



CLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

PROGRAMA PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

**PRODUCCIÓN DE GUARAPO Y BIOETANOL EN SIETE VARIEDADES
DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp*) COLPOSCTMEX.**

PASCUAL LÓPEZ VÁZQUEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS


H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO


2013


La presente tesis, titulada: **Producción de guarapo y bioetanol en siete variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp*) COLPOSCTMEX**, realizada por el alumno: **Pascual López Vázquez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO**

CONSEJO PARTICULAR.

CONSEJERO: 
DR. APOLONIO VALDEZ BALERO

ASESOR: 
DR. ARMANDO GUERRERO PEÑA

ASESOR: 
DR. SANTIAGO DE JESÚS MÉNDEZ GALLEGOS

H. Cárdenas, Tabasco, 14 de Junio de 2013

RESUMEN

PRODUCCIÓN DE GUARAPO Y BIOETANOL EN SIETE VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp*) COLPOSCTMEX.

Pascual López Vázquez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2013

El presente estudio se realizó con el objetivo de evaluar la producción de guarapo y bioetanol en siete variedades de caña de azúcar COLPOSCTMEX, mediante la incorporación de tres niveles de fermento (*Sacharomyces cerevisiae*). Se determinó la producción de guarapo por variedad, °brix, pH inicial, tiempo de fermentación, °brix y pH final de la fermentación, también se determinó el grado alcohol y el rendimiento de alcohol por variedad. El jugo se extrajo de 20 tallos por variedad, la variedad COLPOSCTMEX 05-223 con 42.97 Kg que fue el mejor, debido a que los tallos de esta variedad son suculenta, en cuanto a la cantidad de jugo las variedades COLPOSCTMEX 05-223 con 48.2 litros, en el análisis estadístico se obtuvo diferencias ($p \geq 0.05$) entre variedades. Con relación al brix la variedad COLPOSCTMEX 05-003 la que presentó la mayor concentración de brix (17) con diferencia significativa entre las variedades. En el pH los resultados indicaron que existen diferencias significativas entre las variedades en estudio. Para determinar el inóculo para inducir la fermentación se observó que no existieron diferencias significativas entre las tres cantidades utilizadas. La cantidad de fermento utilizado fue de 20 mg por litro para inducir la fermentación a los seis días. El análisis estadístico indicó que en el brix final presentó diferencias significativas, el brix tuvo un descenso inversamente proporcional a los seis días del inicio de la fermentación en todas las variedades, el pH al concluir la fermentación, presentó valores diferentes, los cuales fueron significativamente diferentes entre las variedades en estudio. La variedad COLPOSCTMEX 05-204 con 90.75 °GL, en cuanto a la concentración de grados de alcohol, no existió diferencias significativas en las siete variedades, en el rendimiento la variedad COLPOSCTMEX 05-204 es la que produce mayor cantidad de alcohol con 26% de efectividad con 90.75 grados de alcohol.

PALABRAS CLAVES: Bioetanol, *Sacharomyces cerevisiae*, Caña de azúcar

ABSTRACT

GUARAPO AND BIOETHANOL PRODUCTION IN SEVEN VARIETIES OF SUGARCANE (*Saccharum spp*) COLPOSCTMEX.

Pascual López Vázquez, M.C

Colegio de Postgraduados, 2013

The present study was conducted to evaluate the guarapo and bioethanol production in seven sugarcane varieties COLPOSCTMEX, by incorporating three levels of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*). Production was determined by guarapo range, Brix, pH initial fermentation time, and pH Brix end of fermentation, also determine the level of alcohol and alcohol yield variety. The juice was extracted from 20 stems per variety, COLPOSCTMEX range 05-223 with 42.97 kg which was the best, because the stems of this variety are succulent, as to the amount of juice COLPOSCTMEX varieties with 48.2 05-223 liters, in the statistical analysis was obtained differences ($p \geq 0.05$) between varieties. With regard to the variety COLPOSCTMEX 05-003 brix which showed the highest concentration of brix (17) with a significant difference between the varieties. In the pH results indicated significant differences among the varieties under study. To determine the inoculum to induce the fermentation was observed no significant difference between the three doses used. The amount of yeast used was 20 mg per liter to induce fermentation six days. Statistical analysis indicated that the significant differences end brix; brix had a decrease inversely proportional to the six days of the start of fermentation in all varieties, the pH at the end of fermentation, presented different values, which were significantly different between varieties under study. COLPOSCTMEX variety with 90.75 ° GL 05-204, in terms of degrees of alcohol concentration, there was no significant difference in the seven varieties; the variety in the yield is 05-204 COLPOSCTMEX produce the largest amount of alcohol with 26% effectiveness with 90.75 percent alcohol.

KEYWORDS: Bioethanol, *Saccharomyces cerevisiae*, Cane sugar

DEDICATORIAS.

A DIOS: Por darme la sabiduría, la inteligencia, el conocimiento y guiarme por el camino de la rectitud. Por darme la oportunidad de vivir y por ser siempre mi luz, mi fe, esperanza y así permitirme llegar a culminar una de mis metas.

A MIS PADRES: FERNANDO Y CARMELA con todo cariño y eterno agradecimiento por sus esfuerzos y sacrificios que hicieron para lograr mis estudios.

A MIS ABUELOS: PASCUAL Y MARIA por su apoyo incondicional, económico, amor, cariño y sobre todo por sus consejos y comprensión que desarrollaron en mí la motivación para alcanzar la meta propuesta.

A MI ESPOSA: MARTHA AZUCENA por haberme dado la fuerza interior, para seguir adelante con mis estudios y no dejarme vencer en los momentos más difíciles.

A MIS HERMANOS: A todos ellos por su apoyo y cariño que me han demostrado durante la trayectoria de mi vida y en el desarrollo de mi formación profesional.

AI DR. ÁNGEL Y DRA. NANCY: Por el apoyo incondicional y moral que me han brindado

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico aportado durante mis dos años de maestría.

Al Colegio de Postgraduados Campus Tabasco por permitirme realizar mi maestría en el Programa de Producción Agroalimentaria en el Trópico (PROPAT).

Al Dr. Apolonio Valdez Balero, por apoyarme en la realización de mi tesis en la parte de campo y laboratorio, por sus aportaciones, comentarios y su dedicación para enseñar a los demás.

Al Dr. Armando Guerrero Peña, por apoyarme en la realización de mi tesis, por sus aportaciones, comentarios y su dedicación para enseñar a los demás.

Al Dr. Santiago de Jesús Méndez Gallegos, por apoyarme en la realización de mi tesis, por sus aportaciones, comentarios y su dedicación para enseñar a los demás

Al Dr. Adolfo Bucio Galindo por su ayuda y colaboración para la fermentación del jugo y en laboratorio.

Al Ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa por su ayuda y colaboración para la extracción del jugo de la caña de azúcar para la fermentación.

Al personal Académico, de Laboratorio, Administrativo y de campo del Campus Tabasco, por las facilidades y apoyo brindado durante mis estudios.

Y a todas las personas que de una u otra manera, contribuyeron a la realización y la culminación de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	III
ABSCTRACT	IV
DEDICATORIAS	V
AGRADECIMIENTOS	VI
INDICE DE CUADROS	XI
INDICE DE FIGURAS	XII
INDICE DE ANEXOS	XIII
I.-INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos e hipótesis	3
1.1.1 Objetivos	3
1.1.2 Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 El cultivo de la caña de azúcar	4
2.1.2 Origen y distribución.....	4
2.2 Morfología de la caña de azúcar	5
2.2.1 La raíz	5
2.2.2 El tallo.....	5
2.2.3 La hoja.....	6
2.3 Variedades	7
2.4 Cosecha	7
2.5 Condiciones ambientales	8
2.6 Composición de la caña de azúcar	8
2.7 Usos de la caña de azúcar	10
2.7.1 Biomasa	10
2.7.2 Azúcar o tipos de azucares de la caña de azúcar	11
2.7.3 Jugo de la caña de azúcar	11
2.7.3.1 Composición del jugo de caña de azúcar	11
2.8 Alcoholes.....	12

2.8.1 Clasificación de alcoholes	12
2.9 Etanol	13
2.9.1 Usos del etanol.....	14
2.9.2 Importancia del bioetanol	17
2.9.2.1 Economía	17
2.9.2.2 Medio ambiente	17
2.9.2.3 Social.....	18
2.10 Procesos para la obtención de alcohol o bioetanol	18
2.10.1 Procesos tradicionales	19
2.10.2 Procesos avanzados para la obtención de etanol.	20
2.10.3 Fundamentos bioquímicos de la fermentación alcohólica	20
2.10.4 Producción de alcohol etílico	21
2.11 La fermentación alcohólica	22
2.11.1 Condiciones necesarias para una buena fermentación alcohólica	22
2.11.2 Cultivo iniciador	23
2.11.3 Levaduras y clasificación.....	23
2.11.4 pH.....	25
2.11.5 Concentración de azúcar.....	25
2.11.6 Oxígeno necesario	25
2.11.7 Temperatura.....	26
2.12 Tipos de destilación.....	26
2.12.1 Artesanal	26
2.12.2 Industrial.....	27
2.12.2.1 Destilación simple.....	27
2.12.2.2 Destilación fraccionada	27
2.13 Importancia de la caña de azúcar en México	28
2.13.1 Fabricas productoras de alcohol en México	28
2.13.2 Producción actual en el país	29
2.14 Producción mundial de etanol	30
2.14.1 La industria mundial de etanol.....	31

2.15 Rendimiento y costos	31
2.16 Países productores de etanol	32
2.16.1 Brasil	32
2.16.2 Estados Unidos	33
2.16.3 Unión Europea	34
2.16.4 India.....	35
2.16.5 Japón.....	36
2.16.6 Colombia	36
III. MATERIALES Y MÉTODOS	39
3.1 Ubicación geográfica de la investigación.....	39
3.2 Material vegetal	40
3.3 Materia prima	41
3.3.1 Pesado	43
3.3.2 Extracción del jugo o guarapo	44
3.3.3 Sólidos solubles (°Brix inicial).....	44
3.3.4 pH Inicial.....	44
3.3.5 Fermentación	45
3.3.6 Brix final después de la fermentación.....	46
3.3.7 pH finales	47
3.3.8 Destilación.....	47
3.3.9 Bidestilación	49
3.3.10 Rendimientos de alcohol	50
3.3.11 Análisis estadístico	50
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1 Peso del tallo.....	51
4.2 Cantidad de jugo	52
4.3 Brix inicial	54
4.4 pH al inicial	55
4.5 Fermentación	56
4.6 Brix final después de la fermentación.....	58

4.7 pH final de la fermentación.....	59
4.8 Destilación.....	60
4.9 Bidestillación.....	62
4.10 Análisis en el rendimiento de alcohol por variedad.....	63
V. CONCLUSIONES.....	71
VI. RECOMENDACIÓN.....	72
VII. LITERATURA CITADA.....	73
VIII. ANEXOS.....	81

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición química (%) del tallo y jugo de la caña de azúcar	9
Cuadro 2. Propiedades físicas de alcoholes usadas como combustible	15
Cuadro 3. Tipos de levaduras y su característica	23
Cuadro 4. Producción de alcohol y rendimiento por estados	29
Cuadro 5. Total de brix al inicio de la fermentación	54
Cuadro 6. pH al inicio de la fermentación	55
Cuadro 7. Tabla de rendimiento de alcohol por variedad	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Configuración especial y estructura del etanol	13
Figura 2. Síntesis de rutas tecnológicas para la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar.....	19
Figura 3. Ubicación geográfica donde se realizó la investigación	40
Figura 4. Caña en la planta procesadora	41
Figura 5. Caña en el campo	42
Figura 6. Pesado de la caña de azúcar	43
Figura 7. Proceso de fermentación del jugo de caña con trampa de agua.....	46
Figura 8. Destilador simple	48
Figura 9. Peso del tallo de las variedades en estudio	52
Figura 10. Cantidad de jugo de las variedades en estudio	53
Figura 11. Efecto de tres niveles de inóculo para inducir la fermentación	56
Figura 12. Grados brix al final de la fermentación	59
Figura 13. pH al final del proceso de fermentación	60
Figura 14. Contenido de grado alcohólico en la destilación en las siete variedades.....	61
Figura 15. Contenido de grado alcohólico en bidestilación	62

ÍNDICE DE ANEXOS.

Anexo 1. Prueba de Tukey para el peso del tallo de las variedades	82
Anexo 2. Prueba de Tukey para cantidad de jugo	82
Anexo 3. Prueba de Tukey para el final de la fermentación	83
Anexo 4. Prueba de Tukey de tres niveles de levadura, brix final de la fermentación.....	83
Anexo 5. Prueba de Tukey al final de la fermentación.	84
Anexo 6. Prueba de Tukey de tres niveles de fermento, del pH final de la fermentación.....	84
Anexo 7. Prueba de Tukey del contenido de grado alcohólico en las variedades	85
Anexo 8. Prueba de Tukey del contenido de grado alcohólico de tres niveles de fermento	85
Anexo 9. Prueba de Tukey del contenido de grado alcohólico en bidestilación.....	86

I INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum spp*) es uno de los cultivos más antiguos del mundo y de mayor importancia industrial en las zonas tropicales y subtropicales. Se cultiva en más de 130 países; de ellos Brasil aporta el 28% y la India el 22% de la producción, seguidos por China, Tailandia, Pakistán y México (USDA, 2010).

En México, la caña de azúcar se cultiva en 734,818.74 ha, las cuales producen 50,421,619.53 t, con un rendimiento promedio nacional de 71.63 t ha⁻¹. En el estado de Tabasco se cultivan 31,340.00 ha, con un rendimiento promedio de 61.15 t.ha⁻¹ (SIAP, 2011).

Entre los cultivos bioenergéticos más usados para la producción de etanol, está la caña de azúcar, materia prima utilizada en países tropicales como Brasil e India, mediante la fermentación de los jugos (Wheals *et al.*, 1999).

La caña de azúcar es un recurso natural renovable, porque es fuente de azúcar, biocombustible, fibra, fertilizante orgánico y muchos otros productos y subproductos con sustentabilidad ecológica. Los combustibles son de vital importancia para el desarrollo de las actividades productivas de cualquier país; es por ello que utilizar fuentes alternativas y renovables a los combustibles fósiles tradicionales ayuda a diversificar las opciones disponibles dentro de la economía, por ejemplo con la incorporación del Bioetanol (Wheals *et al.*, 1999).

Actualmente el biocombustible más importante es el etanol, producto 100% renovable obtenido a partir de cultivos bioenergéticos. El etanol carburante es utilizado para oxigenar la gasolina, permitiendo una mejor oxidación de los hidrocarburos y reduciendo las emisiones de monóxido de carbono, compuestos aromáticos y compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera (Casanova, 2002).

La producción de etanol con fines carburantes es uno de los procesos más utilizados en el mundo. Las razones por las cuales se ha convertido en el compuesto oxigenado de mayor demanda se encuentran en sus propiedades físico-químicas, ya que al provenir de materia prima biológica puede asegurar sostenibilidad ambiental y económica en el proceso (Usayán *et al.*, 2006).

Considerando que en México no existen variedades de caña de azúcar recomendado para la producción de etanol, en este estudio se propuso evaluar siete variedades de caña de azúcar COLPOSCTMEX como fuentes para la producción de guarapo y etanol.

1.1 Objetivos e hipótesis

1.1.1 Objetivos

Objetivo general

- Evaluar la producción de guarapo y etanol en siete variedades de caña de azúcar COLPOSCTMEX, mediante la incorporación de tres niveles de fermento (*Sacharomyces cerevisiae*).

Objetivos específicos

- Determinar tiempo de fermentación y °Brix finales del jugo fermentado.
- Determinar el rendimiento de alcohol y grado alcohólico de acuerdo con la concentración óptima de fermento.
- Evaluar la producción de guarapo y alcohol en las variedades de caña de azúcar en estudio.

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados se desarrollaron las siguientes hipótesis de trabajo.

1.1.2 Hipótesis

No todas las variedades evaluadas de caña de azúcar producen la misma cantidad de guarapo y bioetanol.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El cultivo de la caña de azúcar

La caña se cultiva en regiones tropicales y subtropicales especialmente en clima cálido. La planta se adapta desde el nivel del mar hasta los 2200 msnm. Existen variedades que se cosechan en entre los 12 a 18 meses, esto depende de la zona donde se ubica el cultivo. Para obtener un buen desarrollo de la planta su temperatura promedio ideal es de 25 °C (Humbert, 1974).

2.1.2 Origen y distribución.

Se considera que la región que comprende parte de la India, China, Nueva Guinea y zonas aledañas son el centro de origen de la caña de azúcar, por encontrarse ahí el mayor número de especies (Ruiz, 1995).

El género *Saccharum* está constituido por seis especies: *S. officinarum*, *S. edule*, *S. barberi*, *S. sinensis*, *S. spontaneum* y *S. robustum*. Las cuatro primeras corresponden a especies domesticadas y las dos últimas a especies silvestres (Guimaraes y Sobral, 1998). La especie *Saccharum officinarum* es conocida como la de mayor producción de azúcar; su centro de origen se encuentra en Nueva Guinea y sus islas circundantes y se cree que es descendiente de *S. robustum* por presentar características similares (Irvine, 1999). Otras teorías afirman que *Saccharum officinarum* evolucionó a través de la hibridación de especies como *Erianthus arundinaceus*, *S. spontaneum* y *S. robustum* (Daniels y Roach, 1987), aunque en la actualidad se ha comprobado que no se puede obtener híbridos fértiles entre las cruces de *Erianthus arundinaceus* y *Saccharum* ssp (Cai et al., 2005).

2.2 Morfología de la caña de azúcar

2.2.1 La raíz

La función principal de la raíz es absorber agua y nutrientes del suelo, como también proporcionar anclaje. Hay dos tipos de raíz: la raíz primaria que está ubicada en el embrión, cuando las plantas provienen de semillas y las raíces adventicias que se originan en el tallo, en la banda de raíces cerca del entrenudo (Subirós, 1995).

Las raíces adventicias se dividen en dos tipos, las primordiales, se forman a partir de la germinación de los primordios radicales que se ubican en los nudos de la caña (semilla asexual). Las permanentes brotan cuando se desarrollan los tallos nuevos, son de mayor grosor, numerosas y largas, su número aumenta de acuerdo con el tamaño de la planta (Subirós, 1995).

2.2.2 El tallo

Vera y Alcolea (1979) mencionan que el tallo es la parte utilizada en la industria azucarera, pues en él se tiene acumulada la sacarosa. La longitud en el momento del corte oscila normalmente entre 1.50 a 4 m.; el diámetro va desde 1.5 cm en ciertas variedades delgadas hasta más de 6 cm en tallos jóvenes de especies gruesas. Su peso en el momento de la recolección puede ser de sólo 300 g o puede alcanzar hasta 6 kg. Está formado por unidades llamadas canutos o entrenudos que varían en longitud, grosor, forma y color según la variedad. Los canutos están unidos por los nudos, lugar donde se insertan las hojas, los tallos están formados por nudos y entrenudos, su color depende de la variedad, normalmente son de color verde.

En cuanto al color, forma, espesor y largo del canuto, (Vera y Alcolea, 1979) mencionan que es variable y dependen de la variedad y las condiciones del medio ambiente donde se desarrollen las plantas de caña. El color puede ser, entre los más comunes: rojo, verdoso y amarillo. Su forma puede ser perfectamente erecta, inclinada o completamente acamada (Fauconier, 1975)

El tallo es el órgano más importante desde el punto de vista económico, debido a que en él se almacenan los carbohidratos, producto de la fotosíntesis. En el proceso industrial, del tallo se obtienen la sacarosa y otros derivados como la melaza, bagazo y cachaza. (Subirós, 1995).

El tallo de la caña de azúcar se considera como producto agrícola, ya que en él se almacena el azúcar. El azúcar se va acumulando en los entrenudos inferiores disminuyendo su concentración a medida que va ascendiendo hacia la parte superior del tallo (Brizuela, 2003).

