AZÚCAR Y MELAZAS                                | 127 |
| 6.2                 | COSTOS PARA OTRAS MATERIAS PRIMAS                                      | 131 |
| 6.3                 | COSTOS DE PROCESAMIENTO  | 132 |
| 6.4                 | COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO                                    | 136 |
| 6.5                 | VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN MEXICO           | 139 |
| <b>CONCLUSIONES</b> |  | 143 |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> |  | 147 |

## INDICE DE FIGURAS

| <b>Figura</b> |  | <b>Página</b> |
|---------------|--|---------------|
| II 2.1        | Reservas de petróleo mundiales   | 19            |
| II.2.2        | Perspectiva de los diferentes tipos de energías que serán usadas                   | 25            |
| III 3.2.1     | Principales tipos de clima de México   | 34            |
| III 3.2.1.1   | Superficies por grupo climático para el clima anual de la República Mexicana       | 37            |
| III 3.2.1.2   | Superficies por tipo de clima para la mitad caliente del año                       | 38            |
| III 3.2.1.3   | Superficies por tipo de clima para la mitad fría del año                           | 39            |
| III 3.2.2.1   | Temperaturas medias anuales de la República Mexicana                               | 40            |
| III 3.2.3.1   | Precipitación anual total en la República Mexicana                                 | 41            |
| IV 4.1.2.1    | Estados de la República Mexicana donde se produce la caña de azúcar                | 54            |
| IV 4.1.4.1    | Principales estados productores de caña de azúcar en México, ciclo agrícola 2008   | 62            |
| IV 4.1.5.1    | Principales productores de caña de azúcar a nivel Internacional                    | 64            |
| IV 4.2.2.1    | Hidrólisis ácida del material vegetal  | 72            |
| V 5.1.1       | Etapas en el proceso de obtención de Bioetanol                                     | 93            |
| V 5.1.2       | Proceso de molido húmedo (Wet Milling Processes)                                   | 94            |
| V 5.1.3       | Proceso de molido seco (Dry Milling Processes)                                     | 95            |
| V 5.2.1       | Proceso simple de obtención de Bioetanol   | 100           |
| V 5.2.2       | Diferencias en los procesos de obtención de Bioetanol                              | 102           |
| V 5.4.1       | Proceso de producción de alcohol de caña de azúcar                                 | 106           |
| V 5.4.1.1     | Balance de materia para la producción de Bioetanol a partir de melazas agotadas    | 107           |
| V 5.4.2.1     | Esquema de un ingenio para la producción combinada de azúcar en Bioetanol          | 110           |
| V 5.4.2.2     | Balance de materia para la producción de Bioetanol a partir de melazas intermedias | 111           |
| V 5.7.1       | Proceso de la cadena de distribución   | 125           |



## INDICE DE TABLAS

| <b>Tabla</b>  | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| II 2.1 Participación por tipo de combustible en la generación de energía primaria                           | 20            |
| II 2.2 Situación energética global según el tipo de combustible para producir energía                       | 21            |
| II 2.3 Comparativo internacional por países petroleros con respecto a sus reservas, producción y refinación | 24            |
| II 2.1.1 Importancia nacional e internacional, indicadores petroleros de PEMEX                              | 26            |
| II 2.1.2 Datos económicos y financieros de México 2006, Banco de México                                     | 27            |
| II 2.1.3 Reservas probadas de petróleo crudo  | 29            |
| III 3.1.1.1 Superficie nacional respecto a su orografía   | 33            |
| III 3.2.4.1 Evapotranspiración (mm)   | 42            |
| III 3.3.2.1 Principales cultivos en las regiones agrícolas  | 47            |
| III 3.3.3.1 Fertilizantes nitrogenados, cifras en toneladas de amoníaco equivalente                         | 50            |
| IV 4.1.1 Estados productores de caña de azúcar de la República Mexicana                                     | 51            |
| IV 4.1.1.1 Composición química del bagazo de caña   | 53            |
| IV 4.1.2.1 Producción mundial en campo de caña de azúcar  | 54            |
| IV 4.1.3.1 Diferencia en % de refinado de EUA contra el refinado nacional                                   | 59            |
| IV 4.1.4.1 Producción de caña de azúcar en México   | 61            |
| IV 4.1.4.2 Balance azucarero, la producción y su consumo en la República Mexicana                           | 63            |
| IV 4.1.5.1 Volumen de producción mundial de la caña de azúcar, millones de hectáreas 1997-2007              | 64            |
| IV 4.1.5.2 Rendimiento mundial de la caña de azúcar toneladas/hectárea 1997-2007                            | 65            |
| IV 4.1.5.3 Países con mayor exportación de caña de azúcar en 2009   | 65            |
| IV 4.2.1.1 Composición de la paja de trigo  | 69            |
| IV 4.2.2.1 Descripción de la metodología usada para las pruebas de laboratorio                              | 70            |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| IV 4.2.2.2 | Diseño experimental para la hidrólisis ácida de residuo agroindustrial, paja de trigo                          | 71  |
| IV 4.2.2.3 | Descripción de los tratamientos experimentales   | 71  |
| IV 4.2.2.4 | Promedio de azúcar reductora (% AR) obtenidos en porcentajes   | 73  |
| IV 4.3.1.1 | Composición de la raíz de remolacha  | 77  |
| IV 4.4.1.1 | Composición de la raíz del grano de sorgo  | 80  |
| IV 4.5.1.1 | Composición química de la raíz de la yuca  | 84  |
| V 5.1      | Ejemplos de materias primas para la conversión en Bioetanol  | 92  |
| V 5.4.1.1  | Insumos en la producción de Bioetanol a partir de melazas agotadas   | 108 |
| V 5.4.2.1  | Insumos, productos y subproductos en la producción de Bioetanol a partir de melazas intermedias                | 112 |
| V 5.6.1    | Características del sorgo y la caña de azúcar  | 122 |
| VI 6.1.1   | Costos de producción para la caña en pesos   | 127 |
| VI 6.1.2   | Composición de costos de producción en una zona de temporal  | 128 |
| VI 6.1.3   | Inversiones específicas para el riego de caña de azúcar en pesos/hectárea                                      | 129 |
| VI 6.2.1   | Costos estimados de producción de biomasa no convencional de interés para la producción de Bioetanol en México | 131 |
| VI 6.3.1   | Destilerías para la fabricación de Bioetanol de caña de azúcar   | 134 |
| VI 6.3.2   | Destilerías para la fabricación de Bioetanol con materias primas no convencionales                             | 135 |
| VI 6.4.1   | Inversiones en plantas productoras de Bioetanol  | 137 |
| VI 6.4.2   | Costos totales para la producción de Bioetanol (US\$/litro)  | 137 |
| VI 6.5.1   | Número de unidades productivas necesarias (tecnologías convencionales)   | 140 |
| VI 6.5.2   | Número de unidades productivas necesarias (tecnologías innovadoras)  | 141 |
| VI 6.5.3   | Superficie de cultivo requerida (tecnologías convencionales)   | 141 |
| VI 6.5.4   | Superficie de cultivo requerida (tecnologías innovadoras)  | 142 |

## INDICE DE GRÁFICAS

| <b>Gráfica</b> |  | <b>Página</b> |
|----------------|--|---------------|
| II 2.1         | Consecuencias sobre la variación de los precios de los hidrocarburos desde 1971-2006         | 17            |
| II 2.2         | Producción mundial de petróleo   | 18            |
| IV 4.1.3.1     | Diferencial entre el precio de la azúcar refinada en Estados Unidos y en México              | 58            |
| IV 4.1.4.1     | Producción final zafra contra la producción estimada zafra 08/09                             | 61            |
| V 5.4.2.1      | Productores de Bioetanol y azúcar en condiciones medias de los ingenios azucareros de México | 114           |

## **RESUMEN**

En los próximos años, la humanidad estará inmersa en una crisis energética global, provocada por dos factores opuestos, uno social (crecimiento del consumo) y el otro físico-geológico (agotamiento de los recursos). El petróleo empieza a escasear, y esto es grave para la sociedad moderna, dado el enorme grado de dependencia de las actividades industriales y del transporte, a la energía fácil y barata. La mayor parte de los grandes daños ambientales al planeta están asociados a derrames durante la explotación, refinación y distribución de este recurso. Además, a la combustión de hidrocarburos usados para el transporte, que provoca gases de efecto invernadero por estos motivos se plantea usar energías limpias. Los biocombustibles son una fuente potencial de energía renovable para Brasil, Estados Unidos, y el resto del mundo; tienen un balance energético ambiental bastante favorable; si las condiciones de precios son adecuadas para los productores de las materias primas, los biocombustibles también tienen un impacto social importante. México tiene posibilidades de participar en el mercado nacional de los biocombustibles, tanto de la gasolina como del diesel con bioetanol y biodiesel, respectivamente. La caña de azúcar en miel rica constituyen las materias primas con mayor potencial.

## **SUMMARY**

To the next years, the whole humanity will be immersed in a great global energy crisis, brought about by the head-on collision between two opposed factors, one social (growth of the consumption) and the other physical-geologic (exhaustion of the resources). Petroleum begins to be scarce, and this is serious for the modern society, say the enormous degree of dependency of the industrial activities and the transport, to the easy and cheap energy. Most of the great environmental damages to the planet are associate to spills during the operation, refinement and distribution of this resource. In addition, to the hydrocarbon combustion in the transport that causes greenhouse effect gases by these reasons considers using clean energies. Biofuels are a promising source of renewable energy for the United States and the

rest of the world, with favorable energy and environmental balances. If price conditions are adequate for the basic input producers, biofuels will have an important social impact, as well. Mexico has the possibility to participate in the national biofuels substitution markets for gasoline and diesel with ethanol and biodiesel, respectively. Sugar Cane is the raw materials with the best potential.

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han producido una serie de acontecimientos con efectos sobre los mercados energéticos, con los cambiantes precios del petróleo a nivel internacional, y las consecuentes repercusiones en las economías de los países en vías de desarrollo. Por otra parte se están observando dos factores opuestos, uno social (crecimiento del consumo) y el otro físico-geológico (agotamiento de los recursos). El petróleo empieza a escasear, y esto es grave para la sociedad, dado el enorme grado de dependencia de las actividades industriales y de transporte que tenemos con la energía fácil y barata de extraer. Actualmente en México existen dificultades con la terminación de los yacimientos de fácil acceso, particularmente Cantarell; se tienen que desarrollar campos de mayor complejidad, en donde los costos de producción suben, esto se puede apreciar en datos del 2000 al 2007, los costos de producción de Petróleos Mexicanos PEMEX aumentaron a una tasa promedio anual de 17%, al pasar de 3.16 a 4.36 dólares por barril (*Secretaría de Energía de México SENER, 2009*). Este aumento se explica por un incremento de los precios y el consumo de gas para bombeo neumático; mayores gastos de mantenimiento; el aumento de los precios de los equipos y servicios asociados a la producción y la madurez promedio de los campos petroleros. Actualmente, se está trabajando en el proyecto más ambicioso de PEMEX, el Aceite Terciario del Golfo (ATG) en Chicontepec, su costo de producción es de cinco a seis veces superior a Cantarell y en aguas profundas es mucho más caro. Aunado a esto tenemos los efectos negativos la mayor parte de los grandes daños ambientales al planeta están asociados a derrames durante la explotación, refinación y distribución del petróleo.

La búsqueda de alternativas capaces de reducir la dependencia del petróleo es una tarea importante y urgente, estos factores han creado las condiciones para el surgimiento de un mercado de biocombustibles. Los biocombustibles representan una oportunidad para

aquellos países que poseen un potencial agrícola o forestal que le permitiría desarrollar una industria que al menos sirva para autoconsumo.

Actualmente en varios países el argumento principal se centra en la urgencia de reducir las emisiones de contaminantes y alargar la existencia del petróleo, combustible que ha surtido de energía durante muchas décadas a la humanidad, sin embargo sabemos que éste recurso es *no renovable*. Por estas razones es que los gobiernos de diversos países han comenzado a tomar cartas en el asunto, como China, donde se producen automóviles que usan exclusivamente Bioetanol (Etanol); Estados Unidos con la promoción de la construcción de plantas especializadas para extraer la mayor cantidad de este biocombustible; México empieza con diversas acciones, como programas en el que se proponen convertir a nuestro país en exportador de biocombustibles a América del Norte, con la producción de siete mil 840 barriles diarios de etanol; “Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar” ([www.http://atinabiotec.cl/content/](http://atinabiotec.cl/content/))

En México los biocombustibles son una fuente renovable de energía con un gran potencial para impulsar el desarrollo sustentable, generan un balance energético ambiental favorable; si las condiciones de precios son adecuadas para los productores de las materias primas.

México tiene posibilidades de participar en el mercado nacional de los biocombustibles tanto con el Bioetanol (Etanol) y Biodiesel. La producción de etanol en México presenta diferentes áreas de oportunidad, como la identificación del campo mexicano y sus pequeños agricultores.

Para la elaboración de este estudio, se combinó la investigación documental con el trabajo de laboratorio en la cual se realizó una hidrólisis ácida para la paja de trigo para verificar si es factible obtener importantes cantidades de azúcar a partir de sus sustratos y observar si reacciona rápidamente, con estos resultados, se determinó si se usaría como materia prima para este estudio; también se efectuó un análisis de la situación energética en México. Se analizaron las diversas consideraciones generales de las materias primas así como el entorno físico, sector agrícola, composición química, costos de producción, procesos

tecnológicos para elegir la mejor alternativa, con estos datos obtenidos, se determinó lo que cuesta producir bioetanol en el campo Mexicano.

Con este trabajo se comprobará cual es la mejor alternativa con respecto a la materia prima para la producción de bioetanol en México. Otro de los objetivos específicos es conocer si estamos preparados para producirlo, analizar el potencial de mercado nacional de las materias primas seleccionadas para la elaboración, la demanda probable de dichos combustibles, investigar sobre las características de México analizando si hay condiciones para la introducción de este biocombustible.

En este estudio se tomo en cuenta la cadena productiva del Etanol como producto sustituto de una proporción de los combustibles, se analizó este tema tomando en cuenta tres importantes perspectivas: la energética, ambiental y agrícola, para así concluir si es viable producir biocombustibles en México, para que sean adicionados a la gasolina que se usa para el transporte.

## **1.2 ANTECEDENTES**

La utilización del etanol como combustible ha pasado por varias etapas a través de los años, en los orígenes de la industria automovilística fue el principal combustible: Los motores de ciclo Otto se diseñaron en principio para utilizarlo, después la industria cambió y se basó en el petróleo, los fabricantes de motores eligieron esta opción. Cuando se temió por la estabilidad de estos mercados en los años 20 y el posterior embargo petrolífero en el año 1973 se volvió a invertir en el desarrollo de Bioetanol.

Louis Renault, Armand Peugeot, Herbert Austin, Henry Ford, Karl Benz y otros intentaban adaptar el motor de combustión interna recientemente integrado en vehículos, simultáneamente en Francia y Alemania se investigaba como llevar a cabo la utilización del etanol en estos motores. Brasil comenzó a mezclar etanol y gasolina en la producción y fue el primer país en producir los primeros automóviles que funcionaron con alcohol hidratado



(95 % de etanol y 5% de agua), más tarde en 1980 la mayor parte de los coches fabricados estaban diseñados para funcionar exclusivamente con etanol (*Harris, 2006*)

Desde entonces y hasta nuestros días, el uso del etanol en vehículos automotores ha tenido un considerable avance, principalmente porque su uso reduce la dependencia del petróleo, disminuye emisiones contaminantes, se amplían las fuentes de energía alternativas para uso automotor. Actualmente casi la mitad del consumo de gasolina en Brasil, China, Australia, Francia, España está siendo reemplazado por el etanol, Brasil gracias a esto ha ahorrado 86 miles de millones de dólares en importación de petróleo durante las últimas tres décadas.

Su uso ha impulsado el desarrollo de una nueva rama automotriz, la de los automóviles llamados flexibles (Flex Fuel FFV's) que pueden funcionar con etanol, gasolina pura o la mezcla de los dos. Actualmente en Europa se ha optado por oxigenar las gasolinas con productos derivados de los alcoholes, como son el MTBE (metil-terbutil-eter) o el ETBE (etil-terbutileter) para eliminar los aditivos con plomo. (*Handbook, Industrial, 2006*)



## CAPITULO 2

# SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL

En las últimas cuatro décadas, como resultado de la aparición de problemas energéticos y ambientales, la sociedad mundial ha decidido disminuir su independencia del petróleo y del carbón; debido a que ambos son combustibles fósiles, de naturaleza no renovables y contaminan. Este fenómeno se está presentando en los países industrializados, que desde el siglo XIX han sido grandes consumidores de estos energéticos.

Analizando la situación petrolera de Estados Unidos no solo es la potencia más poderosa del mundo en materia económica, financiera, comercial, militar, también es el país que, aunque prácticamente carece de reservas, absorbe la cuarta parte del consumo mundial de petróleo; lo que lo vuelve altamente vulnerable y dependiente de las importaciones para cubrir su consumo interno. Por ello, asegurar el abasto de petróleo importado se ha convertido en un asunto vital para su Seguridad Nacional. Otros países desarrollados son Japón, Alemania, Francia, Canadá, Inglaterra, Italia, Australia, España y Corea del Sur, estos países con sólo el 13% de la población mundial, absorben casi la mitad del consumo mundial, otros cinco países como China, India, Rusia, Brasil y México con el 44% de la población Mundial, absorben el 25% del consumo mundial. (*EIA, International Energy Outlook, 2008*)

La situación energética mundial es muy variable. Las guerras y crisis son algunas de las razones de la subida del precio del petróleo, el aumento de la población mundial (actualmente Asia), la subida del consumo de energía per cápita y al mismo tiempo la disminución continua de las reservas de petróleo, son las razones fundamentales que causan estas crisis.

A continuación se muestran algunas fechas que explican los grandes movimientos del precio del petróleo desde hace más de treinta años.

- *Guerras y políticas:* Las tensiones geopolíticas hacen subir los precios del barril a corto plazo

1973: Embargo de los países de la OPEP

1978: Revolución Iraní

1979: Crisis de los rehenes americanos en Irán. Guerra Irán Irak: incidentes en la frontera entre Irán- Irak

1980: Principio de la guerra Irán-Irak

1990: Invasión de Kuwait por Irak

1991: Principio de la Operación tormenta del desierto Principio de la dislocación de la URSS

2001: Atentados al World Trade Center, Nueva York

2003: Principio de la Guerra en Irak

2006: Final de la guerra del golfo (liberación de Kuwait City)

- *Situación de la economía mundial ante los problemas de energía*

1993: China hace en importador de petróleo, en 2002 el 34% de las necesidades de petróleo se importan luego un 40% en 2005. La producción de petróleo de China debería mantenerse hasta en 2009 a continuación para bajar. En consecuencia, todas las nuevas necesidades de petróleo de China deberán ser colmadas por importaciones.

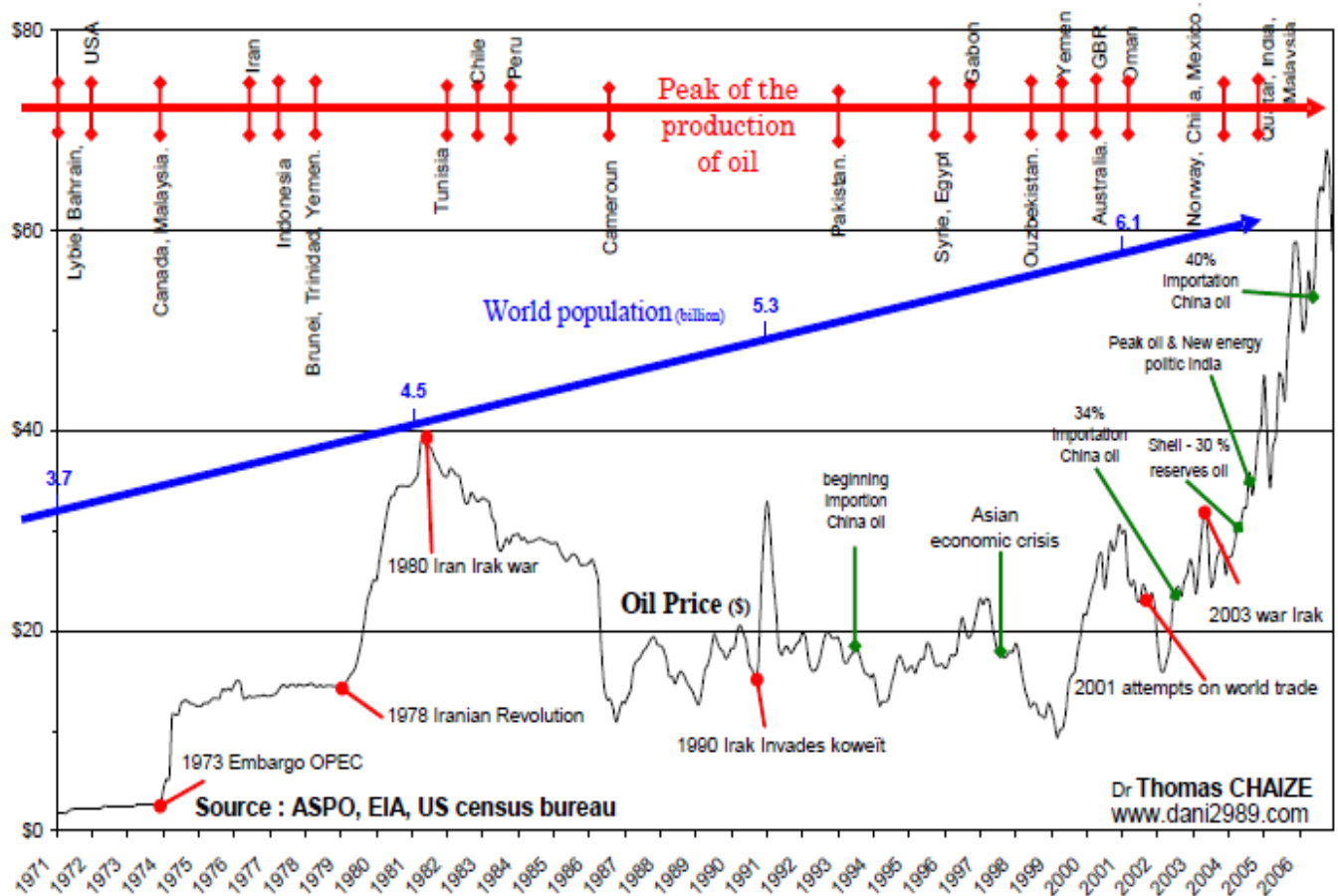
1997: Crisis económica en Asia que implica una reducción temporal de la demanda en petróleo.

2004: la India alcanza su pico de producción de petróleo, desarrolla entonces una diplomacia de la energía para garantizar su suministro de petróleo a largo plazo. La India y China se encuentran a menudo en situación de competencia para comprar recursos petrolíferos en Rusia, Irán, África, en Sudamérica y sobre todo en Asia Central

2004: En Febrero, Shell anuncia una revisión a la baja del 30% de sus reservas de petróleo sobre fondo de sobrestimación de las reservas de petróleo de Nigeria para pasar las cuotas de la OPEP.

En el gráfico II 2.1 se puede apreciar lo que se menciono anteriormente

**GRÁFICA II 2.1** Consecuencias sobre la variación de los precios de los hidrocarburos desde 1971- 2006



FUENTE: Información estadística de la AIE

El incremento del precio del petróleo en los próximos años no será el fruto de graves crisis cada vez más frecuentes, si no el resultado de una demanda que crece entre la población y el aumento del consumo per cápita, esto se ve reflejado en el límite geológico de las reservas de petróleo. Estos son algunos motivos por los cuales se debería estar visualizando en utilizar y sustentar el desarrollo en las fuentes alternas en todo el mundo (biomasa, eólica, solar y nuclear), la participación de estas en la producción total de energía sigue siendo marginal (1%).

La demanda mundial de petróleo en el 2010 alcanzará el mayor nivel desde el 2007, con un consumo creciente impulsado por la expansión en las economías emergentes de Asia (Agencia Internacional de Energía AIE, 2008).

La demanda directa será de 86,3 millones de bpd, aún menor que los 86,5 millones de bpd usados en el 2007, pero 10.000 bpd arriba de lo proyectado anteriormente. El consumo ha bajado en los últimos dos años (*BP Yearbook, 2007*).

En la grafica siguiente se muestra el incremento de la producción mundial de petróleo

**GRÁFICA II 2.2** *Producción mundial de petróleo*



FUENTE: "Información estadística de la AIE" y *The Oil Drum*

El consumo energético mundial crecerá un 2% cada año, siendo las economías emergentes decisivas en el equilibrio entre oferta y demanda de combustible. La industria petrolera mundial ha podido aumentar la extracción de petróleo de manera sostenida hasta el 2005, sin embargo a partir de ese año, se ha mantenido estancada en el límite de los 74 millones de barriles al día. Eso hace pensar que hemos pasado el cenit del petróleo, el cual será seguido por la caída irreversible de la producción mundial, provocando una escasez en los mercados internacionales.

La preocupación de que el suministro no podrá abastecer la futura demanda, en medio del creciente consumo en Asia y Oriente Medio y de la limitada inversión en nuevos yacimientos, ayudó a impulsar el crudo a un récord cercano a los 146 dólares el barril. (*EIA, International Energy Outlook, 2007*).

El petróleo, ya está dando señales de su baja actividad tanto en exploración como en explotación, esto se traduce en una caída en la plataformas de producción a lo largo del

tiempo. A este hecho hay que añadir el preocupante aumento de la demanda. Así pues el consumo en 10 años se incrementará en 20 millones de barriles diarios y, al mismo ritmo de crecimiento, en el 2020 la demanda rondará los 115 millones de barriles diarios. Se estima en que la tasa de caída anual en cuanto a producción corresponde a un 5 %. Esto supone que en 10 años habrá un déficit cercano a los 60 millones de barriles diarios (*EIA, International Energy Outlook, 2007*), cifras alarmantes que demuestran la insostenibilidad de este recurso energético.

Como ya se mencionó anteriormente EEUU es el primer consumidor de petróleo (25% del total) y ha incrementado su demanda en un 17% en la última década, mientras Europa lo hizo en un 7 %. Resaltar el incremento del 47 % en el Estado español consumo de más de 1,5 millones de barriles diarios (*EIA, International Energy Outlook, 2007*), que también contrasta con el de los países de la Unión. La figura II 2.1 muestra las reservas de petróleo mundiales, en la cual se puede observar que países tienen petróleo todavía.

**FIGURA II 2.1 Reservas de petróleo mundiales**



FUENTE: *Statistical Year-End 2007, Energy Information Administration*

La Organización de Países Exportadores de Petróleo OPEP, provee dos de cada cinco barriles de petróleo, prevé que la demanda mundial crezca anualmente en 1.3 millones de bpd hasta el 2012 y que ese crecimiento se desacelere a 1.2 millones de bpd en el largo plazo. (*Pemex, 2007*).

Muchos países desarrollados y subdesarrollados, han reducido el uso de petróleo y gas para generar electricidad, algunos países lo han sustituido con carbón como Estados Unidos de América; otros han recurrido a la hidroelectricidad como Venezuela y Noruega; mientras que otros han desarrollado fuertemente la energía nuclear destacadamente como Francia. Entre tanto México marcha a contra corriente (*www.foronuclear.org*).

La tendencia a disminuir el consumo del petróleo a nivel mundial, en lo que se refiere sobre todo a la generación de energía primaria se presenta en la tabla II 2.1, en esta se observa que la humanidad tenderá a utilizar cada vez menos el crudo a nivel mundial, hay un punto que ya están tomando en cuenta en los análisis en los cuales se puede observar que el petróleo está aumentando cada vez mas y la realidad es que el hidrocarburo se está agotando, lo que está obligando a extraer petróleo del fondo de los océanos lo cual es más difícil y costoso.

**TABLA II 2.1** *Participación por tipo de combustible en la generación de energía primaria*

| <b>COMBUSTIBLE</b> | <b>1980</b> | <b>1990</b> | <b>1998</b> | <b>2000</b> | <b>2020</b> |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Petróleo           | 46.2        | 39.9        | 40          | 40.1        | 38.2        |
| Gas Natural        | 20.3        | 22.5        | 23.1        | 24          | 30.3        |
| Carbón             | 28.4        | 28.6        | 26.2        | 26          | 24.1        |
| Nuclear            | 2.8         | 6.6         | 7.4         | 7.2         | 4.4         |
| Hidrogeno          | 2.3         | 2.4         | 2.7         | 2.7         | 3           |
| Total              | 100         | 100         | 100         | 100         | 100         |

*FUENTE: Ruskaya energeticheskaya Gazeta No. 32 Rusa de energía 2004, Moscú Rusia*

El panorama internacional de la industria de refinación durante el periodo del 2006, ubicó la capacidad mundial de refinación en 87,238 miles de barriles diarios (mbd), cifra registrada

1.5% superior a la registrada en 2005. México se ubica en el quinceavo lugar a nivel internacional con 1,540 mbd de capacidad de destilación primaria.

Actualmente también, se utilizan otros tipos de fuentes energéticas, las denominadas “Energías limpias”, que se generan por medio de recursos naturales renovables (sol, viento, mareas, hidráulica, descomposición de materias orgánicas, etc.), este tipo de energías no generan emisiones tóxicas en su producción y uso. Si se comparan los consumos de ambos tipos de energías (generadas de materias primas no renovables y las de materias primas renovables) se observa que el consumo y demanda de las primeras tienen proyecciones de usos preponderantes en un corto y mediano plazo (proyecciones hasta el año 2030), lo que implica que aumentarán las emisiones contaminantes en el mismo plazo y de manera exponencial.

En la Tabla II 2.2 se observa que para el año 2030 se incrementarán los valores de consumo, entre un mínimo de solo un 50% en el Pacífico (Japón, Filipinas, Australia, etc.) a un 150% en Asia (China, Corea, Taiwán, etc.), ubicando Latino-América en un incremento de un 100%, valor similar al de la Unión Europea (15 países) y menor a la de América del Norte (+75%), situación que resulta curiosa, pues en los países desarrollados (denominados según la sigla inglesa “OECD” ) tienen un mayor consumo real actualmente: los mayores consumidores de energías se encuentran en las áreas económicas-geográficas que tendrán los menores consumos energéticos en el 2030.

**TABLA II 2.2 Situación energética global según tipo de combustible para producir energía**

| CONSUMO ENERGÉTICO TETRAWH | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 | TIPO DE COMBUSTIBLE PARA PRODUCIR ENERGÍA |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|---|
| 197,8                      |      |      |      |      |      |      | RENOVABLES                                |
| 186,1                      |      |      |      |      |      |      |   |
| 174,5                      |      |      |      |      |      |      | NUCLEAR                                   |
| 162,8                      |      |      |      |      |      |      |   |
| 151,2                      |      |      |      |      |      |      | GAS NATURAL                               |
| 139,6                      |      |      |      |      |      |      |   |
| 128,0                      |      |      |      |      |      |      |   |
| 104,7                      |      |      |      |      |      |      | PETRÓLEO                                  |
| 81,5                       |      |      |      |      |      |      |   |
| 69,8                       |      |      |      |      |      |      |   |
| 58,2                       |      |      |      |      |      |      |   |
| 46,5                       |      |      |      |      |      |      |   |
| 34,9                       |      |      |      |      |      |      | COMBUSTIBLES SÓLIDOS                      |
| 23,3                       |      |      |      |      |      |      |   |
| 11,7                       |      |      |      |      |      |      |   |

FUENTE: Guy R. McPherson, *Consumo energético 2007*



Esta situación se puede explicar como los “efectos” si se analiza el consumo energético según los tipos de usos, y también, si se recuerda el contexto internacional de todos los tratados y convenios internacionales que se suscribieron desde 1992 (Cumbre de Río) para reducir el nivel de Emisiones Tóxicas Globales. ( [www.ecoportal.net](http://www.ecoportal.net))

Como se pretende una reducción de todas las emisiones tóxicas mundiales, si hasta la fecha no se ha observado una reducción de las emisiones tóxicas, ni la disminución del consumo, ni la de la demanda energética, por el contrario, en ambos casos aumentaron exponencialmente, se necesita que se implementan políticas de optimización del uso de la energía, o sea un uso racional de la energía.

Que pasará en los próximos años, tomando en cuenta estos dos factores opuestos, el primero es social (crecimiento del consumo) y el otro es físico-geológico (agotamiento de los recursos). Por un lado, tenemos a la veloz locomotora del consumo mundial de petróleo, que va en aumento en proporción al crecimiento económico y por el otro, enfrentándose en sentido contrario, el rápido agotamiento de todos los "grandes" yacimientos de hidrocarburos del mundo y el desplome de los hallazgos de nuevos campos, que deriva en la pérdida de capacidad de producción global de petróleo. El petróleo empieza a escasear, y tenemos una enorme dependencia de todas las actividades industriales, del transporte, a la energía fácil y barata. (*Foreign Affairs 2007*)

A nivel mundial se pueden observar las profundas desigualdades en el consumo de petróleo. Los Estados Unidos de América representan 4.6% de la población mundial, consumen un 25% de la producción mundial de petróleo en 2006 (cálculos sobre la base de 300 millones de habitantes y 20 millones de barriles al día consumo de petróleo), lo que representa 10.5 litros de petróleo bruto al día y *per cápita*; Alemania, Inglaterra y Francia reunidos representan 3.2% de la población mundial y consumen un 7.7% de la producción mundial de petróleo, lo que representa 4.94 litros de petróleo bruto al día y *per cápita*. China, con sus 1.3 mil millones de habitantes, representa 20% de la población mundial y sólo consume 6.9 millones de barriles de bruto al día es decir, un 8% de la producción mundial, lo que representa 0.83 litros de petróleo bruto al día y *per cápita*. Un Americano consume 12.6 veces más que un Chino y un Francés, Alemán o Inglés consume 6 veces más que un chino.

El mundo consume en tan solo un día 85 millones de barriles de petróleo, lo que provoca un total anual de 30,000 millones. Si se compara esta cantidad de consumo mundial anual, con las reservas probadas de México, que son de 16,000 millones de barriles en total, se puede entender el apremio de la situación, el consumo mundial puede agotar las reservas mexicanas en tan solo algunos meses.

El 70% de la producción de petróleo del mundo, sale de campos muy maduros que se están explotando desde hace más de 30 años, a los cuales se les tiene que inyectar agua y gas para mantenerlos activos. La tasa de descubrimientos de nuevos yacimientos se ha desplomado a tan solo 7,000 millones de barriles de petróleo al año, y peor aún, en regiones lejanas, muy riesgosas y con una alta complejidad para su desarrollo.

En un año la humanidad consume 30,000 millones de barriles de petróleo y solo se reponen en nuevos descubrimientos, 7,000 millones, es decir, que por cada 5 barriles consumidos, se descubre solo 1. La capacidad de producción mundial de petróleo está cediendo ante el aumento del consumo impulsado por el crecimiento industrial. Las potencias más desarrolladas ya modificaron su estrategia geopolítica para mantenerse en primera fila de los suministros más abundantes del planeta como Irak (*McPherson, Consumo energético 2007*)

La complejidad de la estructura del transporte global y de la industria, no permite que se pueda resolver fácilmente el enorme consumo energético con fuentes alternativas como el hidrogeno, el etanol, la energía solar, la eólica o la fusión. Aun así, la urgencia y la preocupación por la mantener la seguridad energética en las naciones desarrolladas, ha llevado a los gobiernos de estos países, a implementar con "premura", diversas fuentes alternativas al petróleo.

En conclusión, no se alcanza a sustituir lo que se va perdiendo y virtualmente nos estamos quedando sin energía para montar una nueva infraestructura que nos permita hacer una transición energética ordenada. El petróleo aporta hoy en día el 36% del consumo mundial de energía y es el combustible vital para la extracción y obtención de otras fuentes de energía como el carbón (24%) y el gas (22%). (*AIE Consumo energético 2007*)

En la siguiente tabla se muestra un comparativo por países petroleros con respecto a sus reservas, producción y refinación.