Los tallos corresponden a la sección anatómica y estructural de la caña de azúcar, que presenta mayor valor económico e interés para la fabricación de alcohol, motivo por el cual su composición química reviste especial significado (Chávez, 2004).

2.2.3 La hoja

Las hojas de la caña de azúcar se originan en los nudos y se distribuyen en posiciones alternas a lo largo del tallo a medida que éste crece. Es un órgano especializado cuya principal función es la de llevar a cabo la fotosíntesis, proceso mediante el cual los cloroplastos convierten la energía lumínica en energía química. Las hojas también cumplen un papel importante en el proceso de la respiración celular, la transpiración y en el intercambio gaseoso. Sus partes están

compuestas por: lámina, nervadura central, vaina, lígula, y aurícula (Subirós, 1995).

2.3 Variedades

Dentro del gran número de variedades cultivadas, todas pertenecen al género *Saccharum*. Quezada, (2007), es fundamental para el desarrollo de una industria diversificada, contar con variedades de caña de azúcar adecuadas para cada actividad, alto contenido de sacarosa si es para producir azúcar, alto contenido de fibra si es para cogenerar energía eléctrica, de rápido crecimiento si es para alimentación animal, así como otras adecuadas para obtención de mieles para la producción de etanol.

2.4 Cosecha

La recolección se lleva a cabo entre los once y los dieciséis meses después de la plantación; es decir, cuando los tallos concentran la mayor cantidad de sacarosa para producir azúcar. Se quema la plantación para eliminar las malezas que impiden el corte de la caña, aunque se han ensayado con cierto éxito máquinas para cortar caña. En Tabasco, México, la mayor parte de la zafra o recolección sigue haciéndose manual, el instrumento usado para cortarla suele ser un machete grande de acero con hoja de unos 50 cm de longitud y 13 cm de anchura, un pequeño gancho en la parte posterior y empuñadura. La caña se corta en ambos extremo inferior y superior, cerca del último nudo maduro, ya cortadas se apilan a lo largo del campo, luego se colectan con máquina para su transporte al batey, donde finalmente se trituran los tallos y se les extrae el jugo para producir azúcar (Quezada, 2007).

La cosecha tiene como meta producir tallos de caña de azúcar de buena calidad, en función del contenido de sacarosa, para esto se debe cortar las puntas o cogollos en la operación de recolección, ya que las puntas y las hojas de la caña, contienen poca sacarosa disminuyendo el rendimiento de azúcar, la punta se elimina de manera efectiva por el corte a mano que es el método de recolección escogido (Brizuela, 2003).

2.5 Condiciones ambientales

La temperatura, la humedad y la luminosidad, son los principales factores del clima que controlan el desarrollo de la caña. La caña de azúcar es una planta tropical y se desarrolla mejor en lugares calientes y soleados (Brizuela, 2003).

Cuando prevalecen temperaturas altas la caña de azúcar alcanza un gran crecimiento vegetativo y bajo estas condiciones la fotosíntesis se desplaza, hacia la producción de carbohidratos de alto peso molecular, como la celulosa y otras materias que constituyen el follaje y el soporte fibroso del tallo (Brizuela, 2003).

Es indispensable suministrar una adecuada cantidad de agua a la caña durante su desarrollo vegetativo, para que permita la absorción, transporte y asimilación de los nutrientes. La luz tiene un papel muy importante, como principal fuente de energía de la caña de azúcar en el almacenamiento de la sacarosa. A menor luminosidad menor almacenamiento de azúcares (Brizuela, 2003). Se han registrado buenos resultados de rendimiento y de azúcar en suelo de textura franco limoso y franco arenoso. Díaz *et al.* (2003) y Uscátegui (1985), señalan que el rendimiento de azúcar esta determinado principalmente por el componente varietal, el suelo, el manejo agronómico y el clima.

2.6 Composición de la caña de azúcar

El valor nutricional y energético de la caña se debe a la cantidad de azúcar, especialmente sacarosa que contiene esta planta en el tallo. Chen (1991)

menciona que en el tallo de la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida el jugo, que contiene agua y sacarosa. La composición de la caña está definida por muchos factores los cuales varían ampliamente para las diferentes variedades. Con el clima y los cambios estacionales, la composición química varía considerablemente (González y Ortiz, 1974). Sin embargo, unos valores de referencia general se observa en el Cuadro 1. Se presenta la composición química (%) del tallo y jugo de la caña de azúcar (Meade y Chen, 1977).

Cuadro 1. Composición química (%) del tallo y jugo de la caña de azúcar.

Constituyente químico en los tallos	Porcentaje*
Agua	73-76
Sólidos	24-27
Sólidos solubles	10-16
Fibra	11-16
Composición del guarapo	Sólidos solubles (%)
Azucares	75-92
Sacarosa	70-88
Glucosa	2.4
Fructosa	2.4
Sales	3.0-4.5
Ácidos inorgánicos	1.5-4.5
Ácidos orgánicos	1.0-3.0
Ácidos carboxílicos	1.1-3.0
Aminoácidos	0.5-2.5
Otros no azucares orgánicos	
Proteínas	05-06
Almidón	0.001-0.050
Gomas	0.30-0.60
Ceras, grasa y fosfolípidos	0.05-0.15
Otros	3.0-5.0

*En los tallos, el porcentaje se refiere a la planta de caña y en el jugo a sólidos solubles.

2.7 Usos de la caña de azúcar

La caña de azúcar se utiliza preferentemente para la producción de azúcar, adicionalmente se puede utilizar como fuente de materia prima para una amplia gama de derivados, algunos de los cuales constituyen alternativas de sustitución de otros productos con impacto ecológico adverso. En este sentido es importante señalar el empleo de la cachaza como fertilizante orgánico, las mieles finales y los jugos del proceso de producción de azúcar pueden emplearse para la producción de alcohol, lo que permite disponer de un combustible líquido renovable y la incorporación de los derivados tradicionales (tableros aglomerados, papel y cartón, cultivos alternativos para alimento animal y mieles finales) GEPLACEA (1988).

2.7.1 Biomasa

Martin (2005), señala que la caña de azúcar, es un cultivo que se produce en más de 100 países y cuya producción de biomasa supera la de cualquier otro vegetal. El término biomasa, en sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico. La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa. Si tomamos en cuenta sólo el bagazo y la paja, en los cañaverales se almacena el equivalente a una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar que pueda producirse. La combustión de la biomasa tiene además una ventaja ambiental: no incrementa la concentración atmosférica de carbono, porque sólo devuelve a la atmósfera el carbono que fijó la planta durante su crecimiento.

2.7.2 Azúcar o tipos de azúcares de la caña de azúcar

El azúcar es un hidrato de carbono simple. Existen distintos tipos de hidratos de carbono simples: los monosacáridos (como la glucosa, fructosa y lactosa) y disacáridos (como la sacarosa o el azúcar). El azúcar se obtiene de un jugo que produce el tallo maduro de la caña de azúcar. Esta pasa por un proceso, en el que se cristaliza, según el grado de refinamiento que sufren, pertenecen a un tipo u otro de edulcorantes, el azúcar es incoloro e inodoro y soluble al agua (Chen, 1991).

2.7.3 Jugo de la caña de azúcar

El jugo de caña se define como líquido obtenido de la molienda de la caña de azúcar, el mismo que es utilizado en las industrias productoras de panela, azúcar y alcohol y su extracción se lleva a cabo en los molinos y consiste en la compresión de la fibra de caña entre cilindros de gran tamaño llamados mazas. El jugo se vierte en la batea y así sucesivamente hasta que la caña es despojada de todo o casi todo el jugo que contiene, quedando como residuo solamente la parte fibrosa de la misma (www.revistaeidenar.univalle.edu.co/edicion).

2.7.3.1 Composición del jugo de caña de azúcar

Chen (1991) menciona que la composición de la caña de azúcar está compuesta por azúcares. La sacarosa es el principal constituyente, siguiéndole en concentraciones decrecientes, la glucosa y fructosa.

En términos generales, la composición química de la caña de azúcar es la resultante de la integración e interacción de varios factores que intervienen en forma directa e indirecta sobre sus contenidos, variando los mismos entre lotes, localidades, regiones, condiciones del clima, variedades, edad de la caña, estado de madurez de la plantación, grado de despunte del tallo, manejo incorporado,

periodos de tiempo evaluados, características físico-químicas y microbiológicas del suelo, grado de humedad (ambiente y suelo) y fertilización aplicada, entre otros (Meade y Chen, 1977).

En términos globales la caña está constituida principalmente por jugo y fibra, siendo la fibra la parte insoluble en agua formada por celulosa, la que a su vez se compone de azúcares simples como la glucosa (dextrosa). A los sólidos solubles en agua expresados como porcentaje y representados por la sacarosa, los azúcares reductores y otros componentes, comúnmente se les conoce como brix. La relación entre el contenido de sacarosa presente en el jugo y el brix se denomina pureza del jugo. El contenido “aparente” de sacarosa, expresado en % y determinado por polarimetría, se conoce como “pol”. Los sólidos solubles diferentes de la sacarosa, que contemplan los azúcares reductores como la glucosa y la fructuosa y otras sustancias orgánicas e inorgánicas, se denominan usualmente “no pol” o “no sacarosa”, los cuales corresponden porcentualmente a la diferencia entre brix y pol (Larrahondo, 1995).

2.8 Alcoholes

Los alcoholes son el grupo de compuestos químicos que resultan de la sustitución de uno o varios átomos de hidrógeno (H) por grupos hidroxilo (-OH) en los hidrocarburos saturados o no saturados (www.invenia.es.2011). Los alcoholes se clasifican en primarios, secundarios y terciarios, dependiendo del carbono funcional al que se une el grupo hidroxilo.

2.8.1 Clasificación de alcoholes

Los alcoholes tienen uno, dos o tres grupos hidróxido (-OH) enlazados a sus moléculas, por lo que se clasifican en monohidroxílicos, dihidroxílicos y trihidroxílicos, respectivamente. Los alcoholes se caracterizan por la gran variedad

de reacciones en las que intervienen; una de las más importantes es la reacción con los ácidos, en la que se forman sustancias llamadas ésteres, semejantes a las sales inorgánicas. Los alcoholes son subproductos normales de la digestión y de los procesos químicos en el interior de las células, y se encuentran en los tejidos y fluidos de animales y plantas (www.invenia.es.2011).

2.9 Etanol

Se le denomina también alcohol etílico cuya molécula tiene dos átomos de carbono. Es un líquido incoloro, de sabor urente y olor fuerte, que arde fácilmente dando llama azulada y poco luminosa. Este alcohol obtenido en la etapa de fermentación es conocido también como bioetanol; y es llevado al proceso de destilación donde se trata de concentrar al máximo, lográndose etanol con un 96% grado alcohólico debido a que en este punto el etanol forma un azeótropo con el agua, impidiendo una mayor concentración (Posadas 2006).

Su fórmula química es $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$ (Figura 1). Para bebidas alcohólicas, prácticamente todo el alcohol etílico que se consume es una mezcla de 95% de alcohol y 5% de agua. Cualquiera que sea su método de preparación, primero se obtiene alcohol etílico mezclado con agua, y luego se concentra esta mezcla por destilación fraccionada. La gran mayoría de las veces, la palabra alcohol es utilizada para denominar al alcohol etílico o etanol (López, 1986).

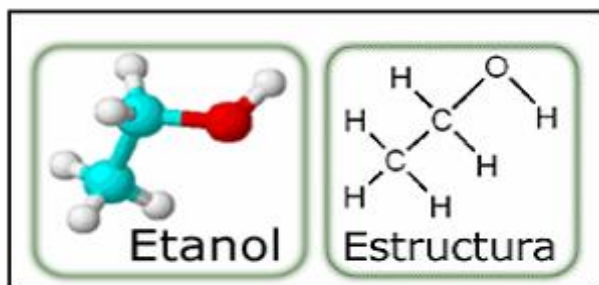


Figura1. Configuración espacial y estructural del etanol (Poy, 1998)

2.9.1 Usos del etanol

El etanol producido tiene distintos usos a escala mundial subdividiéndose en tres principales categorías: combustible, uso industrial y bebidas. El uso como combustible representa un 65% de la producción mundial, ya sea para mezclar o reemplazar petróleo o derivados; un 19% es empleado en el sector industrial (cosméticos, farmacéutica, químicas, entre otras) y el 16 % restante se destina a la industria de bebidas. El alcohol etílico, no solo es el producto químico orgánico sintético más antiguo empleado por el hombre, sino también uno de los más importantes. Sus usos más comunes son industriales, domésticos y medicinales. La industria emplea el alcohol etílico como disolvente para lacas, barnices, perfumes y condimentos; como medio para reacciones químicas, y para recristalizaciones. Como combustible el alcohol anhidro se utiliza en diferentes proporciones. Además de los combustibles tradicionales existen otros tipos de combustibles alternativos (Posadas, 2006).

Villena (2003), señala que “desde el origen de los motores de combustión interna, la utilización de alcoholes como carburante ha sido un tema de investigación que nunca se ha abandonado y que actualmente tiene interés por la capacidad de los alcoholes de contribuir a reducir los problemas medio ambientales de contaminación local o regional y el efecto invernadero.”

Según Maloney (2003), existen varios países que avanzan aceleradamente en el desarrollo e implementación de sus programas nacionales de uso del etanol con fines carburantes, entre los que destacan los siguientes según la fuente de origen del alcohol utilizado: América Central (caña de azúcar), Australia (caña de azúcar), Brasil (caña de azúcar), Canadá (granos), Colombia (caña de azúcar y yuca), China (granos y caña de azúcar), EUA (granos y remolacha azucarera), India (caña de azúcar), Japón (Importará el producto), Perú (caña de azúcar),

Sudáfrica (caña de azúcar), Tailandia (caña de azúcar y yuca), Unión Europea (remolacha azucarera y granos).

Es por ello que el etanol obtenido de fuentes vegetales (principalmente caña de azúcar, maíz y remolacha) o forestales, es uno de un grupo de combustibles líquidos conocidos comúnmente como biocombustibles y que son usados como complemento o sustituto de gasolina, incluso como materia prima para elaborar ETBE (metil-ter-butil-éter) que es usado como aditivo de las gasolinas denominadas reformuladas (Nastari, 1987).

La literatura menciona al alcohol metílico (metanol) y alcohol etílico (etanol) como combustibles en vehículos automotores, los cuales pueden utilizarse de forma individual, en motores especiales o en forma de mezclas con gasolina (Francis, 1969). Algunas de sus propiedades físicas se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Propiedades físicas de alcoholes usados como combustible.

Propiedad	Metanol (CH ₃ OH)	Etanol (C ₂ H ₆ OH)
Punto de fusión (°C)	-114	-98
Punto de ebullición (°C)	64.7	77.8
Densidad relativa a 15 °C	0.796	0.794
Calor específico	0.57	0.53
Poder calorífico (kcal/kg)	5330	7110
Calor latente (kcal/kg)	270	205.5
Número de octano	90	95

Fuente: (Francis, 1969)

En la actualidad, el uso del etanol como combustible o mezclado con gasolinas, ha tenido una tendencia creciente, esto debido al comportamiento que tiene como tal en base a sus propiedades físicas (Francis, 1969):

- 1) Difiere de la gasolina en su mayor calor latente (78 kcal/kg para la gasolina contra 205.5 del etanol), menor poder calorífico y miscibilidad completa con el agua.
- 2) Debido al elevado calor latente, se introduce en el cilindro una corriente más fría de combustible y aire, produciendo una carga más densa y una mayor potencia.
- 3) Debido al poder calorífico, la potencia elevada se consigue solamente por un mayor consumo de combustible que en el caso de las gasolinas.
- 4) El efecto refrigerante del alto calor latente del etanol es responsable de sus excelentes propiedades antidetonantes, tanto si se emplea solo o como mezcla.
- 5) Los límites de inflamabilidad del etanol son más elevados que el de la gasolina, por lo cual se obtiene un arranque más fácil, a pesar del mayor calor latente (los límites de inflamabilidad del etanol son: inferior, 4.0% o; superior a 13.7 %).

Es importante señalar que el etanol que se mezcla con gasolina debe ser anhidro ya que esto garantiza la completa solubilidad del combustible, pues en presencia de agua se forman dos fases, con lo cual se corre el riesgo de inyectar la fase acuosa al cilindro e interrumpir la marcha del motor (INE, 1996).

El primer uso del etanol como combustible data del año 1900, pero debido al insuficiente suministro pronto fue desplazado por los hidrocarburos. Además a principios de siglo XX el parque vehicular era tan reducido que su efecto sobre la calidad del aire todavía no se percibía (García *et al.*, 1995).

En algunos países de América (Brasil y Estados Unidos) y de Europa (Francia y Suecia), el uso intensivo de etanol fue motivado por su habilidad de sustituir a la gasolina. El etanol anhidro se usa mezclado con gasolina en una proporción de hasta 22%, el cual al elevar el octano elimina la adición de tetraetilo de plomo en

la gasolina El etanol puro o alcohol hidratado (96% GL) es usado como combustible en motores de ciclo Otto adaptados especialmente (GEPLACEA, 1988).

2.9.2 Importancia del bioetanol

El Bioetanol es una alternativa importante para el futuro de los combustibles. Sin embargo, se puede ir mucho más lejos con la cuestión para ver que se puede considerar claramente un tema económico, medio ambiental y social, es decir una primera plana en el conocimiento actual.

2.9.2.1 Economía

Si la investigación sigue adelante con buenos resultados, las posibilidades económicas de futuro del bioetanol son favorables (Chacholiades, 1982).

2.9.2.2 Medio ambiente

La producción y utilización de las diferentes fuentes de energía (petróleo, gas, carbón etc.), vienen acompañados de unos enormes impactos ambientales, esto no significa que no se pueden utilizar sino que se debe escoger las menos perjudiciales, racionalizar su uso y controlar su impacto sobre el medio ambiente. Además, no se debe olvidar que las principales fuentes de energía utilizadas en la actualidad provienen de recursos no renovables, los cuales están condenados tarde o temprano al agotamiento (Sachs, 2005).

Dentro de este marco, existe una posibilidad considerable para la producción de alcohol carburante no solo a nivel regional sino mundial. Para ello, es necesario una adición o en el mejor de los casos una sustitución de combustibles derivados de fuentes no renovables por los que provienen de fuentes renovables como el

alcohol de la caña de azúcar. De acuerdo con la Asociación de Recursos Renovables del Canadá, si se le agrega un 10% de alcohol a la gasolina se estaría reduciendo en un 30% las emisiones de monóxido de carbono y entre un 6 y un 10% las emisiones de dióxido de carbono (Chacholiades, 1982).

Desde este punto de vista, el alcohol como combustible, tiene múltiples ventajas si se le compara con la gasolina, en especial, dichos beneficios se relacionan con el impacto sobre el medio ambiente, ofreciendo muchos mercados potenciales para la producción del alcohol carburante, que dependerá de la preocupación de los distintos países por controlar sus emisiones de gases (Sachs, 2005).

2.9.2.3 Social

La industria de los biocarburantes ofrece salidas a productos agrícolas que habían quedando estancados, podría favorecer especialmente a países en vías de desarrollo, donde el clima favorece especialmente los cultivos, crear nuevos puestos de trabajo y industrializar zonas eminentemente agrícolas. Además, con la fabricación del biocarburantes se corta la dependencia con países productores de petróleo que varían el precio del crudo en función del estado del mercado mundial (Chacholiades, 1982).

2.10 Procesos para la obtención de alcohol o bioetanol.

El papel esencial de la fermentación alcohólica es formar de manera óptima el etanol. El proceso para la producción de etanol por vía fermentativa tiene dos etapas fundamentales: la fermentación y la destilación (Horta, 2004) (Figura 2).

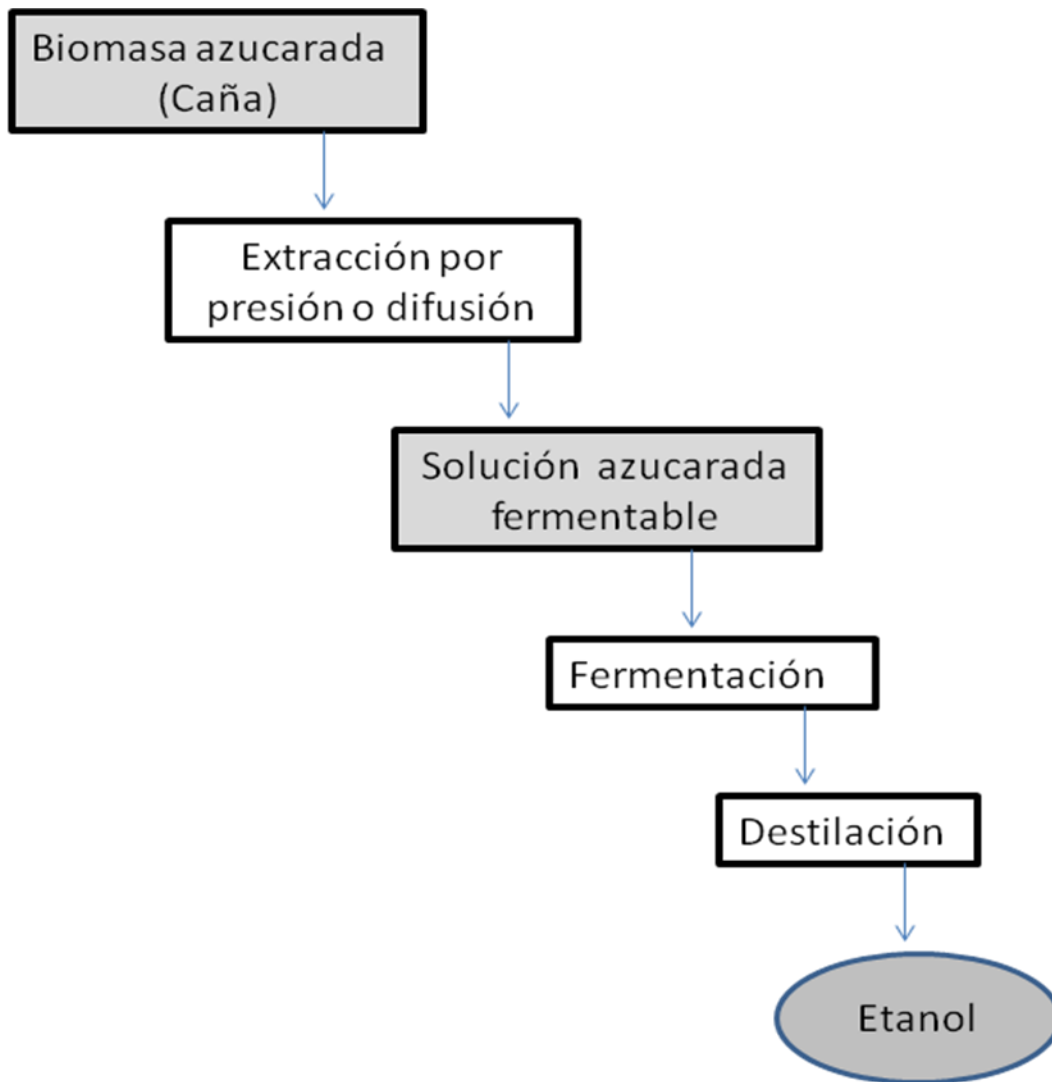


Figura 2. Síntesis de rutas tecnológicas para la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar (Horta 2004).

2.10.1 Procesos tradicionales

González y Jover (1974) investigaron la influencia de la urea como fuente nutritiva de nitrógeno en cepas de levaduras *Saccharomyces cerevisiae* para obtener alcohol de la caña de azúcar. En el procedimiento utilizado actualmente para

producir el etanol, la caña es exprimida para obtener el caldo y luego fermentarlo para transformar el azúcar en etanol. La mayoría de los agricultores cultivan y cosechan la caña de azúcar a mano y producen el alcohol por medio de un proceso tradicional, muchas de estas familias cultivan sin el uso de químicos.

Los molinos de caña de azúcar tradicionales son propulsados por caballos o burros. El animal camina en círculos arrastrando un poste de madera duro que hace girar las ruedas del molino, mientras que los tallos de caña se introducen cuidadosamente entre dos rodillos pesados. Al residuo de los tallos de caña de azúcar molidos se lo conoce como “bagazo” y éste se utiliza como combustible para las destilerías, lo cual evita la necesidad de talar árboles para leña; posteriormente, el jugo de la caña de azúcar se vierte del molino a tanques. Es una bebida deliciosa, pero para producir alcohol debe fermentar durante unos días. Al jugo se le puede agregar levadura, pero también fermentará con levadura natural del aire (González y Jover, 1974).

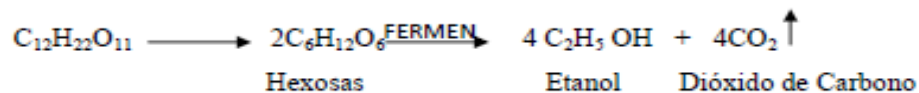
2.10.2 Procesos avanzados para la obtención de etanol

Brock y Madigan (1993) mencionaron que mediante el proceso se pretende utilizar la glucosa presente en el bagazo resultante. Para ello, es necesario separar la celulosa de la lignina para luego ser tratada con enzimas que permitan convertir la celulosa en glucosa. Una vez obtenida la glucosa, ésta se procesa de la misma manera que el caldo de la caña, fermentándose para obtener el alcohol.

2.10.3 Fundamentos bioquímicos de la fermentación alcohólica

El descubrimiento de Buchner en 1897, de que un extracto de levadura del que se habían eliminado las células intactas por filtración conservaba la capacidad de fermentar la glucosa a etanol, demostraba que las enzimas de la fermentación

pueden actuar independientemente de la estructura celular. Los combustibles más corrientes para la fermentación son los azúcares, en especial la D-glucosa, pero algunas bacterias pueden obtener su energía metabólica efectuando la fermentación de ácidos grasos, aminoácidos, las pirimidinas según las especies. Una clase de fermentación importante de la glucosa, es la fermentación alcohólica. La producción de alcohol se lleva a cabo por la acción de enzimas suministradas por la levadura y favorecida por acción de los fosfatos adicionados mediante series de reacciones. Los trabajos de Gay Lussac condujeron a establecer la siguiente ecuación de la fermentación alcohólica. Para muchas levaduras en un medio adecuado, la fermentación significa la conversión de hexosas, principalmente glucosa, fructosa y galactosa en ausencia de aire, en los siguientes productos finales (Blanco, 1987):



2.10.4 Producción de alcohol etílico

Chen (1991), mencionó que “el alcohol etílico” se puede producir a partir de las melazas. La fermentación de las mieles es el resultado de la acción de las levaduras; la que interviene primero es la sacarosa mediante la invertasa que producen, posteriormente, las levaduras convierten el azúcar invertido en “alcohol etílico y bióxido de carbono”. Por lo general, se utilizan las siguientes ecuaciones para calcular la recuperación teórica (RT) y la eficiencia de la fermentación (EF).

$$RT = \text{Total de azúcar fermentable} \times 0.64 *$$

* de acuerdo con la ecuación de Gay-Lussac, 1 g de glucosa produce 0.64 mL de etanol.

$$\%EF = \frac{x\text{RECUPERACION REAL}}{\text{RECUPERACION TEORICA}} \times 100$$

2.11 La fermentación alcohólica

El papel esencial de la fermentación alcohólica es formar de manera óptima el etanol y los productos secundarios. La fermentación alcohólica es el proceso por el que los azúcares contenidos en el jugo se convierten en alcohol etílico (De la Rosa, 1998).

Para llevar a cabo este proceso es necesaria la presencia de levaduras. La fermentación alcohólica es aquel fenómeno, estrechamente ligado a la actividad vital de las levaduras presentes en el jugo y reguladas por su carga enzimática, por lo cual los azúcares originariamente presentes dan origen a alcohol, anhídrido carbónico y otros productos secundarios (De la Rosa, 1998).

Para Flanzky (2000) el etanol representa el producto principal de la fermentación alcohólica y puede alcanzar concentraciones de hasta 12 a 14% volumen.

La fermentación es el proceso por el cual muchos organismos extraen energía química de las moléculas de glucosa y de otros combustibles en ausencia de oxígeno molecular (Quintero, 1981).

González y Jover (1974), afirman que durante la fermentación alcohólica, aparte de la formación de alcohol etílico, se forman microcomponentes, y los de mayor trascendencia son: alcoholes superiores, ésteres, ácidos orgánicos y aldehídos, ya que son los que en mayor proporción aparecen en los destilados.

2.11.1 Condiciones necesarias para una buena fermentación alcohólica

Los factores que se deben tener en cuenta para que la fermentación alcohólica son:

2.11.2 Cultivo iniciador

De la Rosa (1998), menciona que 1 g de levaduras desecadas contiene de 10 a 30 millones de células prevalentemente vitales, por lo que se recomendó la adición de 15 a 20 g/L⁻¹ de jugo. No es aconsejable superar las dosis citadas dado que, además de los costos suplementarios, se corre el riesgo de un proceso excesivamente rápido, con rendimientos menores como graduación alcohólica y calidad del producto terminado.

2.11.3 Levaduras y clasificación

De la Rosa (1998), considera que las levaduras son microorganismos fúngicos unicelulares, dotados de especial facultad zimógena. Esto último se refiere a la capacidad de biosíntesis del complejo enzimático responsable de la fermentación alcohólica. La forma de las levaduras es muy variable y depende tanto de la especie, como de las condiciones de cultivo. En condiciones normales se distinguen cuatro tipos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tipos de levaduras y su característica.

Tipos de levaduras	Características
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Células redondeadas
<i>Saccharomyces elípsoides</i>	Células clípticas
<i>Saccharomyces apiculatus</i>	Forma de limones
<i>Saccharomyces uvarum</i>	Forma de salchichas

Palacio (1956) afirmó que el tamaño de las levaduras suele estar comprendido entre 5 y 8 micras. Existen en la naturaleza numerosas especies de levadura, pero las de mayor interés industrial en el campo de las bebidas alcohólicas corresponden al género *Saccharomyces*; este género comprende 30 especies y tres variedades que se distinguen por su acción fermentativa y su capacidad de

asimilación de diversos azúcares. Las levaduras verdaderas están incluidas en la subdivisión *Ascomycotinia*, mientras que las denominadas falsas asporógenas lo hacen en *Fungui imperfecti* o *Deuteromycotinia* (Pelczar *et al.*, 1987)

Las levaduras utilizadas en la industria de bebidas fermentadas son:

Saccharomyces cerevisiae

Según González (1978), esta especie es típica de fermentación alta en la industria cervecera, sus colonias son blandas, húmedas y de color crema. Fermentan la galactosa, la sacarosa, la maltosa y la rafmosa y no utiliza nitritos; este microorganismo es utilizado para lo obtención de etanol que convierte las hexosas en etanol en condiciones anaeróbicas, generando 2 moles de ATP mol⁻¹ de hexosa consumida (Claasen *et al.*, 1999). *S. cerevisiae* tiene la capacidad de hidrolizar la sacarosa de la caña de azúcar para su conversión hasta glucosa y fructosa, dos hexosas fácilmente asimilables; además puede desarrollarse en condiciones anaeróbicas (Sánchez y Cardona, 2005).

Saccharomyces uvarum

Según De la Rosa (1998), esta levadura se caracteriza por contener células frecuentemente grandes, alargadas y en forma de salchicha y fermentan la glucosa, sacarosa, maltosa y rafinosa. Mientras que Claasen *et al.* (1999) señalan que, en la etapa fermentativa se emplean diferentes tipos de nutrientes, los más utilizados son sulfato de amonio y urea como suministradores de nitrógeno y como suministrador de fósforo se emplea el fosfato dibásico o simplemente fosfato de amonio. Los nitratos y nitritos no son metabolizados por la *S. cerevisiae*.

2.11.4 pH

La reacción óptima para un proceso fermentativo con levaduras se debe realizar a un pH de 4.5 y 5.0. Según González (1978) la fermentación continúa satisfactoriamente cuando el pH del jugo ha sido ajustado entre 4 y 4.5; este pH favorece a las levaduras y es lo suficientemente bajo para inhibir el desarrollo de muchos tipos de bacterias.

Palacio (1956) mencionó que la variación de pH de los jugos quedan supeditadas; además, del normal desarrollo de las levaduras, a que no se perturbe o inhiba el poder enzimático de las enzimas.

Por otro lado, Quintero (1981) menciona que el pH tiene una gran influencia en los productos finales del metabolismo anaeróbico.

2.11.5 Concentración de azúcar

Betancourt (2001) señala que para la multiplicación inicial de la levadura, la concentración de azúcares debe mantenerse en niveles bajos. Del 10 a 22 % de concentración de azúcar es satisfactoria, en ocasiones se emplean concentraciones demasiado altas que inhiben el crecimiento de las levaduras.

2.11.6 Oxígeno necesario

Betancourt (2001) menciona que la presencia de oxígeno tiende a proporcionar una menor producción de alcohol, ya que la levadura pasará a oxidar carbohidratos por medio de la respiración, llevando a la proliferación de levadura y no a la producción de alcohol.

Cuando el cultivo se produce en presencia de oxígeno molecular, la fermentación se denomina aeróbica, la mayor parte del carbono se emplea como energía y solo el 2% se asimila como material celular. *S. cerevisiae* es una levadura que posee alta actividad metabólica, por lo que en un proceso fermentativo en fase aerobia se caracteriza por la producción de biomasa y en fase anaerobia generalmente por la producción de etanol (Owen, 1991).

2.11.7 Temperatura

De acuerdo con González (1978) la fermentación pueda tener lugar en un límite de temperaturas desde los 13-14 °C hasta los 33-35 °C. Las levaduras son microorganismos mesófilos. Cuanto mayor sea la temperatura, dentro del límite establecido mayor será la velocidad del proceso fermentativo siendo también mayor la proporción de productos secundarios. Sin embargo, a menor temperatura es más fácil conseguir un mayor grado alcohólico, ya que las altas temperaturas hacen fermentar más rápido a las levaduras llegando a agotarlas antes.

La temperatura afecta al organismo de manera notable ya que los organismos de una especie dada solo pueden crecer en un límite de temperatura y esto afecta de manera notable al organismo (Fajardo y Sarmientos, 2007; Quintero, 1981).

2.12 Tipos de destilación

2.12.1 Artesanal

El jugo fermentado se vierte en un tanque y se calienta sobre un fuego de bagazo. El calor hace que el jugo se evapore y este vapor pasa a través de un alambique, el cual tradicionalmente está hecho de cobre, aunque hoy en día también se fabrican con acero inoxidable. El vapor pasa por una serpentina o tubo en espiral.

El agua fría de un arroyo cercano se usa para enfriar el alambique y volver a condensar el vapor hasta obtener un líquido transparente que se recoge del otro extremo del alambique. El agua vuelve a enfriarse en su recorrido al arroyo y regresa así al ecosistema. El líquido producido con el alambique se conoce como “aguardiente” y tiene un 60% de contenido alcohólico. La graduación se mide utilizando un hidrómetro para determinar la gravedad específica. El precio que obtienen los agricultores por su aguardiente varía dependiendo de su contenido alcohólico.

2.12.2 Industrial

Dentro de la destilación industrial existen dos tipos que se mencionan a continuación:

2.12.2.1 Destilación simple

Es aquella que se realiza en una única etapa. Se utiliza cuando los dos componentes de una mezcla tienen entre sus puntos de ebullición una diferencia de 80 °C, por lo menos. Al calentar, destila el componente más volátil y queda el menos volátil como residuo.

2.12.2.2 Destilación fraccionada

Si la diferencia entre las temperaturas de ebullición de los componentes de una mezcla es menor de 80 °C, la separación de ambos se realiza por destilaciones sencillas repetidas de los sucesivos destilados, o bien utilizando columnas de destilación fraccionada mediante las que se obtiene como destilado el producto más volátil (www.monografias.com/destilación.htm. noviembre/2011).

2.13 Importancia de la caña de azúcar en México

Aguilar *et al.* (2009) mencionan que la caña de azúcar (*Saccharum spp*) es la materia prima de la agroindustria azucarera y ésta es un actividad de alto impacto social por su producción, además de ser un producto básico en la dieta del mexicano. Esta gramínea se produce en diversos climas, suelos y condiciones culturales, genera 300 mil empleos directos y se estima que más de tres millones de personas dependen directa o indirectamente de este sector agroindustrial.

En el país existen 57 ingenios o fabricas azucareras localizados en 15 estados cañeros donde vive el 13% de la población nacional. En el estado de Tabasco, México, el cultivo de caña cuenta con 31,340 ha sembradas, de las cuales se cosechan 27,668 ha con una producción de 1, 664,111 t y un promedio de 60 t.ha⁻¹ (SIAP, 2010).

2.13.1 Fabricas productoras de alcohol en México

Los ingenios que actualmente cuentan con destilerías en operación son los siguientes:

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1. Aarón Sáenz, Tamps | 8. Independencia, Ver. |
| 2. Calipam, Pue. | 9. La Joya, Camp. |
| 3. Constanca, Ver. | 10. La Providencia, Ver. |
| 4. El Carmen, Ver. | 11. Pujiltic, Chis. |
| 5. El Mante, Tamps. | 12. San Cristóbal, Ver. |
| 6. El Potrero, Ver. | 13. San Nicolás, Ver. |
| 7. Emiliano Zapata, Mor. | 14. Tamazula, Jal. |

La producción de etanol en México, permitió producir durante la zafra 1997/98 poco más de 50 millones de litros de alcohol hidratado (96°G.L.), con un

rendimiento de 232.79 L de etanol por tonelada de miel final de caña. La producción de alcohol se realiza solamente en siete de los 14 estados donde se realiza la industrialización de la caña de azúcar (Cuadro 4).

Cuadro 4. Producción de alcohol y rendimiento por estados.

Estado	Alcohol producido (L)	Rendimiento en destilería (L t⁻¹)
Campeche	1, 036, 618	238.32
Chiapas	4, 257, 032	239.81
Jalisco	5, 688,720	234.75
Morelos	2, 677, 301	243.15
Puebla	757, 019	196.76
Tamaulipas	10, 796, 375	247.89
Veracruz	27, 911, 956	226.07
TOTAL	53, 125, 021	232.79

Fuente: Elaboración propia con resultados de zafra 1997/98. COAAZUCAR, 1998.

A causa de la problemática que enfrenta la industria azucarera nacional, muchos de los ingenios han tenido que modificar sus esquemas de producción, trayendo como consecuencia que cada vez sean menos las destilerías en operación por la falta de recursos que se requieren para realizar la reparación y mantenimiento de los ingenios y en particular de sus destilerías

2.13.2 Producción actual en el país

La capacidad instalada actualmente en las destilerías, es de unos 346,000 L d⁻¹; con rendimientos entre 230 y 250 L TM⁻¹ de melaza procesada. Por lo que respecta a las dos destilerías con posibilidad de producir etanol anhidro, ésta asciende a 115,000 L d⁻¹. Ambas se encuentran en el estado de Veracruz:

ingenios La Gloria y San Nicolás. Teóricamente, una tonelada de azúcar invertida se convierte en 644.8 litros de alcohol absoluto. El rendimiento será proporcional al contenido de azúcar en las mieles empleadas como materia prima para la destilación; por ejemplo.

Una melaza con 45% de azúcares fermentables; la recuperación teórica de alcohol será:

$$450 * 644.8 / 1000 = 290.16 \text{ L. alcohol}$$

Con una eficiencia de fermentación de 85% y una de destilación de 98.5%; la producción neta de alcohol sería: $290.16 * 85 / 1000 * 98.5 / 1000 = 243 \text{ L. (absoluto)}$

2.14 Producción mundial de etanol

En la última década el interés por los biocombustibles ha crecido de manera significativa en todo el mundo. Brasil fue pionero en desarrollar estas fuentes alternativas de energía desde el año 1975 (Wheals *et al.*, 1999), las cuales después fueron retomadas por otros países europeos y más intensamente por Estados Unidos. La industria al igual que el mercado de etanol, presenta una gran actividad y en el mismo están involucrados prácticamente todos los países que lo producen. Durante 1998, se alcanzó una producción de aproximadamente 32.4 mil millones de L, dicha producción corresponde a etanol de tipo potable, industrial y para uso como combustible. Las fuentes usadas para la producción de etanol se pueden clasificar en fuentes vegetales y fuentes sintéticas. Las principales fuentes sintéticas usadas son productos tales como el etileno y el carbón. En la producción mundial juegan un papel de menor importancia, ya que solo el 7% de la producción total es obtenido por esta vía. El mayor porcentaje (60 %) de la producción mundial de etanol, es producido a partir de cultivos sacaríferos (principalmente, caña de azúcar y remolacha); la fracción restante corresponde a otras fuentes agrícolas, principalmente granos (Berg, 1998).