**TABLA II 2.3** *Comparativo internacional por países petroleros con respecto a sus reservas, producción y refinación*

| Lugar | Compañía       | País                  | Reservas |     | Producción |     | Refinación |           |
|-------|----------------|-----------------------|----------|-----|------------|-----|------------|-----------|
|       |                |                       | Crudo    | Gas | Crudo      | Gas | Ventas     | Capacidad |
| 1     | Saudi Aramco   | Arabia Saudita        | 1        | 4   | 1          | 7   | 7          | 10        |
| 2     | NIOC           | Iran                  | 2        | 1   | 2          | 2   | 12         | 14        |
| 3     | Exxon Mobil    | USA                   | 14       | 13  | 5          | 3   | 1          | 1         |
| 4     | BP             | Reino Unido           | 16       | 15  | 8          | 4   | 3          | 6         |
| 5     | PDVSA          | Venezuela             | 5        | 5   | 6          | 26  | 8          | 5         |
| 6     | RD Shell       | Holanda y Reino Unido | 26       | 16  | 9          | 5   | 2          | 2         |
| 7     | PetroChina     | China                 | 9        | 12  | 4          | 13  | 14         | 9         |
| 8     | ConocoPhillips | USA                   | 22       | 19  | 15         | 9   | 6          | 7         |
| 9     | Chevron        | USA                   | 19       | 23  | 14         | 11  | 5          | 12        |
| 10    | Total          | Francia               | 23       | 20  | 18         | 12  | 4          | 8         |
| 11    | PEMEX          | México                | 11       | 33  | 3          | 14  | 13         | 13        |

FUENTE: Ranking PIW 27, 3 de diciembre de 2007. Petroleum Intelligence Weekly

En términos energéticos están involucrados otros aspectos, como la economía y política de cada país del mundo. Un ejemplo lo vemos a diario en el precio del barril de petróleo aumenta día a día, gracias a la oferta y a la demanda (que va aumentando), a los conflictos bélicos, e incluso a los desastres climáticos (que frenan la producción). Como ya se había mencionado antes, el precio de los hidrocarburos también es alterado por la cantidad de reservas estratégicas de un país (dato que es poco claro ya que no existe un inventario real).

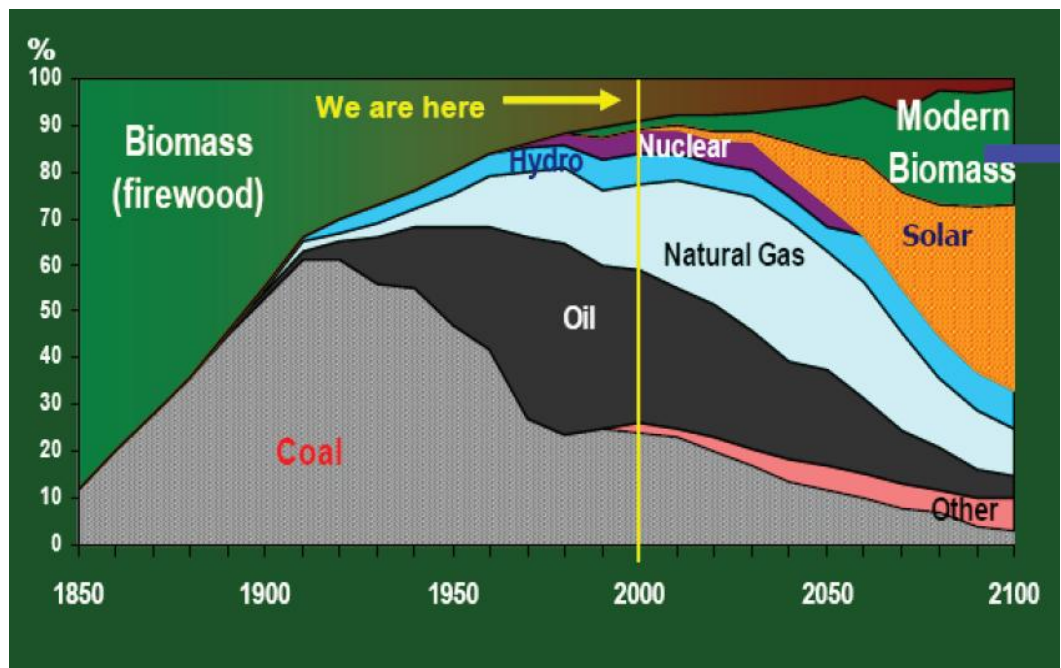
La producción mundial del petróleo crece, pero la demanda aumenta y no han aumentado los descubrimientos, expertos de la industria petrolera, estiman que las reservas actuales solo servirán para cubrir las necesidades de los próximos cuarenta años. Se necesita encontrar una estrategia de salida de la era de los combustibles fósiles, para asegurar el futuro.

Cabe mencionar que algunas de las consecuencias y reacciones ante el abuso del consumo de petróleo son:

- Incremento en la concentración de gases de efecto invernadero
- El sobrecalentamiento global
- Firma del protocolo de Kyoto
- Búsqueda de energías alternativas

En la figura siguiente se puede observar la perspectiva de los diferentes tipos de energía que podrían ser utilizadas en el futuro según Nakicenovic, Grubler y Ma Conald.

**FIGURA II 2.2** *Perspectiva de los diferentes tipos de energías que serán usadas*



FUENTE: Nakicenovic, Grubler and Ma Conald, 2008

## 2.1 SITUACIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO

La creciente fragilidad de Pemex se observa en los indicadores operativos y financieros, que están generando resultados poco alentadores. La producción de crudo, que se ubicó en 3.256 millones de barriles diarios, se ha afectado por la declinación de Cantarell. El descenso en la producción de crudo se agravó en el cuarto trimestre, al situarse en 3.104 millones de barriles diarios, 6% menos que un año antes.

La tendencia declinante de Cantarell continuará, dificultando la meta oficial de mantener la producción de crudo arriba de los 3 millones de barriles diarios. Cantarell, yacimiento que hasta hace poco representaba 63% de la producción nacional y llegó a producir 2.130 millones de barriles diarios en 2004, producía cerca de 1.5 millones de barriles diarios en 2007 y, según estimaciones oficiales de PEMEX, su producción caerá a 600,000 barriles diarios en 2013.

A partir de 2010, prácticamente todos los yacimientos principales de Pemex estarán en fase de declinación. (Pemex, 2008)

A continuación se muestra en la tabla II.2.1.1 se muestra algunos indicadores petroleros y su importancia en el ámbito Nacional e Internacional

**TABLA II 2.1.1** *Importancia nacional e internacional, indicadores petroleros de PEMEX*

| Global  |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 3er productor de crudo en el mundo.<sup>(1)</sup></li> <li>■ 4ta compañía integrada a nivel mundial.<sup>(1)</sup></li> <li>■ 11a en reservas de crudo.<sup>(1)</sup></li> <li>■ 14a en producción de gas.<sup>(1)</sup></li> <li>■ 13a en capacidad de refinación.<sup>(1)</sup></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Empresa más grande en Latinoamérica</li> <li>■ Uno de los tres principales abastecedores de crudo a EUA</li> <li>■ Calificaciones crediticias:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- S&amp;P      <b>BBB+</b></li> <li>- Fitch     <b>BBB</b></li> <li>- Moody's   <b>Baa1</b></li> </ul> </li> </ul> |

*FUENTE: Indicadores Petroleros de PEMEX 2006*

En la siguiente tabla se muestran algunos datos económicos y financieros de las ventas y exportaciones de Pemex.

**TABLA II 2.1.2** *Datos económicos y financieros de México 2006, Banco de México*

|   |  | <b>Nacional</b> |      |   |
|---|--|-----------------|------|---|
|   |  | 2005            | 2006 |   |
| <b>Ventas como % del PIB<sup>(2)</sup></b>                                      |  | 11%             | 13%  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Único productor de crudo, gas natural y productos refinados.</li> </ul>  |
| <b>Exportaciones de PEMEX como % de las exportaciones totales<sup>(3)</sup></b> |  | 27%             | 30%  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Única empresa comercializadora de productos refinados.</li> <li>■ Fuente más importante de ingresos del Gobierno Federal.</li> </ul> |

*FUENTE: Indicadores Petroleros de PEMEX 2006*

## **2.2 CRISIS EN RESERVAS Y EXPLORACIÓN EN MÉXICO**

Las reservas probadas de hidrocarburos totales siguen a la baja, siendo equivalentes a 15,514 millones de barriles de crudo, volumen 7% inferior al de un año antes y suficiente para cubrir poco más de nueve años de producción al ritmo actual de extracción. Las reservas de petróleo crudo se ubican en 12,849 millones de barriles. Han quedado atrás los tiempos en que las reservas eran 60,000 millones de barriles (reservas "totales", es decir, probadas, más probables, más posibles). Pemex Exploración y Producción PEP, en 2006 se incorporaron 966 millones de barriles de petróleo crudo equivalente de reservas "3P" (probadas, más probables, más posibles) atribuibles a nuevos descubrimientos, pero sólo 66 millones de barriles de reservas probadas de aceite. En el periodo 2002-2006 Pemex produjo 6,030 millones de barriles de petróleo crudo e incorporó 360 millones de barriles de reservas probadas de aceite en nuevos descubrimientos. La tasa real de reposición fue de 41% en 2006 (PEP, 2008).

Es decir, se restituyen cuatro de cada 10 barriles de reservas probadas que se sustraen del subsuelo, tasa que está muy por debajo de la norma internacional.

México es un país petrolero que no tiene suficiente capacidad de refinación y el costo que se está pagando por las importaciones es demasiado elevado: más de nueve mil 800 millones de dólares al año, equivalentes a cerca del 30% del valor de la exportación de crudo. (*Petroleum Intelligence Weekly 2007*).

Por este motivo es necesario fortalecer la explotación y producción de crudo y gas, modernizar y ampliar de la capacidad de almacenamiento así como también el suministro y transporte, y desarrollar plantas procesadoras de productos derivados y gas. PEMEX, es el monopolio petrolero estatal, que se encuentra en situación “crítica”, en tanto que las reservas demostradas de crudo siguen cayendo del equivalente de 9.7 años de producción a 9.3, y la producción diaria descendió en 2.3% hasta cerca de 3.2 millones de barriles en 2006. Ante la dificultad para extraer del subsuelo petróleo de fácil acceso, Pemex tiene problemas para proveer el energético para el consumo interno y el de exportación.

Por tal motivo se están acelerando la explotación de las reservas probables de Chicontepec ATG de gas y aceite, estimadas en nueve mil millones de barriles de petróleo crudo equivalente, debido a la “pronunciada declinación en los niveles de producción en pozos convencionales”. (*Pemex, 2007*)

Para el período 2007-2012 se estima que habrá una inversión promedio anual de por lo menos 2 mil millones de dólares anualmente en exploración casi el doble de años recientes que permitirá alcanzar 77 por ciento de reservas probadas para el año 2012. Esto equivale a decir que la meta de una reposición del 100 por ciento de las reservas no se va a alcanzar en este sexenio, la reposición de las reservas petroleras se ha convertido en un factor crítico, el más crítico que enfrenta Pemex hoy día porque, sin petróleo por explotar en el subsuelo, Pemex no podrá subsistir como productora y exportadora de hidrocarburos. Con reservas probadas de hidrocarburos para menos de 10 años y una baja tasa de reposición de esas reservas.

México ha sido y es un país con grandes yacimientos de petróleo. Desde la Expropiación Petrolera, la explotación de yacimientos gigantes primero en Poza Rica en el estado de Veracruz, Samaria (complejo Bermúdez) y Jujo-Tecominoacán en Tabasco, después

Abkatún-Pol-Chuc, Cantarell y ahora Ku-Maloob-Zaap en la Sonda de Campeche ha sido el sostén de la producción petrolera nacional. Gracias a la explotación de yacimientos gigantes, México se había colocado entre los principales países productores y exportadores de petróleo en el mundo. Sin embargo, la explotación acelerada de estos yacimientos es una actividad ruinoso en una época en la que no se están reponiendo las reservas petroleras. El complejo Abkatún-Pol-Chuc prácticamente duró sólo un sexenio.

El de Ku-Maloob-Zaap apenas está alcanzando elevados niveles de producción, pero comenzará su declinación antes de finales del presente sexenio. Esta situación da una idea de la dificultad que enfrentará Petróleos Mexicanos en sus esfuerzos para mantener la producción nacional de petróleo crudo en los próximos años. Es un enorme reto que deberá resolverse en aras de asegurar la sustentabilidad futura de la industria petrolera nacional.

En la siguiente tabla se muestran las reservas probadas de petróleo crudo en México desde el año de 1996 – 2007, con estos datos podemos ver la disminución de las reservas a través de los años

**TABLA II 2.1.3 Reservas probadas de petróleo crudo**

| <b>Años</b> | <b>(mmb)</b> |
|-------------|--------------|
| <b>1996</b> | 60.2*        |
| <b>1997</b> | 60.9*        |
| <b>1998</b> | 60.1*        |
| <b>1999</b> | 24.7**       |
| <b>2000</b> | 24.6         |
| <b>2001</b> | 25.7         |
| <b>2002</b> | 18.7*        |
| <b>2003</b> | 17.2         |
| <b>2004</b> | 16           |
| <b>2005</b> | 14.8         |
| <b>2006</b> | 13.7         |
| <b>2007</b> | 12.8         |

*FUENTE: PEMEX (datos al 1 Enero de cada año, \* reservas totales, \*\* nuevos criterios de cálculo*



## **CAPITULO 3**

### **BASE DE ESTUDIO DEL BIOETANOL**

En México existe una oportunidad importante para emprender la producción de etanol a gran escala, deben superarse varios retos que se analizan con detalle en este trabajo. Para la conversión en etanol fueron considerados como insumos: caña de azúcar, yuca, sorgo y remolacha azucarera, con las tecnologías maduras que ya existen, en el caso de la caña de azúcar, se analizó la producción de etanol a partir del bagazo, cuya tecnología se encuentra en desarrollo.

Se tomaron en cuenta estas materias primas con base en criterios de selección como: disponibilidad de una tecnología madura, costos, necesidades de inversión, superficie requerida, índice de energía neta, emisiones y mitigación de gases de efecto invernadero.

México podría hacer competitiva la forma de producir etanol, dentro de los próximos años, se necesita que apoyen la investigación en otros métodos para producir etanol, usando otros insumos como la madera, tallos de gramíneas, esquilmos agrícolas, cáscaras de cítricos, algas marinas etc. solo así tendremos la posibilidad y el potencial para sustituir más del 30% (350 millones de dólares al año en gasolinás) de las actuales importaciones de combustibles que hasta ahora se realiza.

En México, se cultivan desde hace siglos, la caña de azúcar, la yuca, la remolacha y el sorgo, de las cuales se cultivan miles de hectáreas cada año con tecnología de temporal y de riego, mayormente la primera es una relación de cuatro a uno. En la toma de decisiones sobre los cultivos a estudiar, se tomó en cuenta el hecho de que México es un importador de algunos de los granos aquí considerados.

Para el caso de sorgo se importan anualmente cuatro millones de toneladas de sorgo, donde la mayoría de los mexicanos siguen siendo deficitarios en el grano cuando hay millones de toneladas susceptibles de explotarse en ese cultivo, lo cual no se hace por falta de apoyo y de orientación hacia los dueños de esas tierras (SAGARPA,2009)

Cada año México produce seis millones de toneladas de sorgo, cuando la necesidad es de nueve o diez millones de toneladas, y para cubrir la demanda se importa de los EE.UU, sin embargo sí se presentan en nuestra agricultura condiciones específicas de naturaleza técnica, económica, social y ecológica que podrían hacer viable, razonable y conveniente utilizar estos cultivos como materias primas en la producción de bioetanol y usar tierras marginales abandonadas para el propósito, que normalmente se abandonan. Estas condiciones específicas se podrían modificar como: “asociación de cultivos”; fuentes de energía gratuita; recuperación de suelos; aprovechamiento de agua sin valor; aprovechamiento de suelos marginales y logística.

Con respecto al azúcar México produce alrededor de cinco millones de toneladas de azúcar al año. El consumo nacional es de poco más de cuatro millones, 30 por ciento de la producción total se destina a la industria refresquera y 40 por ciento se genera en Veracruz (Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología COVECYT); hay un excedente de un millón de toneladas que es muy difícil colocar en el mercado internacional por su alto precio.

Por otro lado, la industria cañera se encuentra ante la grave amenaza de que para el 2010 no se pueda frenar la importación de alta fructosa, producto que compite directamente con el azúcar en el mercado de edulcorantes. Ante este panorama, se hace urgente una reconversión tecnológica de la industria cañera nacional que permita la producción masiva de bioenergéticos como el etanol y el biodiesel, lo que generaría una reactivación económica en todo el sector desde los cortadores de caña hasta los grandes industriales del ramo, además de que tendría repercusiones ecológicas benéficas, (Centro Virtual de Investigaciones Multidisciplinarias CEVIM de la Universidad Veracruzana UV)

### **3.1 GENERALIDADES DEL BIOETANOL**

#### **¿Qué es el Etanol o Bioetanol?**

El Etanol, cuya fórmula química es  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ , es un producto orgánico sintético más antiguo, sus usos más comunes son: los industriales, domésticos y medicinales. Es una materia prima importante para su síntesis; su obtención puede darse de dos maneras, como

alcohol etílico por hidratación de etileno o bien por fermentación de los azúcares que se encuentran en la remolacha, maíz, cebada, trigo, caña de azúcar, sorgo u otros cultivos energéticos, que mezclado con la gasolina produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a la gasolina. ([www.biodisol.com](http://www.biodisol.com))

Las ventajas medioambientales y económicas de este combustible renovable son evidentes, puesto que reduce la dependencia de los combustibles fósiles, mejora la combustión del motor, es fácil de producir y almacenar y disminuye la contaminación ambiental.

El Bioetanol ofrece diversas posibilidades de mezclas para la obtención de biocombustibles con los siguientes nombres y propiedades:

**E5:** El Biocombustible **E5** significa una mezcla del 5% de Bioetanol y el 95% de Gasolina normal. Esta es la mezcla habitual y mezcla máxima autorizada en la actualidad por la regulación europea, sin embargo, es previsible una modificación de la normativa europea que aumentará este límite al 10% (E10) ya que diferentes estudios constatan que los vehículos actuales toleran sin problemas mezclas hasta el 10% de Bioetanol y los beneficios para el medioambiente son significativos.

**E10:** El Biocombustible **E10** significa una mezcla del 10% de Bioetanol y el 90% de Gasolina normal. Esta mezcla es la más utilizada en EEUU ya que hasta esta proporción de mezcla los motores de los vehículos no requieren ninguna modificación e incluso produce la elevación del octanaje en las gasolinas mejorando su resultado y obteniendo una notable reducción en la emisión de gases contaminantes.

**E85:** Mezcla de 85% de Bioetanol y 15 % de gasolina, utilizada en vehículos con motores especiales. En EEUU las marcas más conocidas ofrecen vehículos adaptados a estas mezclas. También se comercializan en algunos países (Europa, Brasil, Suecia) los llamados vehículos FFV (Flexible Fuel Vehicles) o Vehículos de Combustibles Flexibles con motores adaptados que permiten una variedad de mezclas.

**E95:** Mezcla hasta el 95% de Bioetanol son utilizados en algunos países como Brasil con motores especiales. (Abengoa Bioenergy, 2007)

**ETBE:** No se comercializa como un biocombustible, sino que se utiliza como un aditivo de la gasolina. El ETBE (etil ter-butil eter) se obtiene por síntesis del bioetanol con el isobutileno, subproducto de la destilación del petróleo. El ETBE posee las ventajas de ser menos volátil y más miscible con la gasolina que el propio etanol y, como el etanol, se adiciona a la gasolina en proporciones del 10-15%. La adición de ETBE o etanol sirve para aumentar el índice de octano de la gasolina, evitando la adición de sales de plomo. (Instituto Mexicano del Petróleo IMP, 2008)

### 3.1.1 Entorno físico

La República Mexicana ocupa una superficie de 1, 967,183 km<sup>2</sup>, 4,612 en las islas del Océano Pacífico y 752 en las Islas del golfo y del Caribe. Colinda en la frontera norte con los Estados Unidos en un desarrollo que alcanza 2,597 km, en la frontera sur limita con Guatemala y Belice mediante una línea fronteriza que alcanza 1,138 km. En cuanto a la orografía, la superficie nacional se distribuye de la siguiente manera como se muestra en la siguiente tabla:

**TABLA III 3.1.1.1 Superficie nacional respecto a su orografía**

| <b>Metros</b>      | <b>% Superficie Nacional</b> |
|--------------------|------------------------------|
| <b>0-300</b>       | 29.11                        |
| <b>301- 900</b>    | 17.43                        |
| <b>901 – 2100</b>  | 42.90                        |
| <b>2001 – 2700</b> | 9.74                         |
| <b>2701 - 3900</b> | 0.82                         |

*FUENTE: (Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación SAGARPA)*

La topografía es vigorosa y movida y se divide así:

Área con pendientes de hasta 2% - 15.3%

2 a 10% - 20.5%

10 a 25% - 35.9%

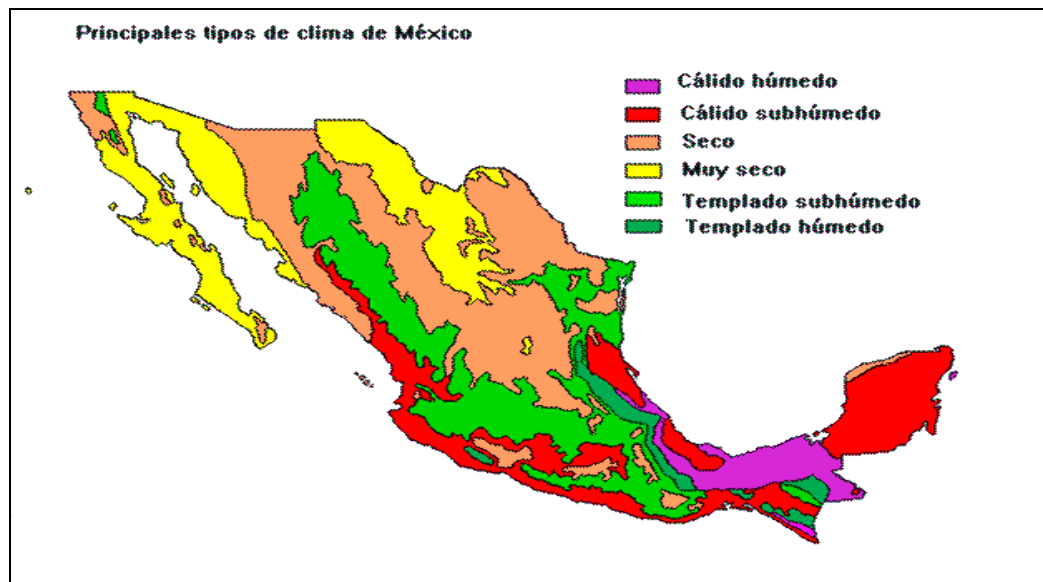
Más de 25% - 28.3%

FUENTE: SAGARPA, 2007 *El uso del suelo en la República Mexicana*

### 3.2 AGRO CLIMATOLOGÍA

México cuenta con déficit de humedad severo o moderado durante el año. Las zonas con déficit de humedad muy severo (clima árido) ocupan 233,767 km<sup>2</sup>, representan el 12% del territorio, estas áreas son las que tienen problemas de sequia y son susceptibles de tener problemas de erosión y sobre pastoreo, siempre y cuando sean sometidas a manejos inadecuados de uso del suelo; los estados que agrupan la mayor parte de esta superficie son: Baja California Sur, Sonora, Chihuahua y Coahuila. Climas áridos y semiáridos ocupan 659,156 km<sup>2</sup>, representando el 33% del país. En la figura III 3.2.1 se representan con colores los principales tipos de clima de México.

**FIGURA III 3.2.1** Principales tipos de clima de México



FUENTE: SAGARPA 2007

Los estados mencionados anteriormente cuentan con periodos de humedad cortos, sujetos a variaciones climáticas.

Los ecosistemas de Sonora, Chihuahua, Nuevo León, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Tamaulipas, Sinaloa, Guanajuato y Aguascalientes son muy frágiles, ya sea que si son degradadas, su tiempo de recuperación es relativamente largo. (SAGARPA, 2007)

México es la cuna del maíz, uno de los cereales básicos para la alimentación humana y animal , sin embargo nuestro país tiene hoy en día una producción y rendimiento del maíz por debajo de lo deseable, desde la década de los sesenta México ha ido reduciendo su producción de maíz en áreas de cultivos más comerciales, pero esto junto con el crecimiento poblacional, hace que el maíz, junto con el resto de los productos agrícolas básicos y comunes en la dieta del mexicano, llegue a escasear y se tenga que comprar al extranjero, sobretodo en años de sequía o de algún otro siniestro.

Sin embargo, contrario a la postura tradicionalmente oficial de culpar al clima por las malas cosechas, los campesinos, agricultores y estudiosos de la agricultura nacional saben que no es el clima una adversidad tan grande como para hacer que México sea un gran importador de productos agrícolas, sobre todo de maíz. En este sentido la investigación científica, particularmente la geográfica, no puede separar los problemas del ambiente físico, de los problemas socioeconómicos.

El territorio mexicano, cuenta, a pesar de las adversidades meteorológicas, con las características climáticas y los espacios suficientes para el cultivo del maíz, los datos estadounidenses reportaban que en el 2005-2006 México fue el tercer importador de maíz con siete millones de toneladas métricas, sólo superado por Japón y Corea del Sur y se estimaba que llegará al segundo lugar para el 2010 con diez millones de toneladas, superando a Corea del Sur.

Estos son algunas de las razones por las cuales descarté como materia prima el maíz para la producción de Etanol.

### 3.2.1 El clima de la República Mexicana

México es un país con una gran diversidad climática. La situación geográfica del país lo ubica en dos áreas bien diferenciadas, separadas por el trópico de Cáncer. Este paralelo separaría al país en una zona tropical y una templada. Sin embargo, el relieve y la presencia de los océanos influyen mucho en la configuración del mapa de los climas en el país. De esta forma, en México es posible encontrar climas fríos de alta montaña a unos cuantos centenares de kilómetros de los climas más calurosos de la llanura costera.

El clima templado subhúmedo o semiseco alcanza temperaturas que oscilan entre los 10 y los 20 °C y presenta precipitaciones no mayores a los 1.000 mm anuales. En las áreas con este tipo de clima, las heladas son una constante que se presenta cada año.

Un segundo tipo de clima lo constituyen el cálido-húmedo y el cálido-subhúmedo. En las zonas con este clima, llueve durante el verano o a lo largo de todo el año. Las zonas con este tipo de clima se ubican en las planicies costeras del golfo de México, del océano Pacífico, el istmo de Tehuantepec, en el norte de Chiapas y en la península de Yucatán.

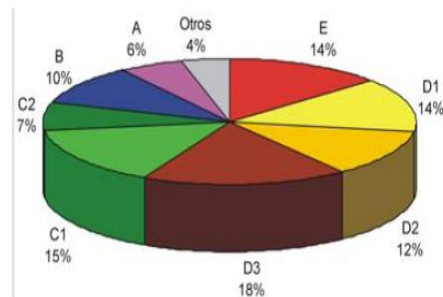
En la zona templada altiplánica del país, el promedio de lluvia es de 635 mm anuales. La zona más fría, de alta montaña, registra índices de 460 mm. En tanto, el semidesierto del norte del Altiplano apenas alcanza 254 mm de lluvia anuales. En contraste con la aridez de este territorio (que concentra el 80% de la población Mexicana), existen algunas regiones que pueden recibir casi 1.000 mm y hasta 3.000 mm (*Estadística de la República Mexicana, Emiliano Busto, 2006*).

Las zonas con déficit de humedad severos (climas semiáridos árido y semiárido), ocupan 659,156.56 km<sup>2</sup> representan el 33.64% del país. Estas áreas cuentan con períodos de humedad cortos, sujetas a variaciones climáticas que repercuten en un aprovechamiento principalmente pecuario y silvícola. Los ecosistemas de estas áreas son muy frágiles, ya que si son degradados, su tiempo de recuperación es relativamente largo. Los Estados que agrupan la mayor parte de esta superficie son; Coahuila, Sonora, Chihuahua, Nuevo León, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas, Tamaulipas, Sinaloa, Guanajuato y Aguascalientes.

Las zonas con déficit de humedad moderada (clima semiárido húmedo, color café) ocupan 305,067.82 km<sup>2</sup> que representan el 16% de México. Abarcan una gran cantidad de condiciones físicas, caracterizadas normalmente por un período de humedad bien definido que hace posible en la mayoría de los casos una agricultura de temporal marginal, sin embargo, dependiendo de los cultivos, son necesarios riegos de auxilio o de punta que permitan asegurar una cosecha. Los Estados que agrupan la mayor parte de esta superficie son; Yucatán, Zacatecas, Guanajuato, Aguascalientes, Campeche, Guerrero, Michoacán, Querétaro, Hidalgo, Morelos, Oaxaca, Colima, Puebla y Jalisco. (Ver figura III 3.2.1.1)

**FIGURA III 3.2.1.1** Superficies por grupo climático para el clima anual de la República Mexicana

| CLIMA               | Superficie % |
|---------------------|--------------|
| ARIDOS Y SEMIÁRIDOS | 57.64        |
| SUBHÚMEDOS          | 22.48        |
| HÚMEDOS             | 10.28        |
| PER HÚMEDO          | 5.52         |
| OTROS               | 4.08         |
| TOTAL               | 100.00       |



FUENTE: Emiliano Busto, 2006

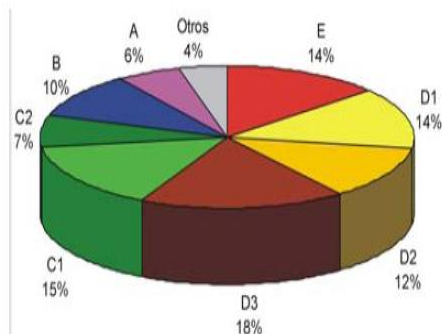
### Clima de la mitad caliente del año (mayo – octubre)

La mitad caliente del año es coincidente con la temporada de lluvias de la mayor parte del país, presenta gran similitud con el balance de humedad anual, incluso la superficie de zonas con déficit de humedad muy severo, severo o moderado es de 1,129,250.67 km<sup>2</sup> que representa el 57.64% del país, no obstante los porcentajes se distribuyen en forma un poco diferente debido a las lluvias de temporada y a las altas temperaturas de verano. (Ver figura III 3.2.1.2)



**FIGURA III 3.2.1.2 Superficies por tipo de clima para la mitad caliente del año**

| CLIMA               | Superficie % |
|---------------------|--------------|
| ARIDOS Y SEMIÁRIDOS | 57.64        |
| SUBHÚMEDOS          | 22.48        |
| HÚMEDOS             | 10.28        |
| PER HÚMEDO          | 5.52         |
| OTROS               | 4.08         |
| TOTAL               | 100.00       |



FUENTE: Emiliano Busto, 2006

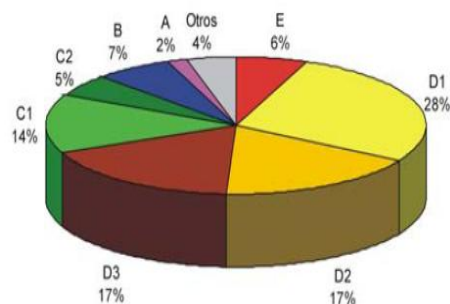
### Clima de la mitad fría del año (noviembre – abril)

La mitad fría del año es un período caracterizado por la disminución de las temperaturas (otoño e invierno) y la carencia de precipitaciones en la mayor parte de la superficie del país, que se ve reflejado en los porcentajes de las zonas con diferentes problemas de humedad que se incrementan al 68.34% del país (1, 338,925.64 km<sup>2</sup>), principalmente en la categoría de déficit severo. Si bien en otoño e invierno no son producidas la mayor parte de las agrícolas de temporal en México, este período refleja la fragilidad del país ante la aparición tardía de la época de lluvias, ya que durante los meses referidos, en 876,515.20 km<sup>2</sup> que representan el 45% de México, la carencia de humedad se vuelve severa.

Particularmente notorio es el hecho que dicho déficit aparezca no únicamente en los Estados que integran el Altiplano Mexicano y el Noroeste del País, sino que se extienda al Centro y Sur de la República en entidades como Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Campeche y Yucatán entre otros. (Ver figura III 3.2.1.3)

**FIGURA III 3.2.1.3 Superficies por tipo de clima para la mitad fría del año**

| CLIMA               | Superficie % |
|---------------------|--------------|
| ARIDOS Y SEMIARIDOS | 68.34        |
| SUBHÚMEDOS          | 19.03        |
| HÚMEDOS             | 6.71         |
| PER HÚMEDO          | 1.84         |
| OTROS               | 4.08         |
| TOTAL               | 100.00       |



FUENTE: CEPAL, 2007

### 3.2.2 Temperatura de México

La radiación solar media anual en la República Mexicana es aproximadamente de 450 cal/cm<sup>2</sup>/día. Esta radiación es mayor que la media del globo terráqueo que es de 300 cal/cm<sup>2</sup>/día (eficiencia en la utilización de esta radiación por los cultivos, es frecuentemente menor a 1%, destaca la caña de azúcar con una eficiencia de 1.43 % y una producción de materia seca 2 veces superior al maíz por ciclo de cosecha).

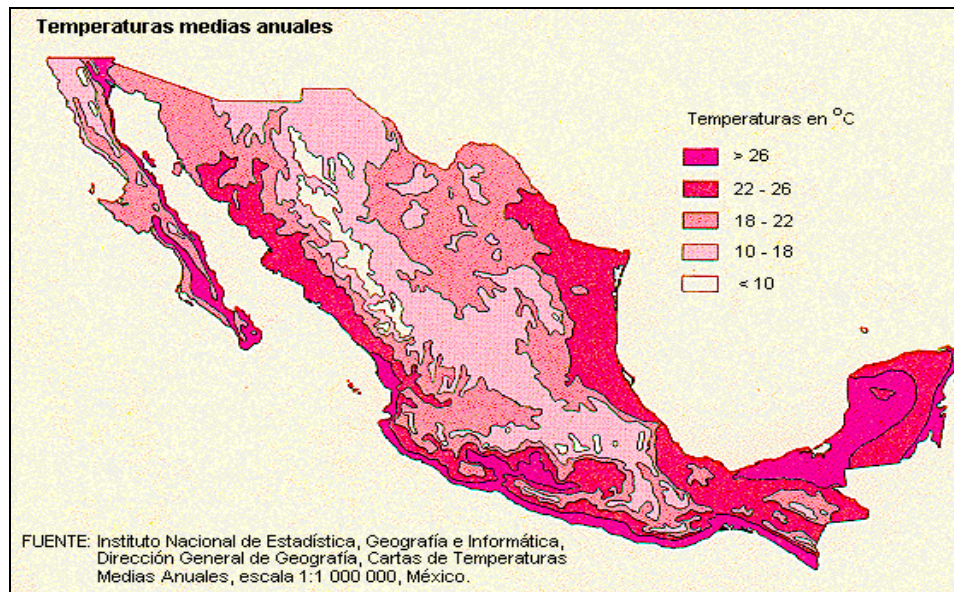
La temperatura del aire es un factor importante para las cosechas, controla las proporciones de las reacciones bioquímicas de varios procesos de crecimiento y del metabolismo de los vegetales; las *constantes térmicas* son las cantidades de calor que las plantas necesitan para su pleno desarrollo según la especie a cultivar. Las constantes térmicas se calculan a partir de los datos de temperaturas diarias desde la siembra hasta la maduración de un cultivo. Los datos de temperatura, también nos ayuda a prever, prevenir y hasta cierto punto de controlar con medidas preventivas para las bajas temperaturas, heladas, lapsos libres de heladas etc. en México.

La carta de isotermas muestra que al norte del paralelo 20 N, las áreas que están comprendidas desde la orilla del mar, con excepción de la región de Huasteca, donde la temperatura media es de 26 °C, las temperaturas medias anuales incluyen el norte de Veracruz, Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, parte de Jalisco, Nayarit, Sinaloa y

Sonora, así como el sur y el oriente de la Península de baja California (*Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2006*)

En la Figura III 3.2.2.1 Se muestra las temperaturas medias anuales de la República Mexicana.

**FIGURA III 3.2.2.1** *Temperaturas medias anuales de la República Mexicana*



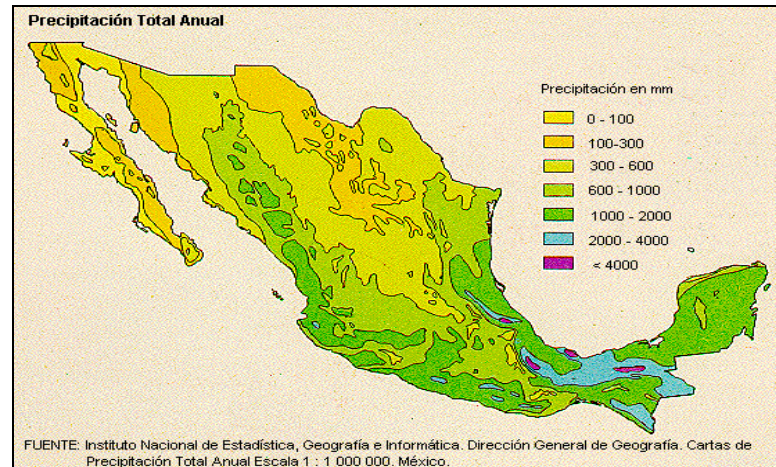
### 3.2.3 La precipitación pluvial en la República Mexicana

En nuestro país la cantidad de lluvia anual en de: 50 mm en Mexicali B.C. y 5500 en Covadonga y Chiapas 5720 mm en Tenango, Oaxaca. En México el total anual de agua disponible alcanza 472 km<sup>3</sup>, contamos con una capacidad de almacenamiento de 180 km<sup>3</sup>, se puede regular el volumen de 84 km<sup>3</sup> del total anual del agua disponible. Aproximadamente dos tercios de la superficie nacional es árida o semiárida.