Los métodos de producción son uno de los puntos por resolver entre industriales y agricultores, ya que algunos de los parámetros tales como capacidad de producción, nivel de eficiencia, calidad consistente del producto, entre otros, requieren de mayor énfasis para mejorar las utilidades de ambos sectores. La creciente producción de etanol para uso como combustible, es un fenómeno que puede ser demostrado por la producción y distribución por continente que se ha dado durante los últimos veinte años. América en la actualidad es la región dominante, pero esto empieza a ser notorio a principios de 1980, cuando Brasil y Estados Unidos inician sus programas de producción de alcohol para uso como combustible (Berg, 1998).

2.14.1 La industria mundial de etanol

En México, desde hace varios años, se produce etanol de caña de azúcar en los diferentes ingenios del país que cuentan con destilerías, Ahora bien, hay que decir que no todo el etanol que se produce en México es anhidro. Se estima que la capacidad instalada para etanol combustible sería de 33 millones de L año⁻¹, producidos fundamentalmente en los ingenios La Gloria y San Nicolás, ambos ubicados en el estado de Veracruz (Horta, 2006).

La producción de etanol ha evolucionado durante los últimos 20 años y su viabilidad económica está determinada por factores muy diversos y específicos de cada país En muchos casos se considera que los factores determinantes son: el valor de la materia prima, su disponibilidad actual o futura, usos a los que estará destinado y posibilidades de exportación (GEPLACEA, 1998).

2.15. Rendimientos y costos

Murtagh (1995), estimó que se debe esperar un rendimiento de 220 L de etanol a partir de una tonelada de melaza que contenga un 46% de azúcares.

Toala y Astudillo (2010), mencionan que la producción de etanol a partir de caña de azúcar muestra los menores costos de producción, seguida por el proceso a partir de almidón de maíz. Finalmente, los costos del etanol a partir de biomasa lignocelulosa siguen siendo elevados, razón por el cual no se ha puesto en funcionamiento hasta el momento una planta comercial que transforme esta materia prima. Sin embargo, muchos centros de investigación de diferentes países están adelantando estudios con miras a disminuir estos costos y llevarlos a niveles rentables para una operación industrial. La globalización del empleo del bioetanol requiere que la tecnología de su obtención a partir de biomasa sea desarrollada completamente. El costo de producción es variable e incierto, puesto que normalmente queda incluido dentro del costo de producción de azúcar en los ingenios. Un análisis serio implicaría tomar en consideración, entre otros elementos: mieles, combustible, productos químicos, agua y mano de obra (operación y mantenimiento). El costo de producción de cada litro en Brasil, es aproximadamente \$0.23; en EE.UU. de \$0.35 y en Centroamérica de \$ 0.33 de dólar; pero el precio internacional supera los \$ 0.65. El costo de Ecuador se encuentra en la media de lo que cuesta en Brasil y Centroamérica.

2.16 Países productores de etanol

2.16.1 Brasil

Brasil es el mayor productor de caña del mundo. La producción de caña cubre un área total de cinco millones de hectáreas y de manera directa genera un millón de empleos en áreas rurales. Alrededor del 60% de la producción total es usada para la producción de etanol. El consumo de alcohol carburante permite el reemplazo de aproximadamente 200,000 barriles de petróleo al día. Debido a la disponibilidad de alcohol, Brasil fue el primer país en eliminar el uso del tetraetilo de plomo en la gasolina. El Programa Nacional de Alcohol (Proalcool), en Brasil, fue fundado por decreto Federal en noviembre de 1975, a mediados de la zafra 1975/1976 cuando

el país producía en plantas industriales anexas a sus ingenios azucareros cerca de 556 millones de litros, 42% en grado anhidro y el resto era alcohol hidratado (96 G L) (Boto, 1988).

Como parte del programa, fueron construidas destilerías autónomas, principalmente en la región centro/sur; de la misma manera se estimuló la construcción de destilerías anexas en las regiones dedicadas a la molienda de la caña. La primera parte del programa fue dedicada a la producción de alcohol anhidro que era mezclado con gasolina para producir gasohol. Sin embargo, el énfasis del programa fue cambiado en 1980 a la producción de alcohol hidratado; el cual era usado sin necesidad de hacer mezclas con gasolina. El cambio fue consecuencia de la segunda caída en los precios del petróleo (ISO, 1998). Según consultores independientes brasileños, la producción de caña de azúcar para la zafra 1998/1999 alcanzó 299.82 millones de toneladas, es decir, 0.5 por ciento más de lo producido un año anterior (298.20 millones de toneladas) (Licht, 1998).

La producción total de alcohol pudo disminuir 3.9 por ciento en 1998/1999, debido a las dificultades que se presentan al pretender colocar el producto en el mercado externo. Del total esperado, 5.9 mil millones de L puede ser alcohol anhidro y 8.52 mil millones de L de alcohol hidratado (Licht, 1998).

2.16.2 Estados Unidos

En el caso de los EUA se viene dando un significativo incremento en el empleo del etanol en los últimos años, como lo demuestran los datos de consumo dados en billones de galones de acuerdo con el año: 2001 (1,77); 2002 (2,13); 2003 (3,20) y 2012 (5,00). La estructura productiva norteamericana actual comprende 69 instalaciones (hay tres en expansión) de fabricación activas ubicadas en 20 estados, cuya capacidad de fabricación supera los 2,7 billones de galones año⁻¹; a esa cantidad próximamente se le incorporarán otras 10 plantas adicionales que se

encuentran en construcción, y cuya capacidad de producción será de 4,83 millones de galones anuales, con lo cual los EUA estarían en capacidad de elaborar 3,19 billones de galones. El mayor consumo se da en la costa Oeste, para lo cual se emplea una mezcla del 10% en la gasolina. Por su importancia los estados que más etanol producen dado en millones de galones año⁻¹ son: Illinois (766), Iowa (695), Nebraska (422), Minnesota (393,6), Dakota del Sur (371), Indiana (95), Missouri (80), Kansas (79,5), Wisconsin (79), Tennessee (65), Michigan (45), Dakota del Norte (33,5), Kentucky (24), Nuevo México (15), California (9), Idaho (6), Wyoming (5), Florida (4), Colorado (1,5) y Washington (0,7); para un total de 3.189,8 millones de galones (RFA, 2003).

2.16.3 Unión Europea

Casi todos los países miembros de la Unión Europea producen etanol a partir de cultivos agrícolas (a excepción de Luxemburgo, que cesó su producción a mediados de los 90's). La producción en esta región ha estado ligada a la industria vinícola (alcohol potable); por consiguiente su producción está basada en una o más materias primas. La importancia de la melaza de remolacha como materia prima varía de forma considerable de un país a otro. La producción durante 1997, alcanzó 1950 millones de hectolitros, de los cuales dos terceras partes fue alcohol fermentado y el resto fue producido por la vía sintética (ISO, 1998).

Francia es el país líder en la producción de etanol dentro de la Unión Europea; su producción en 1997, fue de siete millones de hectolitros (36% de la producción total de la región), resultado de los incentivos dados a la producción de bioetanol y que se realiza a partir de diferentes fuentes. En Francia el etanol es un producto exento del impuesto doméstico sobre el petróleo, lo cual ha resultado en el desarrollo de una industria de bioetanol de tamaño considerable (ISO, 1998).

La industria del etanol en la Unión Europea está sustentada por un complejo marco regulatorio distinto al de otros sectores; no obstante, esto no ha sido armonizado a todos los países miembros de la Unión Europea. Algunos países operan con sistemas de cuota junto con la administración de precios (ISO, 1998).

Otros países cuentan con un impuesto externo para promover el uso preferente de sus materias primas. Sin embargo, algunos países cuentan con subsidios directos por parte del gobierno para ciertos cultivos, como es el caso de cultivos destinados a un proceso de fermentación. La producción de etanol en Italia y España (cada uno produce entre 2-3.5 millones de hectolitros) fluctúa año con año, ya que depende de la cantidad de vino destilado a alcohol. De acuerdo con el régimen de mercado del vino de la Unión Europea, las cantidades excedentes pueden ser destiladas a alcohol y luego ser exportada a otros países.

2.16.4 India

La India es el tercer país que más produce etanol en el mundo; su producción está basada en el uso de las mieles de caña que no son comestibles. El etanol que se produce no se usa como combustible. De la producción total se destinan dos terceras partes para la industria química y el resto se destina para elaborar alcohol potable (Cormack, 1994).

Sin embargo, la eliminación del control sobre las mieles en 1994, que disparó los precios del alcohol, hizo que surgiera una nueva industria productora de etanol a partir de granos de desecho. Según el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la India, la Kedia Distilleries produce de 40,000 a 50,000 L día⁻¹ de alcohol usando arroz partido y sorgo (Herryman y Blanco, 1996).

Con base en lo indicado por Herryman y Blanco (1996) de Productos Químicos y Petroquímicos de la India declaró que la industria debe investigar más en la

mezcla de alcohol con gasolina, para usar el excedente nacional de alcohol como combustible y que debe hacerse más para el control de la contaminación y el tratamiento de efluentes de las destilerías. También se reporta que el Ministerio de Química y Fertilizantes está revisando su política con relación a la industria química basada en el alcohol (alcoquímica), recomendando el control de los precios del alcohol y las mieles y que el gobierno asegure y controle el suministro de ambos productos. La producción de azúcar descendió en 1994, por lo que la disponibilidad de mieles y alcohol disminuyó mientras que la demanda aumentó, contribuyendo al alza de los precios de la materia prima. Esto provocó la importación de alcohol sintético y la subida consecuente del precio en el mercado internacional (Herryman y Blanco, 1996).

2.16.5 Japón

Es de los países desarrollados que se preparan fuertemente para ingresar próximamente, a importar e incorporar el etanol a los combustibles utilizados por su inmensa flota de 72,6 millones vehículos; gran parte de esa importación provendrá posiblemente de Brasil y Asia (Echeverri, 2003).

2.16.6 Colombia

En 1996 la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol) dio un paso importante con la creación de la llamada “gasolina verde” en la que se reemplazaron los aditivos con base en plomo, por otros menos nocivos derivados del etanol. El proceso de producción del etanol tradicionalmente ha estado basado en las mieles finales que se generan como subproducto del azúcar producido en este país. Es en el mismo año cuando comienza la producción de manera directa del jugo de caña.

Sin embargo, a pesar de que en Colombia se cuenta con la tecnología para producir este producto y algunos derivados oxigenados, se recurrió a importaciones de estos compuestos requeridos en la formulación de la gasolina. Dicha situación se presentó a causa de que la cantidad destinada de mieles para fabricar alcohol no era suficiente; se produce solamente lo requerido para suplir las exigencias del sector de bebidas e industria farmacéutica. No obstante, el gobierno en unión con asociaciones y algunos ingenios azucareros, realizan estudios técnicos y económicos para producir en Colombia el alcohol suficiente y los aditivos necesarios para la gasolina verde. Los resultados obtenidos demuestran que el mayor rendimiento se logra con cañas de corte de doce meses, es decir, dos meses menos que el corte para extraer azúcar, lo que significa que la producción de etanol podría ser más rentable que la de azúcar. Se prevé, que debido a la gran producción de caña de azúcar, Colombia podría convertirse en el segundo productor más importante de América Latina (Velez, 1996).

Es la nación latinoamericana que recientemente decidió ingresar al grupo selecto de países que desean hacer las cosas diferente, para lo cual aprobó en setiembre del 2001 una Ley de la República que obliga a realizar una mezcla del 10% en volumen con las gasolinas a partir del 27 de setiembre del año 2005, lo que demandará 900 millones de L de etanol al año, para lo cual deberá contarse con un área sembrada alrededor de los nueve complejos alcoholeros equivalentes a 150 mil hectáreas nuevas de caña de azúcar. Se espera generar con el proyecto 170, 000 nuevos empleos directos e indirectos, mayoritariamente agrícolas. En un principio el programa operará como estrategia en las ciudades mayores de 500 mil habitantes: Bogotá, Cali, Medellín y Barranquilla; lo que un año después deberá ejecutarse también en Cartagena, Cúcuta, Bucaramanga y Pereira, para finalmente extenderse a todo el país (Cala, 2002, Acosta, 2003; Cala, 2003; Echeverri, 2003; León, 2003).

El caso de Centroamérica es muy particular, puesto que hay interés manifiesto de parte de las agroindustrias azucareras y algunos de los gobiernos de las cinco naciones por adoptar una política de uso de alcohol carburante, para lo cual se viene trabajando actualmente en esa línea con bastante intensidad y decisión. Guatemala ha avanzado hasta disponer ya de una propuesta de legislación reguladora de esa materia. En el caso de las otras naciones, el tema viene despertando mucho interés, razón por la cual se vienen haciendo gestiones por procurar materializar y consolidar lo que hoy es apenas una opción. Las iniciativas de la agroindustria centroamericana vienen siendo desarrolladas por AICA (2003).

Otras naciones como es el caso de China y Perú, evalúan y realizan en la actualidad pruebas con el uso del etanol con el fin de incursionar próximamente en una política de sustitución y mezcla con la gasolina.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación geográfica de la investigación

El estudio se realizó, en el campo experimental del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, ubicada en el km 21 de la carretera Cárdenas-Coatzacoalcos y en el Laboratorio de Cultivo de Tejidos del Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. Con domicilio en periférico Carlos A. Molina S/N carretera Cárdenas-Huimanguillo km 3.5 H. Cárdenas, Tabasco, México (Figura 3).

Características climáticas.

- Latitud Norte 17°59'15.6"
- Longitud Oeste 93°35'06.9"
- Altura 10.5 msnm.
- Precipitación 2000 mm
- Temperatura 26 °C.
- Clima cálido húmedo, lluvias en verano.



Figura 3. Ubicación geográfica donde se realizó la investigación.

3.2 Material vegetal

Se utilizaron siete variedades de caña de azúcar, que se seleccionaron en el programa de mejoramiento genético y que han alcanzado la categoría de prometedoras.

- 1. COLPOSCTMEX 05-003**
- 2. COLPOSCTMEX 05-051**
- 3. COLPOSCTMEX 05.204**
- 4. COLPOSCTMEX 05-214**
- 5. COLPOSCTMEX 05-223**
- 6. COLPOSCTMEX 05-224**
- 7. MEX 02-16**

Características industriales

Son variedades de maduración temprana un promedio de sacarosa entre 14.32-16.77% en el mes de enero y febrero dependiendo de las variedades; con una regular pureza en jugos de 89%; se deben cosechar en los meses de enero a marzo. Su corteza es media y con un contenido variable de fibra (bajo, media y alto) esto dependiendo de las variedades.

3.3 Materia prima

Estado de la caña

Para medir la cantidad de jugo se recolectaron 20 tallos de cada variedad, se les eliminó las hojas quedando entre 10 a 15 cm en la parte terminal del tallo esto es para evitar que se oxide el jugo, lo cual disminuyen la calidad del producto final, y evitar también la acción de microorganismos no deseados para el proceso de fermentación (Figura 4).

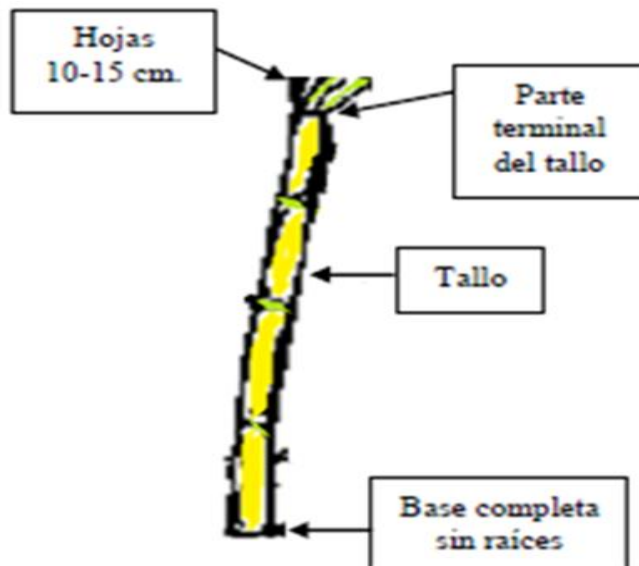


Figura 4. Caña en la planta procesadora.

Los residuos generados en esta etapa como son: hojas, cogollos, hijuelos y la parte inferior de la caña, pueden ser picados y distribuidos en la superficie de los terrenos cañeros (Figura 5).

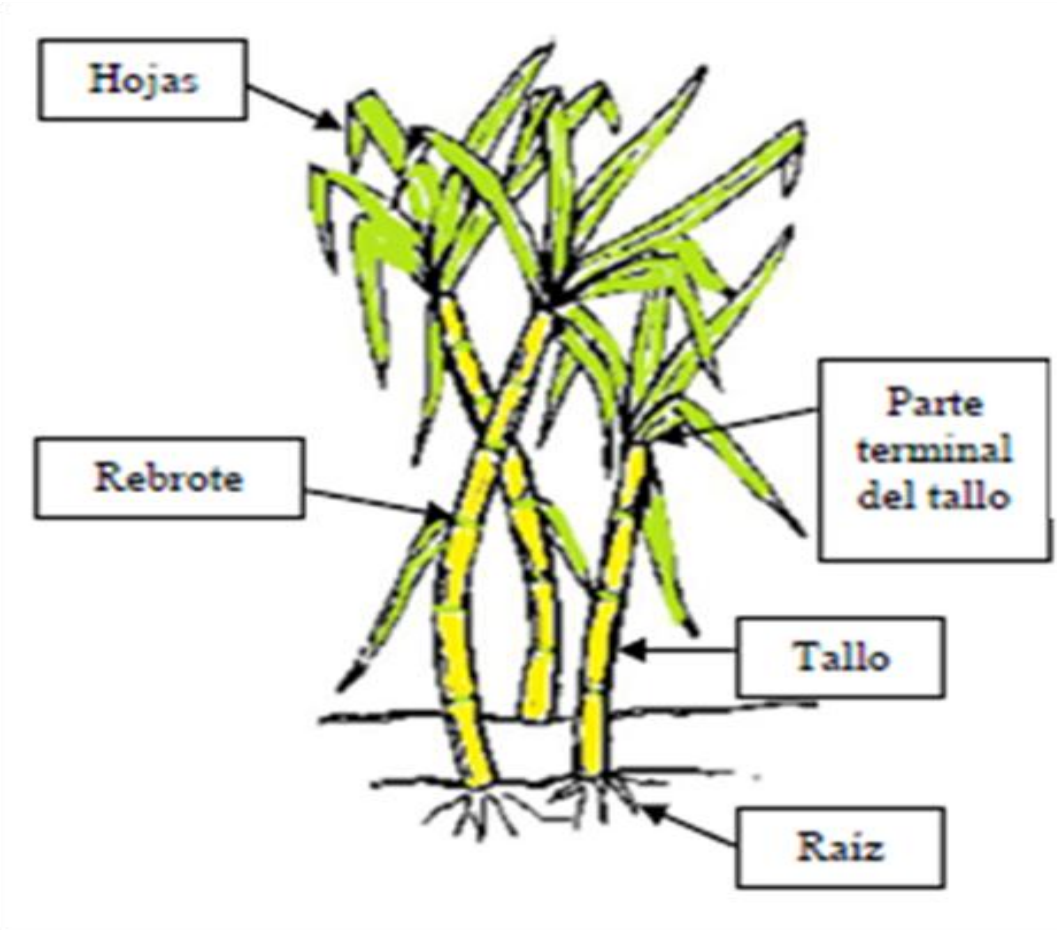


Figura 5. Caña en el campo.

3.3.1 Pesado

La caña de azúcar se pesó en una báscula con el objetivo de conocer la cantidad de biomasa que se procesa de cada una de las variedades en estudio. (Figura 6).



Figura 6. Pesado de la caña de azúcar.

3.3.2 Extracción del jugo o guarapo

El jugo o guarapo se obtuvo a través de la molienda de los tallos de la caña en el ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa ubicado en el municipio de Cárdenas, Tabasco, México. En el área de molinos se extrae el jugo a la caña de cada variedad a través de la presión mecánica ejercida por un conjunto de masas o rodillos. De este proceso se obtienen dos productos: el jugo y el bagazo. Para la filtración se utilizó un tamiz (Modelo: ASTM-AASHO MALLAS-TAMICES MARG, S.A, Medidas: mm .177, N. 80, Pulgadas. 0070 hecho en MEXICO), con la finalidad de retirar las impurezas que se encuentren en el jugo de la caña de azúcar.

3.3.3 Sólidos Solubles (°brix inicial)

Para evaluar el porcentaje de sólidos solubles presentes en el jugo de la caña de cada una de las variedades evaluadas, se empleó un refractómetro (marca ATAGO (automático), modelo: MASTER-T, Cat. No. 2342, made in JAPAN 100%TM) °Brix 0~33 %), con un gotero se colocaron de dos a tres gotas de jugo en el refractómetro y se procede a tomar las lecturas, el gotero se debe lavar para la toma de muestras al cambiar de cada variedad.

3.3.4 pH inicial

Se determinó el pH inicial a las siete variedades en estudio, para ello se utilizó el pHmetro (marca: J.T. BAKER. Modelo Ph10, hecho en México). Es importante conocer el pH inicial de cada una de las siete variedades, en el (Cuadro 6) se señalan los valores en cada una de las variedades evaluadas. Adicionalmente se recomienda ajustar el pH a 4.5 con hidróxido de calcio al 1% antes de iniciar la fermentación.

3.3.5 Fermentación

Una vez tomado los datos de brix inicial y ajustado el pH al jugo de cada una de las siete variedades, se procedió a la pasteurización a 85 °C durante 15 min, con el objetivo de eliminar microorganismos no deseados en el proceso de fermentación, se disminuyó la temperatura de 85 °C a 30 °C mediante la agitación, con el objeto de acondicionar la dilución para adicionar el fermento.

El proceso de fermentación consiste en convertir los azúcares en etanol por medio de la acción de levaduras. Con el objetivo de ajustar la cantidad de levadura a evaluar durante el proceso de fermentación se estudiaron tres concentraciones de fermento 15, 20, 25 mg L⁻¹ de jugo.

Para llevar a cabo esta investigación se utilizó *Saccharomyces cerevisiae* levadura casera, (SAFMEX SA DE CV/ FERMEX SA DE CV hecho en México), que tiene la capacidad de hidrolizar la sacarosa de la caña de azúcar para su conversión hasta glucosa y fructosa, dos hexosas fácilmente asimilables; además puede desarrollarse en condiciones anaeróbicas (Sánchez y Cardona, 2005).

Se adicionó el fermento, a temperatura ambiente en recipientes de vidrio con tapa, los mismos que tuvieron una trampa de agua (Figura 7). El proceso de fermentación fue de seis días. Después el jugo fermentado se envía al proceso de destilación para continuar la separación del etanol producido.



Figura 7. Proceso de fermentación del jugo de caña de azúcar con trampa de agua.

3.3.6 Brix final después de la fermentación

Para evaluar el porcentaje de sólidos solubles finales presentes en el jugo de la caña, se empleó un refractómetro (Brix 0~33 %). Para ello se colocaron de dos a tres gotas en el prisma del refractómetro y se procedió a tomar las lecturas una vez concluida la fermentación.

3.3.7 pH finales

Para la determinación del pH final una vez concluida la fermentación, se utilizó el peachimetro (marca: J.T. BAKER. Modelo Ph10, hecho en México). La medición fue realizada en el Laboratorio de Cultivos de Tejidos, estos datos se obtuvieron al finalizar la fermentación a los seis días.

3.3.8 Destilación

La destilación es un proceso de separación por diferencias en los puntos de ebullición de los componentes de una mezcla, que al ser sometidos al calor, los compuestos más volátiles como el alcohol se evaporan.

Se utilizó un destilador simple que incluye los siguientes componentes (Figura 8): Mechero o plancha eléctrica para proporcionar calor a la mezcla a destilar. Balón de destilación, que deberá contener pequeños trozos de material poroso (cerámica, o material similar) para evitar sobresaltos repentinos por sobrecalentamientos. Tubo refrigerante con entrada de agua, el líquido siempre debe entrar por la parte inferior, para que el tubo permanezca lleno con agua. Salida de agua, casi siempre puede conectarse la salida de uno a la entrada de otro, porque no se calienta mucho el líquido. Se recoge en un balón, vaso de precipitados, u otro recipiente. Cabeza de destilación, no es necesario si el balón de destilación tiene una tubuladura lateral. Termómetro, el bulbo del termómetro siempre se ubica a la misma altura que la salida a la entrada del refrigerador. Para saber si la temperatura es la real, el bulbo deberá tener al menos una gota de líquido. Puede ser necesario un tapón de goma para sostener al termómetro y evitar que se escapen los gases (muy importante cuando se trabaja con líquidos inflamables).

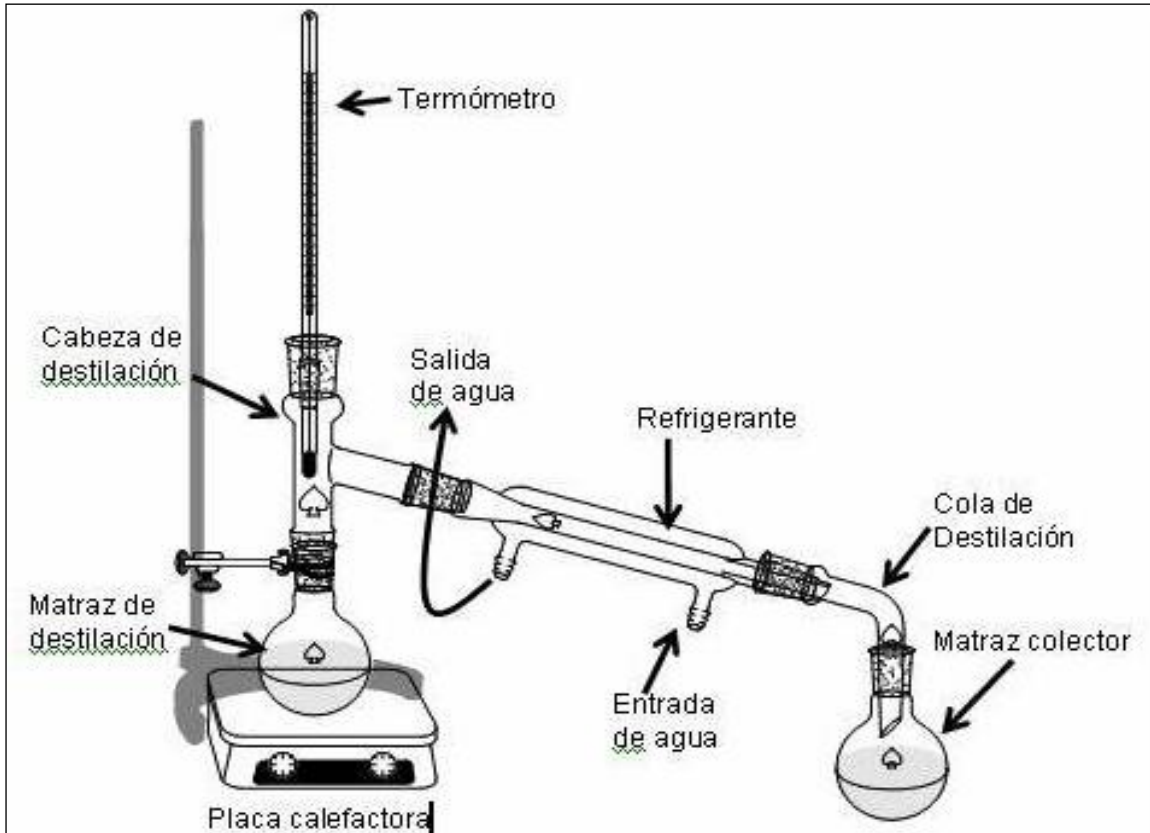


Figura 8. Destilador simple

Para destilar alcohol se utilizó una temperatura entre 150 y 170 °C, para separar de líquidos con puntos de ebullición inferiores a 150 °C de impurezas no volátiles, o bien para separar mezclas de dos componentes que hiervan con una diferencia de puntos de ebullición de al menos 60-80 °C. Aquellas mezclas de sustancias cuyos puntos de ebullición difieren de 30-60 °C se pueden separar por destilaciones sencillas repetidas, recogiendo durante la primera destilación las fracciones enriquecidas de uno de los componentes, las cuales se vuelven a destilar. Para que la ebullición sea homogénea y no se produzcan proyecciones es necesario que el jugo esté en agitación.

El jugo que se desea destilar se coloca en un matraz de 2000 mL a la mitad de su capacidad y se calienta en la placa calefactora. Cuando se alcanza la temperatura de ebullición del líquido comienza la producción de vapor; la mayor parte de éste pasa al refrigerante donde se condensa debido a la corriente de agua fría que asciende por la camisa, el destilado (vapor condensado) escurre al matraz colector a través de la alargadera.

Para determinar los grados alcohol obtenidos en el proceso de destilado se procedió a medir el grado alcohólico, para lo cual se utilizó una probeta de 200 mL y un alcoholímetro (Alkoholometer FUNKE-GERBER, BERLIN) que es un densímetro cuya escala expresa directamente el contenido de alcohol por lo que no es necesario el uso de tablas), la escala del termómetro 0-40 °C, el grado alcohólico se midió en % Vol. a la temperatura de 20 °C. Para corroborar el grado de alcohol también se utilizó un picnómetro (BRAND DURAN, 25 cc³, Modelo 43420, Lot. 12.01 BRAND Made in Germany). Este consiste en un pequeño bulbo de vidrio de volumen perfectamente calibrado que, al llenarlo con la muestra y pesarlo, permite obtener la masa o peso por unidad de volumen de la solución hidroalcohólica. Requiere el empleo de tablas de equivalencia densidad-alcohol, además del uso de una balanza de precisión.

3.3.9 Bidestilación

El alcohol obtenido por destilación se bidestiló con el objetivo de retirar totalmente el agua, obteniendo así el alcohol anhidro o alcohol carburante con pureza.

Para determinar los grados de alcohol obtenidos en el proceso de destilado se procedió a cuantificar el grado alcohólico para lo cual se utilizó una probeta de 200 mL y un alcoholímetro (Alkoholometer FUNKE-GERBER, BERLIN), el cual es un densímetro cuya escala expresa directamente el contenido de alcohol por lo que no es necesario el uso de tablas), la escala del termómetro es de 0-40 °C, el grado

alcohólico se midió en % Vol. a la temperatura de 20 °C. Para corroborar el grado de alcohol también se utilizó un picnómetro (BRAND DURAN, 25 cc³, Modelo 43420, Lot. 12.01 BRAND Made in Germany), ya descrito anteriormente.

3.3.10 Rendimiento de alcohol

Se midió el volumen de alcohol destilado en relación al sustrato utilizado por 100, con el objeto de conocer el rendimiento de alcohol de cada variedad.

Donde:

$$R = \frac{\text{Alcohol destilado (lt)}}{\text{Volumen de la destilado (lt)}} \times 100$$

3.3.11 Análisis estadístico

Para el análisis de la información se utilizó el paquete estadístico InfoStat versión 2008 para la comparación de medias utilizando la prueba de Tukey ($P \geq 0.05$).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Peso del tallo

De acuerdo con la Figura 9, se observan cuatro grupos con diferencias significativas ($P \geq 0.05$) en el peso de tallo. El grupo uno lo integro la variedad COLPOSCTMEX 05-223 la cual obtuvo el mayor peso 42.97 kg. Debido a que los tallos de esta variedad son suculentos. El grupo dos integrado por la variedad COLPOSCTMEX 05-204 con un peso de 40.12 kg. El grupo tres integrada por las variedades COLPOSCTMEX 05-051 con un peso de 30.58 kg, COLPOSCTMEX 05-003 con un peso de 31.25 kg, MEX 02-16 con un peso de 29.58 kg y COLPOSCTMEX 05-214 con un peso de 27.89 kg. Finalmente el grupo cuatro estuvo representado por la variedad COLPOSCTMEX 05-224 con el menos valor ya que obtuvo un peso de solo 25.52 kg

Larrahondo (1995), señala que los tallos corresponden a la sección anatómica y estructural de la planta de caña de azúcar, que presenta mayor valor económico e interés para la extracción de jugo o guarapo para la elaboración de alcohol, de ahí la importancia de la variedad COLPOSCTMEX 05-223 que registro el mayor peso.

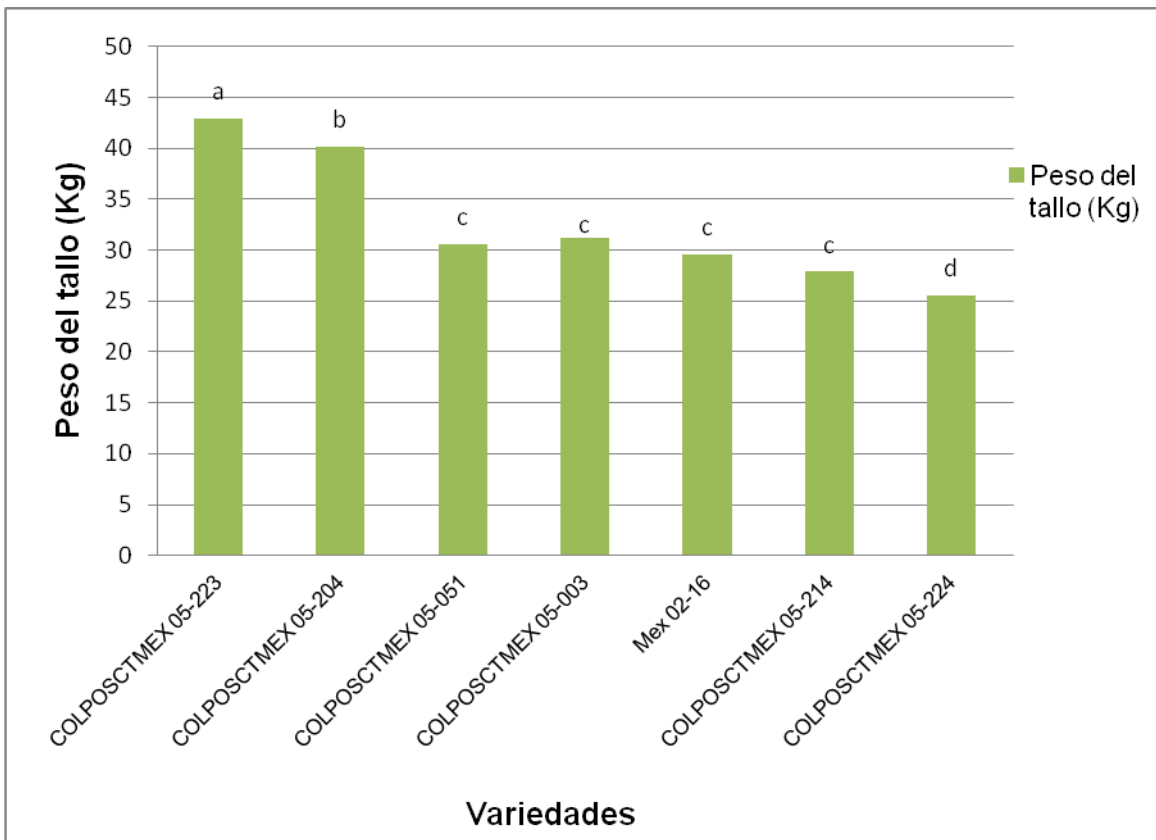


Figura 9. Peso del tallo de las variedades en estudio.

4.2 Cantidad de jugo

La cantidad de jugo producida por cada una de las variedades se muestra en la Figura 10. Como resultado del análisis estadístico se obtuvo diferencia significativa entre variedades en estudio, las cuales se integraron en dos grupos. El primer grupo estuvo constituido por las variedades COLPOSCTMEX 05-223 con 48.2 y COLPOSCTMEX 05-204 con 44.89 L respectivamente. Un segundo grupo está integrado por cinco variedades COLPOSCTMEX 05-051 con 35.13 L, COLPOSCTMEX 05-003 con 33.4 L, MEX 02-16 con 31.57 L, COLPOSCTMEX 05-214 con 29.95 L y COLPOSCTMEX 05-224 con 27.5 L de jugo. Las variedades que presentaron los mayores valores de peso de tallo, consistentemente

obtuvieron la mayor producción de jugo, por lo que es posible observar que existe una correlación entre ambas variedades.

De acuerdo con Chen (1991), el tallo de caña de azúcar (libre de basura) está compuesto aproximadamente de 75% de agua y el resto consiste en fibras y sólidos solubles.

Larrahondo (1995), señala que la caña está constituida principalmente por jugo, la que a su vez se compone de azúcares simples como la glucosa. A los sólidos solubles en agua expresados como porcentaje y representados por la sacarosa, los azúcares reductores y otros componentes, comúnmente se les conoce como brix, la relación entre el contenido de sacarosa presente en el jugo y el brix se denomina pureza del jugo.

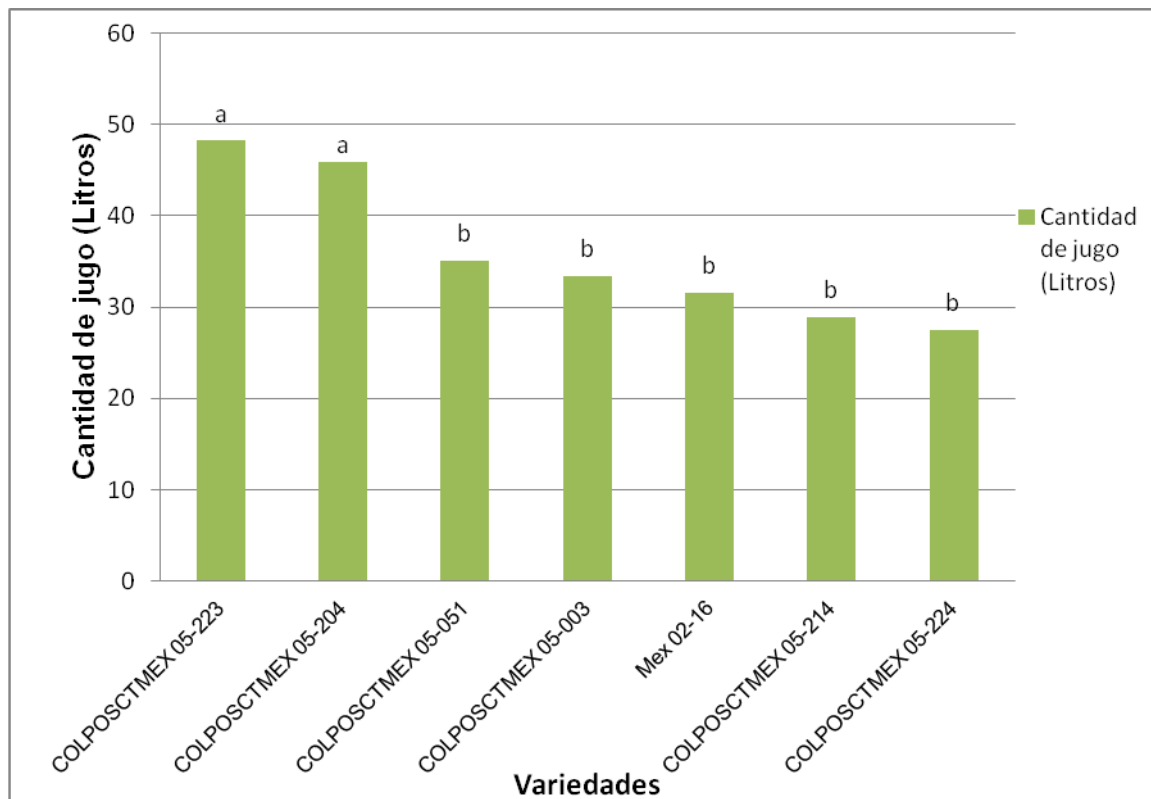


Figura 10. Cantidad de jugo de las variedades en estudio

4.3 Brix inicial

En el Cuadro 5, se observan el °brix al momento de la extracción del jugo. Como resultado del análisis estadístico se observaron diferencias significativas entre las variedades en estudio con relación al °brix, y fue la variedad COLPOSCTMEX 05-003 la que presentó la mayor concentración de °brix con 17. La variedad MEX 02-16 con 16, COLPOSCTMEX 05-051 con 15, COLPOSCTMEX 05-214 con 14, COLPOSCTMEX 05-204 con 13, COLPOSCTMEX 05-223 con 13 y COLPOSCTMEX 05-224 con 12 °brix. Esto no significa que la mayor cantidad de sólidos solubles, contenga mayor cantidad de azúcares, que serán transformados en alcohol. Contrariamente a lo observado en los anteriores parámetros evaluados, las variedades COLPOSCTMEX 05-223 y COLPOSCTMEX 05-224 presentaron los menores valores de °Brix.