Las regiones de buena lluvia para propósitos agrícolas se encuentran en las siguientes entidades: Tabasco, Veracruz, Jalisco, Nayarit, Morelos, Chiapas, Colima, Campeche, México y las regiones en donde la agricultura prospera por el riego, se encuentran en Baja California, Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Durango, Tamaulipas, Guanajuato,

Querétaro y Puebla. En la siguiente figura se puede observar la precipitación total anual en la República Mexicana

**FIGURA III 3.2.3.1** *Precipitación anual total en la República Mexicana*



Para las aproximadamente 6 millones de hectáreas que se consideran de riego, se utilizan 54 km<sup>3</sup> de agua por año: el 66% es proveniente de aguas superficiales y el 34% de aguas subterráneas (9 millones de litros por hectárea regada, como lámina bruta por ciclo).

Es importante mencionar el agua consumida por sectores: Irrigación 84%; Industria 12%; Agua potable 4%. (INEGI, 2007)

### 3.2.4 La evapotranspiración

La evapotranspiración, representa la cantidad de agua perdida por las plantas durante su ciclo vegetativo y se compara con la lluvia o el riego disponible necesario a fin de efectuar un balance hídrico en cualquier región. Se mide como la suma de las cantidades de agua evaporada desde el suelo y la transpirada por las plantas.

A manera de ejemplo de evapotranspiración potencial calculada por el método de Thornhwaite para 6 estaciones meteorológicas. En la siguiente tabla se muestran los siguientes datos anuales de diferentes estados de la República Mexicana.

**TABLA III 3.2.4.1 Evapotranspiración (mm)**

| <b>Estación</b>            | <b>Evapotranspiración<br/>Potencial anual (mm)</b> |
|----------------------------|--|
| <b>Guadalajara Jalisco</b> | 877  |
| <b>Guaymas, Sonora</b>     | 1392   |
| <b>Salina Cruz, Oaxaca</b> | 1748   |
| <b>Monterrey, N.L</b>      | 1185   |
| <b>Morelia Michoacán</b>   | 814  |
| <b>Mérida, Yucatán</b>     | 1522   |

*FUENTE: SAGARPA, 2008*

### **3.3 USO DE SUELO**

La superficie total del país, los bosques ocupan el 18%, el matorral ocupan aproximadamente el 30%, los pastizales el 14%, otros tipos de vegetación y los asentamientos humanos representan el 4% para dejar una proporción cercana al 16% como superficie susceptible de cultivarse con la tecnología del riego o del temporal. La superficie del riego que actualmente se aprovecha, es de 6 millones de hectáreas que se consideran de riego, se usan 54 km<sup>3</sup> de agua por año: el 66% es proveniente de aguas superficiales y el 34% de aguas subterráneas. El agua que se consume por sectores es la siguiente: Agricultura 70%, Industria 25% y agua potable 4%. (*Comisión Nacional del Agua CNA, 2008*)

La superficie de riego que actualmente se aprovecha es de 6 millones aproximadamente de Ha, de las cuales 2 millones se riegan con sus aguas subterráneas mediante bombeo y 4 millones con aguas superficiales de presas de almacenamiento. La superficie de temporal es de aproximadamente 21 millones de hectáreas, en 5 entidades de la república ubicadas en el sur-sureste: Veracruz, Chiapas, Tabasco, Campeche y Yucatán, la superficie ocupada por pastizales alcanza aproximadamente 7 millones de hectáreas dentro de las cuales, si combinamos las condiciones climáticas, edáficas, sociales y económicas, encontramos los espacios que nos permiten un amplio desarrollo de los cultivos para producir

Biocombustibles, sin que se destinen a la producción de alimentos básicos (INEGI, SAGARPA, 2008)

### **3.3.1 Cultivos energéticos en México**

A lo largo de la historia en México se han cultivado unas 3,000 especies para fines alimentarios de las que solamente unas 150 lo han sido a escala comercial. Hoy en día, la alimentación mundial está basada en 20 cultivos principales, de los cuales 4 de ellos (caña de azúcar, maíz, arroz y trigo) representan el 61% de la producción agrícola mundial. Existen casos en que la sobreproducción de algunos cultivos provoca una sobre-oferta, lo que puede suponer un grave problema, y llegar a fomentar e incentivar el abandono de tierras de cultivo para productos alimentarios tradicionales y se fomenten las alternativas de cultivos con fines no alimentarios, enfocándolos a la producción de energía.

Para garantizar la continuidad de las actividades del sector agrícola es necesario pensar en cultivos, que puedan dar rentabilidad a las tierras agrícolas retiradas de la producción de alimentos y cuyas producciones no estén sujetas a causa de contingencias a causa de saturación del mercado. Deben ser cultivos de gran demanda, susceptibles de producirse a partir de plantaciones extensivas; y con un costo de producción tal, que haga rentable su comercialización. Para que se den estas circunstancias hay que pensar necesariamente en el sector energético per cápita es varias veces superior al alimentario.

En México, en virtud de las características de su producción agrícola, su bajo grado de autosuficiencia alimentaria, de la organización social en la producción de cultivos energéticos y sus generosos trópicos, debemos mencionar en primer lugar a la caña de azúcar, la remolacha azucarera y a la yuca como materias primas prioritarias para la producción de Bioetanol.

También, en determinadas zonas con problemas puntuales de calidad de suelos o de carácter climático, que se reflejan en baja productividad y desperdicio de recursos, se podrían considerar los cultivos del trigo y del sorgo.



La caña de azúcar se cultivan actualmente en México en un poco más de 750 mil hectáreas en 15 estados de la República Mexicana y hasta ahora con propósitos exclusivos de producción de azúcar. La remolacha azucarera se ha cultivado en la Región del Mar de Cortés, con propósitos exitosos de demostración, pero actualmente estos esfuerzos están suspendidos. La remolacha forrajera se cultiva en superficies moderadas en las cuencas lecheras de la nación. De yuca, en el año de 2007 se sembraron 1,336 ha, principalmente en el estado de Tabasco. Vale la pena mencionar los esfuerzos realizados en esa entidad por los productores de la región, que lamentablemente no prosperaron por razones ajenas a los aspectos agrícolas. (SAGARPA, 2008).

En el caso de cereales, de los que somos deficitarios para la alimentación humana y que sin embargo podrían usarse como materia prima para la producción de Bioetanol, en condiciones específicas, con problemas locales de carácter técnico, económico y social, encontramos el trigo de Mexicali B.C, que por ubicarse muy lejano de los centros de consumo debe ser subsidiado sobre todo para su transporte. Así, la solución podría ser el darle valor agregado en el sitio a la producción del grano y la paja para la fabricación de Bioetanol para su consumo en el estado, mezclado con las gasolinas, se deberían desarrollar las tecnologías para mejorar los suelos y elevar la productividad del cultivo. (SENER, 2008)

En México, se cultivan desde siempre, el maíz, la caña de azúcar, el trigo, la yuca, la remolacha y el sorgo. Actualmente no se tiene experiencia con la remolacha tropical. De las especies mencionadas, se cultivan miles de hectáreas cada año con tecnología de “temporal” y de “riego”.

**En las regiones siguientes se cultiva:**

Caña de azúcar: Bajo Papaloapan, Huastecas, Balsas.

Sorgo grano: Golfo Norte

Remolacha azucarera: Mar de Cortés

Remolacha tropical: Bajo Papaloapan y Peninsular

Yuca: Bajo Papaloapan y Peninsular

## **Las tecnologías en el uso del agua son:**

Caña de azúcar: Temporal y Riego

Sorgo: Temporal

Remolacha azucarera: Riego

Remolacha tropical: temporal

Yuca: Temporal

Ante la posibilidad de producir biomasa para fines energéticos por el sector agrario, surge el concepto de agro energía, que se puede definir como una nueva faceta de la agricultura, en la que se pretende la producción de biomasa mediante cultivos específicos, y la transformación de ésta en productos energéticos de fácil utilización en los sistemas convencionales, en sustitución de los combustibles tradicionales. El desarrollo de esta actividad agrícola en un plazo más o menos breve depende principalmente de (1) la identificación de especies vegetales adecuadas para producir biomasa en las tierras agrícolas disponibles, (2) la disponibilidad de tecnología necesaria para hacer competitiva la producción de biocombustible, (3) el interés de la sociedad por conservación y protección del medio ambiente, y (4) el establecimiento de políticas adecuadas para estimular al agricultor y al industrial a iniciar esta actividad (*SENER BID, 2007*).

Como los objetivos perseguidos en los cultivos energéticos son distintos a los perseguidos con los alimentarios, es de esperarse que las especies seleccionables para este uso sean distintas a las empleadas como alimento. Las especies dedicadas a producir biomasa con fines energéticos pueden ser de tipo herbáceo o leñoso, o semillas en el que se tengan excedentes, y a veces pueden coincidir con especies utilizadas en cultivos agrícolas tradicionales o en aprovechamientos silvícolas clásicos. La principal condición que debe darse para el desarrollo de cultivos energéticos es la necesidad de que la producción sea económicamente rentable, para lo cual deben alcanzarse elevados rendimientos de biomasa con bajos costos de producción, recolección, almacenamiento y procesado para su transformación. La biomasa que se produce en el país sin aprovechamiento para consumo humano como el bagazo del agave (producción de tequila), la cascarilla de café, de arroz, de trigo, lirio acuático, estiércol, y muchos otros, también puede emplearse como energético.



Ejemplos de aprovechamiento actual son la leña y el bagazo de la caña de azúcar, sin embargo, las demás no se aprovechan. Algunos estados como Durango, Sonora, Sinaloa, Querétaro, Veracruz y Chiapas pueden contribuir con este recurso a disminuir el consumo de productos petrolíferos.

La ventaja estratégica en cuanto a la balanza de pagos del país, resulta al sustituir los combustibles producidos a partir del petróleo; suponiendo la disminución de dependencia del manejo del costo del barril de petróleo en el acuerdo internacional, además de un ahorro de divisas (*Centro de Estudios de las Finanzas Públicas CEFP, 2007*)

### **3.3.2 Principales regiones agrícolas en México**

La siguiente tabla muestra los principales cultivos en las regiones agrícolas de la República Mexicana y las zonas en la que se producen.

**TABLA III 3.3.2.1 Principales cultivos en las regiones agrícolas**

| <b>Región Agrícola</b>                          | <b>Zona</b>   | <b>Cultivos</b>   |
|---|---|---|
| <b>1) Mar de Cortés</b>                         | a) Valle de Mexicali y San Luis Río Colorado<br>b) Valles ríos Yaqui y Mayo<br>c) Valles del Fuerte y Culiacán, Sinaloa | Trigo y algodón<br>Trigo y cártamo<br>Maíz, hortalizas y frijol |
| <b>2) Occidente</b>                             | Sur Sinaloa, Nayarit, Jalisco, sur Michoacán, Colima  | Maíz, caña de azúcar, aguacate, agave tequilero.                |
| <b>3) Pacífico Sur</b>                          | Costas de Chiapas, Oaxaca y Guerrero  | Café, frutales (plátano, mango) copra.                          |
| <b>4) Norte</b>                                 | Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Zacatecas norte y SLP sin huasteca  | Maíz, frijol y avena  |
| <b>5) El Bajío</b>                              | Guanajuato sin el norte del estado, Querétaro sin huasteca, Michoacán sin el norte, Aguascalientes y sur de Zacatecas   | Maíz, sorgo y hortalizas  |
| <b>6) Centro-Valles Altos</b>                   | México, Puebla e Hidalgo, sin huasteca, Tlaxcala  | Maíz, avena y cebada  |
| <b>7) La Laguna</b>                             | Coahuila sureste y Durango este   | Forrajes y maíz   |
| <b>8) Golfo Norte</b>                           | Tamaulipas sin huasteca   | Maíz y sorgo  |
| <b>9) Huastecas</b>                             | Limites de los estados vecinos de Tampico, Ver, SLP, Puebla, Hidalgo y Querétaro  | Maíz, caña de azúcar y café                                     |
| <b>10) Golfo Centro</b>                         | Veracruz centro   | Caña de azúcar, café y cítricos                                 |
| <b>11) Cuenca Papaloapan</b>                    | Sur de Veracruz, NO de Oaxaca   | Caña de azúcar y maíz   |
| <b>12) Valles Centrales de Chiapas y Oaxaca</b> | Valles centrales de Chis y Oaxaca   | Maíz y frijol   |
| <b>13) Peninsular</b>                           | Yucatán, Q. Roo, Campeche y Tabasco   | Maíz, cacao, caña de azúcar y cítricos                          |

Fuente: SAGARPA, 2007 "Las Regiones Agrícolas de México"

### 3.3.3 Los fertilizantes

Después del agua de riego, cuando ésta es la tecnología usada, el fertilizante es el insumo más importante para conservar la fertilidad de los suelos y elevar la producción y productividad agrícolas. En el caso de la agricultura de temporal, el fertilizante es el insumo de mayor importancia.

A partir de comprender y evaluar las experiencias demostradas en el mundo entero, se expresa lo siguiente con respecto a los fertilizantes:

- a. Aún más del 40% del gran incremento en la producción de cereales en las últimas décadas, en el mundo, se atribuye al aumento en el uso del nitrógeno fertilizante
- b. Sin fertilizante las variedades con alto potencial de rendimiento y calidad, no producen más, ni mejor, que las variedades tradicionales.
- c. El cultivo de la tierra con las tecnologías apropiadas, entre las cuales destaca la nutrición vegetal ha propiciado el que, si hace 30 años el abastecimiento mundial de alimentos representaba 2,360 calorías diarias por persona; a mediados de los años 90 se alcanzaron 2,740 calorías diarias por persona (Organización para la agricultura FAO).

Es de importancia mencionar que a los elevados precios de los fertilizantes que hoy se consumen en el país, este insumo representa entre el 25 y el 35% del costo de producción de los granos básicos, según se trate de tecnologías de riego o de temporal.

El Nitrógeno, fósforo y potasio, son los fertilizantes más usados vienen aumentando sus precios y lo seguirán haciendo durante el 2010. Este tipo de producto está atado al dólar y a lo que suceda en el mundo. El aumento de producción de semillas para biocombustibles hizo crecer la demanda de fertilizantes.

Existen diferentes tipos de fertilizantes, sólidos, líquidos y gaseosos, dentro de los fertilizantes líquidos, estos últimos son los de más bajo precio los tipos más característicos son los siguientes:

- a) *Suspensiones*: gracias a la utilización de arcillas dispersas en el agua pueden mantenerse soluciones sobresaturadas de alguna sal (generalmente cloruro potásico) para alcanzar concentraciones totales elevadas en forma líquida. Para mantener las suspensiones se requiere una agitación periódica.
- b) *Soluciones con presión*: soluciones acuosas de nitrógeno en las que participa como componente el amoniaco anhidro con concentración superior a la que se mantiene en equilibrio con la presión atmosférica. Para su aplicación se requieren equipos especiales que soportan la presión adecuada.
- c) *Soluciones normales o clara sin presión*: soluciones acuosas que contienen uno o varios elementos nutritivos disueltos en agua.

Los abonos líquidos ofrecen las siguientes ventajas respecto a los sólidos:

- Su manejo es totalmente mecanizable
- Se alcanza un gran rendimiento en la aplicación
- Se consigue una gran uniformidad en la distribución sobre el terreno.

Las propiedades químicas de los fertilizantes determinan tanto su comportamiento en el suelo, como su manipulación y conservación, destacando lo siguiente:

- **Solubilidad**: la solubilidad en agua o en determinados reactivos es determinante sobre el contenido o riqueza de cada elemento nutritivo en un fertilizante concreto.
- **Reacción del fertilizante sobre el pH del suelo**: viene determinada por el índice de acidez o basicidad del fertilizante, que se corresponde con la cantidad de cal viva que es necesaria para equilibrar el incremento de acidez del suelo (fertilizantes de reacción ácida ) o producir un incremento de pH equivalente (fertilizantes de reacción básica)
- **Higroscopicidad**: capacidad de absorber agua de la atmosfera a partir de un determinado grado de humedad de la misma, esta absorción puede provocar que una parte de las partículas se disuelvan, con lo que se deshace la estructura física del fertilizante. Generalmente, cuando mayor es la solubilidad del fertilizante en agua, mayor es su higroscopicidad. Esta absorción puede provocar que una parte de las

partículas se disuelvan, con lo que se deshace la estructura física del fertilizante.  
([www.quiminet.com](http://www.quiminet.com))

En la siguiente tabla se muestran diferentes tipos de fertilizantes nitrogenados usados en la industria, las cifras están referidas en toneladas.

**TABLA III 3.3.3.1 Fertilizantes nitrogenados, cifras en toneladas de amoniaco equivalente**

| PRODUCTO (A)                     | CONSUMO NACIONAL (B) | CAPACIDAD INSTALADA (C) | PRODUCCION NACIONAL (D) | IMPORTACIONES (E) | SUMA DE LA OFERTA (F) | CONSUMO NACIONAL 1996 (G) | DIFERENCIA (H=B-G) |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| 1. Amoniaco                      |                      | 1'914,000               | 524,519                 | 35,163 *          |                       |                           |                    |
| 2. Amoniaco aplicación directa   | 192,256              | 192,256                 | 192,256                 |                   | 192,256               | 326,189                   | (133,933)          |
| 3. Urea                          | 740,004              | 974,639                 | 0                       | 740,004           | 740,004               | 819,024                   | ( 79,020)          |
| 4.-Nitrato de amonio**           | 56,915               | 311879                  | 0                       | 56,915            | 56,915                | 142,882                   | ( 85,967)          |
| 5. Sulfato de amonio             | 291,961              | 489,144                 | 278,888                 | 13,073            | 291,961               | 424,338                   | (132,377)          |
| 6. Fosfato de amonio             | 120,257              | 173,438                 | 0                       | 120,257           | 120,257               | 109,756                   | 10,501             |
| 7. Nitrofosfatos abono NPK       | 32,793               | 38,130                  | 0                       | 32,793            | 32,793                | En fosfatos               | 32,793             |
| Total Solidos (3 a 7)            | 1'241,930            | 1'985,231               | 278,868                 | 963,042           | 1'241,930             | 1'496,000                 | (254,070)          |
| Suma (incluye NH3 aplic directa) | 1'434,186            | 2'177,487               | 471,144                 |                   | 1'434,186             | 1'822,189                 | (388,003)          |

FUENTE: Dirección Aduana SHCP, Pemex

## CAPITULO 4

### **CONSIDERACIONES GENERALES DE LAS MATERIAS PRIMAS SELECCIONADAS PARA LA OBTENCION DEL BIOETANOL**

#### **4.1 CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO**

La dotación de recursos naturales de México puede desarrollar una importante industria de agro energía y biocombustibles y contribuir a disminuir la pobreza en ciertas zonas. La industria azucarera es una actividad relevante para el país, el cual cuenta actualmente con 57 ingenios (Ver tabla IV 4.1.1), la producción de caña de azúcar se registra en 15 estados de la Republica Mexicana (Ver figura ), beneficia a 227 municipios de la cadena agroindustrial y genera aproximadamente 440 mil empleos directos y 2.5 millones de empleos indirectos. Los ingenios mexicanos procesan la producción generada en aproximadamente 500 mil hectáreas cultivadas, que generan un promedio anual de 34 millones de toneladas de caña de azúcar, con rendimiento de 68 a 69 toneladas por hectárea.

**TABLA IV 4.1.1** *Estados productores de caña de azúcar de la Republica Mexicana*

| <b>Estados Productores</b> | <b>Número de Ingenios</b> |
|----------------------------|---------------------------|
| Veracruz                   | 22                        |
| Jalisco                    | 6                         |
| San Luis Potosí            | 4                         |
| Oaxaca                     | 4                         |
| Michoacán                  | 3                         |
| Tabasco                    | 3                         |
| Sinaloa                    | 3                         |
| Chiapas                    | 2                         |
| Nayarit                    | 2                         |
| Puebla                     | 2                         |
| Tamaulipas                 | 2                         |
| Morelos                    | 2                         |
| Quintana Roo               | 1                         |
| Colima                     | 1                         |
| Campeche                   | 1                         |

*FUENTE: Comisión Especial para la Agroindustria Azucarera, 2009*

En términos generales, el nivel de productividad de la industria azucarera en México es alto, los rendimientos en campo y en fábrica están por arriba del promedio mundial; no obstante, los costos de producción son superiores a los considerados como eficientes. (SAGARPA, INEGI 2008)

El cultivo de la caña se tiene en una superficie de 812 mil hectáreas a nivel nacional. La superficie cosechada en 2007/2008 fue de 683mil hectáreas. La participación de producción de caña de azúcar en el PIB nacional es de 0.06%.

Actualmente el sector azucarero atraviesa por una profunda crisis como consecuencia de las políticas proteccionistas de algunos países y bloques comerciales, la que se intensifica por la aparición de nuevos productos de laboratorio, capaces de substituir el azúcar (edulcorantes). Este hecho se refleja claramente en la sostenida caída de los precios de venta del azúcar. Todo esto indica que existe la necesidad de diversificar la gama de productos del sector mediante la implementación de sistemas alternativos para la producción de energía y combustibles, la producción de alimento animal y de otros derivados.

En México las centrales azucareras tienen que diversificar un mejor aprovechamiento de los residuos de la agroindustria. Por una parte, el bagazo se valoriza cuando se utilizan tecnologías para incrementar la generación de energía eléctrica a un costo ambiental bajo. Por otro, el cogollo, y hojas las pueden ser utilizados como alimento animal, así como otros preparados a partir del bagazo hidrolizado. La opción por la diversificación productiva en la industria azucarera conduce al aumento considerable de las ganancias netas específicas. En un futuro inmediato la cogeneración con altos parámetros del vapor constituye una alternativa real de diversificación.

#### **4.1.1. Composición de la caña de azúcar**

El azúcar es sacarosa, un carbohidrato de origen natural compuesto por carbono, oxígeno e hidrógeno (carbohidrato). Los azúcares *blancos* son alimentos muy puros con más del 99% de sacarosa. Los azúcares *crudos* poseen un contenido algo menor de sacarosa (>94%) pues conservan aún parte de la miel a partir de la cual fueron fabricados. La caña de azúcar contiene entre 8 y 15% de sacarosa. El jugo obtenido de la molienda de la caña se concentra

y cristaliza al evaporarse el agua por calentamiento. Un rendimiento de 75 toneladas de tallos de caña por hectárea, conlleva aproximadamente 25 toneladas de cogollos y hojas, o sea, la cosecha de caña integral de 100 toneladas por hectárea, entendida como caña verde o cruda, no quemada. En la tabla siguiente se muestra la composición química en porcentajes del bagazo de caña

**TABLA IV 4.1.1.1** *Composición química del bagazo de caña*

| <b>Componente</b>                  | <b>Bagazo entero seco %</b> |
|------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Celulosa</b>                    | 51.23                       |
| <b>Hemicelulosa</b>                | 24.11                       |
| <b>Lignina</b>                     | 20.67                       |
| <b>Cenizas y otros componentes</b> | 3.99                        |
| <b>Suma</b>                        | 100                         |

*FUENTE: Instituto Cubano de Investigaciones de los derivados de la caña de azúcar*

#### **4.1.2 Regiones cañeras de la República Mexicana**

La superficie cosechada en 2007/2008 fue de 683mil hectáreas. La superficie cultivada en el país supera las 812 mil hectáreas de las cuales en la zafra pasada 2008-09, se industrializó la caña producida en 657 mil hectáreas.

El país en el contexto mundial del azúcar ocupa:

- 7° lugar en producción de azúcar centrífuga
- 7° lugar en consumo de azúcar
- 6° lugar en producción de azúcar
- Entre 4° y 5 lugar en producción de azúcar por hectárea



**FIGURA IV 4.1.2.1** Estados de la Republica Mexicana donde se produce la caña de azúcar



FUENTE: Comisión Especial para la Agroindustria Azucarera, 2009

En la producción mundial en campo, México ocupa el 13° lugar en la relación producción de caña de azúcar por hectárea (Ver tabla siguiente)

**TABLA IV 4.1.2.1** Producción mundial en campo de caña de azúcar

|                  |                 |
|------------------|-----------------|
| <b>Colombia</b>  | <b>110 -120</b> |
| <b>Australia</b> | 90 – 100        |
| <b>Guatemala</b> | 78 – 90         |
| <b>México</b>    | 74 -75          |
| <b>EU</b>        | 68 - 75         |
| <b>Sudáfrica</b> | 65 - 68         |

Fuente: Elaboración de Financiera Rural “Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial”

Los ciclos del cultivo de la caña se identifican como “Plantillas” para aquéllas de primer corte con edades de 14 a 18 meses, según variedades tempranas o tardías; “Socas” que son las cañas para el segundo corte y “Resocas” cañas del tercer corte hasta el final de la vida útil del cultivo, en México en su mayor superficie alcanza siete cortes en ocho años, es posible

encontrar cañas de 20 y hasta 30 años de plantadas. Naturalmente los cañales disminuyen su producción en función del tiempo transcurrido y por ello, ocurren los “volteos” de “cañas viejas” y las nuevas plantaciones (*Unión Nacional de Cañeros A.C*)

De la superficie cultivada, aproximadamente el 35% es de riego y el resto recibe el agua de la lluvia, es decir, es de temporal, obviamente en su totalidad dentro de las zonas tropicales.

La producción cañera y de azúcar se registra en 15 estados del país de la siguiente manera: Campeche (1 ingenio), Colima (1), Chiapas (2), Jalisco (6), Michoacán (4), Morelos (2), Nayarit (2), Oaxaca (3), Puebla (2), Quintana Roo (1), Sinaloa (4), San Luis Potosí (4), Tabasco (4) y Tamaulipas (2), aparte de los que se ubican en el estado de Veracruz. La agroindustria azucarera veracruzana se compone de 22 ingenios que representan al 36 por ciento de la planta azucarera nacional, los cuales se abastecen de una superficie industrializable de 233 mil 11 hectáreas de caña de azúcar y dan ocupación directa e indirecta a 145 mil personas en campo y 22 mil en fábrica, lo que hace un total de 167 mil empleos. En Veracruz, una población de un millón de personas depende de esta actividad económica. (*Valdez Emilia, 2008*)

*a) Cultivos de caña: área sembrada y rendimiento actual*

El área de siembra de caña de azúcar en México es de 680 mil hectáreas.

*b) Azúcar: producción, rendimiento y costos*

La producción total es de 77,5 toneladas por hectárea de caña y el rendimiento de 8,8 toneladas de azúcar por hectárea

*c) Mecanización e irrigación*

El 30% del área sembrada con caña de azúcar tiene irrigación

*d) Etanol: producción (por hectárea y por tonelada de azúcar) y costos*

La producción de etanol por hectárea es de 4,659 litros y de 52,8 litros por tonelada de caña de azúcar

### e) *Capacidad Industrial Instalada*

La capacidad de la molienda es de 288,234 toneladas de caña por día, distribuida en 58 ingenios

*FUENTE: Instituto Cubano de Investigaciones y Unión Nacional de Cañeros A.C, 2007*

La problemática del sector azucarero según la Agroindustria de la caña de azúcar en México, consiste en:

- a. Rezago tecnológico, tanto en el proceso industrial como en las técnicas de cultivo de la caña de azúcar, provocadas en buena medida por la desorganización del trabajo en el campo, deficiencias en la aplicación de paquetes tecnológicos y falta de maquinaria agrícola.
- b. Sobre regulación del Estado en el proceso integral de producción primaria/comercialización del producto.
- c. Infraestructura heterogénea y en algunos casos obsoleta o rezagada, que provoca bajos rendimientos, pérdida de tiempo y costos elevados de producción.
- d. Serios problemas para obtener financiamiento, el cual requiere de múltiples gestiones y se otorga insuficiente, fuera de tiempo y sobre regulado. Adicionalmente priva el evento de la falta de garantías, pues las plantas se mantienen integralmente comprometidas con Financiera Nacional Azucarera (*FINASA*) o el Gobierno Federal, dado que no han concluido la liquidación de los procesos de venta.
- e. A la problemática de endeudamiento que enfrenta la industria -la cual se concentra en aproximadamente 30 deudores de *FINASA* y/o el Gobierno Federal, con adeudos estimados en 12 mil millones de pesos y severas dificultades para cubrirlos- se apareja la falta de inversión en la industria y en la modernización de los procesos de comercialización de los productos transformados, cuyas consecuencias son la deficiente distribución y la incapacidad para penetrar en un mercado interno de competencia abierta o en los mercados internacionales, mucho más complejos.
- f. La incipiente capacidad administrativa de los ingenios y la penetración legal de las organizaciones en las decisiones técnico-productivas, así como fenómenos de rezago y capacidad tecnológica en la producción primaria, la cual además tiene dificultades de movilización oportuna y eficiente por falta de transporte u obsolescencia del mismo.

- g. En general, los ingenios del país sufren altos niveles de endeudamiento, su descapitalización asciende a 2 mil 500 millones de pesos, lo cual representa entre el 30 y el 40 por ciento del valor de la planta productiva del país.
- h. Los ingenios que sobrevivan a la crisis, tendrán que volverse más eficientes y capaces de atraer inversión extranjera, lo que proporcionará la elevación de la producción de azúcar a su capacidad instalada actual, que es del orden de 5 millones de toneladas.

*Fuente: Comité de la Agroindustria Azucarera en México*

### **4.1.3 Precios de la caña de azúcar**

En el mercado de Azúcar y Edulcorantes a nivel nacional, el consumo de azúcar y edulcorantes es de 5.8 millones de toneladas, de los cuales:

- 5 millones corresponden al azúcar
- 800 mil toneladas a alta fructosa

El precio que recibe el agricultor por tonelada de caña es único, no diferenciado con otros cañeros y corresponde al 57% del valor del azúcar vendido por el ingenio, calidad estándar LAB ingenio. Es importante mencionar que estos precios de la caña obedecen a los decretos y a la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar y que solamente se pueden aplicar para la caña que se transformará en azúcar. Los algoritmos para determinar los precios y calidades de esta materia prima, no se pueden ni se deben aplicar en la misma forma cuando se trata de cañas para la producción de Bioetanol.

Los proveedores de caña con los fabricantes de Bioetanol, deberán establecer sus propias reglas y métodos de cálculo. *(Agroindustria Azucarera, 2008)*

A continuación se muestra una gráfica en la que se puede observar el diferencial entre el precio de la azúcar refinada en Estados Unidos y en México, (líneas azul y verde). Por otro lado, la tendencia que ha seguido el precio de la azúcar refinada en Estados Unidos, desde octubre de 2008 a junio de 2009, representada por la línea roja y calculada en centavos de dólar por libra, como se aprecia en la gráfica en el eje vertical derecho.

**GRAFICA IV 4.1.3.1** Diferencial entre el precio de la azúcar refinada en Estados Unidos y en México



Fuente: Zafranet y Milling, 2009

La brecha tan grande en el precio entre ambos países explica en gran parte el por qué del éxito exportador del azúcar refinada nacional hacia Norteamérica. Mientras el precio en los mercados nacionales se mantuvo corriendo muy cerca de la banda de los \$300 pesos por bulto de 50 Kg Lab ingenio, durante por lo menos de octubre de 2008 a marzo del 2009, en Estados Unidos partía de \$457 pesos y llegaba a febrero de este año a 582 pesos por bulto Lab ingenio, en promedio, 35.03-35.05 centavos de dólar por libra. Después del alza sufrida viene un periodo de ajuste escalonado a la baja hasta llegar a la banda de los 500 pesos, hacia mayo, y desde ahí retornar a los 550 pesos por bulto en los que se mantiene hoy en día. Mientras se ajustaba relativamente el precio a la baja en Estados Unidos, en México tendía al alza pasando de 317 pesos en marzo y llegar a 406 pesos en el mes de junio.

Al parecer, las exportaciones mexicanas generaron ambas tendencias, el precio a la baja en el norte y el precio al alza en México. No está demás aclarar que del total de exportaciones efectuadas y previstas por nuestro país hacia Estados Unidos en este ciclo, calculadas sobre un millón de toneladas, alrededor del 45% serán de la calidad refinada.

En la siguiente tabla se puede observar la diferencia en porcentajes y en pesos de refino de Estados Unidos contra el refino Nacional

**TABLA IV 4.1.3.1 Diferencia en % de refinado de EUA contra el refinado nacional**

| Meses  | Refino EUA pesos | Refino EUA cts /dólar por libra/* | Refino Nacional pesos/** | Diferencia en pesos | Diferencia en (%) |
|--------|------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------|
| oct'08 | 457.40           | 37.78                             | 312.87                   | 144.53              | 31.60             |
| Oct'08 | 496.47           | 35.43                             | 312.33                   | 184.15              | 37.09             |
| oct'08 | 490.87           | 35.03                             | 312.15                   | 178.72              | 36.41             |
| nov'08 | 514.52           | 35.03                             | 309.88                   | 204.65              | 39.77             |
| nov'08 | 514.52           | 35.03                             | 309.64                   | 204.88              | 39.82             |
| dic'08 | 534.98           | 35.08                             | 315.78                   | 219.20              | 40.97             |
| dic'08 | 534.98           | 35.08                             | 316.24                   | 218.74              | 40.89             |
| ene'09 | 555.02           | 35.18                             | 314.44                   | 240.57              | 43.35             |
| ene'09 | 552.65           | 35.03                             | 312.25                   | 240.40              | 43.50             |
| feb'09 | 582.00           | 35.03                             | 313.48                   | 268.52              | 46.14             |
| feb'09 | 582.34           | 35.05                             | 314.53                   | 267.80              | 45.99             |
| mar'09 | 546.55           | 35.03                             | 317.70                   | 228.84              | 41.87             |
| mar'09 | 546.55           | 35.03                             | 320.84                   | 225.71              | 41.30             |
| abr'09 | 530.10           | 34.73                             | 330.27                   | 199.82              | 37.70             |
| abr'09 | 528.57           | 34.63                             | 338.84                   | 189.73              | 35.90             |
| may'09 | 534.67           | 35.03                             | 347.99                   | 186.69              | 34.92             |
| may'09 | 508.51           | 35.03                             | 364.46                   | 144.04              | 28.33             |
| may'09 | 515.76           | 35.53                             | 391.82                   | 123.95              | 24.03             |
| jun'09 | 545.88           | 37.08                             | 398.12                   | 147.76              | 27.07             |
| jun'09 | 546.41           | 37.18                             | 406.14                   | 140.27              | 25.67             |

\*/ Mercado de crudos no. 14 más 7% más 12.25 centavos de dólar con 2% de descuento por pago de contado.  
 /\*\*Precio Promedio Ponderado Nacional (PPN) menos 7.5%.  
 Promedios quincenales.  
 Fuentes: Zafranel.com y Milling & Baking News.

En cuanto a la producción mundial de azúcar asciende a 147 millones de toneladas al año. Los principales productores son Brasil con 30%, la India con 21% y China con 7%. México es el sexto productor con aproximadamente cinco millones de toneladas que representan poco más del 3% de la producción mundial (SAGARPA, 2009)

#### **4.1.4 Contexto nacional de la caña de azúcar**

El 24 de Abril del 2009 en el Estado de Morelos se creó el Programa Nacional de la Agroindustria de la caña de azúcar PRONAC, con el planteamiento de establecer las líneas de política que habrían de guiar la conducción del sector hacia los próximos años. Con este programa se busca enfrentar la competencia en el mercado interno de edulcorantes, aprovechar con éxito la oportunidad que ofrece la apertura del mercado TLCAN y diversificar la oferta mediante la producción de biocombustibles, sucroquímica y la cogeneración de energía eléctrica.

Para tal propósito, se impulsará la conversión a riego de 76 mil hectáreas, más un incremento de 26 mil hectáreas a la superficie industrializable y la compactación de superficies mecanizables que permitan tener escalas productivas, eficientes y competitivas, además de avanzar en los procesos de cosecha, disminuyendo gradualmente la quema. Se impulsará la investigación y transferencia de tecnología, así como el acceso al financiamiento en la diversificación productiva tanto en la generación de energía eléctrica como de biocombustibles, utilizando a la caña de azúcar como fuente de energía renovable.

Todo este esfuerzo propiciará incrementos anuales de 3.3 por ciento en la producción de azúcar y para ello se deberá modernizar los procesos productivos para una mayor molienda, una disminución de tiempo perdido, combustóleo por tonelada de caña, pérdidas de sacarosa, una mayor recuperación de azúcar y una diversificación de los insumos y de los productos de la industria misma.

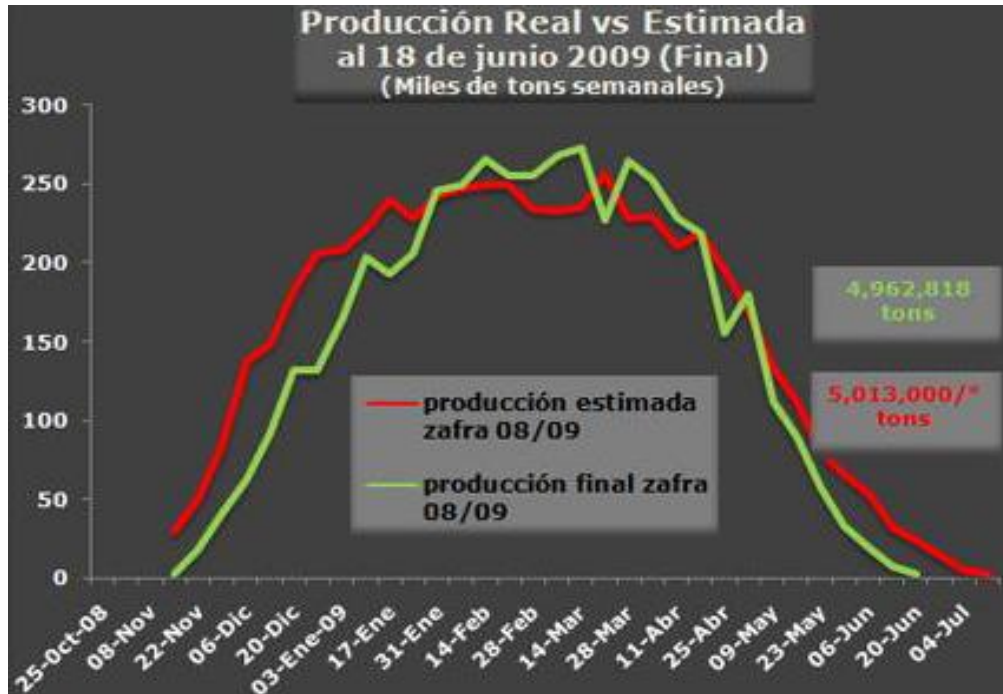
La situación actual de la producción es la siguiente:

En la zafra 2008/2009 (concluida el 18 de junio) de acuerdo al informe presentado por SAGARPA, se había cosechado una superficie total de 662,700 hectáreas. La zafra registró una molienda bruta de caña de 42,526,838 toneladas, lo que llevó a una producción de azucarera de 4,962,818 toneladas.

En la siguiente gráfica se puede apreciar la producción real (color verde) contra la producción estimada (color rojo)



**GRAFICA IV 4.1.4.1 Producción final zafra contra la producción estimada zafra 08/09**



Fuente: Unión Nacional de Cañeros CNPR

En la tabla IV 4.1.4.1 producción de caña de azúcar en México, está referida en superficie, rendimiento y precio.

**TABLA IV 4.1.4.1 Producción de caña de azúcar en México**

| Producción de Caña de Azúcar: México |                   |                         |           |                          |          |                    |                        |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------------|-----------|--------------------------|----------|--------------------|------------------------|
| Año                                  | Prod <sup>1</sup> | Superficie <sup>2</sup> |           | Rendimiento <sup>3</sup> |          | R + T <sup>4</sup> | Precio MR <sup>5</sup> |
|                                      |                   | Sembrada                | Cosechada | Riego                    | Temporal |                    |                        |
| 2000                                 | 42.37             | 0.67                    | 0.62      | 85.31                    | 57.98    | 68.53              | 255.38                 |
| 2001                                 | 45.50             | 0.65                    | 0.62      | 88.25                    | 62.90    | 72.95              | 289.30                 |
| 2002                                 | 45.64             | 0.66                    | 0.63      | 85.61                    | 63.25    | 72.18              | 299.58                 |
| 2003                                 | 47.48             | 0.68                    | 0.64      | 90.39                    | 63.03    | 73.69              | 313.77                 |
| 2004                                 | 48.66             | 0.70                    | 0.65      | 89.42                    | 64.97    | 74.65              | 328.57                 |
| 2005                                 | 51.65             | 0.71                    | 0.67      | 92.39                    | 67.11    | 77.11              | 363.32                 |
| 2006                                 | 50.06             | 0.72                    | 0.66      | 91.22                    | 64.99    | 75.52              | 371.99                 |
| 2007                                 | 52.09             | 0.73                    | 0.69      | 92.40                    | 64.01    | 75.44              | 381.35                 |
| 2008/e                               | 51.75             | ND                      | 0.72      | N/D                      | N/D      | 76.90              | N/D                    |

1 Millones de Ton, 2 Millones de Ha, 3 Ton/Ha, 4 Riego + Temporal, 5 Precio Medio Rural en Pesos

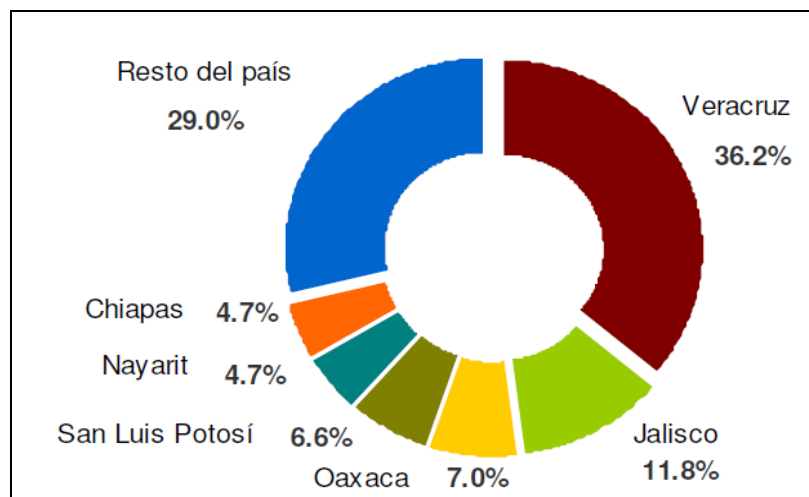
FUENTE: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP, 2008



Principales estados productores: Veracruz es el principal productor de Caña de Azúcar de nuestro país, con un volumen de producción de 18.9 millones de toneladas, esto representa el 36% de la producción nacional. Jalisco es el segundo productor con 6.1 millones de toneladas, estos dos estados en conjunto aportan el 48% de la producción total nacional (25 millones de toneladas.) Oaxaca ocupa el tercer lugar en producción con un volumen de 3.65 millones de toneladas, seguido de San Luis Potosí con 3.42 millones.

En quinto lugar están Nayarit y Chiapas que tienen el mismo volumen de producción (2.46 millones de toneladas). Todos estos estados, en conjunto aportan el 71% de la producción nacional.

**FIGURA IV 4.1.4.1** Principales estados productores de caña de azúcar en México, ciclo agrícola 2008



FUENTE: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP, 2008

En la siguiente tabla se puede observar el balance azucarero, la producción y su consumo en la República Mexicana. (Fondo de Empresas Expropiadas del Sector Azucarero FEESA, 2008)

**TABLA IV 4.1.4.2 Balance azucarero, la producción y su consumo en la República Mexicana**

| BALANCE AZUCARERO, PRODUCCIÓN Y CONSUMO |           |           |           |            |             |             |             |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Año fiscal (oct-sep)                    | 2005/06   | 2006/07   | 2007/08   | 2008/2009  | 2008/2009   | 2008/2009   | 2009/2010   |
| conceptos                               | real      | real      | real      | Estimado   | Estimado    | Estimado    | Estimado    |
|   |           |           |           | 31 de mayo | 07 de junio | 29 de junio | 29 de junio |
| Inventarios Iniciales                   | 1,850,731 | 1,153,817 | 1,621,857 | 1,723,379  | 1,723,379   | 1,723,379   | 913,073     |
| Producción                              | 5,281,067 | 5,313,993 | 5,520,646 | 5,013,000  | 4,981,588   | 4,962,818   | 5,189,250   |
| Importaciones /*                        | 173,109   | 497,088   | 173,109   | 260,858    | 260,858     | 310,858     | 320,551     |
| Estados Unidos                          | 173,109   | 359,862   | 173,109   | 110,858    | 110,858     | 110,858     | 170,551     |
| Mercado Mundial                         |           | 137,226   |           | 150,000    | 150,000     | 200,000     | 150,000     |
| Oferta Total                            | 7,304,907 | 6,964,898 | 7,315,612 | 6,997,237  | 6,965,825   | 6,997,055   | 6,422,874   |
| Consumo Nacional                        | 5,350,000 | 5,250,000 | 5,130,000 | 5,130,000  | 5,130,000   | 4,995,000   | 4,900,000   |
| Exportaciones /**                       | 923,124   | 172,807   | 712,000   | 854,400    | 963,382     | 1,088,982   | 450,000     |
| Demanda Total                           | 6,273,124 | 5,422,807 | 5,842,000 | 5,984,400  | 6,093,382   | 6,083,982   | 5,350,000   |
| Inventario Final                        | 1,031,783 | 1,542,091 | 1,473,612 | 1,012,837  | 872,443     | 913,073     | 1,072,874   |
| Inventarios/uso (%)                     | 16.45     | 28.44     | 25.22     | 16.92      | 14.32       | 15.01       | 20.05       |

FUENTE: SE, SAGARPA 2008

#### 4.1.5 Contexto internacional de la caña de azúcar

La producción mundial de caña de azúcar está directamente relacionada con la producción de azúcar y su gran competidor mundial es la remolacha azucarera. En los años de 2003 a 2007, la producción mundial de caña de azúcar se ha situado en la franja de 1,395 millones de toneladas. Se destaca como principales productores a Brasil, India, China, Tailandia, Pakistán, México, Australia, Colombia, USA, Filipinas, Cuba, e Indonesia.

La producción mundial no tuvo cambios relevantes, los niveles más altos de producción se dieron en 2002 con 1,331; 2003 con 1,376; 2006 con 1,389 y 2007 con 1,558 millones de toneladas.

En la siguiente figura se puede ver los principales Países productores de la caña de azúcar a nivel Internacional

**FIGURA IV 4.1.5.1 Principales productores de caña de azúcar a nivel internacional**



Fuente: SAGARPA Fuente: *Elaboración de Financiera Rural "Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial"*

En la tabla IV 4.1.6.1 se puede observar el volumen de producción mundial de caña de azúcar, y en la tabla IV 4.1.6.2 se muestra el rendimiento mundial de la caña de azúcar.

**TABLA IV 4.1.5.1 Volumen de producción mundial de la caña de azúcar, millones de hectáreas 1997 - 2007**

|                  | 1997  | 1998  | 1999  | 2000  | 2001  | 2002  | 2003  | 2004  | 2005  | 2006  | 2007  | PROMEDIO | TMAC  |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|
| <b>BRASIL</b>    | 332   | 345   | 334   | 328   | 346   | 364   | 396   | 415   | 423   | 457   | 514   | 387      | 4.5   |
| <b>INDIA</b>     | 278   | 262   | 296   | 299   | 296   | 297   | 287   | 234   | 237   | 281   | 356   | 284      | 2.5   |
| <b>CHINA</b>     | 83    | 87    | 78    | 69    | 78    | 92    | 92    | 91    | 88    | 100   | 106   | 88       | 2.5   |
| <b>TAILANDIA</b> | 56    | 47    | 50    | 54    | 50    | 60    | 74    | 65    | 50    | 48    | 64    | 56       | 1.3   |
| <b>PAKISTÁN</b>  | 42    | 53    | 55    | 46    | 44    | 48    | 52    | 54    | 45    | 45    | 55    | 49       | 2.7   |
| <b>MÉXICO</b>    | 44    | 47    | 45    | 42    | 46    | 46    | 47    | 49    | 52    | 50    | 52    | 47       | 1.6   |
| <b>AUSTRALIA</b> | 40    | 41    | 40    | 38    | 28    | 31    | 37    | 37    | 38    | 38    | 36    | 37       | -1.0  |
| <b>COLOMBIA</b>  | 36    | 34    | 33    | 33    | 33    | 37    | 39    | 40    | 40    | 39    | 40    | 37       | 1.1   |
| <b>USA</b>       | 29    | 31    | 32    | 33    | 31    | 32    | 31    | 26    | 24    | 27    | 28    | 30       | -0.4  |
| <b>FILIPINAS</b> | 27    | 26    | 24    | 24    | 27    | 28    | 31    | 34    | 31    | 24    | 25    | 27       | -0.6  |
| <b>CUBA</b>      | 39    | 33    | 34    | 36    | 32    | 35    | 22    | 24    | 12    | 11    | 11    | 26       | -11.8 |
| <b>INDONESIA</b> | 28    | 28    | 24    | 24    | 25    | 26    | 25    | 27    | 29    | 25    | 25    | 26       | -1.0  |
| <b>OTROS</b>     | 218   | 223   | 223   | 224   | 226   | 235   | 242   | 241   | 249   | 243   | 245   | 234      | 1.2   |
| <b>MUNDO</b>     | 1,252 | 1,258 | 1,267 | 1,253 | 1,261 | 1,331 | 1,376 | 1,336 | 1,317 | 1,389 | 1,558 | 1,327    | 2.2   |

FUENTE: SAGARPA Fuente: *Elaboración de Financiera Rural "Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial"*

**TABLA IV 4.1.5.2: Rendimiento mundial de la caña de azúcar toneladas/hectárea  
1997 – 2007**

|           | 1997  | 1998  | 1999  | 2000  | 2001  | 2002  | 2003  | 2004  | 2005  | 2006  | 2007  | PROMEDIO | TMAC  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|
| BRASIL    | 68.88 | 69.25 | 68.15 | 67.62 | 69.78 | 71.44 | 73.73 | 73.73 | 72.85 | 74.42 | 76.59 | 71.50    | 1.07  |
| INDIA     | 66.56 | 66.52 | 72.93 | 70.91 | 68.58 | 67.37 | 63.58 | 59.38 | 64.75 | 66.93 | 72.56 | 67.28    | 0.87  |
| CHINA     | 74.91 | 73.47 | 74.93 | 58.30 | 60.86 | 64.89 | 64.21 | 65.34 | 64.11 | 82.64 | 86.05 | 69.97    | 1.40  |
| TAILANDIA | 57.53 | 51.08 | 54.86 | 59.16 | 56.51 | 59.35 | 65.18 | 58.49 | 46.46 | 49.37 | 63.71 | 56.52    | 1.03  |
| PAKISTÁN  | 43.54 | 50.28 | 47.78 | 45.88 | 45.39 | 48.06 | 47.34 | 50.09 | 46.22 | 49.23 | 53.21 | 47.91    | 2.02  |
| MÉXICO    | 72.33 | 74.74 | 70.13 | 68.53 | 72.95 | 72.18 | 73.69 | 74.65 | 77.11 | 75.52 | 75.44 | 73.39    | 0.42  |
| AUSTRALIA | 99.60 | 97.77 | 95.89 | 91.09 | 69.77 | 73.77 | 82.58 | 82.64 | 87.16 | 91.97 | 85.71 | 87.09    | -1.49 |
| COLOMBIA  | 93.03 | 86.40 | 84.81 | 81.85 | 81.89 | 88.82 | 92.35 | 93.58 | 93.60 | 92.86 | 88.89 | 88.92    | -0.45 |
| USA       | 77.87 | 82.15 | 79.66 | 78.42 | 75.44 | 77.89 | 76.32 | 69.32 | 64.70 | 73.50 | 77.62 | 75.72    | -0.03 |
| FILIPINAS | 76.71 | 76.50 | 75.76 | 62.01 | 69.76 | 71.66 | 80.75 | 86.72 | 85.11 | 62.06 | 63.25 | 73.66    | -1.91 |
| CUBA      | 31.21 | 31.28 | 34.14 | 34.97 | 31.87 | 33.33 | 34.33 | 36.01 | 22.43 | 27.85 | 27.75 | 31.38    | -1.17 |
| INDONESIA | 73.43 | 68.95 | 60.09 | 65.31 | 65.23 | 72.79 | 68.00 | 77.54 | 81.39 | 72.00 | 72.00 | 70.61    | -0.20 |
| OTROS     | 62.21 | 61.65 | 62.10 | 61.09 | 60.70 | 60.32 | 61.45 | 61.23 | 62.25 | 60.47 | 60.96 | 61.31    | -0.20 |
| MUNDO     | 64.87 | 65.10 | 65.98 | 64.18 | 63.89 | 64.91 | 66.11 | 65.55 | 65.78 | 67.90 | 70.88 | 65.92    | 0.89  |

FUENTE: SAGARPA Fuente: Elaboración de Financiera Rural "Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial"

En la siguiente tabla se enlistan los 10 Países con mayor exportación de caña de azúcar

**TABLA IV 4.1.5.3 Países con mayor exportación de caña de azúcar en 2009**

| País de Origen - Destino                               | Volumen Kg    | Valor DLS      |
|--|---------------|----------------|
| ESTADOS UNIDOS DE AMERICA                              | 399152587.568 | \$199970453.78 |
| MEXICO (ESTADOS UNIDOS MEXICANOS)                      | 128620890     | \$64073583.34  |
| CANADA   | 12375084      | \$4281873.35   |
| PUERTO RICO (ESTADO LIBRE ASOCIADO DE LA COMUNIDAD DE) | 2979993       | \$2565990.55   |
| REINO UNIDO DE LA GRAN BRETAÑA E IRLANDA DEL NORTE     | 200097        | \$86030.15     |
| COSTA RICA (REPUBLICA DE)                              | 6084.8        | \$10360.97     |
| REPUBLICA DOMINICANA                                   | 5569.2        | \$9489.03      |
| COLOMBIA (REPUBLICA DE)                                | 5020          | \$18624.17     |
| BELICE   | 1100          | \$508.46       |
| FRANCIA (REPUBLICA FRANCESA)                           | 500           | \$1000         |

FUENTE: SAGARPA Fuente: Elaboración de Financiera Rural "Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial"

#### 4.1.6 Costos de producción

Los resultados son los siguientes en cuanto a cultivo de la caña de azúcar, cosecha, acarreo por tonelada y rendimiento para la Zafra 2007-2008:

Se analizó por ciclos, plantillas, socas y resocas

|  |            |
|--|------------|
| a) Caña de temporal regiones huastecas y Centro de Veracruz: |            |
| ▪ Costo de producción de cultivo por ton de caña             | \$450.47 * |
| ▪ Costo de cosecha y acarreo                                 | \$479.53   |
| ▪ Costo total por tonelada de cana del ingenio               | \$583.00   |
| ▪ Precio al agricultor por tonelada de caña                  | \$738.53   |
| ▪ Rendimiento de la caña ton/ha                              | \$91       |
| b) Caña de riego, regiones Huasteca y Balsas:                |            |
| ▪ Costo de producción (cultivo) por ton de caña              | \$401.81 * |
| ▪ Costo de cosecha y acarreo                                 | \$438.92   |
| ▪ Costo total por tonelada de cana del ingenio               | \$464.88   |
| ▪ Precio al agricultor por tonelada de caña                  | \$557.27   |
| ▪ Rendimiento de la caña ton/ha                              | \$458.03   |

\* El costo está expresado en pesos constantes, la producción no considera renta de tierra ni parcela ejidal

**Zafra:** cosecha e industrialización de la caña de azúcar y período que dura esta operación. La zafra se inicia a finales del año calendario y termina a mediados del año siguiente

(FUENTE: Cañicultores y técnicos en las zonas productoras)

#### 4.1.7 El costo primo de la caña de azúcar en la producción de Bioetanol

Los rendimientos esperados en litros de Bioetanol por ton de caña, en cada una de las dos Tecnologías, serían los siguientes:

#### a) Jugo de caña (guarapo)

(14.5% de azúcares fermentables en tallos) 80 litros de Bioetanol por ton de caña\*

- 80 litros de Bioetanol por tonelada de caña
- Costo primo con caña de temporal por litro  $\$583/80 \text{ litros} = \$ 7.28$
- Costo primo con caña de riego por litro de Bioetanol  $\$557.27/80 = \$ 6.96$

\*Se abonaría a los costos el valor del bagazo sobrante (no se hace azúcar la caña destinada a Bioetanol) para cogeneración u otros productos.

b) Cosechando caña integral, el esquilmo, separado en centro de limpieza y acopio, les deja caña completa (jugo más bagazo) con un rendimiento esperado de 138 litros de Bioetanol por tonelada de caña completa.

- Costo primo por litro de Bioetanol con caña de temporal  $\$583/138 \text{ litros} = \$4.22$
- Costo primo por litro de Bioetanol con caña de riego  $\$557.27 / 138 \text{ litros} = \$4.04$

#### c) Competitividad

- Durante la zafra 2007/2008: el total de la caña molida de azúcar fue de 48.3 millones de toneladas.
- El rendimiento por Ha en campo fue de 70.7 ton por ha
- La producción de azúcar fue de 5.5 millones de ton
- El azúcar producido por ha fue de 8.1 ton
- El rendimiento en fabrica fue de 11.43 %
- El consumo de petróleo fue de 5.1 litros por ton

## 4.2 PAJA DE TRIGO

En el Valle de Mexicali, con un rendimiento de grano de 6 ton/ha, se producen 7.3 ton de paja posible de cosecharse. La siembra del trigo debe hacerse en plano o surcos pequeños

para que los implementos de corte y empaque jalados por un tractor operen correctamente. Así, bastarían 3 horas y media del conjunto para cosecha para una hectárea. (SIAP, 2007)

El mejor ciclo para la siembra del trigo es en Otoño-Primavera, el régimen de humedad tendrá q ser mediante el riego, el potencial de producción es alto y mediano, y el tipo de siembra y labranza puede hacerse manual o mecánicamente.

A continuación se explican algunas características que pueden ser tomadas en cuenta para aumentar el potencial de producción de este cultivo.

**Fertilización:** se debe usar dosis 120-60-00 en dos aplicaciones: 60-60-00 antes o al momento de la siembra y 60-00-00 en la etapa de amacollamiento del cultivo.

**Programa de riegos:** El de siembra, el de descostre o de emergencia, y no debe faltar el agua en las etapas de amacolle, encañe, embuche, espigamiento, grano lechoso y grano masoso.

**Control de plagas:** Pulgón ruso, pulgón del follaje, pulgón del cogollo y pulgón de la espiga. Para su control, se puede aplicar metomilo 90 PS, o pirimicarb, en dosis de 250 a 300 g/ha, diazinon 0.750 a 1.0 L/ha, dimetoato 40E 1 L/ha, ometoato 84LM 0.4 L/ha, malation 1000 E 1.0 L/ha, todos deben ser diluidos en 400 litros de agua. Contra la rata de campo y ardillas, aplicar cebos envenenados comerciales.

**Control de malezas:** Control mecánico: Se realiza en forma indirecta cuando la siembra se efectúa en tierra húmeda, ya que antes de sembrar se rastrea y la maleza presente se elimina. Control químico: Aplicar el herbicida 2,4-D Amina en dosis de 1.5 a 2.0 L/ha de producto comercial diluido en 400 litros de agua. La aplicación debe hacerse hasta antes de la etapa de amacollamiento del cultivo.

**Control de enfermedades:** No son de importancia económica.

**Rendimiento potencial:** Alto: 4.5 t/ha, mediano: 4.0 t/ha.

*FUENTE: Cabañas, 2000; Huerta, 2000; Salmerón y Dyck, 1993*

### 4.2.1 Composición de la paja de trigo

La paja de trigo es un material lignocelulósico que posee una composición aproximada de celulosa, hemicelulosa y lignina, en proporciones 3:5:2. Esta característica la hace más rica en xilosa que el resto de los materiales (Hon, 1996).

En la siguiente tabla se puede observar la composición de la paja de trigo en % Peso

**TABLA IV 4.2.1.1** *Composición de la paja de trigo*

| <b>Componente</b> | <b>% Peso</b> |
|-------------------|---------------|
| <b>Agua</b>       | 15            |
| <b>Lignina</b>    | 21            |
| <b>Celulosa</b>   | 54            |
| <b>Cenizas</b>    | 11            |

*FUENTE: The Biotechnology of Ethanol. Wiley-VCH*

### 4.2.2 Procedimiento experimental, hidrólisis acida para la paja de trigo

Los residuos agroindustriales son una fuente importante de celulosa y por lo tanto se pueden considerar como materias primas para la obtención de alcohol para después ser convertidos en azúcares por medio de procesos de hidrólisis química o enzimática. (Karisson Lee, 1998)

La paja de trigo es uno de los residuos agroindustriales más abundantes, para comprobar si es significativa la cantidad de azúcar a partir de sus sustratos realicé unas pruebas en laboratorio, una hidrólisis acida con ácido sulfúrico diluido a diferentes concentraciones y diferentes tiempos de reacción con tres repeticiones. Con los datos obtenidos verifiqué si es factible obtener importantes cantidades de azúcares a partir de sus sustratos y observar si reacciona rápidamente.



El objetivo de este ensayo es evaluar la viabilidad de sacarificar por un método sencillo y barato este residuo agroindustrial, y evaluar si tiene potencial para la producción de alcohol por métodos fisicoquímicos.

En la tabla IV 4.2.2.1 se describe la metodología usada

**TABLA IV 4.2.2.1** Descripción de la metodología usada para las pruebas de laboratorio

| Equipos          | Reactivos                     | Muestreo                  | Preparación de las muestras |
|------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| <b>Estufa</b>    | Sacarosa                      | Se tomo muestras,         | El material vegetal         |
| <b>Tamizador</b> | Sulfato de Cobre              | recogiendo solo la paja o | es secado por 4             |
|                  | Ácido Sulfúrico 2%, 4%, 6%,8% | restos de cereal y se     | horas a 100 °C,             |
|                  | Hidróxido de Sodio 2 N        | conservan en bolsas       | posteriormente se           |
|                  | Hidróxido de Sodio 10% 30%    | selladas                  | tamiza durante 10           |
|                  | Ácido Clorhídrico 1N          |                           | min, se selecciona          |
|                  | Agua Destilada                | Nota: El muestreo del     | el material en              |
|                  | Carbón Activado               | material fue realizado    | tamaños inferiores          |
|                  | Fenolftaleína                 | siguiendo la metodología  | a 1mm                       |
|                  | Azul de Metileno              | propuesta en el libro de  |                             |
|                  |                               | análisis de suelos,       |                             |
|                  |                               | plantas y aguas para      |                             |
|                  |                               | riego                     |                             |

**Procedimiento:** El material preparado, se somete a la hidrólisis acida mediante ebullición a presión atmosférica a una temperatura de 100°C, y con una velocidad de agitación de 100 rpm, se empleo ácido sulfúrico a diferentes concentraciones al 2%, 4%, 6%,8% y en diferentes tiempos de reacción: 4 ,6 y 8 hrs

*FUENTE: Elaboración propia, 2009*

La descripción del tratamiento aplicado y la descripción de los tratamientos experimentales se presentan en las siguientes tablas:

**TABLA IV 4.2.2.2** *Diseño experimental para la hidrólisis acida de residuo agroindustrial, paja de trigo*

| <b>Variable</b>                      | <b>Niveles para cada variable</b>   |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Sustrato</b>                      | Paja de trigo                       |
| <b>Porcentaje de ácido sulfúrico</b> | 2%, 4%, 6%,8%                       |
| <b>Tiempo de reacción</b>            | 4 ,6 y 8 hrs                        |
| <b>Variable obtenida</b>             | % de azúcares reductores producidos |

*FUENTE: Elaboración propia, 2009*

**TABLA IV 4.2.2.3** *Descripción de los tratamientos experimentales*

| <b>Número de Tratamiento</b> | <b>% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b> | <b>Tiempo de Reacción de la Hidrólisis (Hrs)</b> |
|------------------------------|--------------------------------------|--|
| 1                            | 2                                    | 4  |
| 2                            | 4                                    | 4  |
| 3                            | 6                                    | 4  |
| 4                            | 8                                    | 4  |
| 5                            | 2                                    | 8  |
| 6                            | 4                                    | 8  |
| 7                            | 6                                    | 8  |
| 8                            | 8                                    | 8  |
| 9                            | 2                                    | 12   |
| 10                           | 4                                    | 12   |
| 11                           | 6                                    | 12   |
| 12                           | 8                                    | 12   |

*FUENTE: Elaboración propia, 2009*

### **Determinación de azúcares producidos**

El material hidrolizado se filtra empleando papel filtro cuantitativo banda azul y se le ajusta el pH entre el 2.0 y 4.5 con hidróxido de sodio a la concentración de 2N (Concentración químicamente expresada en Normalidad), se decolora con carbón activado y se conserva en frascos de vidrio en una nevera hasta su análisis. El filtrado del material hidrolizado fue

analizado para determinar el porcentaje de azúcares producidos, siguiendo el método 4.7.02 de la AOAC (*Association of Official Analytical Chemical, 2000*)

**FIGURA IV 4.2.2.1** *Hidrólisis acida del material vegetal*



El método consiste en la valoración volumétrica de una mezcla de solución de Fehling A y Fehling B previamente se estandarizada frente a sacarosa grado R.A, esta se mantiene en ebullición y en continua agitación empleando como titulante la muestra hidrolizada y como indicador azul de metileno.

La cantidad de azúcares obtenidos en el tratamiento se calcula de la siguiente forma:

$$\% \text{ Azúcares} = A \times VA \times \frac{250 \times 1g \times 100}{VF \times 100 \text{ mg} \times P}$$

Donde:

A = mg/ml de solución patrón de sacarosa

VA = ml de solución de Fehling

VF = ml de solución azucarada gastado en la titulación

P = peso de la muestra en gr

Las pruebas se repitieron tres veces, en la tabla siguiente se muestran los porcentajes de azúcares reductores obtenidos en promedio del tratamiento experimental realizados para el sustrato de paja de trigo.

**TABLA IV 4.2.2.4 Promedio de azúcar reductora (% AR) obtenidos en porcentajes**

| <b>Número de tratamiento</b> | <b>% AR a partir de paja de paja de trigo</b> |
|------------------------------|---|
| <b>1</b>                     | 9.84  |
| <b>2</b>                     | 8.52  |
| <b>3</b>                     | 7.73  |
| <b>4</b>                     | 8.96  |
| <b>5</b>                     | 15.02   |
| <b>6</b>                     | 17.83   |
| <b>7</b>                     | 23.97   |
| <b>8</b>                     | 15.98   |
| <b>9</b>                     | 8.87  |
| <b>10</b>                    | 13.96   |
| <b>11</b>                    | 13.44   |
| <b>12</b>                    | 21.85   |

*FUENTE: Elaboración propia, 2009*

Se puede observar como después la hidrólisis de 7 horas, la paja de trigo reportó el mayor porcentaje de azúcares 23.97%, con estos resultados se puede decir que la paja de trigo en sus sustratos si posee gran cantidad de material hidrolizable, químicamente esto se puede explicar este cereal está formado por una importante cantidad de componentes celulósicos y en conjunto contiene una mayor cantidad de materiales hidrolizables que el maíz, a pesar de que este último es más rico en almidones y otros carbohidratos (*Belitz & Grosz, 1998*).

El trigo se podría emplear se únicamente en lugares que se cultive a gran escala ya que si es factible la obtención de cantidades importantes de azúcares alrededor de un 24% por el método propuesto, con una fermentación posterior de los hidrolizados obtenidos, permite determinar la cantidad de alcohol que se puede obtener a partir de cada unos de los sustratos.

### 4.2.3 Costos de producción de la paja de trigo en Valle de Mexicali, B.C.

Se toma como costo total, el de cosecha, flete, como sigue:

- Equipo Tractor de 80 H.P
- Cortadora de jalón
- Rastrillo
- Empacadora
- Tiempo para cosechar una ha con un tractor = 3.5 horas
- Pacas de 25 kilos
- Cosecha 292 pacas a \$15.00 por paca \$4,380.00
- Flete de 292 pacas \$1,540.00
- Costo por hectárea (7.3 ton/ha) \$4,180.00
- Costo por tonelada \$645.53

\* El costo esta expresado en pesos constantes, la producción no considera renta de tierra ni parcela ejidal

*FUENTE: Directa, agricultores y técnicos locales.*

### 4.2.4 El costo primo de la paja de trigo en la producción de Bioetanol

Tecnología.- Pre tratamiento e Hidrólisis H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Rendimientos esperados por tonelada de paja:

- Bioetanol 345 litros
- Acido acético (sin mercado) 31.5 kg
- Cenizas (sin mercado) 105.2 kg
- \*Lignina y no fermentables 210.1 kg

\*Lignina transformada a fuente de energía térmica o eléctrica a proceso.

- Costo de la paja \$ 645.53 / ton
- Valor de co y sub productos

- Costo de materia prima a Bioetanol \$645.53 / ton
- Costo primo por litro de Bioetanol \$ 0.87

\* Los costos están expresados en pesos constantes

*Fuente: Sheffield Hallam University*

#### **4.2.5. El costo primo integrado de trigo grano más paja**

- Costo primo de Bioetanol: Grano \$2.96 por litro
- Paja \$ 0.87 por litro
- Costo combinado: \$1.93 por litro

Una hectárea de trigo integral (cosechado trigo mas paja) en el Valle de Mexicali produciría (2,160 lts + 2,518 lts) = 4,678 litros de Bioetanol, más los productos y subproductos ya mencionados.

*Fuente: Elaboración propia, agricultores y técnicos locales.*

### **4.3 LA REMOLACHA AZUCARERA**

La remolacha azucarera es una planta bianual que durante el primer ciclo de su desarrollo produce una raíz con alto contenido de sacarosa (16 – 18% en peso) dependiendo de la variedad (ciclo de 6 a 7 meses a partir de la siembra) y en el segundo ciclo desarrolla un tallo floral, yemas, flores y semillas. La materia seca de la remolacha, es casi tan rica como la de los cereales.

En México se cultivó en el Valle de Mexicali, B.C. hace 20 años, con buenos resultados y también en los Valles del Yaqui y del Fuerte en donde se evaluó la producción de remolacha en tierras marginales (salinidad y sodio) y estas aún regadas con las aguas de drenaje de los distritos que ya iban al mar. En estas condiciones extremas el cultivo produjo 40 toneladas de raíz por ha y además, así se inicia el proceso de rescate de estos terrenos. Con la remolacha se pueden rehabilitar áreas marginales.

La fabricación de Bioetanol a partir de la remolacha podría aprovechar la energía térmica del vapor de escape de la Geotermoeléctrica de “Cerro Prieto”, que hoy lamentablemente se desperdicia, ubicada en la zona agrícola de referencia, abatiendo el costo de producción del Bioetanol y superando el problema de la remolacha de no producir, como la caña con su bagazo, su propio combustible.

En el Valle del Fuerte (Sinaloa) se propone la siembra de remolacha para operar plantas “mixtas” productoras de Bioetanol con jugos de remolacha y de caña, en zafras de mayor duración y también rehabilitando suelos. La caña en esta región se produce con alta fibra y bastos excedentes de bagazo en la zafra, los cuales serían la “energía” para procesar la remolacha. Esta, genera subproductos ricos para la alimentación animal (*Fuente: James A. Duke. 1993*)

#### **4.3.1 Composición de la raíz de remolacha**

La remolacha azucarera se utiliza para la extracción de sacarosa y fabricación de azúcar. Se pueden obtener subproductos del procesamiento de la remolacha, para la obtención de alcoholes, levaduras. La parte más utilizada es la raíz. Generalmente, tiene un color que varía desde el rojo hasta el morado oscuro en las variedades silvestres y blanco en las variedades azucareras. Tiene forma globular, cilíndrica o cónica.

Se componen de una parte central alrededor de la cual se alternan zonas opacas (fibrosas y ricas en azúcar) y transparentes (pobres en azúcar pero ricas en agua y en materias nitrogenadas).