Cuadro 5. Total de °brix al inicio de la fermentación.

Variedades	°Brix
COLPOSCTMEX 05-003	17 a
MEX 02-16	16 ab
COLPOSCTMEX 05-051	15 b
COLPOSCTMEX 05-214	14 bc
COLPOSCTMEX 05-204	13 c
COLPOSCTMEX 05-223	13 c
COLPOSCTMEX 05-224	12 d

4.4 pH inicial

Respecto al pH observado al inicio del proceso de fermentación, los valores registrados se presentan en el Cuadro 6. Los resultados indicaron que existen diferencias significativas entre el pH de las variedades en estudio. De acuerdo a los valores obtenidos se integran dos grupos. El primer grupo está constituido por las variedades COLPOSCTMEX 05-223 con un pH de 4.32 y la COLPOSCTMEX 05-204 con un pH de 4.29. El segundo grupo lo integran las variedades COLPOSCTMEX 05-051 con un pH de 4.10, COLPOSCTMEX 05-003 con un pH de 4.09, MEX 02-16 con un pH de 4.06, COLPOSCTMEX 05-214 con un pH de 4.03 y COLPOSCTMEX 05-224 con un pH de 3.98. Según González (1978) el pH de todas las variedades debe ajustarse a un valor de 4.5 que es el valor óptimo para que el proceso fermentativo con levaduras se inicie satisfactoriamente. El pH de 4.5, es lo suficientemente bajo para inhibir el desarrollo de muchos tipos de bacterias. Por otro lado, Quintero (1981) menciona que el pH tiene una gran influencia en los productos finales del metabolismo anaeróbico.

Cuadro 6. pH al inicio de la fermentación.

Variedades.	pH inicial	pH ajustado
COLPOSCTMEX 05-223	4.32 a	4.5
COLPOSCTMEX 05-204	4.29 a	4.5
COLPOSCTMEX 05-051	4.10 b	4.5
COLPOSCTMEX 05-003	4.09 b	4.5
MEX 02-16	4.06 b	4.5
COLPOSCTMEX 05-214	4.03 b	4.5
COLPOSCTMEX 05-224	3.98 b	4.5

4.5 Fermentación

Para determinar el inóculo necesario para inducir la fermentación se observó que no se presentaron diferencias significativas entre las tres cantidades utilizadas, en cuanto a los °Brix final obtenidos (Figura 11).

Por lo anterior se recomienda que en futuras investigaciones la cantidad de fermento utilizado sea de 20 mg de fermento para inducir la fermentación.

Las levaduras, se han utilizado con excelentes resultados en diferentes procedimientos, obteniendo productos de calidad (Torija, 2002). El producto final depende de la naturaleza específica de la levadura que se desarrolla durante el proceso de adaptación o de la fermentación del jugo.

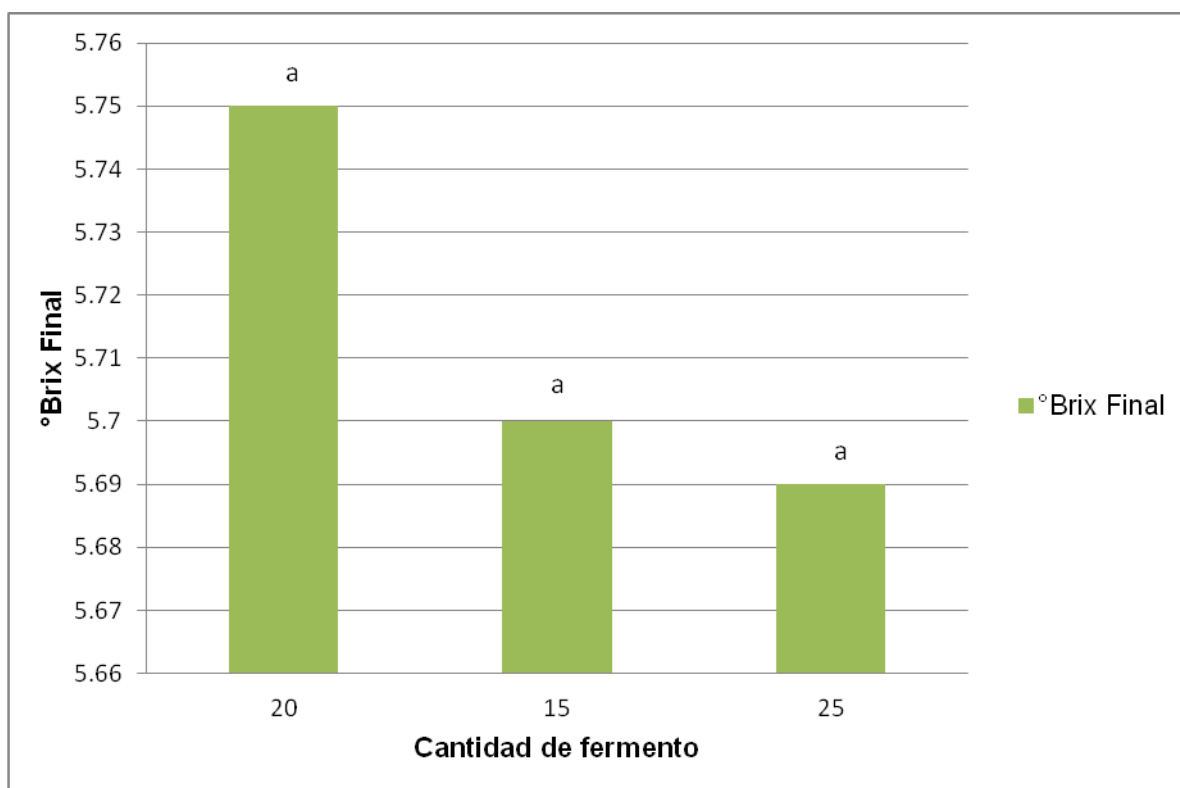


Figura 11. Efecto de tres niveles de inóculo para inducir la fermentación

Según estudios realizados por Fleet y Heard (1993), para llevar a cabo una fermentación exitosa recomiendan la utilización de levaduras comerciales, específicas del área, adaptadas tanto a las condiciones climáticas de la zona como a la materia prima, acopladas a las condiciones del jugo con alto o bajo contenido en azúcares, así como al grado alcohólico, temperatura de fermentación, etc. Martini y Martini (1999) añaden que la levadura comercial se debe acoplar al jugo por fermentar; así como, hacer que la levadura crezca dentro de un medio líquido bajo condiciones controladas.

La temperatura fue otro factor que se tomó en cuenta en el proceso de fermentación. La temperatura a la cual se trabajó fue de 28 °C (temperatura considerada óptima), ya que tiene influencia tanto en el desarrollo de los microorganismos, como en el producto final (Nagel y Herrick, 1989). Esta temperatura influye en: 1) en el crecimiento de las levaduras, 2) la importancia de unas determinadas especies respecto a otras y 3) las reacciones bioquímicas del metabolismo de las levaduras (Fleet y Heard, 1993).

En el proceso de evaluación de las condiciones de pH, °brix y temperatura el aumento en la velocidad de fermentación se debe a la disminución de la fase de latencia al haber un incremento en la temperatura (Ribéreau *et al.*, 2000). Así como aumenta la velocidad de consumo de azúcares por la temperatura, el tiempo de fermentación también es menor al tener una menor concentración de azúcares (°brix). Según un estudio que realizó Nagel y Herrick (1989) los procesos de fermentación evaluados a temperaturas bajas, presentan ventajas al tener un mayor control del proceso, pero pueden presentar paradas de fermentación. Las paradas de fermentación tienen lugar cuando existe un consumo más lento del azúcar del jugo que está fermentado. Esta caída en el consumo de azúcares indica que existen condiciones fisiológicas o ambientales adversas. Según autores como Watson (1987), Bisson (1999), y Ribéreau *et al.* (2000), la baja en el

consumo de azúcares se debe a factores como son: 1) altas concentraciones de etanol, 2) temperaturas extremas, 3) residuos de pesticidas, 4) deficiencia de algún tipo de nutriente, 5) toxicidad de ácidos grasos, 6) falta de agitación, 7) falta de oxigenación y 8) altas concentraciones de SO₂, principalmente. La combinación de algunos de estos factores, provocan una mayor inhibición del crecimiento y por tanto, de la fermentación.

El tiempo de fermentación tuvo una duración de seis días en todas las variedades, en este tiempo es cuando se da la máxima capacidad fermentativa la fase más activa de la fermentación. Según Robinson (2006), la fermentación es la función catalizadora que convierte el jugo de caña de azúcar en alcohol. Robinson (2003) menciona que durante la fermentación, la levadura interactúa con los azúcares del jugo para transformarlos en etanol, comúnmente conocido como alcohol etílico.

4.6 Brix final después de la fermentación

El brix presentó un comportamiento diferencial entre las variedades evaluadas al final de la fermentación. El análisis estadístico indicó que en el brix final existieron diferencias significativas. En este caso, el brix tuvo un descenso inversamente proporcional a los seis días del inicio de la fermentación en todas las variedades. En la Figura 12, se observa que el brix más alto correspondieron a cuatro variedades COLPOSCTMEX 05-204 con un pH de 5.95, COLPOSCTMEX 05-003 con pH de 5.94, MEX 02-16 con pH de 5.93 y COLPOSCTMEX 05-051 con pH de 5.8.

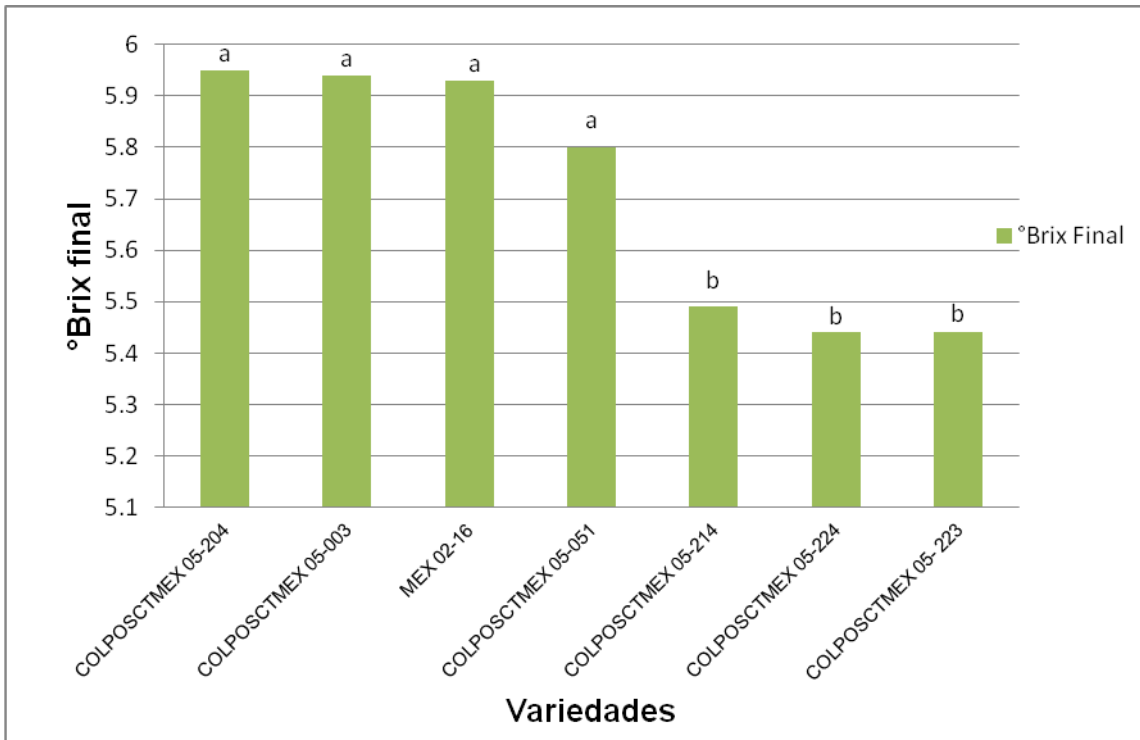


Figura 12. Grados brix al final de la fermentación.

4.7 pH final de la fermentación

Los resultados indicaron que el pH al concluir la fermentación, presentó valores diferentes. El análisis estadístico indicó que existieron diferencias significativas entre las variedades en estudio (Figura 13).

Este descenso en el brix y en el pH posiblemente es consecuencia del uso de cal que se utilizó para regular el pH de los jugos de las variedades que se evaluaron y que la capacidad iónica de este ácido afecta al pH del medio.

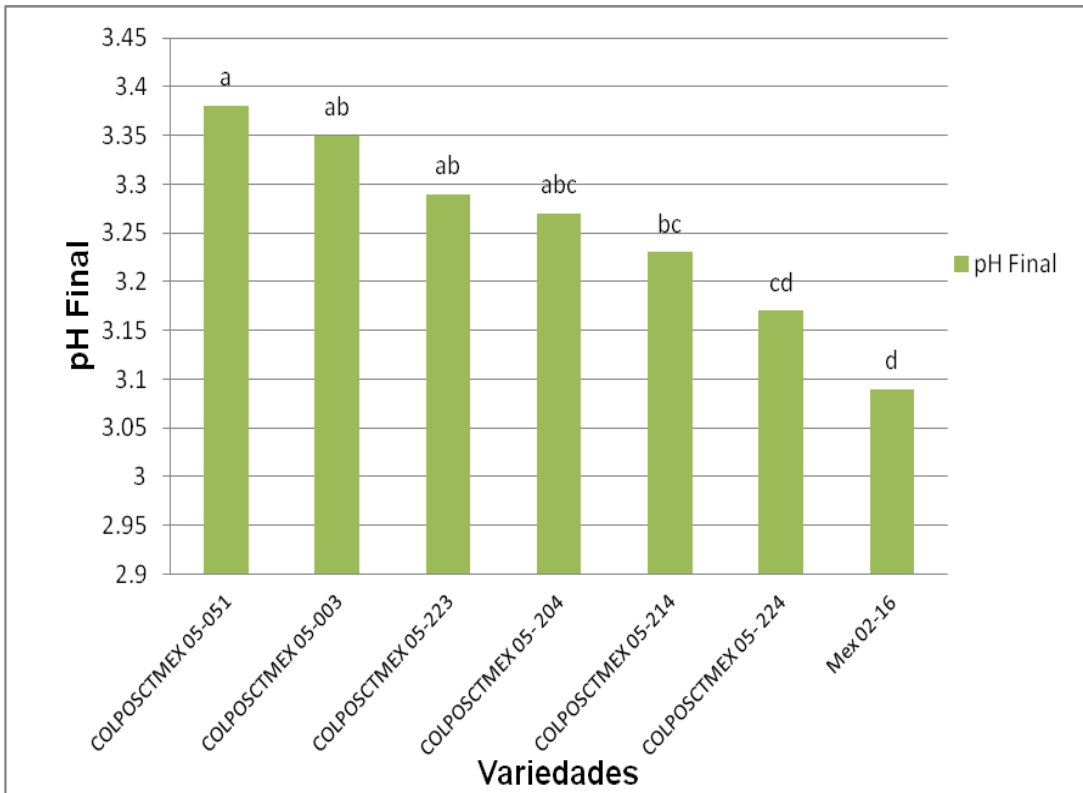


Figura 13. pH al final del proceso de fermentación.

4.8 Destilación

Los resultados indicaron que al destilar 1000 mL de jugo de cada una de las variedades no existió diferencias significativas, en cuanto a la concentración de grados de alcohol (Figura 14).

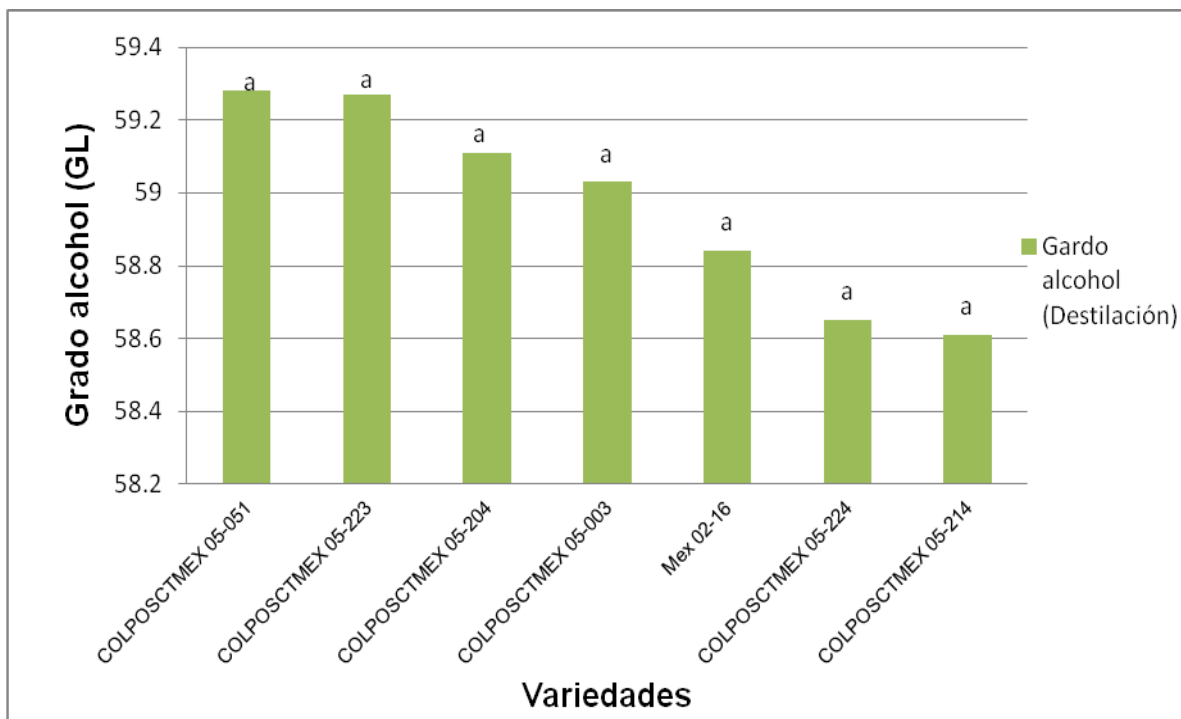


Figura 14. Contenido de grado alcohólico en la destilación en las siete variedades.