En base seca, el 77% del peso de la raíz, está representado por azúcares fermentables, casi exclusivamente sacarosa y en base húmeda, se muestra el análisis:

**TABLA IV 4.3.1.1** *Composición de la raíz de remolacha*

| <b>Componente</b>     | <b>% Peso</b> |
|-----------------------|---------------|
| <b>Agua</b>           | 75.10         |
| <b>Carbohidratos</b>  | 19.14         |
| <b>Fibra</b>          | 1.13          |
| <b>Proteína cruda</b> | 1.35          |
| <b>Grasa</b>          | 0.25          |
| <b>Cenizas</b>        | 3.03          |

*FUENTE: Andren R, Mandels 2001*

El análisis típico del jugo que sale del difusor (equivalente al jugo mezclado de la caña) nos muestra en base seca, un contenido del 87.75% de sacarosa más 1.03% de azúcares invertidos. (*Internacional Sugar JLN. Idaho USA*)

De una tonelada de raíz, como co-producto de la fabricación de Bioetanol, se producen:

- 472 kg de pulpa húmeda
- 17 kg de pectina
- 2.9 kg de lignina

#### **4.3.2 Costo de producción de la remolacha (Valle de Mexicali) por hectárea y por tonelada, 2008**

|   |             |
|---|-------------|
| ▪ Preparación de tierras                    | \$1,607.53  |
| ▪ Cultivos, siembra y aplicación de insumos | \$1,766.53  |
| ▪ Semilla                                   | \$1,759.53  |
| ▪ Fertilizante                              | \$2,463.53  |
| ▪ Agroquímicos (Insec. Herb. Fun.)          | \$5,375.53  |
| ▪ Cuota de agua                             | \$970.00    |
| ▪ Mano de obra (3 jornales)                 | \$800.00    |
| ▪ Cosecha (85 ton/ha)                       | \$ 3,069.53 |



|                                    |             |
|------------------------------------|-------------|
| Transporte                         | \$2,915.53  |
| ▪ Intereses crédito de avío        | \$1,096.53  |
| ▪ Seguro agrícola                  | \$1,046.53  |
| ▪ Cuotas varias                    | \$586       |
| ▪ Costo total por ha               | \$21,849.77 |
| ▪ Costo de producción por tonelada | \$ 579.14   |
| ▪ Variedades: Phoenix; Beta        | \$4776.53   |

\* El costo esta expresado en pesos constantes, la producción no considera renta de tierra ni parcela ejidal

FUENTE: Universidad de California. Condado del Valle Imperial, California y Agricultores y técnicos del Valle de Mexicali.

La tecnología de producción es la que se practica en el Valle Imperial de California, los costos de agroquímicos; semilla, y cosecha son los del Valle Imperial; los de labores mecanizadas de preparación de tierras, cultivos, aplicación de insumos, transporte, agua, mano de obra, seguro e intereses, son según las cuotas y tarifas de la región. No se considera renta de tierra que se cotiza en \$ 4,500 /ha /año (Agricultores y técnicos del Valle de Mexicali)

### 4.3.3 El costo primo de la remolacha azucarera en la producción de Bioetanol

Tecnología: Extracción del azúcar de las rebanadas de raíz (cossettas) por lixiviación (Difusión), con agua caliente. Utilización del vapor de escape y del agua caliente de la Geotérmica, como fuente de calor (*The Biotechnology of ethanol. Wiley-VCH*).

Rendimientos esperados por ton de remolacha:

|                                      |                   |
|--------------------------------------|-------------------|
| ▪ Bioetanol                          | 98 litros         |
| ▪ Pulpa seca (24% proteína)          | 12.5 kg ganadería |
| ▪ Costo de la remolacha por tonelada | \$ 579.14 ton     |
| ▪ Valor de la pulpa ( 15.00)         |                   |

- Costo de materia prima a Bioetanol \$564.14 ton
- Costo primo por litro de Bioetanol \$ 2.22 / litro

\* *Los costos están expresados en pesos constantes*

#### 4.4 GRANO DE SORGO

De esta gramínea se sembraron en los últimos diez años, en la zona de San Fernando Tampico. Región del Pacífico Norte, aproximadamente 230 mil has por año; siembras de invierno de temporal, aprovechando las humedades de las lluvias de esa estación. La producción de grano alcanza un poco más de 2 toneladas por hectárea con el promedio de lluvias del ciclo y sin fertilizante, pero con semilla mejorada.

Son estas las zonas que podrían tener mayores ingresos directos, si el sorgo se transforma en Bioetanol, ya que ahora el precio de mercado es de \$1,250.00 / ton y solo se eleva al pago actual de hasta \$1,960.00 debido a los apoyos del Gobierno Federal (Pro campo).

Cabe destacar que en esta planicie costera, de San Fernando, la dotación ejidal es de 20 hrs por campesino, que normalmente se siembra completa de este cultivo (SAGARPA, 2007)

A continuación se explican algunas características que pueden ser tomadas en cuenta para aumentar el potencial de producción de este cultivo.

**Ciclo:** Primavera/Verano.

**Régimen de humedad:** Riego.

**Potencial de producción:** Alto y mediano.

**Tipo de siembra y labranza:** Mecánica

**Fertilización:** Aplicar la dosis 160-40-00; la mitad del nitrógeno y todo el fósforo al momento de la siembra y la otra mitad del nitrógeno en la primera escarda.

**Programa de riegos:** Aplicar cinco riegos de auxilio y láminas de 10 cm. Para evitar pérdidas en rendimiento, es importante que no falte el agua durante el embuche, la floración y al inicio del llenado de grano.

**Control de plagas:** Para el gusano cogollero aplicar 10 kg/ha de carbarilo 5G o clorpirifos 3G, 15 kg/ha de triclorfon 2.5G. Para el gusano soldado aplicar 1.5 kg/ha de carbarilo 80 PH o 0.75 L/ha de metamidofos 600 o 1.5 kg/ha de triclorfon 80PH.

**Control de malezas:** Para el control preemergente de maleza de hoja ancha aplicar atrazina PH 50 y para maleza de hoja angosta atrazina SCA 25, ambos a razón de 0.5 kg/ha. Para el control postemergente de la maleza de hoja ancha y angosta aplicar 0.35 kg de atrazina PH 50 + 350 cc/ha de Acido 2,4-D CA 70. Cuando el problema es sólo de hoja ancha, se puede aplicar 600 cc de Acido 2,4-D CA 70. En ambos casos se aplica en banda a los 10 o 15 días después de la emergencia del cultivo o cuando la maleza tenga una altura menor a 8 cm.

**Control de enfermedades:** Para prevenir posibles enfermedades, es conveniente el uso de las variedades mejoradas y la rotación de cultivos.

**Rendimiento potencial:** 9 t/ha.

*FUENTE: CEPAB. 1998.*

#### 4.4.1 Composición del grano de sorgo

**TABLA IV 4.4.1.1** *Composición de la raíz del grano de sorgo*

| Componente                  | % Peso |
|-----------------------------|--------|
| Agua                        | 11.5   |
| Extracto libre de nitrógeno | 71.5   |
| Proteína                    | 10.0   |
| Grasa                       | 2.5    |
| Fibra                       | 3.0    |
| Cenizas                     | 1.5    |
| Almidón y azúcares          | 63     |

*FUENTE: James A. Duke. 1983. Handbook of Energy Crops*

Con 630 kg de almidón contenido en una tonelada de sorgo, se pueden producir 400 litros de

Bioetanol, 333 kg de granos de destilería con 10% de humedad y 285 kg de dióxido de carbono (*The Biothechnology of Ethanol.Wiley-VCH*)

#### 4.4.2 Costo de producción

Zonas: San Fernando, Tamaulipas sin uso de fertilizante

|  |             |
|--|-------------|
| ▪ Preparación de tierras siembras y cultivos (tractor) | \$ 1,746.53 |
| ▪ Semilla (híbrido)                                    | \$666.53    |
| ▪ Trilla   | \$586.53    |
| ▪ Flete  | \$466.53    |
| ▪ Costo total por hectárea                             | \$2,426.53  |
| ▪ Rendimiento 2 ton por ha.                            |             |
| ▪ Costo por tonelada                                   | \$1,386.53  |
| ▪ Precio de venta: ton                                 |             |
| ▪ Precio base  | \$1,606.53  |
| ▪ Subsidio Gobierno Federal                            | \$1,056.53  |
| ▪ Precio al agricultor                                 | \$2,306.53  |

\* *Los costos están expresados en pesos constantes, este costo no considera renta de tierra que en esta zona cotiza poco.*

*FUENTE: Agricultores y técnicos de la zona*

#### Análisis económico del sorgo grano

|                                 |                |
|---------------------------------|----------------|
| ▪ Costo de producción y acarreo | \$1,386.53 ton |
| ▪ Ingreso por venta y subsidios | \$2,306.53     |
| ▪ Margen por tonelada           | \$1,266.53     |

Un agricultor que siembra su parcela alrededor de 20 horas, obtiene ingreso neto de \$37,800.00 al año

### 4.4.3 El costo primo del sorgo de temporal en la producción de Bioetanol

Tecnología: molienda seca de sorgo

- Valor de los granos de destilería \$ 1,846.53 / ton

Rendimientos esperados por tonelada procesada:

- Bioetanol 400 litros
- Granos de destilería 333 kg ganadería
- Dióxido de carbono 285 kg sin mercado
- Costo del sorgo \$ 1,386.53 ton
- Valor de los granos destilería (500.00)
- Costo de la materia prima a Bioetanol \$886.53 ton
- Costo primo por litro de Bioetanol 1.35

\* *Los costos están expresados en pesos constantes*

## 4.5 LA YUCA

Originaria del trópico sur americano, posiblemente de Brasil; cultivada en importantes superficies de Indonesia, Nigeria, El Congo, Tanzania y desde luego Brasil. En México, en el año agrícola del 2004, se cultivaron en la Región Peninsular principalmente, solo 1,336 hectáreas, en su gran mayoría de temporal en el estado de Tabasco, entidad seleccionada en el presente estudio.

El precio medio rural alcanzó \$2,900 pesos por tonelada en la cosecha de la primavera-verano.

Es una planta rústica que se propaga por estacas; es un arbusto que llega a crecer hasta 3 metros y sus raíces son tuberosas de 30 a 50 centímetros de largo, con alto contenido de

almidón, cuya concentración alcanza del 25 al 33% en peso. Sus rendimientos de raíces por hectárea, varían de 12 a 25 toneladas (*www.ciat.cgiar.org*)

Sus rendimientos de la parte área por hectárea varían de 30 a 60 toneladas para un índice de cosecha de 0.4 de la plantación a la cosecha de las raíces el lapso es de 8 a 10 meses.

La Yuca es sensible a inundaciones prolongadas y en tal virtud, tomando el drenaje de los suelos como el factor limitante de la producción, se tienen aproximadamente 75,000 hectáreas con muy buen potencial para la producción de raíces de Yuca, localizadas en su mayor parte en el Distrito de Desarrollo Rural (DDR) 151 de Cárdenas, Municipio de Huimanguillo, en el estado de Tabasco, siempre que se realicen prácticas de fertilización balanceada.

Además, si se realizan los drenajes adecuados, se cuenta con aproximadamente 200 mil hectáreas en los DDR 150 y 151 de mediano potencial para el cultivo. Las variedades que sobresalen en producción de raíces son la Esmeralda, Criolla Papa y Sabanera. Cabe mencionar que la Yuca se cultiva en especial en suelos francamente ácidos, en los cuales otros cultivos como el maíz y el frijol, no prosperan.

Es una planta que tiene la “habilidad” de producir en donde otros cultivos no crecen. Una característica muy positiva de la Yuca, es que las raíces pueden permanecer en el suelo sin descomponerse, hasta 24 meses. Así, el suelo representa el almacén de la materia prima para la producción de Bioetanol (*Journal of the Science of Food and Agriculture*)

#### 4.5.1 Composición química de las raíces % en peso

**TABLA IV 4.5.1.1** *Composición química de la raíz de la yuca*

| <b>Componente</b> | <b>Criolla</b> | <b>Esmeralda</b> | <b>Sabanera</b> |
|-------------------|----------------|------------------|-----------------|
| <b>Proteína</b>   | 1.95           | 1.68             | 1.37            |
| <b>Fibra</b>      | 2.30           | 1.95             | 2.74            |
| <b>Grasa</b>      | 0.36           | 0.32             | 0.50            |
| <b>Humedad</b>    | 58.70          | 66.24            | 61.93           |
| <b>Cenizas</b>    | 2.53           | 3.31             | 2.82            |
| <b>Azúcares</b>   | 1.82           | 1.77             | 1.45            |
| <b>Almidón</b>    | 76.89          | 78.42            | 78.71           |

*FUENTE: Instituto de Investigaciones Tecnológicas, 2007*

#### 4.5.2 Costo de producción de la yuca

Zona: Estado de Tabasco, Cultivo de temporal con fertilizante, 2009

Pesos por hectárea.

|  |             |
|--|-------------|
| ▪ Preparación de tierras                     | \$ 1,246.53 |
| ▪ Siembra o plantación                       | \$1,196.53  |
| ▪ Fertilización                              | \$2,229.53  |
| ▪ Cultivos                                   | \$ 1,130.53 |
| ▪ Control de plagas                          | \$842.53    |
| ▪ Cosecha                                    | \$1,496.53  |
| ▪ Acarreo                                    | \$946.53    |
| ▪ Costo Total por hectárea                   | \$9,088.71  |
| ▪ Rendimiento de raíces 12 toneladas por ha. |             |
| ▪ Costo total por tonelada                   | \$901.78    |
| ▪ Precio de venta por tonelada               | \$1,026.53  |
| ▪ Subsidios gubernamentales                  |             |
| ▪ Ingreso del agricultor por tonelada        | \$1,026.53  |

(FUENTE: SAGARPA Delegación Estatal Tabasco)

### **Análisis económico** (sin renta de tierra)

|   |            |
|---|------------|
| ▪ Costo por tonelada                    | \$901.78   |
| ▪ Precio de venta de las raíces por ton | \$1,026.53 |
| ▪ Valor neto de los esquilmos           | \$503.53   |
| ▪ Ingreso total de la cosecha por ton   | \$1,183.53 |
| ▪ Margen del agricultor por ton         | \$628.28   |

\* *Los costos no están expresados en pesos constantes, la producción no considera renta de tierra ni parcela ejidal*

### **4.5.3 Costo primo de la yuca en la producción de Bioetanol**

Tecnología HPCP

Productos esperados por ton de yuca

|   |                 |
|---|-----------------|
| ▪ Bioetanol (raíces)                              | \$486.53 litros |
| ▪ Follaje verde (hojas, pecíolos y tallos, kilos) | \$1,846.53      |
| ▪ Costo de la Yuca                                | \$901.78        |
| ▪ Valor neto del follaje                          | \$503.53        |
| ▪ Costo de la materia prima a Bioetanol           | \$744.78        |
| ▪ Costo primo de la Yuca para Bioetanol           | \$ 2.84         |

\* *Los costos están expresados en pesos constantes*

Es importante señalar que se necesita una moderna tecnología de producción, que incremente de manera significativa los rendimientos de raíces y de follajes, abatiendo el costo de producción y el costo primo. Los rendimientos potenciales se estiman de 20 a 30 toneladas por hectárea, con un contenido de almidón de hasta 35%, de modo que al considerar la eficiencia de fabricación agroindustrial en un 70%, se pueden producir hasta 4,630 litros de Bioetanol por hectárea (SENER, BID, 2007)



## 4.6 SORGO DULCE

Es una planta anual, un pasto o zacate de origen tropical, con un alto potencial para la producción de biomasa, debido a su eficiencia fotosintética. En el mundo se cultiva principalmente en áreas donde la lluvia no es suficiente para otros cultivos como el maíz y la temperatura, es alta para obtener de este grano producciones rentables. Se adapta a un amplio rango de pH de los suelos (5.5 – 8.2).

En México, se cultiva en el centro y sur de Sinaloa y Coahuila con muy buenos rendimientos bajo riego. También en las regiones de la Laguna y del Bajío con la misma tecnología. De temporal se cultiva también en Sinaloa, en Chihuahua, Guerrero, Michoacán y Jalisco.

Lo producen principalmente para autoconsumo en las granjas que explotan ganado lechero. Las condiciones para su cultivo en el temporal, se encuentran también en el centro-oriente de Tamaulipas en donde se produce sorgo grano en grandes superficies.

Tanto en el riego como en el temporal, se le pueden dar hasta cinco cortes en un año, con un rendimiento acumulado de hasta 100 toneladas por hectárea de material verde en el riego y de 60 ton por hectárea en el temporal. La cosecha es sencilla, totalmente mecanizada y se llegan a obtener en otros países, hasta 30 toneladas de materia seca por hectárea y en tal virtud, también hasta 13,000 litros de Bioetanol por ha. (130 litros por tonelada de sorgo) aprovechando las 13 toneladas de azúcar de sus jugos y las 10 toneladas de su tallos y follajes. Las cosechas se harían al inicio de la floración, impidiendo así la formación de grano. La primera entre los 60 y 80 días a partir de la siembra, la segunda y tercera, entre los 40 y 50 días después del primero y del segundo cortes. La experiencia indica que es más eficiente limitar la cosecha a tres cortes.

Las principales variedades Híbridas en las regiones de Sinaloa y Tamaulipas seleccionadas para el cultivo de riego y de temporal respectivamente son:

Para la zona de Culiacán, Sinaloa: Gota de Miel y para Tamaulipas, 2008:

La producción nacional fue como sigue:

Cultivo Superficie cosechada (ha) Precio por ton \$

|                   |                |
|-------------------|----------------|
| ▪ Sorgo verde     | \$62,759 308   |
| ▪ Sorgo acicalado | \$10,078 1,048 |
| ▪ Sorgo seco      | \$4,189 847    |

(FUENTE: SAGARPA Delegación Estatal Tamaulipas)

\* Los costos están expresados en pesos constantes, 2008

#### 4.6.1 Composición de la planta completa

Por 1,000 kilos de tallos más 399 kilos de hojas, pedúnculos y panoja, es decir 1,399 kilos de Biomasa:

|                |             |
|----------------|-------------|
| ▪ Agua         | 1,083 kilos |
| ▪ Materia seca | 315         |

Materia seca:

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| ▪ Sólidos en solución               | 204 kilos |
| ▪ Insolubles                        | 110       |
| ▪ Sólidos en solución:              |           |
| ▪ Azúcares fermentables y almidones | 134 kilos |
| ▪ Sólidos no fermentables           | 70        |

Insolubles:

|   |              |
|---|--------------|
| ▪ Fibra   | 106 kilos    |
| ▪ Cenizas   | 4            |
| ▪ Bioetanol de fermentables (azúcares y celulosas) litros por toneladas de tallos | 132          |
| ▪ Producción de Bioetanol por hectárea:   |              |
| ▪ Riego Temporal  |              |
| ▪ Rendimiento del sorgo (ton-ha)  | 100 60       |
| ▪ Bioetanol (Litros)  | 13,200 7,920 |

\* Los costos están expresados en pesos constantes, 2008

#### 4.6.2 Costos de producción

(Sinaloa, con tecnología de riego, ciclo PV 2005, por hectárea y por tonelada de sorgo verde. cultivo, cosecha y acarreo)

|  |                  |
|--|------------------|
| <b>a) Primer corte: producción</b>                 | <b>40 ton/ha</b> |
| Preparación de tierras y otras labores mecanizadas | \$ 2,040         |
| Riego (3 x 80) mano de obra                        | \$240            |
| Cuota de riego                                     | \$680            |
| Fertilizante                                       | \$2,146.53       |
| Insecticida  | \$496.53         |
| Semilla  | \$636.53         |
| Cosecha  | \$1,546.53       |
| Acarreo (flete)                                    | \$3,203.53       |
| Costo de producción por ha                         | \$10,989.65      |
| Precio del producto por tonelada                   | \$647            |
| <br>   |                  |
| <b>b) Segundo corte: producción</b>                | <b>35 ton/ha</b> |
| Labores mecanizadas                                | \$647            |
| Fertilizante                                       | \$916.53         |
| Riego (2 X 80)                                     | \$506.50         |
| Cosecha  | \$1,546.53       |
| Acarreo (flete)                                    | \$2,679.53       |
| Costo de producción por Ha                         | \$6,296.09       |
| Precio del producto por tonelada                   | \$647            |
| <br>   |                  |
| <b>c) Tercer corte: producción</b>                 | <b>30 ton/ha</b> |
| Labores mecanizadas                                | \$647            |
| Fertilizante                                       | \$917            |

|   |             |
|---|-------------|
| Riego (2 X 80)                                  | \$507       |
| Cosecha   | \$1,546.53  |
| Acarreo (flete)                                 | \$2,347     |
| Costo de producción por Ha                      | \$5,964.53  |
| Precio del producto por tonelada                | \$647       |
| Costo total de producción por ha                | \$23,250.27 |
| Rendimiento en 3 cortes (ton de material verde) | \$105       |
| Costo por tonelada                              | \$516       |
| Costo de cultivo por tonelada                   | \$413.30    |
| Costo de cosecha y acarreo por ton              | \$449.30    |

#### **Análisis económico (sin renta de tierra)**

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| Costo de producción por tonelada | \$ 516.53 |
| Precio de venta por ton          | \$346.50  |
| Margen por ton                   | \$476     |

*(Fuente: técnicos y productores de la región)*

\* Los costos están expresados en pesos constantes, 2008

### **4.6.3 Costo primo del sorgo dulce en la producción de Bioetanol**

|   |              |
|---|--------------|
| Rendimiento de Bioetanol por ton de sorgo | 94.34 litros |
| Costo primo                               | \$1.80       |

Con este cultivo como materia prima para la producción de Bioetanol, no se obtienen esquilmos utilizables, para la generación de energía térmica y su utilización en el proceso por lixiviación para extraer los jugos azucarados en un difusor. Por tal motivo, se debe trabajar para el propósito, con paneles de energía solar y/o con vapores de escape y agua caliente de Geotermia.

#### **Sorgo dulce de temporal en Tamaulipas**

Costo de producción por hectárea y por tonelada.

**a) Primer corte: producción 25 ton/ha**

|  |             |
|--|-------------|
| Preparación de tierras y otras labores mecanizadas | \$ 2,226.53 |
| Fertilizante y agroquímicos                        | \$ 2,346.54 |
| Semilla  | \$547       |
| Cosecha  | \$ 1096     |
| Acarreo (flete)                                    | \$ 1,596    |
| Costo de producción por ha                         | \$ 7,813.2  |
| Precio del producto por tonelada                   | \$ 300      |

**b) Segundo corte: producción 20 ton/ha**

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| Labores mecanizadas              | \$547      |
| Fertilizante y agroquímicos      | \$947      |
| Cosecha                          | \$ 947     |
| Acarreo (flete)                  | \$1,346    |
| Costo de producción por ha       | \$3,787.53 |
| Precio del producto por tonelada | \$647      |

**c) Tercer corte: producción 15 ton/ha**

|   |          |
|---|----------|
| Labores mecanizadas                             | \$547    |
| Fertilizante y agroquímicos                     | \$947    |
| Cosecha   | \$796.53 |
| Acarreo (flete)                                 | \$1097   |
| Costo de producción por ha                      | \$3,387  |
| Precio del producto por tonelada                | \$647    |
| Costo total de producción por ha                | \$14,987 |
| Rendimiento en 3 cortes (ton de material verde) | \$406.54 |
| Costo por tonelada                              | \$521.23 |
| Costo de cultivo por tonelada                   | \$441.2  |
| Costo de cosecha y acarreo por ton              | \$427    |

**Análisis económico (sin renta de tierra)**

|                             |          |
|-----------------------------|----------|
| Costo de producción por ton | \$ 521.2 |
| Precio de venta por ton     | \$647    |
| Margen por ton              | \$472    |

**Costo primo del sorgo dulce para la producción de bioetanol**

|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| Litros de Bioetanol por ton de sorgo | 94.34  |
| Litros de Bioetanol por ha           | 5,660  |
| Costo primo por litro de Bioetanol   | \$1.85 |

*(Fuente: técnicos y productores de la región)*

\* *Los costos están expresados en pesos constantes, 2008*

## CAPITULO 5

### PROCESOS PARA LA PRODUCCION DE BIOETANOL

Como ya se menciona el Bioetanol o Etanol se obtiene a partir de la remolacha (u otras plantas ricas en azúcares), de cereales, de alcohol vínico o de biomasa, mediante un proceso de destilación.

En varios países la producción industrial emplea principalmente cereal como materia prima básica, con posibilidad de utilizar los excedentes de la industria remolachera transformados en jugos azucarados de bajo costo (*Abengoa Bioenergy, 2007*)

En general, se utilizan tres familias de productos para la obtención del alcohol:

- Azúcares, procedentes de la caña o la remolacha
- Cereales, mediante la fermentación de los azúcares de el almidón
- Biomasa, por la fermentación de los azúcares contenidos en la celulosa y hemicelulosa

En la tabla siguiente se muestra el esquema general de las principales materias primas usadas para la fabricación del Bioetanol.

**TABLA V 5.1** *Ejemplos de materias primas para la conversión en Bioetanol*

| Producto básico a ser convertido en etanol | Ejemplos:  |
|--|--|
| <b>Azúcares</b>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sacarosa de cultivos Sacáridos: caña de azúcar, remolacha, sorgo dulce</li> <li>• Azúcares invertidos y glucosa: melazas y otros residuos agroindustriales como lactosas</li> </ul>                   |
| <b>Almidón</b>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Granos de cereales: maíz, sorgo, trigo, cebada</li> <li>• Productos procesados: harina de trigo, cascarilla de maíz</li> <li>• Raíces almidonadas: yuca, papa, patata, alcachofa israelita</li> </ul> |

## Celulosa

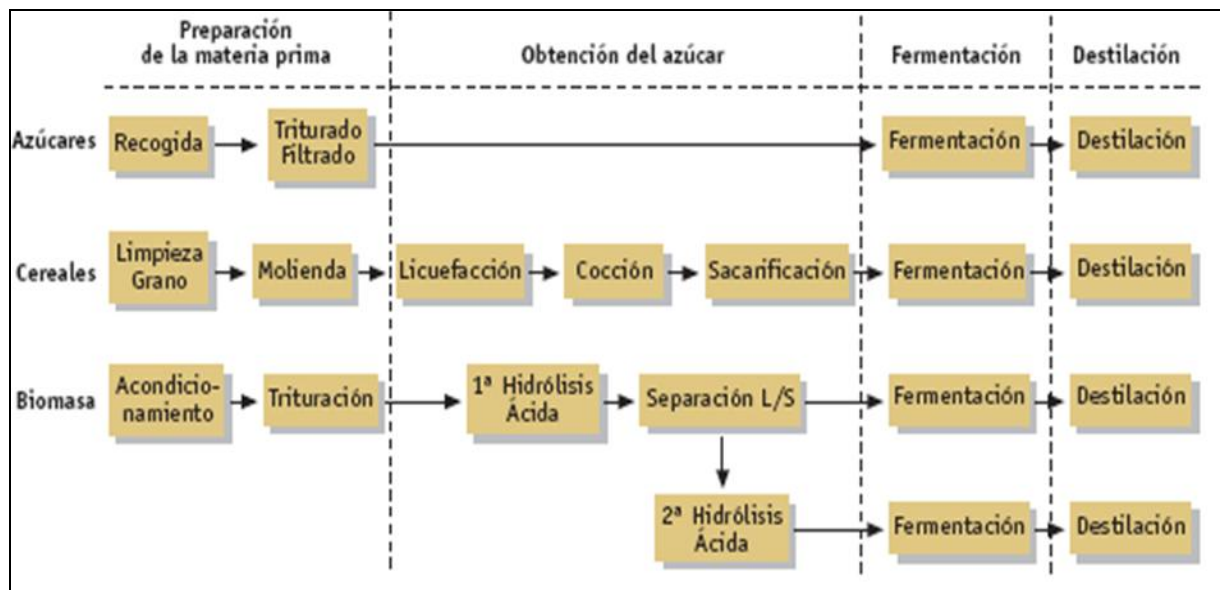
- Residuos lignocelulósicos: aserrín, paja, residuos boscosos, residuos agrícolas, lejía celulósica
- Residuos urbanos y industriales: papel, fracciones celulósicas

FUENTE Abengoa Bioenergy, 2007

## 5.1 ETAPAS EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOETANOL

En la figura V 5.1.1 se esquematizan las etapas que componen el proceso de obtención de bioetanol con diferentes materias primas, a continuación se detallaran.

FIGURA V 5.1.1 Etapas en el proceso de obtención de Bioetanol



FUENTE: Federación Nacional de Biocombustibles, 2008

### • Acondicionamiento de las materias primas

Los cereales son la principal fuente para la producción de Bioetanol, destacando el uso del maíz en EE.UU. y la cebada y el trigo en las plantas instaladas en España, (primer productor europeo de Bioetanol). En el caso de los cereales, para los procesos de preparación de la materia prima y la obtención de los azúcares que contienen, se utilizan principalmente dos tecnologías: Wet milling y Dry milling



- **Proceso de molido húmedo (Wet Milling Processes)**

Esta tecnología se aplica normalmente en plantas con grandes producciones de alcohol, este sistema es elegido cuando se quieren obtener otros subproductos, tales como el sirope, fructosa, dextrosa, etc. además de la producción del alcohol. Es un proceso complejo, dado el elevado número de pasos a seguir en el pre-tratamiento y su separación en sus diferentes componentes. En este proceso, los granos son "escaldados" en agua caliente, lo que ayuda a romper las proteínas, liberar el almidón presente en las semillas y ablandar el grano para el proceso de molido. Las semillas son molidas para obtener el germen, la fibra y la fécula. Con el germen se obtiene aceite y la fécula se centrifuga y sacarifica para producir una pasta de gluten húmeda.

En la figura V 5.1.2 se puede apreciar la secuencia sintetizada del proceso de molido húmedo (Wet Milling Processes)

**FIGURA V 5.1.2** Proceso de molido húmedo (Wet Milling Processes)



FUENTE: Biofuels Barometer, 2008

El proceso comienza con el secado de los granos, posteriormente se inspeccionan automáticamente y se limpian de piedras, trozos de caña, paja o cualquier otra impureza. Se remoja en grandes tanques en una solución que contiene pequeñas cantidades de dióxido de azufre y ácido láctico. Estos dos últimos productos químicos se remojan en agua a una temperatura de 50 °C, esto con la finalidad de ayudar a ablandar los granos, en un

proceso que puede durar entre uno y dos días. Durante este tiempo los granos se hinchan, luego se ablandan debido a las condiciones ligeramente ácidas de la disolución, se libera el almidón. La siguiente parte del proceso es pasarlo a través de un separador que, principalmente, hace que el germen de los granos floten en la parte superior de la mezcla y sea posible recogerlos fácilmente (debido al contenido de aceite de estos).

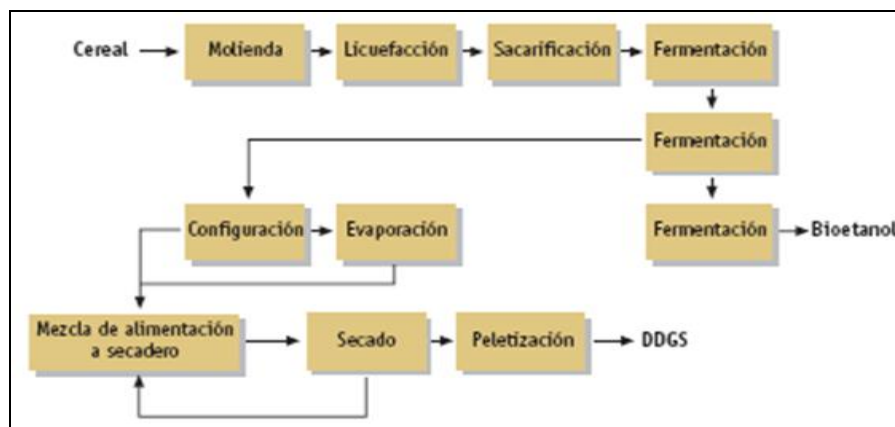
A partir de ahí primeramente se obtiene la parte fibrosa y posteriormente se separa el almidón de las proteínas por un proceso de centrifugación (*Abengoa Bioenergy*)

- **Proceso de molido en seco (Dry Milling Process)**

Este proceso consiste en limpiar y moler los granos de cereal hasta reducirlos a finas partículas por un sistema mecánico. Se produce una harina con el germen, la fibra y la fécula. Para producir una solución 'azucarada' la harina es hidrolizada o convertida en sacarosa usando enzimas o una disolución ácida. La mezcla es enfriada y se le añade la levadura para que comience a fermentar, en la figura V 5.1.3 se puede ver el proceso detallado.

De la masa resultante, una vez obtenido el alcohol, se obtiene un subproducto (DDGS, en inglés Dried Distiller Grains of Solubles, granos secos solubles de destilería, que se distribuyen en forma de pellets) que se pueden utilizar como alimentación para ganado. Esta tecnología es usada en plantas de pequeño y medio tamaño.

**FIGURA V 5.1.3** *Proceso de molido en seco (Dry Milling Processes)*

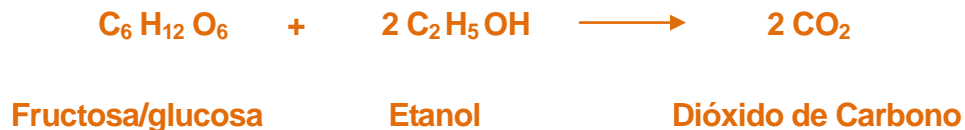


FUENTE: *Federación Nacional de Biocombustibles, 2008*

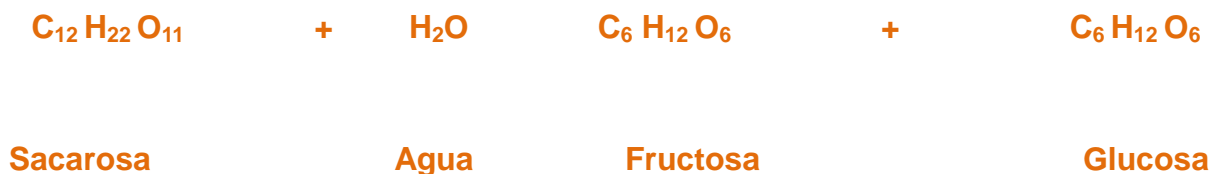
- **Hidrólisis:** Las celulosas no pueden ser fermentadas directamente, es necesario convertirla en azúcares más sencillos para su conversión en alcohol. La hidrólisis es un proceso químico que divide la molécula de celulosa por la acción de la molécula de agua. Las complejas estructuras de la celulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) son divididas en diferentes procesos para conseguir una solución azucarada, y eliminar productos de descomposición de los azúcares que pueden inhibir o, al menos, dificultar el proceso de fermentación. Principalmente se realizan procesos de hidrólisis de ácidos concentrados a bajas temperaturas, de ácidos diluidos a altas temperaturas y enzimáticos.
- **Hidrólisis con ácidos concentrados:** En este proceso se añade entre 70-77% de ácido sulfúrico a la biomasa, que ha sido secada previamente hasta obtener una humedad menor del 10%. La proporción de ácido es de 1:25 por cada parte de biomasa y se mantiene a una temperatura controlada de 50°C. Entonces se añade agua, para diluir el ácido a un 20-30% de la mezcla, aumentando su temperatura hasta los 100°C. El gel producido en este proceso es prensado para obtener la mezcla de ácido y azúcar, que finalmente son separados. Este es un proceso del que se obtiene rendimientos muy elevados pero a un costo igualmente muy elevado, por lo que industrialmente no se realiza.
- **Hidrólisis con ácidos diluidos:** Es uno de los procesos de hidrólisis más antiguos, simples y eficientes para la producción del alcohol. El primer paso es mezclar una proporción de 0,7% de ácido sulfúrico con la hemicelulosa presente en la biomasa, para que se hidrolice a 190°C. La segunda parte consiste en optimizar el rendimiento de la reacción con la parte de la celulosa más resistente, para ello se usa un 0,4% de ácido sulfúrico a 215°C. Finalmente los líquidos hidrolizados son neutralizados y recuperados, normalmente mediante percolación.
- **Hidrólisis enzimática:** Consiste en "romper" (hidrolizar) la celulosa por la adición de determinadas enzimas. La celulosa es degradada por las celulasas a azúcares, que pueden ser fermentados por levaduras o bacterias para producir etanol. En síntesis, el proceso consiste en descomponer la celulosa y la hemicelulosa del residuo en

azúcares sencillos y transformarlos en etanol por fermentación. En primer lugar se lleva a cabo un pre tratamiento del residuo cuyo objetivo es alcanzar los mejores resultados en las etapas siguientes (hidrólisis y fermentación). Desde el punto de vista económico, esta etapa es crítica, puesto que gran parte del costo total del proceso estaría en esta primera etapa. Como resultado del pre tratamiento se obtiene una disolución de azúcares provenientes de la ruptura de la hemicelulosa y un residuo sólido (constituido principalmente por la celulosa del residuo original). La hidrólisis enzimática presenta ventajas frente a la hidrólisis química, como menores costos de equipamiento (debido a que se realiza a presión atmosférica y a temperatura próxima a la ambiente, mayores rendimientos y no necesita utilizar agentes químicos

- **Fermentación del azúcar:** La última etapa del proceso consiste en la fermentación por levaduras de la glucosa liberada a partir de la celulosa, así como la de los azúcares procedentes de la hemicelulosa que se han liberado durante los pre tratamientos anteriores. La levadura contiene una enzima llamada invertasa, que actúa como catalizador ayudando a convertir los azúcares en glucosa y fructosa (ambos  $C_6 H_{12} O_6$ ). La reacción química es la siguiente:



La fructosa y la glucosa reaccionan con otra enzima llamada Zimasa, que también está presente en la levadura para producir el etanol y dióxido de carbono.



- **Destilación:** La destilación es la operación de separar, mediante calor, los diferentes componentes líquidos de una mezcla. Una forma de destilación, conocida desde la antigüedad, es la obtención de alcohol aplicando calor a una mezcla fermentada. El alcohol producido por fermentación contiene una parte significativa de agua, que debe ser eliminada

para su uso como combustible. Para ello se utiliza un proceso de destilación, aprovechando que el etanol tiene un punto de ebullición menor (78.3 °C) que el agua (100 °C), la mezcla se calienta hasta que el alcohol se evapora y se pueda separar por condensación del mismo.

#### **Principales co-productos en su proceso productivo integral:**

- Sorgo granífero: Granos destilados secos y solubles (DDGS)
- Caña de azúcar: biomasa
- Maíz: Granos destilados secos y solubles (DDGS)

## **5.2 PROCESOS GENERALES PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL**

En la figura V 5.2.1, se presenta un esquema general de la fabricación de bioetanol muestra las siguientes fases en el proceso.

- **Dilución:** Es la adición del agua para ajustar la cantidad de azúcar en la mezcla o (en última instancia) la cantidad de alcohol en el producto. Es necesaria porque la levadura, usada más adelante en el proceso de fermentación, puede morir debido a una concentración demasiado grande del alcohol.

- **Conversión:** La conversión es el proceso de convertir el almidón/celulosa en azúcares fermentables. Puede ser lograda por el uso de la malta, extractos de enzimas contenidas en la malta, o por el tratamiento del almidón (o de la celulosa) con el ácido en un proceso de hidrólisis ácida.

- **Fermentación:** La fermentación alcohólica es un proceso anaeróbico realizado por las levaduras, básicamente. De la fermentación alcohólica se obtienen un gran número de productos, entre ellos el alcohol.

La reacción de fermentación que tiene lugar es la siguiente:

## 1 molécula GLUCOS = 2 moléculas ETANOL + 2 moléculas DIÓXIDO DE CARBONO

Las enzimas que más comúnmente se utilizan en estos procesos son las levaduras y, entre ellas, la *saccharomyces cerevisiae*, por ser la más eficiente en la fermentación de azúcares de seis carbonos como es el caso de la glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ).

Para enriquecer este contenido alcohólico se someten a destilación, proceso mediante el cual se separan las vinazas (restos de materia prima vegetal no convertidos en alcohol que se recuperan posteriormente en una unidad de recuperación de subproductos) de lo que se denomina “etanol hidratado”, cuyo contenido en agua oscila entre el 4% y 5%. El Bioetanol así obtenido no puede mezclarse con la gasolina dado que, la presencia de agua en la mezcla provocaría la separación de las dos fases, por lo que ha de someterse antes de su utilización a una deshidratación específica.

El balance aproximado para la producción de un litro de Bioetanol se necesitaría 2,5-3 kg de granos de cereal, mientras que si la materia prima elegida es la remolacha o la caña de azúcar las cantidades requeridas ascenderían a 10 kg y 15-20 kg, respectivamente. Otra alternativa a las cosechas dedicadas a fines energéticos, son los materiales lignocelulósicos son los que ofrecen un mayor potencial para la producción de Bioetanol, el uso de residuos de procesos agrícolas, forestales o industriales, con alto contenido en biomasa. Estos residuos pueden ir desde la paja de cereal a las “limpias” forestales, pasando por los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) o las cáscaras de cereal o de arroz. Los residuos tienen la ventaja de su bajo costo, ya que son la parte no necesaria de otros productos o procesos, salvo cuando son utilizados en la alimentación del ganado.

Los RSU tienen un alto contenido en materia orgánica, como papel o madera, que los hace una potencial fuente de materia prima, aunque debido a su diversa procedencia pueden contener otros materiales cuyo pre proceso de separación incrementa mucho el precio de la obtención del bioalcohol (*Nasdaq, 2007*)

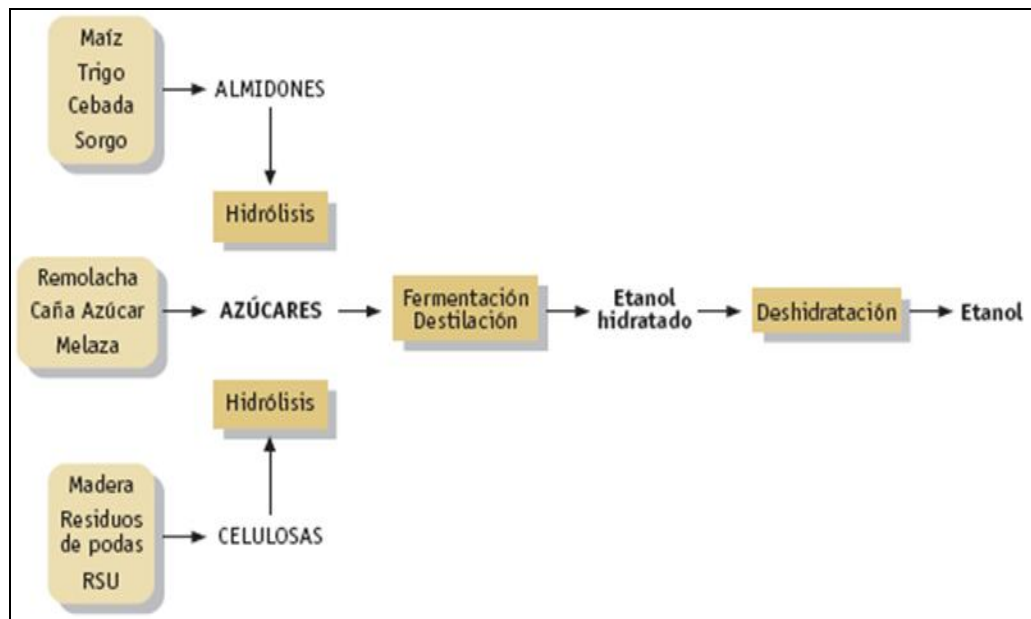
También pueden utilizarse residuos generados en algunas industrias, como la papelera, la hortofrutícola o la fracción orgánica de residuos sólidos industriales. Muchos de estos residuos no sólo tienen valor económico en el contexto donde se generan sino que pueden ser causa de problemas ambientales durante su eliminación.

Los residuos de biomasa contienen mezclas complejas de carbohidratos, llamados celulosa, hemicelulosa y lignina. Para obtener los azúcares de la biomasa, ésta es tratada con ácidos o enzimas que facilitan su obtención. La celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas por enzimas o diluidas por ácidos para obtener sacarosa, que es entonces fermentada.

Los principales métodos para extraer estos azúcares son tres: la hidrólisis con ácidos concentrados, la hidrólisis con ácidos diluidos y la hidrólisis enzimática (Cabrera, J. A., 2006)

En la siguiente figura se detalla el proceso simple de obtención del Bioetanol o Etanol

**FIGURA V 5.2.1** Proceso simple de obtención de Bioetanol



FUENTE: Biofuels Barometer 2007

Otro ejemplo de proceso de obtención de Bioetanol es a partir de alcohol vínico, donde se procede a la limpieza y deshidratación del alcohol bruto, para elevar su pureza del 92 % al 99,9 % y comercializarlo, una vez desnaturalizado, como Bioetanol y se lleva a cabo con las siguientes etapas:

- **Desulfuración:** eliminación del anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) presente en el alcohol bruto.
- **Deshidratación:** reducción del contenido en agua mediante su tamizado con zeolitas, sustancias que captan las moléculas de agua.

- **Desmetilización:** proceso en el que el alcohol ya deshidratado (99,9%) se separa de su contenido de metanol. Esta sustancia resulta corrosiva para los vehículos y puede ser comercializada como producto químico o combustible.
- **Almacenamiento en depósitos:** desde ellos el producto se transporta por tuberías a la cisterna de carga y en ese trayecto se le añade una sustancia que desnaturaliza el Bioetanol para evitar así su derivación al consumo humano.
- **Subproductos de la obtención del Bioetanol:** los subproductos generados en la producción de Bioetanol, así como el volumen de los mismos, dependen en parte de la materia prima utilizada. En general se pueden agrupar en dos tipos:
  - a) **Materiales lignocelulósicos:** tallos, bagazo, etc., correspondientes a las partes estructurales de la planta. En general se utilizan para valorización energética en cogeneración, especialmente para cubrir las necesidades energéticas de la fase de destilación del Bioetanol, aunque también se puede vender el excedente a la red eléctrica (con precio primado).
  - b) **Materiales alimenticios:** pulpa y granos de destilería desecados con solubles (DDGS), que son los restos energéticos de la planta después de la fermentación y destilación del Bioetanol. Tienen interés para el mercado de piensos animales por su riqueza en proteína y valor energético (*Fondo Español de Garantía Agraria FEAGA*).

La caña de azúcar es la planta más aprovechable por el bagazo generado para su combustión y generación energética. La remolacha azucarera genera, por su parte, unas 0,75 toneladas de pulpa por tonelada de Bioetanol producido. La producción de Bioetanol a partir de trigo o maíz genera en torno a 1,2 toneladas de DDGS por tonelada de Bioetanol.

Otra alternativa a las cosechas dedicadas a fines energéticos, son los materiales lignocelulósicos que ofrecen un mayor potencial para la producción de bioetanol, el uso de residuos de procesos agrícolas, forestales o industriales, con alto contenido en biomasa. Estos residuos pueden ser residuos sólidos urbanos, paja de cereal, “limpias” forestales, cáscaras de cereal o de arroz, entre muchos otros. Los residuos tienen la ventaja de su bajo costo, ya que son la parte no necesaria de otros productos o procesos, salvo cuando son utilizados en la alimentación del ganado. Los residuos sólidos urbanos tienen un alto contenido en materia orgánica, como papel o madera, que los hace una potencial fuente de

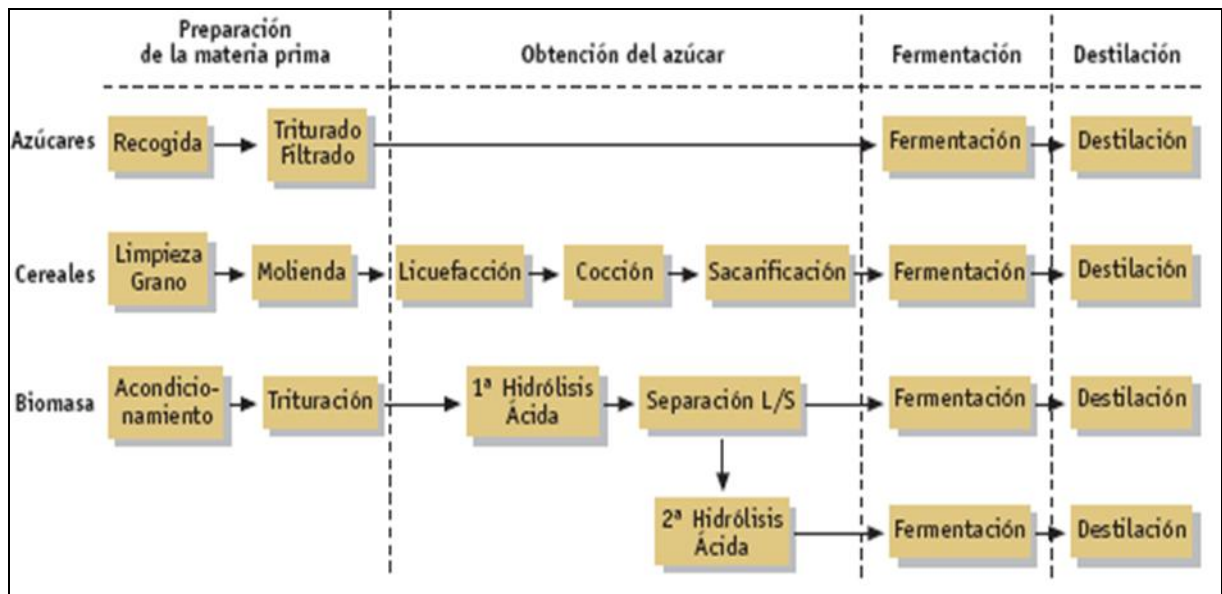


materia prima, pero debido a su diversa procedencia pueden muchas veces contener otros materiales cuyo pre-proceso de separación incrementa el precio de la obtención del bioetanol.

También pueden utilizarse residuos generados en algunas industrias, como la papelera, la hortofrutícola o la fracción orgánica de residuos sólidos industriales. Los residuos de biomasa contienen mezclas de celulosa, hemicelulosa y lignina.

En la Figura V 5.2.2 se muestran las diferencias entre los procesos de obtención de bioetanol según sea su materia prima de origen.

**FIGURA V 5.2.2** Diferencias en los procesos de obtención de Bioetanol



FUENTE: (Abengoa Bioenergy, 2007)

El bioetanol obtenido a partir de azúcares y almidón es llamado de primera generación mientras que el alcohol obtenido a partir de lignocelulosa es llamado de segunda generación.

- **Subproductos de la obtención del bioetanol:** Los subproductos generados en la producción de bioetanol, así como el volumen de los mismos, dependen en parte de la materia prima utilizada. En general se pueden agrupar en dos tipos:

**a) Materiales lignocelulósicos:** como tallos, bagazo, etc., correspondientes a las partes estructurales de la planta, que suelen cubrir las necesidades energéticas de la fase de destilación del bioetanol

**b) Materiales alimenticios:** como pulpa y granos de destilería de maíz desecados con solubles, que son los restos energéticos de la planta después de la fermentación y destilación del bioetanol.

La caña de azúcar es la planta más aprovechable por el bagazo generado para su combustión y generación energética.

### 5.3 BALANCE ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

La importancia que hoy en día tienen los temas de energías alternas, no sólo en nuestro país, sino en el mundo en general, nos obliga a la búsqueda permanente de aquellas alternativas que, habiendo probado su viabilidad técnica, se presenten como opciones económicas a los hidrocarburos, cuya expectativa de utilización es finita y cada vez más próximo su agotamiento.

La Agro Industria de la Caña de Azúcar en nuestro país, está bien consciente del rol que la gramínea jugará en el futuro, dada su mayor fortaleza, a saber *“pronta renovabilidad”*; y secuestradora potencial de CO<sub>2</sub>. Es aquí donde surge el *alcohol etílico*, en sus variantes: anhidro e hidratado, como una contribución al balance energético y a la detención del mal de los últimos tiempos; *“el cambio climático”*.

Para que el etanol contribuya perceptiblemente a las necesidades de combustible para el transporte, necesitaría tener un balance energético neto positivo, el balance energético básicamente es la diferencia entre la energía disponible por unidad de combustible producido y la energía necesaria para su producción (extracción o cultivo de la materia prima), el transporte de ésta a la industria, la industrialización (transformación y destilado) y transporte hasta el uso final.

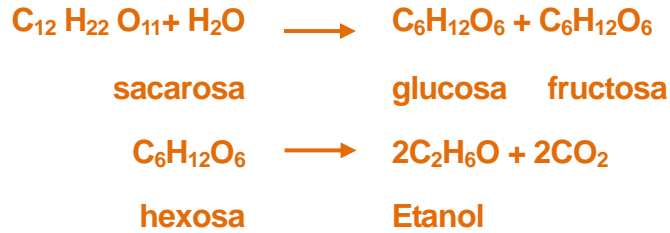
Para evaluar la energía neta del etanol hay que considerar cuatro variables: la cantidad de energía contenida en el producto final del etanol, la cantidad de energía consumida directamente para hacer el etanol, la calidad del etanol resultante comparado con la calidad de la gasolina refinada y la energía consumida indirectamente para hacer la planta de proceso de etanol. Para no utilizar combustibles fósiles en la obtención de bioetanol la energía necesaria para que funcionen los tractores, para producir el fertilizante, para procesar el etanol, y la energía asociada al desgaste y al rasgón en todo el equipo usado en el proceso (conocido como amortización del activo por los economistas) puede usarse alcohol para evitar que se quemen combustibles fósiles.

En termino de costos, si se compara la calidad de la energía con los costos de descontaminación del suelo que provocan los derrames de gasolina al ambiente y los costos "médicos" de la contaminación atmosférica (porque no se puede descontaminar la atmósfera), resultado de la refinación y de la gasolina quemada. La última decisión se debería fundar sobre razonamientos económicos y sociales a largo plazo, la energía neta varía de 0,7 a 1,5 unidades de etanol por unidad de energía de combustible fósil consumida.

En comparación si el combustible fósil utilizado para extraer etanol se hubiese utilizado para extraer petróleo y gas se hubiesen llenado 15 unidades de gasolina, que es un orden de magnitud mayor. Pero, la extracción no es igual que la producción. Cada litro de petróleo extraído es un litro de petróleo agotado.

## **5.4 PROCESO UTILIZADO PARA LA CAÑA DE AZÚCAR**

La caña de azúcar es, por su alto rendimiento y simplicidad en el proceso para obtención de soluciones dulces fermentables, una de las mejores opciones para la producción de etanol. Esencialmente hay dos reacciones que son necesarias para convertir la sacarosa en etanol: una hidrólisis de la sacarosa, con producción de hexosas y la fermentación alcohólica, con auxilio de levaduras del tipo *Saccharomyces Cerevisiae*, como se indica en las reacciones siguientes.



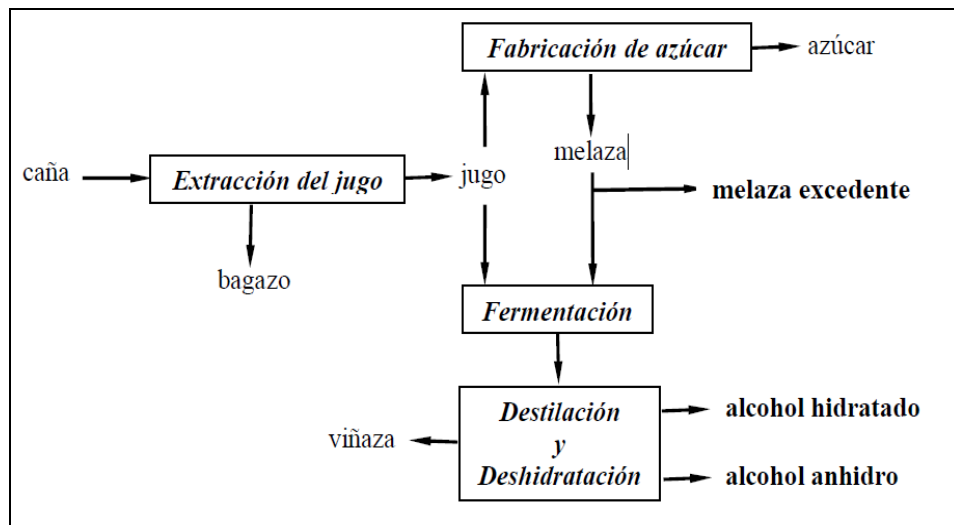
Existen diversas alternativas que pueden ser adoptadas para la producción de etanol, desde la fermentación directa del jugo de la caña hasta el empleo de soluciones acuosas de mieles finales o intermediarias, o aún mezclas de mieles e jugo. De hecho, en los ingenios, la sacarosa de la caña puede ser convertida en azúcar de diversos grados de calidad, pero en el proceso de fabricación siempre una fracción del azúcar se “invierte” degradándose en azúcares más sencillos, las hexosas, que constituyen los mieles o las melazas y pueden dar origen a mostos fermentables y luego a etanol.

Generalmente en los ingenios de azúcar se emplean hasta tres sucesivas cristalizaciones o “tres masas”. Cada proceso de cristalización es seguido por una separación de los cristales de sacarosa del llamado licor madre o miel, mediante centrifugación. Así, la primera etapa de cristalización y centrifugación permite obtener el azúcar A y el miel A, luego esta miel A es sometida a nueva cristalización y centrifugación, resultando el azúcar B y la miel B, finalmente de modo análogo se produce el azúcar C y la miel C, considerada agotada y de la cual no se recupera más sacarosa, sin embargo contienen unos 50% de material fermentable.

La melaza o miel final actualmente producida por los ingenios mexicanos, alrededor de 1,668 miles toneladas en 2004 (Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica *CNIAA, 2006*), es parcialmente utilizada para la producción de etanol y alimentación animal, pudiendo ser empleada como materia prima para una serie de otros productos, como levaduras, miel proteica, L-lisina, glutamato monosódico y ácido cítrico.

Las exportaciones de melazas de México a Estados Unidos son relevantes, superiores a 440 miles toneladas en 2008, o sea, aproximadamente una cuarta parte de la producción (*ZAFRANET, 2008*). En la Figura IV 5.4.1 se muestra el proceso de producción de alcohol de caña de azúcar.

**FIGURA V 5.4.1** *Proceso de producción de alcohol de caña de azúcar*



FUENTE: SENER, BID 2007

Las alternativas de mayor interés para México, se detalla en la producción de etanol empleando mieles agotadas, mieles B y jugo directo. La utilización de mieles intermedias puede significar una interesante entre la producción de azúcar y etanol, con ventajas en términos de productividad y calidad del producto, siendo la ruta preferencial adoptada en Brasil. De acuerdo con los precios relativos y las demandas, puede ser desviada más o menos sacarosa para fabricación de azúcar, dejando consecuentemente menos o más materia prima para producir etanol.

De ese modo, la variabilidad de la producción depende directamente del contenido total de azúcares de la melaza utilizada para preparar el mosto, cantidad usualmente evaluada según el contenido de los “azúcares reductores totales”, que corresponden a suma de la sacarosa y las hexosas. Considerando procesos teóricos de conversión de glucosas en etanol y la densidad de ese biocombustible ( $792 \text{ kg/m}^3$ ), se puede determinar que un kilogramo de sacarosa corresponde teóricamente a 0.679 litros de etanol anhidro, o en otras palabras un litro de etanol requiere 1.473 kilogramos de sacarosa para ser producido.

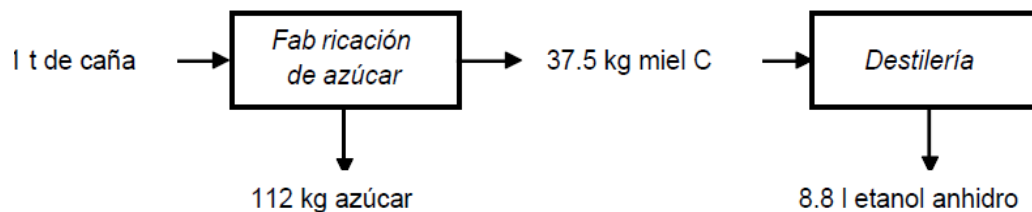
En los procesos reales de fermentación y destilación para los tres casos evaluados adelante, la eficiencia en la conversión de azúcares para etanol y obtención de etanol anhidro (mosto fermentado) fue adoptada como respectivamente 90% y 98%, valores de referencia para las

plantas brasileñas (Macedo, 2000). En estas condiciones, por litro de etanol anhidro se requieren 1.67 kg de azúcares reductores totales. Para la caña fue adoptado un contenido de sacarosa (Polcaña) y de fibra respectivamente de 13.5% y 13.2%, promedios de los valores observados en las últimas cinco zafas para los ingenios mexicanos (CNIAA, 2006).

### 5.4.1 Producción de Bioetanol de melazas agotadas (miel tipo 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, cuyo contenido de azúcares reductores totales en las melazas agotadas puede ser determinado por su “pureza en ART”. Para las condiciones de las melazas producidas en los ingenios de México se estima que este parámetro varíe entre 32 y 63% (Poy, 2005). Así, apenas utilizando las melazas agotadas inevitablemente resultantes de la fabricación de azúcar, entre 6 y 12 litros de etanol pueden ser producidos por tonelada de caña procesada, como mínimo. El valor observado en los ingenios mexicanos que poseen destilerías, 8.8 litros por tonelada de caña, situase en este rango y puede ser considerado representativo. En la Figura IV 5.4.1.1 se esquematiza los principales flujos de masa observados en esa alternativa.

**FIGURA V 5.4.1.1** Balance de Materia para la producción de Bioetanol a partir de melazas agotadas



FUENTE: Roca Alfred - Control de Procesos, 2008

En la Tabla V 5.4.1.1 se presentan los componentes básicos de un balance de insumos y productos en ese caso, con valores estimados de acuerdo a las condiciones observadas en ingenios brasileños y características de la caña en México. Se consideró que el consumo de vapor adicional para la producción de etanol, estimado en 2.5 kg de vapor por litro de etanol, representando cerca de 5% del consumo del ingenio, sea poco relevante y pueda ser absorbido por incrementos de eficiencia en el sistema de vapor existente.

**TABLA V 5.4.1.1 Insumos en la producción de Bioetanol a partir de melazas agotadas**

| <b>Insumos</b>   | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b> |
|--|-----------------|---------------|
| <b>Caña de azúcar</b>  | 1,000           | Kg            |
| <b>Fuel oil (podría ser remplazado por bagazo)</b>             | 10.8            | Kg            |
| <b>Electricidad (puede ser producida a partir del bagazo)</b>  | 12.5            | Kwh           |
| <b>Agua tratada</b>  | 5,600           | Litro         |
| <b>Acido Sulfúrico H2SO4</b>                                   | 0.026           | Kg            |
| <b>Urea (nitrógeno para las levaduras)</b>                     | 0.052           | Kg            |
| <b>Productos y Subproductos</b>                                |                 |               |
| <b>Azúcar</b>  | 115             | Kg            |
| <b>Etanol anhidro ( sin agua)</b>                              | 8.8             | Litro         |
| <b>Bagazo con 50% humedad (consumido en el ingenio)</b>        | 264             | Kg            |
| <b>Vinazas</b>   | 88 a 142        | Litro         |
| <b>Cachaza (torta de filtro)</b>                               | 30              | Kg            |
| <b>Levadura (excedente a las necesidades de la producción)</b> | 1.6             | Kg            |
| <b>CO2 (producido en las cubas de fermentaciones)</b>          | 7               | Kg            |

*FUENTE: Mc Cabe -Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 2007*

### **5.4.2 Producción de Bioetanol de melazas intermedias (miel tipo B)**

Cuando se quiere 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 etanol.

Bajo el concepto de aumentar la producción relativa de etanol, pueden ser adoptados procedimientos más complejos, por ejemplo con el uso de mostos combinando jugo directo o jugo pobre de los filtros y parte de las melazas intermediarias, buscando simultáneamente reducir consumo de servicios auxiliares e insumos químicos, ampliando los beneficios de la integración productiva etanol/azúcar.

Basándose en la amplia experiencia brasileña con esa tecnología, son citados los siguientes puntos como más relevantes en esa integración: (*Chen, Anderson, 2008*)

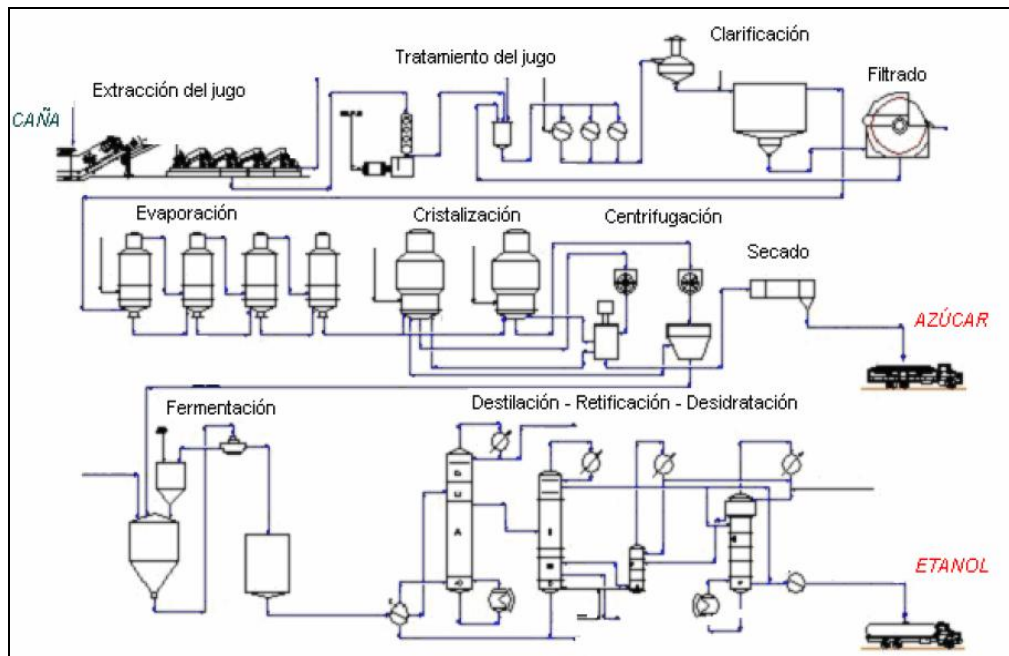
1. Todas las corrientes conteniendo azúcares de baja calidad, como los jugos de los últimos molinos y el jugo de los filtros pueden ser utilizados para producir etanol sin representar pérdidas de azúcar. Asimismo, todos los problemas de producción en la fábrica de azúcar, que resulten en disponibilidad de materiales azucarados, pueden ser resueltos de forma sencilla, enviando tales materiales para la destilería.
2. Al utilizar sólo dos masas las melazas no son agotadas, permitiendo una calidad más elevada del azúcar (mejor color y pureza) y consecuentemente mejores precios.
3. El vapor producido en los evaporadores puede ser empleado eficientemente para tratamiento del jugo a ser fermentado y la destilería.
4. La necesidad de concentrar el jugo a ser fermentado se reduce pues el contenido de azúcares puede ser ajustado de forma sencilla mediante la mezcla con melazas, hasta la concentración más adecuada (18-24 o Brix), permitiendo producir un vino con elevada concentración alcohólica, dependiendo de la tolerancia alcohólica de las levaduras empleadas.



5. Las mismas instalaciones auxiliares (utilidades, disposición de residuos, laboratorios, talleres de mantenimiento, seguridad industrial, gestión y comercialización), pueden ventajosamente ser utilizadas para el azúcar y el etanol producidos.

En la figura V 5.4.2.1 se muestra el esquema de un ingenio para la producción combinada de azúcar en etanol, en el cual se puede observar desde las operaciones unitarias básicas hasta la conversión del azúcar en etanol.

**FIGURA V 5.4.2.1** Esquema de un ingenio para la producción combinada de azúcar en *Bioetanol*

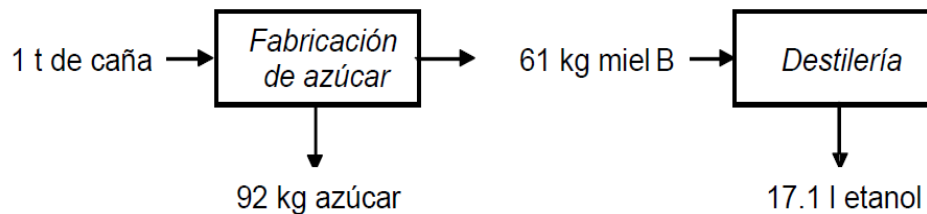


FUENTE: Finguerut, 2006

Existen diversos escenarios productivos que son factibles, dependen directamente del contenido de azúcares que presenta la melaza enviada para la destilería. En un cálculo, se evalúa el uso de miel B para producir etanol, estimando por tonelada de caña, una producción simultánea de 104.3 kg de azúcar y 14.6 litros de etanol (Poy, 1998). En Brasil, correspondiendo a una división en proporciones iguales de los azúcares de la caña entre los dos productos, en promedio son producidos cerca de 67 kg de azúcar y 42 litros de etanol, por tonelada de caña procesada.

Entre estos límites y buscando reproducir una situación de bajo impacto en producción azucarera y una producción de etanol relativamente importante, admitiendo una producción de 61 kg de miel B por tonelada de caña procesada, con 82° Brix y un contenido de ART en el rango 49 a 60%, se estima una reducción en la producción de azúcar de 18%. 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 etanol.

**FIGURA V 5.4.2.2** Balance de materia para la producción de Bioetanol a partir de melazas intermedias



FUENTE: Mc Cabe -Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 2008

Se necesita una demanda de vapor de 450 kg por tonelada de caña molida y una relación vapor/bagazo de 2.2. Estas estimaciones fueron desarrolladas tomando como referencia un estudio detallado de conversión de plantas azucareras para producción de etanol. (Almazán y González, 1999). Para las condiciones mexicanas, el efecto del consumo de vapor más bajo en la producción combinada de azúcar y etanol puede ser considerado mediante el cómputo de la reducción en la demanda de combustible adicional (fuel oil). En la figura IV 5.4.2.2, con 18% de reducción de la producción de azúcar y 17.1 litros de etanol por tonelada de caña procesada, se estima un consumo de vapor inferior en 6%, permitiendo un consumo de aceite combustible cerca de 30% más bajo que el valor indicado en la tabla V 5.4.2.1, se toma respectivamente para el bagazo y el producción de aceite combustible de 2 y 13 kg de vapor por kg de combustible.

**TABLA V 5.4.2.1** *Insumos, productos y subproductos en la producción de Bioetanol a partir de melazas intermedias*

| <b>Insumos</b>  |                  |
|---|------------------|
| <b>Caña de Azúcar</b>   | 1,000 kg         |
| <b>Fuel Oil</b>   | 7.4 kg           |
| <b>Electricidad (puede ser producida a partir del bagazo)</b>   | 12.5 kwh         |
| <b>Agua tratada</b>   | 5,600 litros     |
| <b>Acido sulfúrico</b>  | 0.050 kg         |
| <b>Urea</b>   | 0.100 kg         |
| <b>Productos y Subproductos</b>                                 |                  |
| <b>Azúcar</b>   | 92 kg            |
| <b>Etanol anhidro</b>   | 17.1 litro       |
| <b>Bagazo</b>   | 264 kg           |
| <b>Vinazas</b>  | 172 a 274 litros |
| <b>Levadura</b>   | 3.9 kg           |
| <b>CO<sub>2</sub> (producido en las cubas de fermentación )</b> | 13.3 kg          |
| <b>Cachaza</b>  | 30 kg            |

*FUENTE:* Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica CNIAA, 2007

Para evaluar diferentes escenarios de producción combinando azúcar y etanol, puede ser usada una expresión utilizada en Brasil para determinar la eficiencia industrial teórica en plantas que producen simultáneamente y en proporciones variables etanol y azúcar, traduciendo en ART ambos productos, como se presenta a continuación. Partiendo del rendimiento industrial “eficiencia en fábrica” promedio observado en los ingenios mexicanos

durante las últimas cinco zafras, 82.6%, y asumiendo una caña con 13.5% de sacarosa (CNIAA, 2007), es posible estimar la relación entre la producción de etanol versus la producción de azúcar.