Garcia *et al.* (1995) mencionaron que cuando la riqueza alcohólica aumenta, la probación de las levaduras mueren y se van sustituyendo por poblaciones dominantes de *S. cerevisiae* particularmente del tipo *ellipsoideus*, *chevalieri* y *Torulaspota delbrueckii* y esta última es la que presenta más resistencia. Al terminarse la fermentación alcohólica predominan las cepas altamente resistentes al alcohol como *S. bayanus* y cepas de *S. cerevisiae*. Este patrón de sucesión está influenciado por las condiciones en que se lleva la fermentación alcohólica como son la temperatura y el pH; por ejemplo, a una temperatura de 25 °C y un pH de 3.0 – 3.5 las cepas *S. cerevisiae* domina la fermentación, mientras que a 20 °C algunas especies de *S. cerevisiae* y *Kloeckera apiculata* sobreviven hasta el final de la fermentación.

4.9 Bidestilación

En la bidestilación se encontró que los grados de alcohol se incrementaron, producto de la eliminación de H₂O. Así mismo, se observó que no existieron diferencias significativas entre las variedades evaluadas (Figura 15).

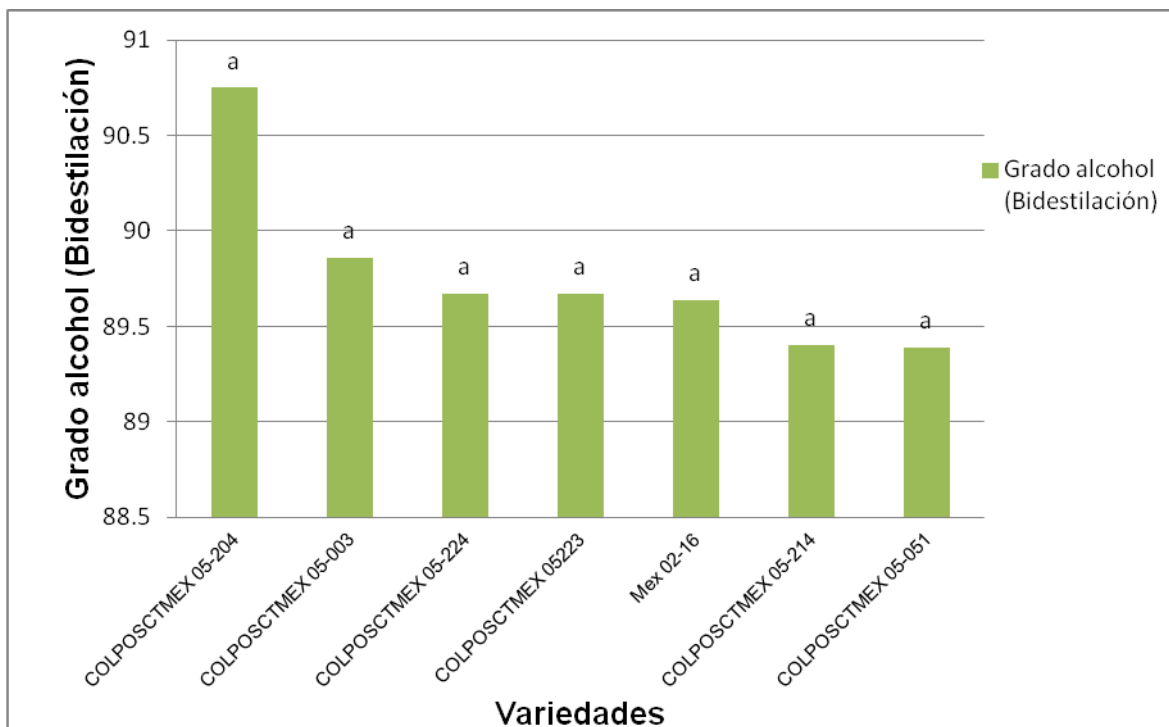


Figura 15. Contenido de grado alcohólico en bidestilación.

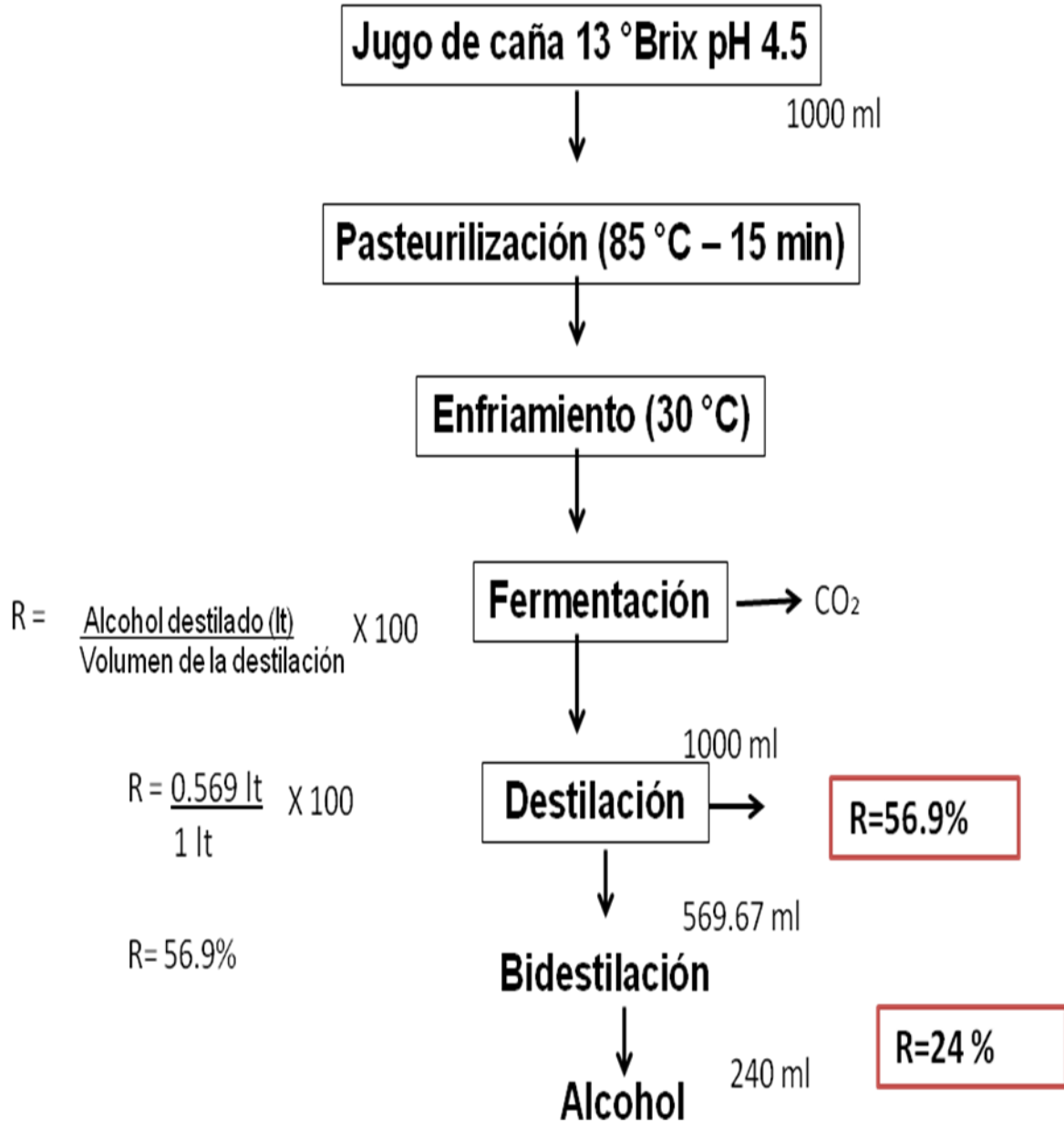
3.10 Análisis en el rendimiento de alcohol por variedad.

En el cuadro 7 se observa que la variedad COLPOSCTMEX 05-204 es la que produce mayor cantidad de alcohol con 26% de efectividad con 90 grados de alcohol.

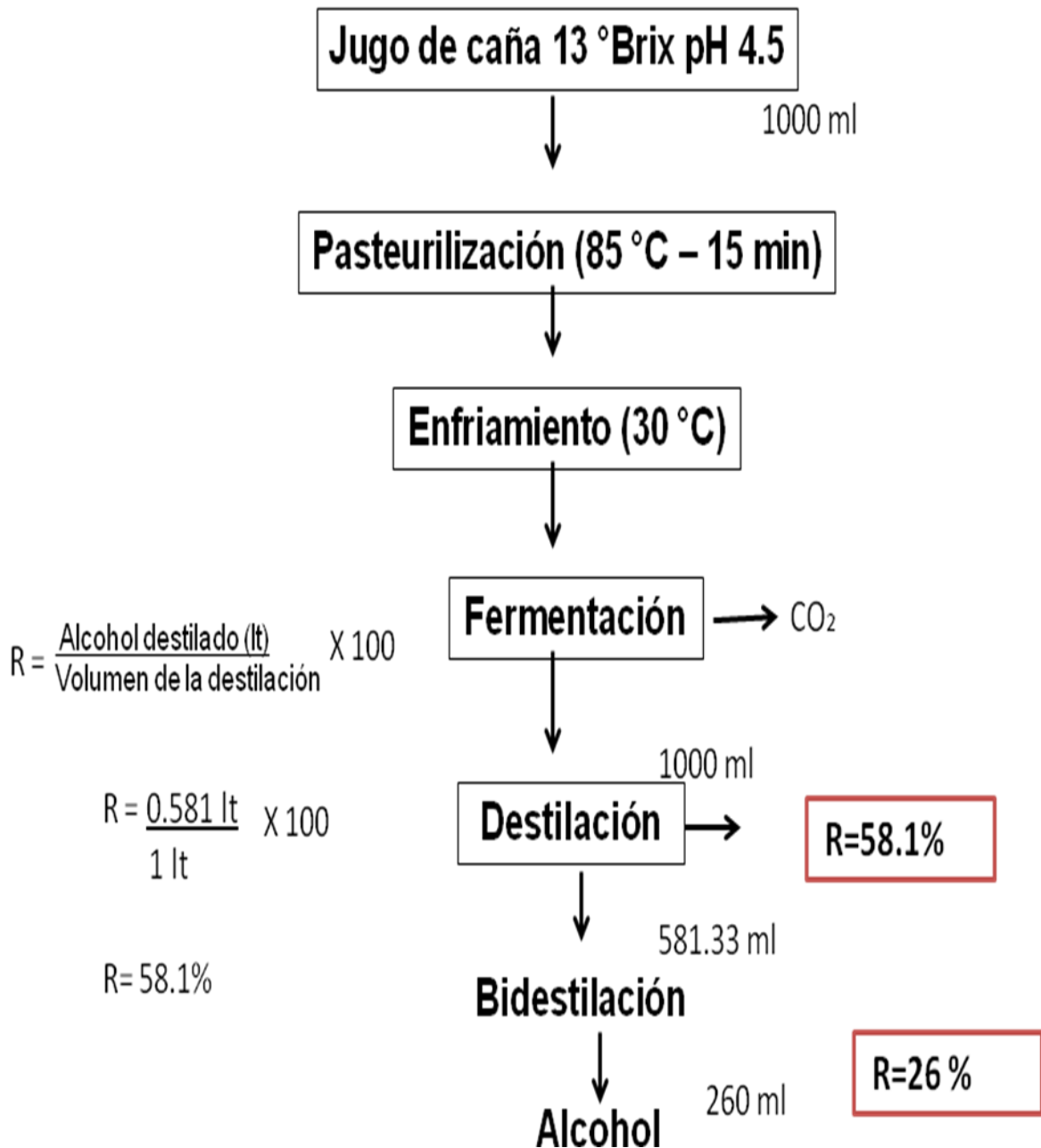
Cuadro 7. Tabla de rendimiento de alcohol por variedad.

Tabla de rendimiento de alcohol por variedad.						
Variedad	Cantidad de jugo	°Brix	Bidestilación (mL)	Cantidad de alcohol	% de alcohol x variedad	Grado alcohol
COLPOSCTMEX 05-223	48.2	13	240	11.568	24	89.67
COLPOSCTMEX 05-204	44.89	13	260	11.6714	26	90.75
COLPOSCTMEX 05-051	35.13	15	237	8.3258	23.7	89.67
COLPOSCTMEX 05-003	33.4	17	239	7.9826	23.9	89.86
MEX 02-16	31.57	16	244	7.7038	24.4	89.64
COLPOSCTMEX 05-214	29.95	14	240	7.188	24	89.67
COLPOSCTMEX 05-224	27.5	12	255	7.0125	25.5	89.40