Seguramente que, en función de los precios y estrategias de mercado, los productores de azúcar y etanol empleando tal tecnología pueden elegir el perfil de producción más adecuado, inclusive tomando en cuenta las limitaciones de almacenamiento y logística. (SENER BID, 2007)

$$\eta_{\text{teórica}} = \frac{\text{ART}_{\text{productos}}}{\text{ART}_{\text{caña}}} = \frac{S}{0.95} + \frac{E}{0.647}$$

Donde:

ART<sub>productos</sub> = azúcares reductores totales en los productos (kg/t caña)

ART<sub>caña</sub> = azúcares reductores totales en la caña (kg/t caña)

S = azúcar producida, (kg de sacarosa/t caña)

η<sub>energética</sub> = eficiencia industrial teórica

En la ausencia de datos experimentales, se estima que el contenido de ART en jugos de alta pureza, como jugo directo de caña, sea la suma del los azúcares reductores formados a partir de la sacarosa con el contenido de otros azúcares reductores, estimados en 0,5% del peso de la caña, resultando:

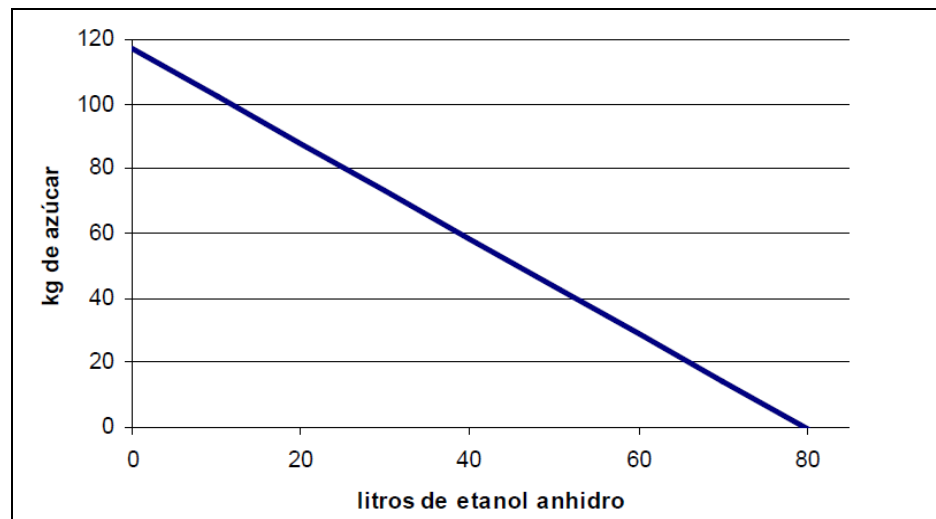
$$\text{ART}_{\text{caña}} = 1.05 \left( \frac{\text{Pol}_{\text{caña}}}{0,95} \right) = 1.105 \text{Pol}_{\text{caña}}$$

Si se parte del rendimiento industrial (“eficiencia en fábrica”) promedio observado en los ingenios mexicanos durante las últimas cinco zafras, 82.6%, y asumiendo una caña con 13.5% de sacarosa (CNIAA, 2006), es posible estimar la relación entre la producción de etanol versus la producción de azúcar, esa situación representa un ingenio mexicano promedio, seguramente existiendo situaciones de rendimiento superior e inferior al utilizado.

La producción de etanol utilizando mieles agotadas, por lo menos 8.8 litros de etanol pueden ser siempre producidos, ya que una fracción de la sacarosa de la caña no se alcanza a convertir en azúcar y así, la máxima producción de azúcar.

En la siguiente grafica se observa la producción de Etanol y azúcar en condiciones medias de los ingenios de México

**GRAFICA V 5.4.2.1** *Producción de Bioetanol y azúcar en condiciones medias de los ingenios azucareros de México*



*FUENTE: Elaboración propia con Datos de SIAP*

### **5.4.3 Producción de Bioetanol de jugo directo de caña y residuos celulósicos**

Cuando se requiere aumentar la producción de etanol, se desvía progresivamente más jugo de caña hacia la producción de etanol, hasta la situación en que no se produce ningún azúcar. Para condiciones así y considerando 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 un consumo de vapor cerca de 10% inferior al consumo en la producción de azúcar, debiendo mantenerse el tratamiento térmico del jugo y el ajuste del nivel de

concentración buscando mejorar las condiciones en la fermentación. La producción de etanol directamente del jugo de la caña reduce la flexibilidad del ingenio en términos de producir diferentes productos y determinar según las condiciones de mercado, una composición de mayor rentabilidad.

Por otro lado, la producción solamente de etanol reduce las inversiones significativamente, no siendo requerido cualquier equipo de la sección de cocimiento (tachos, turbinas de centrifugación, etc.), que pueden corresponder a 20% de las inversiones totales en un ingenio. Las plantas agroindustriales operando dedicadas únicamente a la producción de etanol presentan como indicadores representativos los valores constantes estimados con base en las condiciones observadas en los ingenios brasileños. Es posible esperar una variación en estos valores según cada contexto agroindustrial, en función de las características de la materia prima y las especificidades del proceso adoptado, en particular las condiciones de tratamiento del jugo y fermentación.

Considerando las disponibilidades de bagazo excedente en los ingenios, como consecuencia de la racionalización energética en los procesos de producción y uso de vapor, así como disponibilidades de residuos de cosecha (puntas y hojas de caña), la posibilidad de utilizarse estos materiales lignocelulósicos de costo reducido como materia prima para producción de etanol despierta grande interés y podría con ventajas asociarse a producción convencional a partir de sustancias dulces de la caña. Sin embargo, aun que la utilización de esa rota productiva permita elevar dramáticamente la producción de etanol por unidad de materia prima procesada y potencialmente reducir bastante los costos, dependiendo de las inversiones incrementales, los procesos de conversión de celulosa están todavía en desarrollo. Los materiales lignocelulósicos son compuestos de celulosa, hemicelulosa y lignina.

La celulosa es formada por largas cadenas de glucosas, mientras la hemicelulosa es constituida por hexosas y pentosas. La lignina no contiene azúcares y envuelve las celdas vegetales con una capa que dificulta romper la celulosa y hemicelulosa para producir soluciones fermentables. La proporción de cada componente varía con la especie vegetal y su edad, típicamente las gramíneas presentando menos lignina que las especies leñosas.

El principal reto en la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica es el pre tratamiento e hidrólisis de la materia prima, que pueden utilizar esencialmente tres tipos de procesos y sus variantes y combinaciones: hidrólisis ácida (con ácido diluido o concentrado), hidrólisis enzimática y procesos termoquímicos. El pre tratamiento tiene como objetivo desintegrar la matriz de carbohidratos de tal manera que la celulosa reduzca su grado de cristalinidad y aumente la celulosa amorfa, que es la más adecuada para el posterior ataque enzimático.

Adicionalmente, la mayor parte de la hemicelulosa se hidroliza durante el pre tratamiento y la lignina se libera o puede incluso descomponerse, en algunos casos con producción de compuestos perjudiciales al proceso fermentativo posterior. No obstante, caso separada, la lignina puede presentar valor comercial o servir como combustible.

En una etapa posterior, la celulosa liberada es típicamente sometida a hidrólisis enzimática con celulosas 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. Hay en estudio decenas de alternativas de proceso para pre tratamiento e hidrólisis (*Sun y Cheng, 2006*). Como afirmado anteriormente, las glucosas pueden ser convertidas sin dificultades en etanol, pero las pentosas son todavía objeto de atención de los bioquímicos, que buscan desarrollar bacterias capaces de efectuar adecuadamente tal conversión.

A pesar del gran esfuerzo de instituciones públicas y privadas para desarrollar procesos eficientes, capaces de lograr a bajo costo una máxima conversión de los polisacáridos y baja degradación de los azúcares resultantes, como glucosas y pentosas, todavía no se definieran procesos económicamente competitivos, esperándose en un horizonte de diez años su cabal perfeccionamiento y desarrollo de las tecnologías asociadas (*Worldwatch Institute, 2006*).

En la actualidad se considera representativa una eficiencia de conversión y recuperación de celulosa en 76%, que asociada a una conversión fermentativa de 75%, aumentaría la producción a 336 litros de etanol anhidro por tonelada de celulosa (*Badger, 2004*). En el

bagazo seco los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina son respectivamente cerca de 47%, 25% y 20%, valores próximos a los observados para los residuos de cosecha. Por tonelada de bagazo con 50% de humedad, se puede producir a partir de la celulosa, 123 litros de etanol anhidro y a partir de la hemicelulosa, 63 litros de ese biocombustible (Rosset, 2005). Estos datos permiten ver la relevancia de lograr la conversión y fermentación de las pentosas.

En términos concretos, específicamente para bagazo, empleando ácido diluido y tratamientos térmicos, estudios hechos en una planta piloto en un ingenio azucarero en Brasil llegaron a una productividad de 109 litros por tonelada de bagazo, con perspectivas de alcanzar hasta 180 litros por tonelada, caso se consiga fermentar las pentosas. A esos niveles, la producción de etanol prácticamente dobla por unidad de área en cultivo, estimándose que llegue a más de 12 mil litros por hectárea, utilizando cerca de 1/3 del bagazo producido, pasible de ser obtenido sin afectar la operación normal de la planta, excedente del proceso de generación de vapor, más una cantidad similar de residuos de cosecha (Oliverio, 2005).

Como se tratan de procesos todavía en desarrollo y no son disponibles datos o parámetros de instalaciones reales, para los análisis posteriores, necesariamente simplificadas, serán considerados conservadoramente una productividad de 109 litros de etanol por tonelada de bagazo húmedo y una idéntica productividad en el procesamiento de los residuos de cosecha. Considerándose disponibilidades de bagazo y residuos para producir etanol como se mencionó en el párrafo anterior, cerca de 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.

## **5.5 PROCESO UTILIZANDO COMO MATERIA PRIMA YUCA**

La Yuca es un tubérculo perteneciente a la familia Euphorbiacea y al género Manihot, siendo la del tipo Manihot Esculenta Crant la que es comercialmente conocida, es un arbusto muy ramificado, de hasta 2.5 m de altura, con flores de color amarillo verdoso, la raíz alcanza



hasta 8 cm de diámetro y 90 cm de longitud, los frutos asemejan pequeños plátanos y son comestibles.

La Yuca presenta gran tolerancia a condiciones ambientales extremadamente duras, entre sus bondades se puede decir que cuenta con gran adaptación a ecosistemas diferentes, soporta la sequía, es fuerte a las plagas, necesita pocos fertilizantes, plaguicidas y agua; y es de fácil almacenamiento bajo tierra. Requiere suelo de preferencia suelto, profundo y con algo de materia orgánica, la preparación del suelo debe tener una profundidad de 20 a 30 cm, los distanciamientos deben ser entre surcos de 0.90 a 1.10 m, dependiendo de las ramificaciones y con estacas, con tamaño promedio de 10 a 20 cm, yemas hinchadas provenientes de plantas maduras, se plantan las estacas de forma oblicua, debajo del suelo entre 3 y 5 cm en el costillar del surco, los brotes deben tener de apuntar hacia el surco.

Para la cosecha, las plantas deben estar maduras y deshojarse, cortar los estocones, después proceder con el arrancado o jalado, en un suelo preferentemente húmedo para producir menor daño a las raíces reservantes. Como raíz fresca y procesada para consumo humano, como insumo en la industria alimenticia, como materia prima en la industria productora de alimentos balanceados para animales y como producto intermedio en la industria no alimenticia, el producto industrial más importante elaborado con base en Yuca es el almidón, que se usa en las industrias alimenticia y textil y en la fabricación de papeles y adhesivos, la Yuca es un cultivo fuente de carbohidratos para la elaboración de harinas con alto porcentaje de proteínas, las características de este cultivo permite su total utilización, el tallo (estacón) para su propagación vegetativa, sus hojas para producir harinas y las raíces reservantes para el consumo en fresco o la agroindustria o la exportación.

El atractivo de la yuca aparte de que se cultiva en suelos muy ácidos, tiene un contenido de almidón, entre 20 a 30% de las raíces, asociado a rusticidad de los cultivos, baja exigencia edafoclimática y posibilidad de producir al largo de casi todo el año, la yuca es frecuentemente considerada una materia prima de potencial interés para la fabricación de etanol combustible. De hecho, durante los años setenta, en la primera fase del programa brasileño de alcohol, se intentó promover el uso de mandioca y fueran construidas dos plantas productoras de etanol utilizando esa materia prima, sin cualquier éxito,

principalmente debido al precio y discontinuidades en el suministro regular de raíces para la industria.

En Brasil la yuca sigue siendo un cultivo de reducido interés para producción de etanol. Sin embargo, en países asiáticos la yuca es frecuentemente considerada como una posible alternativa para producción de etanol, con proyectos en estudio o desarrollo en China y Tailandia (*Howeler, 2003*).

Actualmente, con la posible excepción de Tailandia, la obtención de etanol a partir de yuca todavía no es practicada de forma comercial y por tanto los datos sobre su procesamiento, como balances de masa y parámetros operativos son bastante escasos. Para el presente trabajo, se utilizó como referencia un estudio realizado para evaluar las perspectivas del etanol en Tailandia, que aborda la utilización de esa materia prima (*Trindade, 1985*).

En la producción de etanol, las raíces son descascadas, lavadas y molidas, pasando luego a cocedores y después a tanques para sacarificación del almidón. Los procesos sucesivos son similares a la producción de etanol de maíz. Considerando factores productivos semejantes a los adoptados para el maíz, la productividad debería estar cerca de 170 litros por tonelada de raíz de yuca procesada, con cerca de 25% de almidón. Evidentemente que contenidos más elevados de almidón permiten productividades más altas. Además de la vinaza, resultante del proceso de destilación, no se identificaron co-productos de valor en ese proceso. Sin embargo, existe la posibilidad de utilizar los residuos fibrosos del procesamiento de yuca para etanol como complemento alimentar para animales (*Leonel, 1999*).

La demanda de energía térmica se estimó entre 26 a 31 MJ por litro de etanol producido, para una planta con capacidad de 150 m<sup>3</sup> por día, conforme el estudio para Tailandia (*Trindade, 1985*). Se puede considerar como alternativa para generación de calor el gas natural, carbón mineral (posiblemente lignito) y cáscaras de arroz. En la realidad tailandesa y para los escenarios evaluados, ese último biocombustible resulto económicamente más atractivo. La demanda de electricidad fue considerada atendida por producción propia.

Una posible alternativa, relevante en Tailandia, para la utilización de la yuca en plantas de etanol es mediante el procesamiento de “chips” de esas raíces, un producto pre-procesado que contiene menos humedad y alrededor de 75% de almidón, permitiendo almacenamiento. Se estima que la productividad de esa materia prima en procesos combinados de sacarificación y fermentación, sería de 380 litros de etanol por tonelada de “chips” de yuca, generando mostos fermentables con 9,5% de etanol en volumen (Keawsompong, 2003).

## **5.6 PROCESO UTILIZADO PARA EL SORGO Y LA REMOLACHA AZUCARERA**

Los *sorgos* (*Sorghum spp.*) son un género botánico de unas 20 especies de gramíneas oriundas de las regiones tropicales y subtropicales de África oriental. Se cultivan en su zona de origen, Europa, América y Asia como cereal para consumo humano, animal, en la producción de forrajes, y para la elaboración de bebidas alcohólicas. Su resistencia a la sequía y el calor lo hace un cultivo importante en regiones áridas, y es uno de los cultivos alimentarios más importantes del mundo. Al tratarse de un alimento carente de gluten, representa una opción nutritiva para las personas celíacas.

Las exigencias en calor del sorgo para grano son más elevadas que las de maíz. Para germinar necesita una temperatura de 12 a 13 °C, por lo que su siembra tiene que hacerse de 3 a 4 semanas después del maíz. El crecimiento de la planta no es verdaderamente activo hasta que se sobrepasan los 15 °C, situándose el óptimo hacia los 32 °C. Al principio de su desarrollo, el sorgo soporta las bajas temperaturas de forma parecida al maíz, y su sensibilidad en el otoño es también comparable. Los descensos de temperatura en el momento de la floración pueden reducir el rendimiento del grano. Por el contrario, el sorgo resiste mucho mejor que el maíz las altas temperaturas.

El sorgo resiste la sequía mejor que el maíz. Es capaz de sufrir sequía durante un periodo de tiempo bastante largo, y reemprender su crecimiento más adelante cuando cesa la sequía. Por otra parte, necesita menos cantidad de agua que el maíz para formar un kilogramo de materia seca. Se desarrolla bien en terrenos alcalinos, sobre todo las variedades azucaradas

que exigen la presencia en el suelo de carbonato cálcico, lo que aumenta el contenido en sacarosa de tallos y hojas. Prefiere suelos sanos, profundos, no demasiado pesados. Soporta algo la sal. Es un mal precedente de otros cultivos, particularmente para los cereales de otoño. Sorgo dulce es similar al grano sorgo con un tallo rico en azúcar, casi similar a la caña de azúcar. Además tiene amplia adaptabilidad, rápido crecimiento y alta acumulación de azúcar y producción potencial de biomasa.

El sorgo dulce es tolerante a la sequía, inundaciones, salinidad del suelo y toxicidad por acidez. Este tiene un gran potencial para la producción de jaggery, sirope y alcohol (más importante Gasohol, el cual es etanol mezclado con petróleo ). El contenido de azúcar en el jugo extraído del sorgo dulce varía de 16-23 % Brix. En años recientes ha incrementado el interés en la utilización este producto para la producción de etanol en la India, como su periodo de crecimiento es de alrededor 4 meses y los requerimientos de agua de 8000 m<sup>3</sup> sobre dos cultivos, que ¼ de la caña de azúcar, la cual tiene un periodo de crecimiento de 12- 16 meses y requiere 36 000 m<sup>3</sup> de agua por cultivo. El sorgo dulce es mejor para la producción mecanizada y la propagación de semilla. El sirope del sorgo es extraído de la planta mediante la molienda del tallo. El sirope es producido primariamente en los Estados Unidos y es usado para la industria alimentaria como sustituto del azúcar. Investigaciones han evaluado el sorgo como materia prima para la producción de etanol. El grano el sorgo dulce se puede utilizar como alimentación para las aves de corral y el ganado (*Undersander, 1990*).

El sorgo produce un volumen de etanol idéntico al maíz. El 10-20% de producción de sorgo dulce de Estados Unidos se utiliza actualmente para la producción de etanol que está aumentando rápidamente (sobre ocho mil millones litro/año) de demanda en parte debido a la eliminación de MTBE (éter butílico terciario metílico). Por supuesto y quizás solamente a corto plazo allí tiene ventajas significativas el tener un grano no transgénico (*Maunder B., 2006*).

### **Sorgo para la producción de alcohol**

Acorde con un estudio piloto, el sorgo dulce es la mayor material prima alternativa que puede suplementar el uso de la caña de azúcar en la producción de etanol. La producción etanol de este se compara bien con la caña de azúcar, pues se producen 5600 L por ha (sobre dos cultivos, de 70 t por ha de tallo molido por cultivo a 40 L por t); para el cultivo de la caña de

azúcar se producen 6,500 L por ha por cultivo (de 85-90 t por ha de caña molida por cultivo a 75 L por t). De acuerdo con los estimados realizados por el Centro Nacional de Investigaciones para el Sorgo (NRCS), el costo de producción por litro de etanol de sorgo dulce es 13.11 (de 500 por t de tallo), Sin embargo, el incremento del costo de producción de etanol de sorgo dulce es más que compensado por el rendimiento del grano de 1t por ha (el cual se puede usar como alimento y la calidad superior del etanol).

La ventaja significativa de la producción de etanol a partir del mismo es que es amistosa con el medio ambiente pues no se usa la ruta de las mieles. El nivel de contaminación basado en la producción de etanol tiene  $\frac{1}{4}$  de DBO, es decir 19 500 mg/L y también tiene menos DQO 38 640 mg/L comparado con la ruta de la caña de azúcar, (ICRISAT, 2004). Los tallos de sorgo dulce pueden almacenar los azúcares solubles la cual puede ser más de 40% del tallo seco. Estos azúcares son principalmente sacarosa (25-30% de peso del tallo seco) y glucosa y fructosa en pequeñas cantidades. En los años 70 fue propuesta la posibilidad de cultivarlo para la producción de bioetanol, como es capaz de producir fácilmente azúcares fermentables si crece en medio ambientes no limitados (Fernández J., 2006). En la siguiente tabla se muestra algunas de las características del sorgo y la caña de azúcar

**TABLA V 5.6.1 Características del sorgo y la caña de azúcar**

| <b>Tipo de Cultivo (parámetro)</b>  | <b>Sorgo Dulce (valor)</b> | <b>Caña (valor)</b> |
|-------------------------------------|----------------------------|---------------------|
| <b>Días para florecer</b>           | 75 días                    | 115 días            |
| <b>Días para madurar</b>            | 100 días                   | 115 días            |
| <b>Altura de la planta</b>          | 280 cm                     | 340 cm              |
| <b>Promedio del peso de la caña</b> | 380 g/panta                | 528 g/panta         |
| <b>Rendimiento de la caña</b>       | 35 t/ha                    | 50 t/ha             |
| <b>Rendimiento del grano</b>        | 17 q/ha                    | 28 q/ha             |
| <b>Extractabilidad del jugo</b>     | 40%                        | 50%                 |
| <b>Brix</b>                         | 16 °                       | 19 °                |
| <b>Sólidos totales solubles</b>     | 13 %                       | 15.2 %              |
| <b>Azúcares reducidos</b>           | 1.3 %                      | 2.1 %               |
| <b>Sacarosa</b>                     | 9.6 %                      | 13.6 %              |
| <b>Rendimiento de alcohol</b>       | 2500 lt /ha                | 4000 lt/ha          |

FUENTE: (Raveendran T. S., 2006)

El sorgo dulce puede ser molido en los trapiches, produciendo un jugo azucarado, con contenido de sacarosa inferior al típico jugo de caña, pero que puede ser sometido a procesamiento similar, para producir jarabes o etanol.

Tomando en cuenta el contenido de azúcares y la baja aptitud del sorgo para producir azúcar sólido, se considera que esa materia prima deba ser procesada mediante plantas autónomas para producción de etanol a partir de jugo directo de caña, como se presentó anteriormente, estimándose para unidades con 150 metros cúbicos diarios de capacidad una productividad de 35 litros de etanol por tonelada de sorgo dulce procesado (*Trindade, 1985*). Estudios más recientes hechos en India estiman 40 litros por tonelada para plantas similares (*ICRISAT 2004*).

El sorgo dulce es rico en fibras y produce un bagazo con propiedades similares al bagazo de caña, con aplicaciones parecidas para la generación de energía térmica y uso como forraje en la alimentación animal. Un problema particular en el procesamiento industrial del sorgo dulce es su tendencia a rápidamente degradar, luego de cortado, imponiendo una adecuada gestión de la cosecha y del ritmo de procesamiento, además de otras medidas preventivas que pueden ser adoptadas (*Anderson, 2002*). No se encontró información de plantas comerciales de producción de etanol operando a partir de sorgo dulce, pero hay una razonable experiencia en Estados Unidos en la producción de jarabes de sorgo dulce y extensa literatura sobre estudios y proyectos en ese sentido en países africanos y asiáticos, particularmente India y China (*Nan, Best y Carvalho, 1994*).

Para la remolacha, el proceso de producción de etanol empieza con el lavado y troceado fino de las raíces, que son reducidas a fracciones de sección triangular y 3 mm de espesor, llamadas cosetas. Las cosetas siguen para un difusor, en donde con medio de agua caliente a 70° C lentamente se mueven las fracciones de remolacha y progresivamente se enriquece la solución con los azúcares presentes en la raíz. Luego de extraerse los azúcares, los residuos o pulpa son secados y el jugo, con cerca de 16° Brix y una pureza en sacarosa de 85% (*InfoAgro, 2006*)

Prosigue su tratamiento en un proceso análogo al adoptado en las destilerías de jugo de caña, pasando sucesivamente por los procesos de pasteurización, fermentación, destilación

y rectificación. En promedio, una tonelada de raíces de remolacha produce entre 80 y 100 litros de etanol. Asumiendo una concentración de azúcares totales de 19% en las raíces (varía típicamente entre 15 a 20%), se estima una producción de etanol de 86 litros por tonelada de raíces, resultando aún 51 kg de torta fibrosa que puede ser utilizada como alimento animal (*El Sayed et al., 2005*). En Francia algunas plantas productoras de azúcar de remolacha están produciendo etanol, aprovechando melazas residuales de manera semejante a los ingenios azucareros que operan destilerías integradas (*TEREOS, 2006*).

Particularmente para las condiciones mexicanas, de acuerdo con el escenario sugerido para la utilización de la remolacha, se considera que la demanda energética para su procesamiento y fabricación de etanol, es cerca de 6.7 MJ y 0.084 kWh respectivamente de energía térmica y electricidad por litro de etanol, sería suministrada gratuitamente a partir de los excedentes de una planta geotérmica existente en la región adonde se plantea eventualmente promover ese cultivo

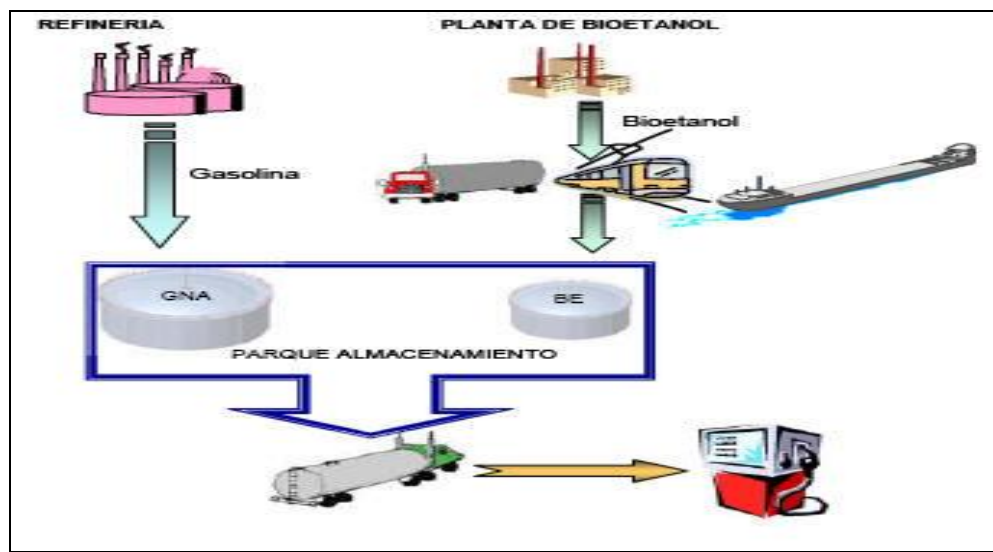
## **5.7 LOGÍSTICA Y COMERCIALIZACIÓN**

La naturaleza físico-química y el comportamiento de los alcoholes difieren en gran medida de los de los hidrocarburos. Concretamente el Bioetanol presenta una serie de propiedades que lo diferencian de la gasolina y que, por tanto, condicionan el modo en el que se ha de realizar su transporte, almacenamiento y comercialización.

Según la AIE, la cadena de distribución más típica (Ver figura V. 5.7.1) comienza en la propia instalación de producción, donde el bioetanol se desnaturaliza. La normativa fiscal de numerosos países exige la desnaturalización o la mezcla con carburante convencional para permitir la no sujeción del bioetanol a las normas relativas al impuesto especial sobre alcohol y bebidas derivadas<sup>10</sup>. Una vez desnaturalizado, el Bioetanol se transporta desde la planta de producción hasta una terminal de almacenamiento generalmente mediante camión-cisterna y, en menor medida, por ferrocarril o barco. La mezcla final con la gasolina en la proporción deseada normalmente se realiza en la terminal, en el brazo de carga del camión-cisterna, lo que se conoce como “mezclasplash”.

De lo anterior resulta que habitualmente la mejor opción desde el punto de vista estrictamente logístico no sea el transporte del etanol a la refinería y el transporte posterior de la mezcla etanol/gasolina al lugar de consumo (muchas veces próximo al propio lugar de producción del etanol), resultando por el contrario una opción más adecuada el transporte de uno y otro componente de forma independiente hacia puntos más próximos a los de consumo final. En el esquema así descrito, la mezcla bioetanol/gasolina sólo existe como tal en el camión-cisterna y en el depósito de la estación de servicio, con lo cual se minimizan los problemas técnicos derivados de las propiedades físico-químicas del etanol. (Abengoa Bioenergy, 2007).

**FIGURA V 5.7.1** *Proceso de la cadena de distribución*



FUENTE: CNE

Aunque el grado de similitud en comportamiento entre el Bioetanol y los hidrocarburos permitiría, desde el punto de vista técnico, otras alternativas de distribución, el esquema descrito presenta la ventaja de la flexibilidad en la formulación de mezclas con distintos porcentajes Bioetanol/gasolina, facilitando su adaptación a los requerimientos de cada cliente



## CAPITULO 6

### **COSTOS PARA LA PRODUCCION DE BIOETANOL EN MEXICO**

Esta es la parte más importante del estudio obtener los costos para cultivar y transportar la materia prima, son importantes en la formación de los costos totales de producción de etanol. Para los contextos y las materias primas mencionadas como las más prometedoras, se presenta a continuación los costos para su obtención, que serán empleados adelante para estimar el costo del etanol. Los costos serán presentados como costos para los productores agrícolas, y luego como precios de mercado, correspondientes a los costos para las plantas productoras de etanol.

La producción de Bioetanol en México no es un riesgo para la seguridad alimentaria en México, Petróleos Mexicanos emitirá la convocatoria para la adquisición de 176 millones de litros anuales de etanol que serán mezclados con las gasolinas que se comercializan en la Zona Metropolitana de Guadalajara. En meses pasados, se realizó una prueba piloto para la introducción de etanol en las gasolinas de Monterrey, donde se utilizaron 151 mil 600 litros de Etanol Anhidro obtenido de caña de azúcar, distribuidos en un total de 2.53 millones de litros de gasolina.

En lo que respecta a la introducción del etanol en la Ciudad de Monterrey y en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se estima que la demanda será de 626 millones de litros anuales. Gracias a la reforma aprobada por el Congreso de la Unión el año pasado, el Consejo de Administración de Pemex autorizó en junio pasado, los lineamientos para la instrumentación del esquema de precio fijo de amoniaco, base para la fabricación de fertilizantes. Pemex Gas y Petroquímica Básica ofrecerá coberturas sobre el precio del gas natural que se utiliza como insumo para la producción de amoniaco. A dicho precio se le añadirán los costos de transformación, así como los costos por el manejo y la entrega del producto. (SENER, 2009)

## 6.1 COSTOS PARA LA CAÑA DE AZÚCAR Y MELAZAS

En lo que se refiere a los costos para producción agrícola, en la agroindustria cañera Mexicana en condiciones típicas, para cultivo temporal la productividad agrícola sea de 68 t/ha y presenta un costo de producción de 257.49 \$/t, mientras bajo riego se alcance 95 t/ha y un costo de 286.71 \$/t, correspondientes respectivamente a 23.64 y 26.32 US\$/t. A partir de estos costos, se determinó que el ingreso neto de los productores de caña de México por hectárea estaría entre \$10,200.00 y \$14,250.00, para cultivo temporal o bajo riego (Poy, 2005A).

En la tabla siguiente se puede observar que los costos bajo riego fueron inferiores, no se consideró el costo de la tierra

**TABLA VI 6.1.1** *Costos de producción para la caña en pesos*

| <b>Componente del costo</b>     | <b>Caña de temporal en huastecas y el centro de Veracruz</b> | <b>Caña de riego Huasteca y Balsas</b> |
|---------------------------------|--|--|
| <b>Costo agrícola (cultivo)</b> | 203.47   | 102                                    |
| <b>Transporte y Cosecha</b>     | 233  | 218                                    |
| <b>Costo total</b>              | 437  | 320                                    |

*FUENTE: SENER BID*

Los costos de producción de caña de azúcar de temporal pueden ser considerados alrededor de 300 a 500 \$/t.

Con relación a desagregación de estos costos, de acuerdo a un análisis detallado realizado en un ingenio mexicano ubicado en la media nacional y cosechando caña proveniente de una zona de temporal, fue posible establecer para caña planta (primero corte) y caña soca (cosechas sucesivas al primero corte) las distribuciones de costos presentadas en la Tabla

VI 6.1.2. Se indica para la caña planta y la caña soca productividades de 80 t/ha y 45 t/ha, respectivamente.

La formación de los costos el importante impacto económico de los gastos de cosecha y agro insumos, respectivamente es del 64.4 y 76.6%, siendo por tanto los montos prioritarios para buscar economías.

En ese mismo trabajo, se considera que los gastos de reparación de caminos, contratación de cortadores, corte, alza, flete, transportación, personal y gastos administrativos son susceptibles de reducir en hasta 31%. Cuando esto efectivamente ocurra, se podría llegar a costos para la caña alrededor de 15 US\$/t, puesta en el ingenio, de toda manera costos todavía elevados comparando con los de Brasil, Tailandia y Australia.

**TABLA VI 6.1.2** *Composición de costos de producción en una zona de temporal*

| <b>Componente del costo agrícola</b> | <b>Caña (planta)</b> | <b>Caña (soca)</b> |
|--------------------------------------|----------------------|--------------------|
| <b>Preparación</b>                   | 7.6 %                | No aplica          |
| <b>Siembra</b>                       | 9.2 %                | No aplica          |
| <b>Insumos</b>                       | 6 %                  | 27 %               |
| <b>Cosecha</b>                       | 31.7 %               | 49.6 %             |
| <b>Intereses</b>                     | 12.8 %               | 6.6 %              |

*FUENTE: (Poy, 2005A)*

Cabe mencionar que en regiones más secas naturalmente permite elevar la productividad. Un estudio hecho en Tamaulipas dio como resultados los costos unitarios indicados en la siguiente tabla VI 6.1.3 que asociados a distritos de riego de 15,000 ha, con expectativas de producir 1.1 millones de t de caña y atender la demanda de destilerías para 500 mil litros diarios de etanol, corresponde a inversiones de US\$ 78 millones, suma superior a los US\$ 50 millones estimados para implementar la destilería (ANUR, 2005).

Puede ser que los cultivos de temporal sean alternativas mejores, bajo costos más aceptables y no disputando con otros cultivos la humedad artificial.

**TABLA VI 6.1.3** *Inversiones específicas para riego de la caña de azúcar en pesos/hectárea*

| <b>Descripción</b>                               | <b>Costo unitario<br/>(US\$/ha)</b> |
|--|-------------------------------------|
| <b>Infraestructura de riego</b>                  | 4,500                               |
| <b>Riego por goteo</b>                           | 2,200                               |
| <b>Drenaje parcelario ( mitad de superficie)</b> | 1,800                               |

*FUENTE: Elaboración propia con datos de SAGARPA*

La materia prima es comprada por productores independientes. Esos productores reciben por su producto de acuerdo a una fórmula conocida como KARBE, que determina la cantidad de azúcar recuperable por tonelada de caña que se entregue, en función de parámetros de calidad de la caña y del desempeño agroindustrial.

En esa fórmula se adopta el contenido de sacarosa (*Polcaña, 2005*) como la principal variable de calidad de la caña y se toma como condiciones adicionales de referencia un contenido de fibra de 14.21% y una pureza del jugo mezclado de 81.23%.

Existen disposiciones para descuentos y castigos, pero no son aplicados de forma individualizada por productor, resultando en devoluciones a la masa común de recursos correspondientes al sector cañero. Se ha adoptado un promedio por zafra y por ingenio para los parámetros y la remuneración de los cañeros que corresponde al 57% del precio del azúcar cobrado a los ingenios, resultante de las distintas condiciones de comercialización. Cada año se define el precio KARBE y mediante un mecanismo de pre-liquidaciones (80% del valor final estimado) y una liquidación final, se pagan los productores de caña. El precio KARBE puede ser adoptado como costo de la materia prima, bajo el concepto de costo de oportunidad, para una planta productora de etanol de caña de azúcar.

Para 2007, el precio del azúcar referente para el pago de la caña a los productores fue \$5,759.97 por tonelada. Como el contenido de sacarosa estuvo entre 10.75% a 15.36%,

resultó un rendimiento KARBE en el rango 90 a 127 kg/t; considerando el reparto legal de 57% a los productores, la caña fue pagada como mínimo a 292.47 \$/t (28.67 US\$/t) y como máximo a 417.90 \$/t (40.97 US\$/t), con un promedio nacional de 33 US\$/t (CNIAA, 2007).

Aparentemente, frente a los costos estimados anteriormente, la actividad cañera en México presenta buena remuneración, con un margen bruto de aproximadamente 10 a 13 US \$/t, valor que puede incrementarse al implementar las medidas de racionalización de costos mencionadas. Este precio ha estado prácticamente estable en los últimos diez años (Lazcano, 2006). La variación de los precios pagados a los productores, en pesos mexicanos de 1994, a lo largo de las últimas décadas ha variado poco.

Con relación a las melazas en términos generales la industria azucarera en México no cuenta con capacidad instalada de almacenaje para el líquido. Así, las ventas son programadas desde inicio de zafra, bajo precios conocidos y pactados, por lo que se calcula la producción de miel final para la venta directa, que se realiza en periodos que desahoguen la problemática de capacidad de almacenaje. El precio de miel guarda un comportamiento con el precio del alcohol, el precio del maíz y del sorgo forrajero, porque es considerado un sustituto. Los principales destinos de las melazas producidas en los ingenios mexicanos son la agropecuaria, la producción de bebidas y la exportación. Como se indicó anteriormente, en 2008 la producción de melazas en los ingenios mexicanos fue de 1,668 miles de toneladas, de los cuales 26% fueran exportados para los Estados Unidos (F.O.Licht, 2007).

Los precios internacionales de la miel final, se incrementaron para finales del año pasado y se han mantenido estables durante 2008. A finales de 2007, el mercado enfrentó escasez de alcohol y la demanda de miel para la producción del mismo creció, lo que impulsó los precios a la alza. Durante 2007, los precios internacionales estaban alrededor de 45 US\$/t, para octubre en 65 US\$/t, en diciembre 85 US\$/t, y en enero de 2007 alrededor de 140 US\$/t. Actualmente el precio está estacionado entre los 95 US\$/t y 100 US\$/t.

Para la producción de etanol de residuos celulósicos, no se consideró un precio para el bagazo, asumido como un residuo disponible en la planta y correspondiente a mitad de los residuos a procesar. Para la fracción de las puntas y hojas de caña transportadas hacia el

ingenio para procesamiento, evaluaciones en ingenios de Brasil establecieron un costo de recolección de 2 US\$/t (*Macedo et al., 2001*). Como esa fracción representa la mitad de la materia prima utilizada en el escenario adoptado, resultaría un costo promedio de 1 US\$/t para el total de los residuos celulósicos, considerado despreciable.

## 6.2 COSTOS PARA OTRAS MATERIAS PRIMAS

Se tiene una limitante en la experiencia agronómica, para el sorgo dulce, yuca y la remolacha azucarera) la limitada área cultivada y reducida experiencia agronómica, basándose en estudios desarrollados en contextos similares, se determinarían costos de referencia para estos productos, como se resumen en la Tabla VI 6.2.1.

Los valores de costos para el sorgo dulce se estimaron de datos de costos de producción en Estados Unidos (*Rains et al., 2005*), sustituyendo los costos de cosecha y transporte para datos mexicanos resultando 20.85 US\$/t. Los costos para yuca fueron considerados similares a los determinados para Brasil, 51.00 US\$/t, según reciente estudio sobre el empleo de esa raíz para la producción de etanol (*ABAM, 2006*). En la región colombiana de Magdalena, considerando producción para fines industriales, fueron estimados costos bastante bajos para la yuca, alrededor de 20.80 US\$/t (*Quintero, 2004*), sin embargo debido a reducida experiencia mexicana con ese cultivo, los valores constatados en Brasil parecen más adecuados.

**TABLA VI 6.2.1** *Costos estimados de producción para la biomasa no convencional de interés para la producción de Bioetanol en México*

| <b>Cultivo</b>             | <b>Costos de producción US\$/t</b> |
|----------------------------|------------------------------------|
| <b>Sorgo dulce</b>         | 21                                 |
| <b>Yuca</b>                | 51                                 |
| <b>Remolacha Azucarera</b> | 35.60                              |

*FUENTE: Rains 2006*

Los valores de costos de producción de la remolacha consideraran condiciones similares a la región de interés, ya que el Valle Imperial de California es vecino inmediato del Valle de Mexicali. Para ese cultivo, tomando las variedades Phoenix y Beta 4430 (*Poy, 2005*), los costos de agroquímicos; semillas y cosecha son los del Valle Imperial; los de labores mecanizadas de preparación de tierras, cultivos, aplicación de insumos, transporte, agua, mano de obra, seguro e intereses, son según las cuotas y tarifas de la región (*Lazcano, 2006*) y asumiendo una productividad de 51 t/ha, se llega a 35.60 US\$/t. No se consideraran renta de tierras que se cotiza en \$ 2,500 anuales por hectárea. Es interesante observar que esos costos resultaran similares a los presentados en un reciente estudio para Tasmania, Australia (*RIRDC, 2005*).

### **6.3 COSTOS DE PROCESAMIENTO**

Para las tecnologías de producción de etanol consideradas más factibles y utilizando las diferentes alternativas de materia prima, se presenta a continuación las evaluaciones de los costos de procesamiento correspondientes. A partir de la materia prima colocada en la unidad agroindustrial, esos costos pueden ser subdivididos en costos variables, que dependen del volumen de etanol producido, como mano de obra para los ciclos de zafra, materiales y productos químicos, energía eléctrica, combustibles, etc. y costos fijos, referentes a las inversiones, tasas y reparación y otros rubros, que no dependen del volumen de etanol producido. El costo puede variar en función de las condiciones del proyecto por ejemplo, equipos con materiales más resistentes a la corrosión, adopción de sistemas de automatización, controles automatizados, sistemas de tratamientos de efluentes, etc.

A continuación se en listan las principales características para la fabricación de etanol a partir de la caña de azúcar, Estos módulos fueran concebidos basándose en la experiencia brasileña para la destilería autónoma (*Oliverio, 2006*) para las destilerías anexas, adoptándose en ese último caso las inversiones estimadas en plantas productoras de etanol implantadas recientemente en Guatemala junto al ingenio azucareros, utilizando equipos producidos en México (*CEPAL, 2006*).

La extensa experiencia brasileña en la producción de estos equipos permite estimaciones de precios bastante confiables, típicamente en el rango de US\$ 5,000 por tonelada de caña procesada por día, para azúcar y etanol. Estudios recientes e independientes sobre costos de ingenios alcohólicos en Brasil apuntan inversiones bastante similares a la estimación presentada, actualmente las destilerías brasileñas son típicamente diseñadas para procesar cerca de 2 millones de t de caña por año, o sea, el doble del módulo productivo adoptado para jugo directo de caña, (CGEE, 2006 y Assis, 2007). Pero se consideró más razonable proponer capacidades de procesamiento similares a mayores plantas azucareras en operación en México, cerca de 10% de estos costos corresponden a obras civiles, el restante a equipos y máquinas (Tercio, 2007).

En la siguiente tabla, se muestran los diferentes tipos de destilerías para la fabricación de etanol de caña de azúcar.



**TABLA VI 6.3.1 Destilerías para la fabricación de Bioetanol de caña de azúcar**

| <b>Proceso con miel pobre</b>  | <b>Proceso con miel rica</b>   | <b>Proceso Jugo Directo</b>   | <b>Proceso jugo directo y hidrólisis de bagazo y residuos</b>   |
|--|--|---|---|
| <b>Destilería anexa con 150 m<sup>3</sup>/día de capacidad, inversiones de 15 millones de dólares, operando 210 días/año y 86% de aprovechamiento del tiempo, anualmente utilizando miel C (propio o comprado de otros ingenios) resultante del procesamiento de 3.08 millones de toneladas de caña y produciendo 27,090 m<sup>3</sup> de etanol anhidro. Dispone de servicios auxiliares (electricidad y vapor generados a partir de bagazo en el ingenio asociado)</b> | Destilería anexa con 150 m <sup>3</sup> /día de capacidad, inversiones de 15 millones de dólares, operando 210 días/año y 86% de aprovechamiento del tiempo, anualmente utilizando miel B (Propio o comprado de otros ingenios) resultante del procesamiento de 1.58 millones de toneladas de caña y produciendo 27,090 m <sup>3</sup> de etanol anhidro. Dispone de servicios auxiliares (electricidad y vapor generados a partir de bagazo en el ingenio asociado) | Destilaría autónoma con 450 m <sup>3</sup> /día de capacidad, inversiones industriales de 50 millones de dólares, operando 210 días/año y 86% de aprovechamiento del tiempo, procesando por zafra 1 millón de t de caña y produciendo 80,000 m <sup>3</sup> de etanol anhidro. Produce electricidad y vapor a partir de 250 mil t de bagazo producido por zafra, sin necesitar de aportes energéticos externos. | Destilaría autónoma con 450 m <sup>3</sup> /día de capacidad, incorporando una planta para hidrolizar aprox. 923 t de bagazo excedente y residuos de cosecha, con capacidad adicional de 100 m <sup>3</sup> /día y inversiones industriales totales de 158 millones de dólares, operando 210 días/año y 86% de aprovechamiento del tiempo, procesando por zafra 1 millón de t de caña y produciendo 98,000 m <sup>3</sup> de etanol anhidro. Produce electricidad y vapor a partir de 250 mil de bagazo producido por zafra, sin necesitar de aportes energéticos externos. |

*FUENTE: Elaboración propia con datos de SENER*

La evaluación para las alternativas no convencionales (sorgo, yuca y remolacha) resultó menos fundamentada, por lo tanto me guie en semejanzas de proceso con materias primas

conocidas y en proyectos realizados por otros países. Para todos estos casos se ocupó la misma dimensión, estudiado para la caña, lo que varía naturalmente es la cantidad de biomasa procesada.

Para el sorgo, la configuración básica de la planta es similar a sugerida para Tailandia. (Trinidad, 1985). Para la yuca, se definió una configuración de la misma capacidad, con los valores de modo de mantener la proporcionalidad entre los costos por procesos con sacáridos y almidones. Para la remolacha, se adoptó el balance de masa y los indicadores de demanda energética de la literatura (El Sayed, 2007).

Para las tecnologías asociadas a caña de azúcar los costos no varían mucho, a excepción del caso de hidrólisis, ya que es bastante elevado por ser una tecnología todavía no comercial. En el caso de considerar solamente la hidrólisis, el costo unitario de etanol fue de 1,080 US\$/litro diario de etanol producido.

**TABLA VI 6.3.2 Destilerías para la fabricación de Bioetanol con materias primas no convencionales**

| <b>Remolacha</b>  | <b>Yuca</b>  | <b>Sorgo</b>  |
|---|--|---|
| <b>Destilaría autónoma con 150 m<sup>3</sup>/día de capacidad, inversiones industriales de 30 millones de dólares, operando 250 días/año y 86% de aprovechamiento del tiempo, procesando por zafra 375 mil de t de remolacha y produciendo 32,250 m<sup>3</sup> de etanol anhidro. Necesita de 2,518 MWh y 212 TJ respectivamente para atender su demanda de electricidad y calor de proceso.</b> | Destilaría autónoma con 150 m <sup>3</sup> /día de capacidad, inversiones industriales de 45 millones de dólares, operando 250 días/año y 86% de aprovechamiento del tiempo, procesando por zafra 189.7 mil de t de raíces de yuca y produciendo 32,250 m <sup>3</sup> de etanol anhidro. Necesita de 903 TJ como combustibles para atender su demanda de electricidad y calor de proceso. | Destilaría autónoma con 150 m <sup>3</sup> /día de capacidad, inversiones industriales de 25 millones de dólares, operando 250 días/año y 86% de aprovechamiento del tiempo, procesando por zafra 921 mil de t de sorgo dulce y produciendo 32,250 m <sup>3</sup> de etanol anhidro. Produce electricidad y vapor a partir de 230 mil t de bagazo producido por zafra, sin necesitar de aportes energéticos externos. |

FUENTE: Elaboración propia con datos de FSA/USDA

## 6.4 COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos para operar una planta productora de etanol, incluyen los costos de los servicios auxiliares (energía eléctrica y vapor de proceso), costos de mano de obra, los costos administrativos, de los insumos de producción y costos de mantenimiento y conservación. Los costos energéticos o de los servicios, para las alternativas asociadas a la caña de azúcar, están cubiertos por el uso del bagazo en la producción de vapor de alta presión y la utilización de esquemas de cogeneración, con producción combinada de electricidad y calor. De hecho, empleándose calderas compresión de 21 bar se asegura el balance entre las demandas y disponibilidades de vapor, mientras bajo una presión de 80 bar puede ser esperada un excedente de 80 kWh por tonelada de caña procesada (*Assis, 2007*).

De modo semejante se consideró que el procesamiento del sorgo no demanda aporte de energía externa, por ser procesado de forma parecida a la de la caña. Para la yuca, se consideró la demanda de combustibles de 28 MJ por litro asumiendo el empleo de sistemas de cogeneración y la generación de electricidad en la propia planta. Para la remolacha, se propone que el cultivo debería ocurrir en la región del Valle de Mexicali, relativamente cerca de la Central Geotérmica de Cerro Prieto, exactamente buscando utilizar las disponibilidades de calor de esa planta, consecuentemente no necesitando de aporte energético externo.

Para la energía eléctrica consumida se adoptó un precio de 150 US\$/MWh y para el gas natural, asumido como la fuente complementaria de energía térmica a ser empleada en calderas con 80% de rendimiento, se consideró un precio de 5.50 US\$/MJ, valores adoptados en estudios similares para México (*Fundación Emisión, 2007*) y constatados como representativos.

Con base en datos de sistemas reales utilizando caña de azúcar, los costos de mano de obra y costos administrativos corresponden a 8.5% y 1.2% de los costos con materia prima. Para los costos asociados a los insumos de producción y costos de mantenimiento y conservación, se adoptó 3% de las inversiones para ambos casos. Estos valores fueron elegidos a partir de datos de plantas brasileñas (*Assis, 2007*) y son comparables a indicadores similares para otros procesos (*Henniges y Zeddies, 2004*).

Como se verá a continuación, esos costos representan generalmente menos de 15% del costo total del etanol, mayormente formado por la materia prima, inversión y energía. En la siguiente tabla se presentan las Inversiones en plantas productoras de etanol.

**TABLA VI 6.4.1 Inversiones en plantas productoras de Bioetanol**

| <b>Tecnología y Materia prima</b> | <b>Capacidad<br/>m<sup>3</sup>/día</b> | <b>Inversión mil US\$</b> | <b>Inversión Unitaria<br/>US\$/Lts/día</b> |
|-----------------------------------|--|---------------------------|--|
| <b>Caña, miel pobre</b>           | 152                                    | 15,000                    | 100  |
| <b>Caña miel rica</b>             | 152                                    | 15,000                    | 100  |
| <b>Jugo directo</b>               | 450                                    | 50,000                    | 112  |
| <b>Jugo directo + hidrolisis</b>  | 550                                    | 157,000                   | 288  |
| <b>Maíz</b>                       | 500                                    | 61,000                    | 125  |
| <b>Sordo</b>                      | 170                                    | 24,000                    | 168  |
| <b>Yuca</b>                       | 170                                    | 45,000                    | 300  |
| <b>Remolacha Azucarera</b>        | 170                                    | 30,000                    | 210  |

*FUENTE: Elaboración propia con datos de Banco Interamericano de Desarrollo BID*

Para los costos totales se han agregado los costos de materia prima, operación y mantenimiento, se obtiene el costo total del etanol, en la siguiente tabla se observan los distintos componentes.

**TABLA VI 6.4.2 Costos totales para la producción de Bioetanol (US\$/litro)**

| <b>Descripción</b>       | <b>Caña de<br/>miel<br/>pobre<br/>(US\$/litro)</b> | <b>Caña de<br/>miel rica<br/>(US\$/litro)</b> | <b>Caña de<br/>jugo<br/>directo<br/>(US\$/litro)</b> | <b>Caña de<br/>jugo<br/>hidrólisis<br/>(US\$/litro)</b> | <b>Sorgo<br/>(US\$/litro)</b> | <b>Yuca<br/>(US\$/litro)</b> | <b>Remolacha<br/>(US\$/litro)</b> |
|--------------------------|--|---|--|---|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Materia<br/>prima</b> | 0.26   | 0.21  | 0.27   | 0.22  | 0.59                          | 0.30                         | 0.44                              |
| <b>Inversiones</b>       | 0.09   | 0.09  | 0.10   | 0.26  | 0.13                          | 0.23                         | 0.15                              |
| <b>Energía</b>           | -  | -   | -  | -   | -                             | 0.15                         | -                                 |
| <b>Otros</b>             | 0.06   | 0.21  | 0.06   | 0.12  | 0.10                          | 0.11                         | 0.10                              |
| <b>Total</b>             | 0.40   | 0.52  | 0.43   | 0.60  | 0.82                          | 0.79                         | 0.69                              |

*FUENTE: Elaboración propia con datos de BID*

En Europa la materia prima es más cara y por lo mismo las inversiones son cerca de 30% más elevadas, ya que requieren un nivel más elevado de automatización y exigencias ambientales (*Henniges, 2006*). La materia prima representa más de la mitad de los costos, con la excepción del proceso utilizando hidrólisis, aún en desarrollo exactamente por su elevado costo y el caso de utilizarse miel rica, cuando se suman a los costos la pérdida de ingresos producto de la reducción de producción de azúcar. Naturalmente que este es un costo de oportunidad, pero efectivamente debe ser considerado, valiendo para el caso en estudio cerca de 0.18 US\$ por litro de etanol producido.

Técnicamente es importante mencionar que las mezclas de etanol con gasolina producen dos efectos principales, la elevación del octanaje e incremento de la presión de vapor, que pueden ser de interés en relación a los precios y que cabe comentar brevemente. 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*), pero implicando claramente que la gasolina-base puede ser un producto de precio inferior, que llega a cumplir las especificaciones solo con la adición de etanol, que le agrega valor. Como regla general, cuando más baja la calidad de la gasolina base, más sensible es el efecto del etanol (*IMP, 2004*).

En relación 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 volátiles. 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 sube 7 kPa y para 10%, sube 6,5 kPa (*Furey, 1985*). Este efecto impone un ajuste en la composición de la gasolina base, que debe presentar un contenido más bajo de fracciones livianas, como butanos e pentanos.

Las gasolinas con fracciones más pesadas son de menor calidad y de menor precio. Es por eso que, para las condiciones brasileñas, se estima para las gasolinas base que podrían ser adoptadas para formular gasohol, un precio en el mercado americano alrededor de 10% menos que el precio de una gasolina ya especificada (*CEPAL, 2007*). Sin embargo, es

importante reconocer que intervienen otros efectos, como las escalas de producción, las facilidades y condiciones disponibles para producir, transportar y almacenar la gasolina base requerida, que frente a volúmenes muy reducidos de consumo, pueden llevar a pequeñas reducciones o mismo alguna elevación en el precio de la gasolina base. Esas variaciones naturalmente pueden afectar indirectamente los precios de paridad.

## **6.5 VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN MÉXICO**

En los capítulos anteriores se mencionaron las condiciones generales tomando en cuenta diferentes materias primas seleccionadas para la obtención del bioetanol, el entorno físico, los cultivos energéticos en México, los procesos tecnológicos requeridos y los costos para producir etanol en México, con esta información es posible definir mejor los contextos más favorables, tomando en cuenta las necesidades de la dimensión de los parques productores de etanol en México.

Como ya lo vimos en el capítulo tres, las materias primas adecuadas para producir etanol son aquellas dulces, amiláceas y celulósicas que combinan altas productividades agrícolas e industriales, tienen bajo precio, demandan pocos insumos y no afectan la demanda alimentaria; además de que para elegir las, se debe considerar el nivel de autosuficiencia y el balance energético que presentan.

Con esta información puedo decir que México tiene potencial productivo relevante para producir etanol a partir de la caña de azúcar. Sin embargo, para que esto resulte rentable se requiere disminuir el costo de la materia prima y aumentar su productividad.

El problema que yo observe es que la materia prima tiene costos altos este sería un problema con respecto a su competitividad económica, mientras que en el caso de los requerimientos de área cultivada e inversiones éstos no son elevados.

Para que la caña de azúcar resulte un cultivo rentable se requiere disminuir el costo de la materia prima, aumentar la escala productiva y tener precios de etanol mayores a los 0.55 dólares por litro. En base a esas consideraciones, afirmar que producir etanol a base de caña de azúcar sería lo más viable para México en el corto plazo.

Nuestro país debe mejorar sobre la implementación de procesos agrícolas más productivos y de menor costo, además de proporcionar las condiciones sustentables para el desarrollo del etanol, y mejorar las condiciones de vida de los campesinos que se dedican a trabajar este tipo de cultivos.

Es importante que la producción bioenergética no sea considerada como sustituta de la presente producción agrícola sino que esté orientada al empleo de tierras marginales que no se usan y que están abandonadas, en un proceso de expansión y diversificación de las actividades.

En la siguiente tabla se presentan el número de unidades productivas necesarias, las inversiones asociadas a su implantación y las superficies de cultivo requeridas para cada caso.

**TABLA VI 6.5.1** *Número de unidades productivas necesarias (tecnologías convencionales)*

| <b>Materia prima y tecnología</b>                    | <b>Caña miel pobre</b> | <b>Caña miel rica</b> | <b>Caña jugo directo</b> |
|--|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| <b>Capacidad (m<sup>3</sup>/día)</b>                 | 200                    | 200                   | 500                      |
| <b>Inversiones industrial por unidad ( mil US\$)</b> | 18,000                 | 18,000                | 50,000                   |
| <b>Producción anual (m<sup>3</sup>/año)</b>          | 27,900                 | 27,900                | 81,300                   |

FUENTE: SENER-BID-GTZ

**TABLA VI 6.5.2** *Número de unidades productivas necesarias (tecnologías innovadoras)*

| <b>Materia prima y tecnología</b>                    | <b>Caña jugo mas hidrólisis</b> | <b>Sorgo</b> | <b>Yuca</b> | <b>Remolacha Azucarera</b> |
|--|---------------------------------|--------------|-------------|----------------------------|
| <b>Capacidad (m<sup>3</sup>/día)</b>                 | 551                             | 150          | 150         | 150                        |
| <b>Inversiones industrial por unidad ( mil US\$)</b> | 170,000                         | 22,000       | 22,000      | 22,000                     |
| <b>Producción anual (m<sup>3</sup>/año)</b>          | 10,000                          | 35,000       | 32,000      | 32,000                     |

FUENTE: SENER-BID-GTZ

Como se puede observar en las tablas VI 6.5.1 y 6.5.2 las inversiones más bajas se asociaran a tecnologías conocidas. Las destilerías anexas a ingenios azucareros, en donde la inversión más importante, para extracción del jugo de la caña, ya está hechas. 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.

**TABLA VI 6.5.3** *Superficie de cultivo requerida (tecnologías convencionales)*

| <b>Materia prima y tecnología</b>         | <b>Caña miel pobre</b> | <b>Caña miel rica</b> | <b>Caña jugo directo</b> |
|---|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| <b>Productividad agrícola (t/ha)</b>      | 65                     | 65                    | 65                       |
| <b>Productividad industrial (litro/t)</b> | 9                      | 18.1                  | 83                       |

FUENTE: SENER-BID-GTZ



**TABLA VI 6.5.4 Superficie de cultivo requerida (tecnologías innovadoras)**

| <b>Materia prima y tecnología</b>         | <b>Caña jugo mas hidrólisis</b> | <b>Sorgo</b> | <b>Yuca</b> | <b>Remolacha</b> |
|---|---------------------------------|--------------|-------------|------------------|
| <b>Productividad agrícola (t/ha)</b>      | 65                              | 42           | 14          | 52               |
| <b>Productividad industrial (litro/t)</b> | 99                              | 35           | 170         | 83               |

*FUENTE: SENER-BID-GTZ*

En resumen la mejor opción para que México produzca Bioetanol o Etanol, entre las diversas posibilidades se destacan las melazas, el jugo directo de caña por su productividad, costos y conocimiento agronómico 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.

## CONCLUSIONES

La importancia que hoy en día tienen los temas de corte energético, no sólo en nuestro país, sino en el mundo en general, nos obliga a la búsqueda de aquellas alternativas que, habiendo probado su viabilidad técnica, se presentan como opciones económicas.

Con la realización de este trabajo puedo concluir que, México se beneficiaría con la introducción del etanol como combustible de muchas formas: creación de empleo, desarrollo de la economía rural, ampliación de las infraestructuras sociales en zonas rurales, mejora de la seguridad energética, conservación de los recursos petrolíferos (que como hemos estado observando existen dos factores, uno es el crecimiento del consumo de petróleo y el otro es el agotamiento de este recurso), mejor gestión del agua, expansión de la agricultura a tierras más secas cosechando cultivos energéticos, como cultivos anuales múltiples como el sorgo dulce y yuca, motivación de la comunidad científica y tecnológica, incentivos a la agroindustria.

Son muy importantes los apoyos públicos que se den mediante una política de Estado, con esta ayuda se puede realizar investigaciones y promover el desarrollo tecnológico, preferentemente en las Instituciones y Universidades Mexicanas. También es necesario fortalecer la investigación para que sea implantada a la biomasa vegetal dentro de la matriz energética nacional con especial énfasis en la caña de azúcar, ya que la caña de azúcar resultó ser una de las mejores opciones tomando en cuenta el balance energético, en inversión y energía utilizada en el proceso de fabricación, aunado a esto, en México se cuenta con larga experiencia en este cultivo, ya que se practica desde hace siglos en la agronomía mexicana.

En este estudio se analizó como Biocombustible el Bioetanol, consideré como materias primas: la caña de azúcar, paja de trigo, yuca, remolacha azucarera, sorgo grano, sorgo dulce y la yuca; los criterios que fueron tomados en cuenta para la selección de la mejor opción de la materia prima fueron: Disponibilidad de la tecnología, que fuera madura, los costos producción totales, superficie requerida, necesidades de inversión, conocimientos agronómicos en México.

El costo de la materia prima es el elemento más importante de los costos de producción alrededor del 63%, depreciación e impuestos 19%, químicos 5%, mano de obra 3%, mantenimiento de las plantas representa solo el 1%.

La caña de azúcar resulto ser una de las mejores opciones tomando en cuenta el balance energético, en inversión y energía utilizada en el proceso de fabricación, en México se cuenta con experiencia en este cultivo.

De una manera general la caña de azúcar como miel pobre y jugo directo en proceso vía seca es la mejor opción, representa costos más bajos y se usa tecnología madura y simple, los beneficios estimados para la producción de etanol a partir de miel rica son menores que los obtenidos a partir del jugo de caña.

Tomando en cuenta los costos de materia prima y operación se obtiene el costo total del etanol expresado en dólares por litro; comparando las diferentes materias primas el costo más bajo resulto ser el de la caña miel rica (0.21US\$/Lt) y el más caro resulto ser del sorgo (0.59 US\$/Lt), en cuanto a inversiones en plantas productoras de etanol el precio más bajo fue de la caña miel pobre y miel rica (15,000 mil US\$) y la más cara fue con la materia prima y tecnología de jugo directo mas hidrólisis, en cuanto a precios el más bajo fue de la caña de miel pobre y cana de miel rica (0.9US\$/Lt) respectivamente, mientras que el precio más caro fue la caña con el proceso de hidrólisis (0.26 US\$/Lt),tomando en cuenta los costos de energía, los costos más elevados son para la yuca (0.15 US\$/Lt).

Comparando la productividad en litros de etanol por tonelada tenemos que la mejor opción resulto ser la yuca (170 Lts Et/t), seguida por la caña de azúcar con (98 Lts Et/t), la productividad más baja fue con la miel pobre (8.8 Lts Et/t). Comparando la superficie de cultivo requeridas con tecnologías convencionales la mayor productividad agrícola es con la materia prima de caña de azúcar usando la tecnología de miel pobre, miel rica jugo directo (61 t/ha), la mayor productividad industrial es con la caña de jugo directo (80 Lts/t), comparando la superficie de cultivo requeridas con tecnologías innovadoras tenemos que

con la caña jugo mas hidrólisis es la más alta (61 t/ha), seguida por la remolacha (51 t/ha), la más baja es la yuca (14 t/ha).

Como ya se menciona anteriormente, para el análisis de la viabilidad económica de la producción de etanol en nuestro país, depende de varios aspectos a considerar: Costo de la materia prima a emplear, esta es muy importante ya que si hay variaciones muy severas en los precios estos afectan considerablemente el precio final del etanol, en estos casos la inversión no es tan relevante porque solo se trata de una destilería anexa. **ESTE ES EL FACTOR MAS CRITICO, ACUERDATE DE LOS EFECTOS EN LOS PRECIOS DE LOS ALTOS COSTOS DE LAS MATERIAS PRIMAS, CONVENDRÍA EXPLICAR LOS CONTRA EN UN CASO DE UN USO MASIVO.**

Para el caso en que se incluye la hidrólisis, ocurre exactamente al revés, con las inversiones es el factor más importante. Otro punto a comentar es la manera de como los coproductos afectan: 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, otro punto es la autosuficiencia energética, a partir del bagazo de la caña, tratar de no utilizar petróleo para la producción de bioetanol, economía de escala (mayor tamaño de las destilerías, para obtener mayor producción), incorporación de la cogeneración, con entrega de electricidad a la red pública en el ingenio, introducción de la biotecnología para mejorar los procesos de fermentación, subsidios a la agricultura (producción de caña destinada para etanol y exportación de azúcar al mercado mundial).

Cabe mencionar que las inversiones presentadas reflejan únicamente los costos de capital para la planta agroindustrial y no consideran los costos agrícolas, de desarrollo de plantaciones, evidentemente necesarios para promover la producción de materia prima. Es indispensable reconocer que la formación de campos de cultivo, incluyendo por ejemplo preparación de suelo, eventualmente obras de drenaje o riego, puede representar costos significativos. Como una referencia que indica la magnitud relativa de tales costos, es Brasil, las inversiones permanentes para producción de caña son consideradas como formación de capital fijo agrícola y valen 47% de las inversiones industriales (Consecana, 2007).

La Agro Industria de la Caña de Azúcar en nuestro país, está consciente del rol que la gramínea jugará en el futuro, dada su mayor fortaleza, a saber “pronta renovabilidad”; y secuestradora potencial de CO<sub>2</sub>. Es aquí donde surge el alcohol etílico, en sus variantes: anhidro e hidratado, como una contribución al balance energético y a la detención del mal de los últimos tiempos; “el cambio climático”. Comparando los beneficios energéticos y ambientales en la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar son menores en México que en Brasil. Esto se debe a que el sector cañero mexicano presenta un rendimiento más bajo y a la menor eficiencia energética en los procesos de refinación.

Es importante aclarar que no se espera que el combustible etanol desplace completamente a la gasolina del mercado en ningún momento. Por el contrario, el etanol puede alargar los recursos petrolíferos y ahorrando gasolina para el futuro.

Algunas recomendaciones indispensables son las siguientes:

Es necesario que la legislación minimice los trámites y burocracia en que se encuentra la agroindustria de la caña de azúcar en México debido al exceso de leyes, negociando entre las partes relacionadas tales como los cañeros e industriales, se requieren apoyos crediticios que estén ordenados y bien dirigidos al campo, así como la difusión y el trabajo dentro del proceso de la hidrólisis rápida misma que es necesaria para aumentar la oferta del etanol.

Un punto importante que mencionaron los cañeros de las zonas del estado de Villahermosa y Veracruz, pedían al gobierno cumplir con la Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar; en materia de investigación, financiamiento, (esquemas de garantías líquidas adecuadas) registro de organizaciones e instrumentación de mecanismos, así como la creación de organismos colegiados y administrativos. Es indispensable la aplicación de nuevas tecnologías de punta como la informática a nivel parcelario ya que el uso de esta tecnología aumenta considerablemente la productividad.

## BIBLIOGRAFIA

- Martínez Mario Enrique “ENERGÍA, MEDIO AMBIENTE Y ALIMENTOS”, Publicación Electrónica, Instituto Nacional de tecnología industrial, Argentina 2007.
- Juana, José María, Florentino Macías Manuel, ENERGÍAS RENOVABLES PARA EL DESARROLLO. MADRID España 2007.
- María Helena Tachinardi, Revista Época (Brasil). Consultado el 2008-08-06. Edición impresa pp. 73
- Martínez Allier, Joan ECONOMÍA ECOLÓGICA AL ECOLOGISMO POPULAR. Barcelona: Icaria, 1994.
- José Goldemberg "The Brazilian biofuels industry" (en Inglés). *Biotechnology for Biofuels* 1. Consultado el 2008
- Hernández, Piorno a. ENERGÍAS RENOVABLES, APROXIMACIÓN A SU ESTUDIO. Salamanca: Amarú, 1993
- COMITÉ DE SEGURIDAD ALIMENTARIA MUNDIAL (2007); “Evaluación de la situación de la seguridad alimentaria mundial”, organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación, Mayo de 2007
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE, fondo de naciones unidas para la agricultura y la alimentación (2007); “oportunidades y riesgos del uso de la bioenergía para la seguridad alimentaria en América latina y el Caribe”
- Industry Statistics: Annual World Ethanol Production by Country (Ingles). Renewable Fuels Association, 2008
- National Ethanol Vehicle Coalition, New E85 Stations (Ingles). Newsletter (Vol 14 no. 13) 2008
- Larry Rother, With Big Boost From Sugar Cane, Brazil Is Satisfying Its Fuel Needs (Ingles). The New York Times. 2008
- BBI International Consulting Division. “Feasibility Study for Ethanol Production in Mexico from Sugar Cane and Maize”. Abril 2005. Banco de Crédito Rural del Noroeste, S.A. El cultivo de la remolacha azucarera utilizada como forraje. Mayo de 1984.

- Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA). “Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático” 2004
- Comité de la Agroindustria Azucarera. “Desarrollo Operativo Campo-fábrica. Zafra 2003-04”.
- Cuadri de la Torre, Gabriel. “Elementos para la introducción de Etanol en las gasolinas mexicanas”. Octubre 2004
- Ethanol Producer Magazine. Abril 2006, Imperial County. “Agricultural Crop & Livestock Report” 2004. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)
- Banco de México. 2006. Comunicado de prensa 24 de febrero de 2006 Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento Regional de Operaciones II. 2005.
- Situación económica y perspectivas. Istmo Centroamericano, México, Haití y República Dominicana, pp. 51-54.
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la Cámara de Diputados. 2007. La industria alcoholera de México ante la apertura comercial.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). 2007. Anexo. Fondo Mixto CONACYT – Gobierno del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Convocatoria 2006-01. Demandas específicas. Área 1. Desarrollo y Transferencia de Tecnología al sector agropecuario y pesquero.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). 2002. Proyecciones de la población de México y de las entidades federativas, 2002
- Foro OCDE México. 2004. Políticas agrícolas y el desarrollo de México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. XII Censo General de Población y Vivienda 2000.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Petróleos Mexicanos. 2007. Anuario Estadístico 2007. Comparaciones Internacionales.
- Secretaría de Economía. Subsecretaría de Negociaciones Comerciales Internacionales:

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Bases de datos del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales The World Bank Group. 2003. GenderStats Database of gender statistics.
- Almazán, O y González, L. (ICIDCA), 1999, “Estudio de alternativas de materias primas, fuentes de energía y recursos tecnológicos para la producción de alcohol carburante en el sector azucarero y su impacto en la industria cubana de azúcar y derivados”, Proyecto Promoción de Programas de Alcohol Carburante: reporte final, FCPB – Fondo Común de Productos Básicos, OIA - Organización Internacional del Azúcar y GEPLACEA - Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe Exportadores de Azúcar, São Paulo
- Anderson, I.C., 2002, Ethanol from Sweet Sorghum, Iowa Energy Center, disponible en [www.energy.iastate.edu/renewable/biomass/cs-anoerobic2.html](http://www.energy.iastate.edu/renewable/biomass/cs-anoerobic2.html), consultado en mayo de 2009
- ANUR, 2005, “Producción de Etanol con Caña de Azúcar”, Estrategia para áreas de riego con Modernización Integral, Asociación Nacional de Usuarios de Riego, México, D.F ASAZGUA, 2006, Fabricación de Azúcar, Asociación Azucarera de Guatemala.
- Assis, P., 2006, Cogeneración de Energía en Ingenios Azucareros, presentación en el Encuentro Interamericano sobre Biocombustibles, MAPA/IICA, São Paulo Badger, P.C., 2002, “Ethanol from cellulose: a general review” in: J. Janick and A. Whipkey (eds.), Trends in new crops and new uses, ASHS Press



## Presentaciones

- PEMEX Refinación, Etanol de Origen Agrícola como Oxigenante para Combustible, CACINTRA Xalapa, Foro: Etanol, Caña de Azúcar y Energía, Xalapa, Veracruz, Noviembre 24 de 2006.
- PEMEX, Dirección Corporativa de Operaciones, Evaluación del uso de Etanol para la Producción de Gasolinas, Enero de 2006.
- Drogos, Donna L., P.E., MTBE vs. Other Oxygenates, Mealey's MTBE Conference, Molino del Rey, CA, May 11-12, 2000.

## Páginas web consultadas

- [www.energia.gob.mx](http://www.energia.gob.mx) Balance Nacional de Energía 2007
- [www.camaradiputados.gob.mx](http://www.camaradiputados.gob.mx) Leyes Federales y Estatales
- [www.pemex.com](http://www.pemex.com) PEMEX Statistical Yearbook 2007, Indicadores Petroleros, Enero 2008, Informe de Labores 2008
- [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)
- [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx)
- [www.e-local.gob.mx](http://www.e-local.gob.mx)
- [www.epa.gov/atag/consumer/fuels/htm](http://www.epa.gov/atag/consumer/fuels/htm)
- [www.bioetanol.org](http://www.bioetanol.org)
- [www.enginemanufacturers.org](http://www.enginemanufacturers.org)
- [www.biofuels.arc.ab.ca](http://www.biofuels.arc.ab.ca)
- [www.presidencia.gob.mx](http://www.presidencia.gob.mx)
- [www.economia-snci.gob.mx](http://www.economia-snci.gob.mx)
- [www.greenfleet.info](http://www.greenfleet.info)
- [www.bancomexico.gob.mx](http://www.bancomexico.gob.mx)
- [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
- [www.conapo.gob.mx](http://www.conapo.gob.mx)
- [www.cefp.gob.mx](http://www.cefp.gob.mx) Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la Cámara de Diputados