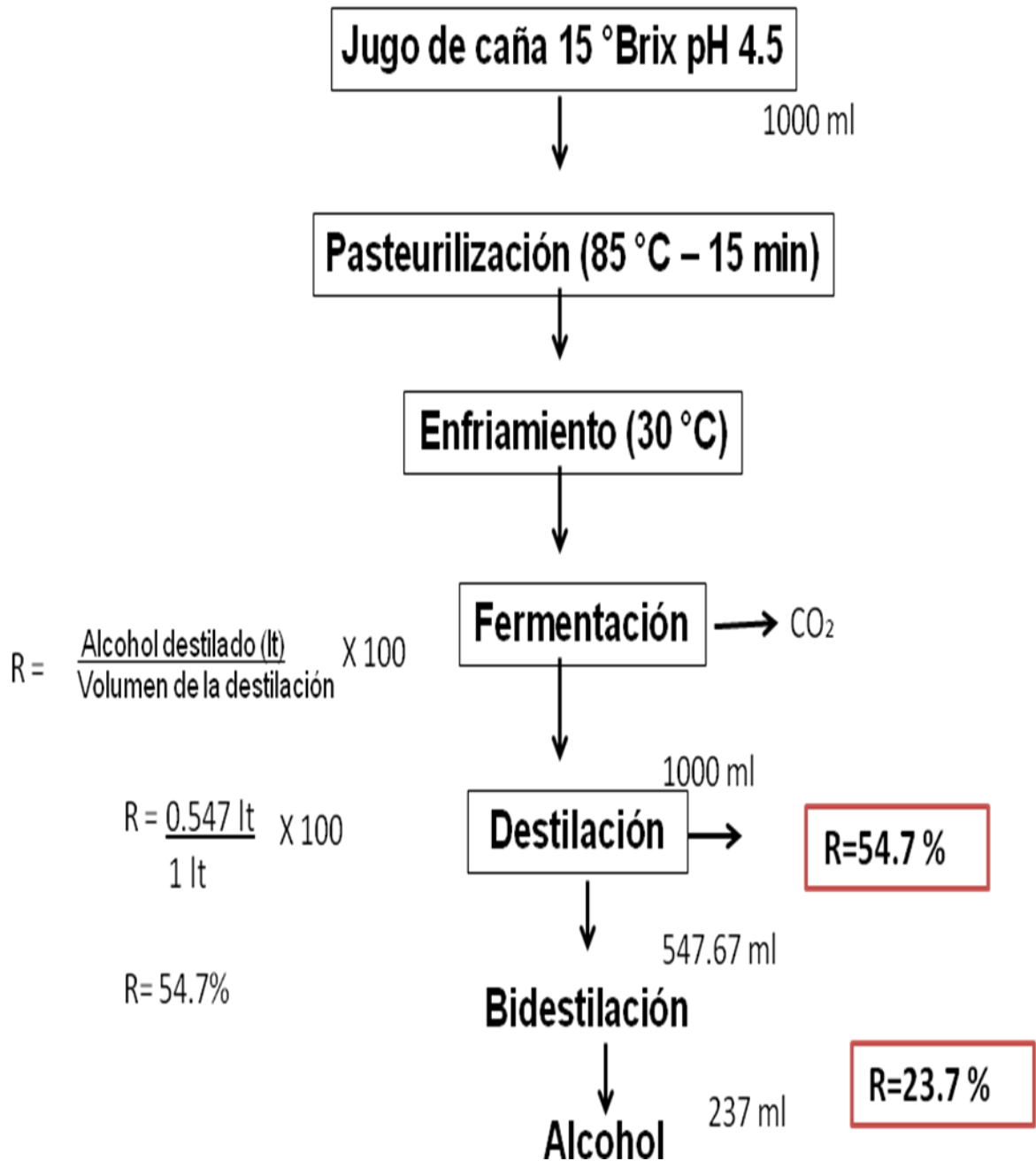
RENDIMIENTO DE ALCOHOL A PARTIR DE JUGO DE CAÑA
 VARIEDAD COLPOSCTMEX 05-223



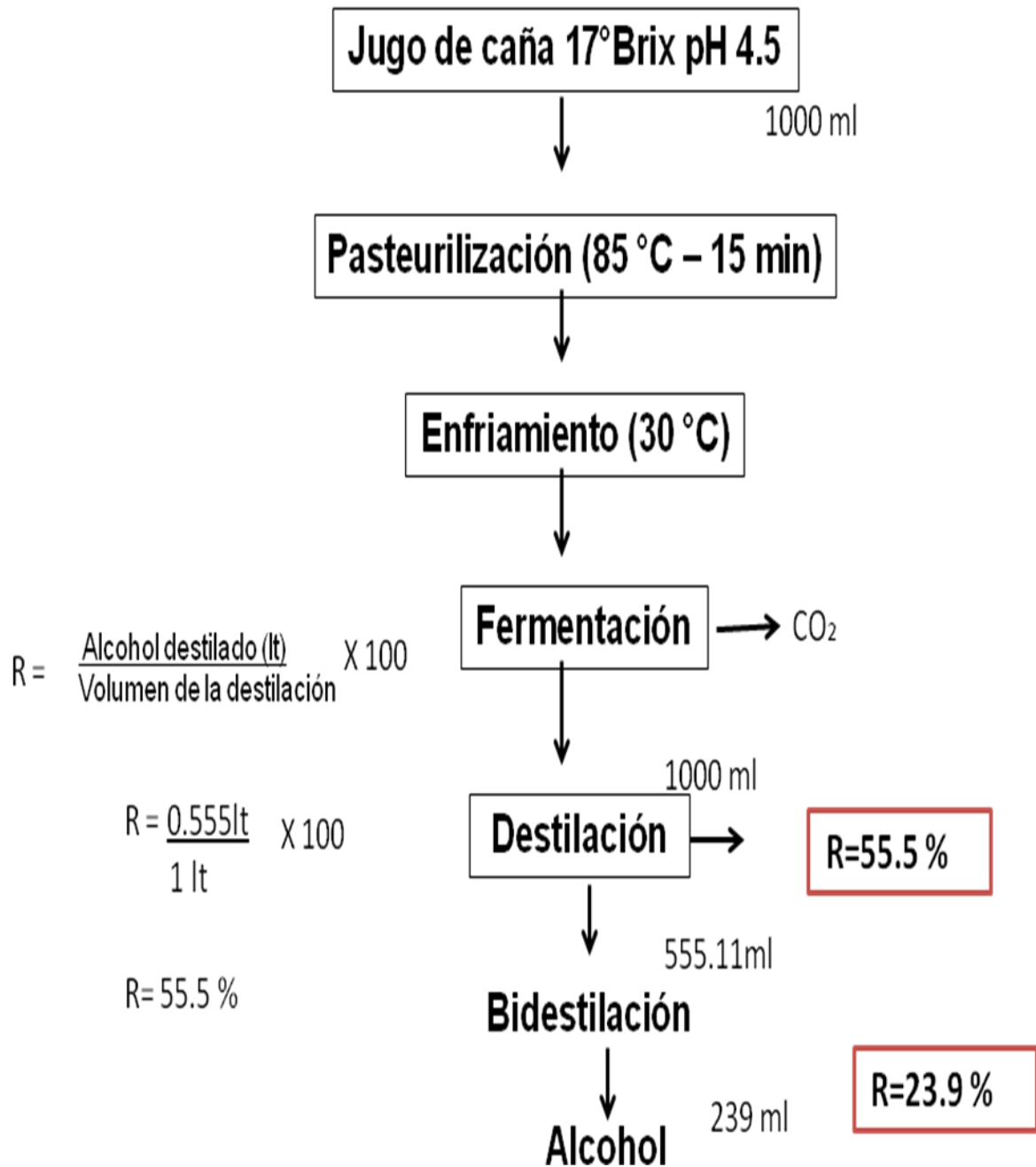
RENDIMIENTO DE ALCOHOL A PARTIR DE JUGO DE CAÑA
 VARIEDAD COLPOSCTMEX 05-204



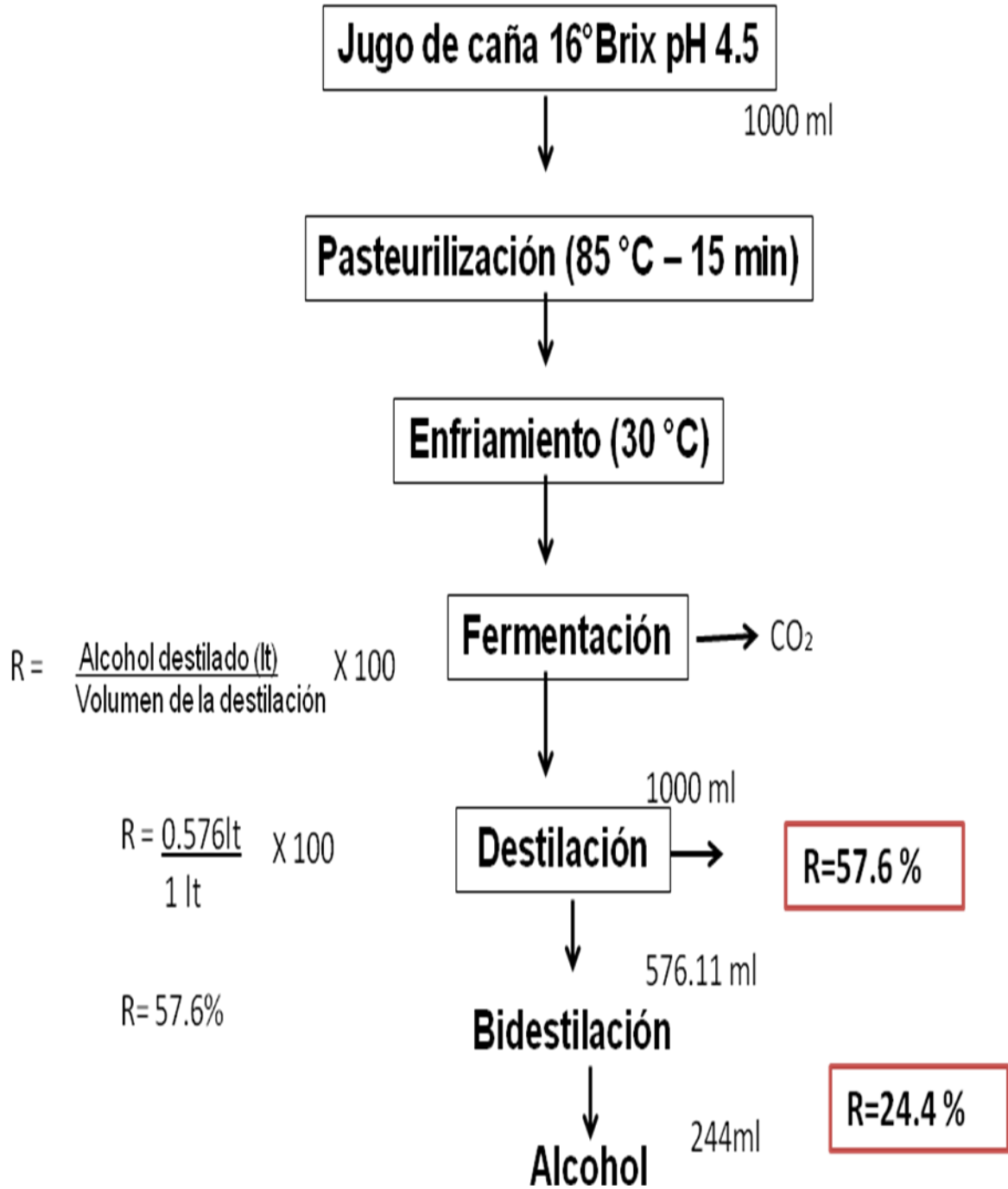
RENDIMIENTO DE ALCOHOL A PARTIR DE JUGO DE CAÑA
 VARIEDAD COLPOSCTMEX 05-051



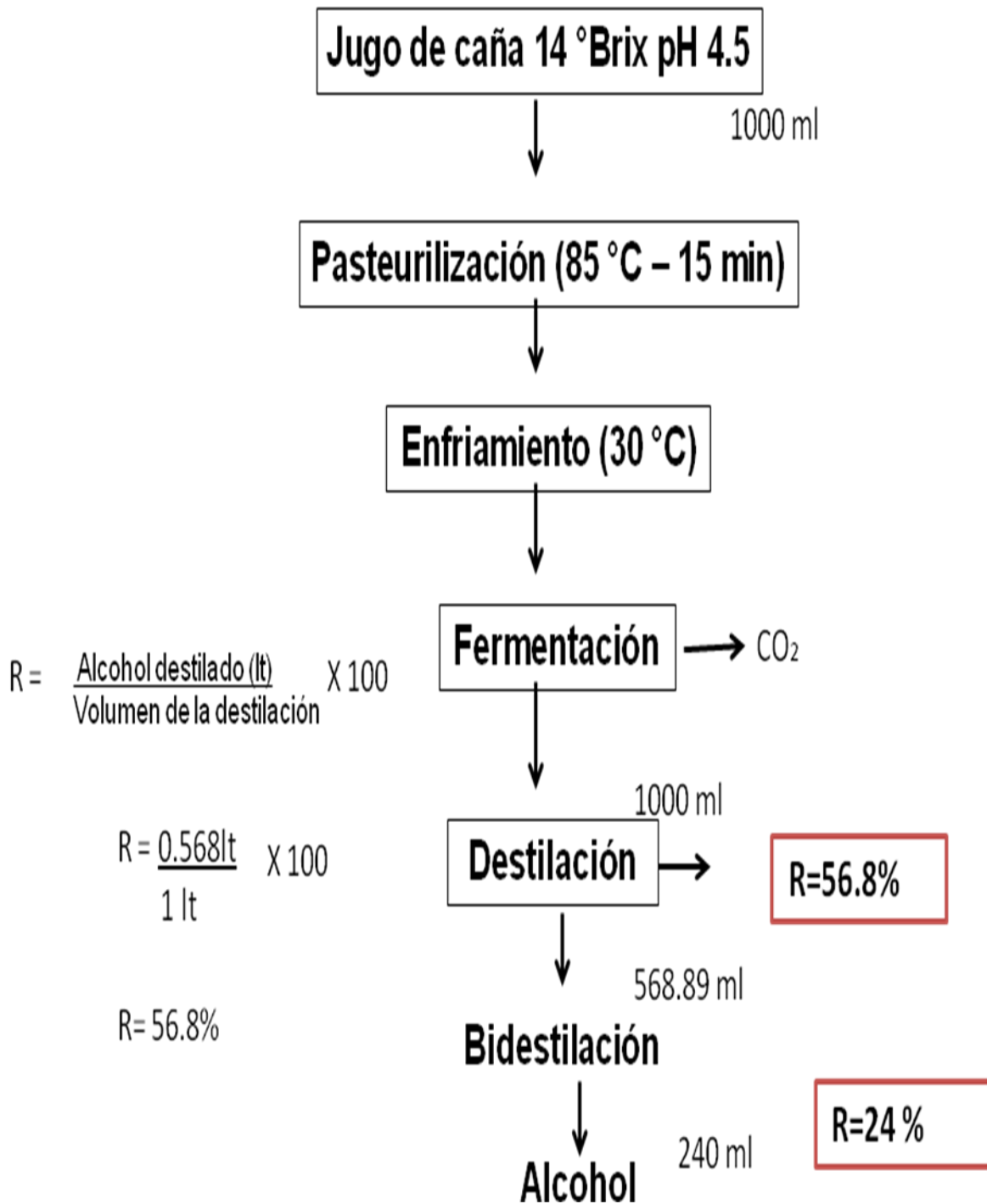
RENDIMIENTO DE ALCOHOL A PARTIR DE JUGO DE CAÑA
 VARIEDAD COLPOSCTMEX 05-003



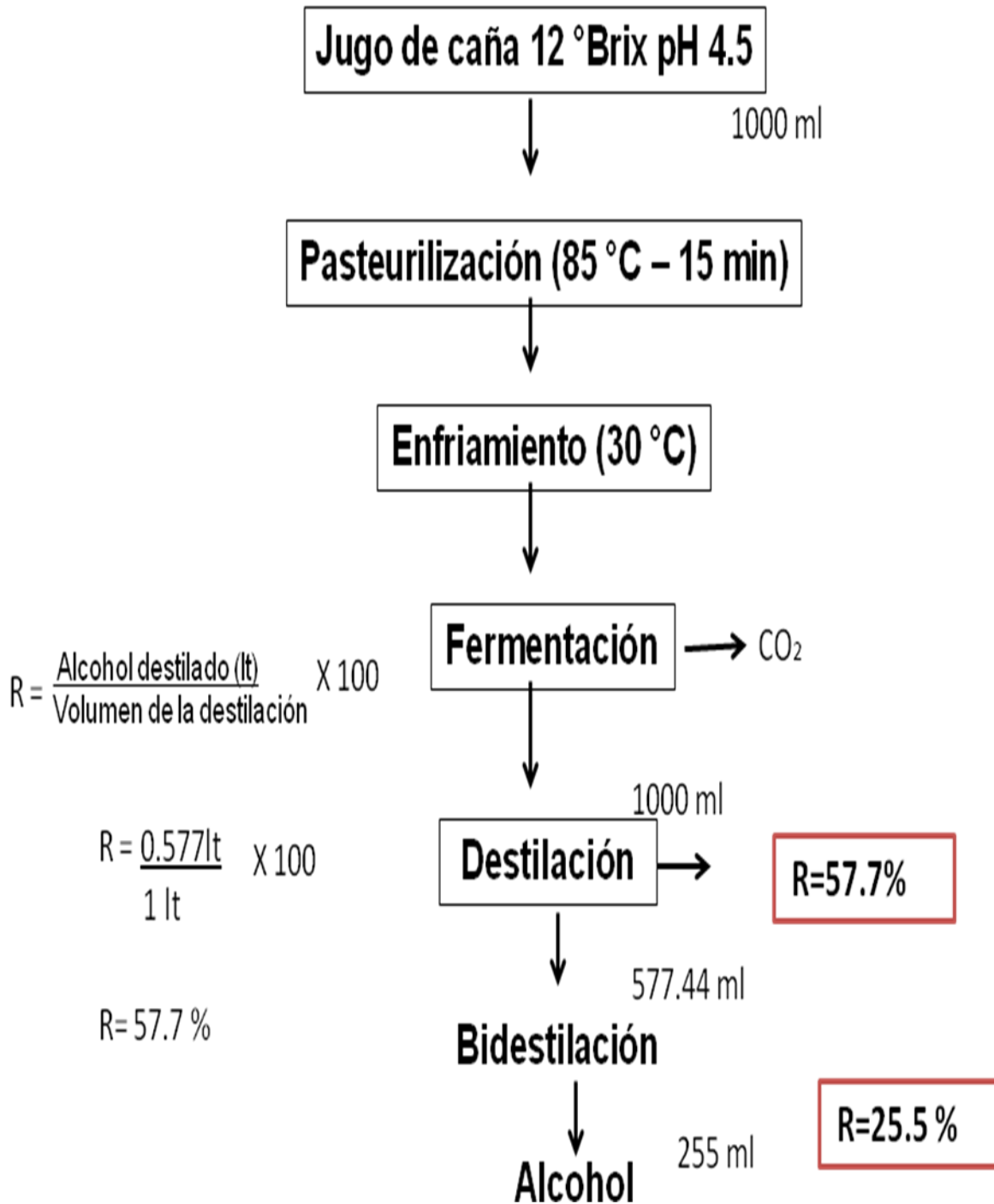
RENDIMIENTO DE ALCOHOL A PARTIR DE JUGO DE CAÑA
VARIEDAD Mex 02-16



RENDIMIENTO DE ALCOHOL A PARTIR DE JUGO DE CAÑA
 VARIEDAD COLPOSCTMEX 05-214



RENDIMIENTO DE ALCOHOL A PARTIR DE JUGO DE CAÑA
 VARIEDAD COLPOSCTMEX 05-224



V. CONCLUSIONES

La evaluación de las variedades de caña para la producción de guarapo y bioetanol permitió identificar la variedad con mejores rendimientos. Esto indica que en las siete variedades potencialmente prometedoras estudiadas hay diferencias en la producción de los dos productos.

Se definió la cantidad de levadura a utilizar para la fermentación, así como el proceso de destilación con objeto de incrementar los grados de alcohol o pureza de alcohol.

La variedad COLPOSCTMEX 05-223 fue la que obtuvo la mayor cantidad de jugo; mientras que la variedad COLPOSCTMEX 05-204 fue la que obtuvo la mayor cantidad de alcohol.

VI. RECOMENDACIÓN

Se recomienda continuar los estudios con estas dos variedades para escalar la producción a nivel industrial.

VII. LITERATURA CITADA

- Acosta, M.A. (2003). El Gran Desafío: A Propósito de los Alcoholes Carburantes. Seminario Internacional de Alcohol Carburante. In. Seminario Internacional de Alcohol Carburante. Santiago de Cali, Colombia, Junio 17 y 18 del 2003. Memoria. Cali, ASOCAÑA, CORPODIB y TECNICAÑA. 11 p.
- Aguilar, N., Galindo, G.M., Fortanelli, J.M., Contreras, C.S. (2009). ¿Por qué diversificar la agroindustria azucarera en México? GCG Georgetown University-Universia.3:1
- AICA. (2003). Azucareros del ITSMO centroamericano. COMERCIO Internacional del Etanol Carburante y Acciones Conjuntas a Futuro. XXXVIII Reunión General de AICA, Guatemala, 06 de Febrero.
- Berg, C. (1998). Towards a world ethanol market. F.O. Licht's International Molasses and Alcohol Report. Vol. 35, No. 23, pp. 435-440.
- Betancourt, R. (2001). Guía de Laboratorio de Operaciones Unitarias III; Editorial. UNM, Manizales.
- Bisson, L. (1999). Stuck and sluggish fermentations. Am. Enol. 50, 107- 119.
- Boto, D.R. (1988). Consideraciones en torno a la petroquímica y alcoquímica. En GEPLACEA. La Industria Alcoquímica en América Latina y el Caribe. Colección GEPLACEA. Serie DIVERSIFICACIÓN. México. pp. 32-84.
- Brizuela, G. (2003). Guía técnica para el cultivo de la caña de azúcar. Santa Tecla, El Salvador. Talleres gráficos de la editorial EUNED.
- Brock, T., Madigan, M. (1993). Microbiología. Sexta edición, Editorial Prentice Hall, México.
- Blanco, G. (1987). "La producción de alcohol a partir de la industria química y sus posibilidades." Rev. ICIDCA. 21, 2, 12-18.
- Cai, Q., Aitken, K., Deng, H.H., Chen, X.W., Fu, C., Jackson, P.A., McIntyre, C. L. (2005). Verification of the introgression of *Erianthus arundinaceus* germplasm into sugarcane using molecular markers. Journal Plant Breeding ISSN 0179 – 9541. Vol. 24. No. 4. Pp. 322-328.

- Cala, H.D.F. (2002). Programa de Etanol Carburante en Colombia. Corporación Para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia (CORPODIB). Colombia. 25 p.
- Cala, H.D.F. (2003). Iniciativas de Colombia. In. Seminario Internacional de Alcohol Carburante. Santiago de Cali, Colombia, Junio 17 y 18 del 2003. Memoria. Cali, ASOCAÑA, CORPODIB y TECNICAÑA. 18 p.
- Casanova, J. (2002). Red temática: Utilización de Combustibles Alternativos en Motores Térmicos. Módulo 1. Universidad Nacional de Colombia: Medellín.
- Chacholiades, M. (1982). Economía Internacional. Editorial Mc Graw-Hill, Madrid.
- Chávez, M. (2004). La caña de azúcar como materia prima para la producción de alcohol carburante. San José, Costa Rica. Extraída el 8 de octubre de 2007.
- Chen, J. (1991). Manual del Azúcar de caña. Editorial Limusa, México, p 492.
- Claasen, P., Van Lier J., López, C.A., Van Niel, E., Sijtsma L., Stams A., De Vries S., Weusthuis, R., 1999. Utilisation of biomasa for the supply of energy carriers. Appl., Microbio. Biotechnol. 52: 741-755.
- Cormack, C.M. (1994). The development of the market of fuel alcohol. En: F.O. Licht World Sugar and Sweetnear Yearbook. México. pp. DIO-DI3.
- Daniels, J., Roach, B.T. (1987). Taxonomy and evolution. In: Heinz D.J. (ed.), Sugarcane Improvement through Breeding. Elsevier, Amsterdam. P. 7-84.
- De la Rosa, T. (1998); Tecnología de los Vinos Blancos; Ediciones Mundi - Prensa; Barcelona – España.
- Díaz, A., Rea, R., De Sousa, O., Briseño, R. (2003). B80-408 y B80-549: Nuevas variedades promisorias de caña de azúcar en Venezuela. Caña de azúcar. Vol. 21 No 1. Pp: 3-16.
- Echeverri, C.H. (2003). Alcoholes Carburantes en Colombia. Boletín del Observatorio Colombiano de Energía N° 9, Febrero-Marzo.
- Fajardo, E., Sarmiento, S. (2007). Evaluación de la melaza de caña como sustrato para la producción de *Saccharomyces cerevisiae*. Trabajo de grado para la obtención del título de Microbióloga Industrial. Pontificia Universidad

- Javeriana. Microbiología Industrial. Extraído en 17 de Noviembre de 2008, del sitio Web de Pontificia Universidad Javeriana. <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis26.pdf>.
- FAO. (2010). <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> /Consultado: 23 de Abril de 2012/
- Fauconier, R. (1975). La caña de azúcar. Barcelona, Blume, pp: 15-21.
- Flanzy, C. (2000). Enología: Fundamentos Científicos y Tecnológicos; Ediciones Mundi Prensa; Madrid - España.
- Fleet, G., Heard, G. (1993). Yeast growth during fermentation. In: Wine Microbiology and Biotechnology. Harwood Academic Publishers, 23, 37-54.
- Francis, W. (1969). Los combustibles y su tecnología. Ediciones Urmo. Bilbao, España.
- García, J.L., Miramontes, L.E., Barrera, J.C., Cacho, O. (1995). Estudio de factibilidad para la producción de etanol anhidro (EtOH) por vía agroindustrial y su utilización para producir etil-terbutil-éter (ETBE), ambos para uso como componentes renovables de gasolina para automóviles. Consorcio Industrial Escorpión. Proyecto Pro-Etanol y ETBE. México.
- GEPLACEA, (1988). (Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe Exportadores de Azúcar). La industria alcoquímica en América Latina y el Caribe Colección GEPLACEA Serie DIVERSIFICACIÓN México.
- GEPLACEA. (1998). (Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe Exportadores de Azúcar). La industria del alcohol combustible. V Congreso internacional sobre azúcar y derivados de la caña (Memoria). La Habana, Cuba. Mayo 25 - 29.
- González, S., Jover, R. (1974). Microbiología de las Bebidas; Pueblos y Educación Ediciones; La Habana - Cuba.
- González, S. (1978). Microbiología de las Bebidas; Pueblos y Educación Ediciones; La Habana - Cuba.

- González, G., Ortiz, V. (1974). Sazonado y maduración de la caña de azúcar. CNIA. México.
- Guimaraes, C.T., Sobral, B.W.S. (1998). The Saccharum complex: relation to other Andropogoneae. *Plant Breed Rev* 16: 269 –288.
- Herryman, M.N., Blanco, C.G. (1996). Análisis de la situación actual del mercado del alcohol. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) (Memoria). La Habana, Cuba.
- Horta, N.L.A. (2004). Perspectivas de un programa de biocombustibles en América Central. Ciudad de México: Proyecto Cepal/GTZ Uso Sustentable de Hidrocarburos, Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Horta, N.L.A. (2006); “Etanol and ETBE production and end-use in México”; Dast 5; Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para Transporte en México; Sener, BID-GTZ
- Humbert, R.P. (1974). El cultivo de la caña de azúcar en México. Compañía Editorial Continental. 719 p.
- INE (1996). (Instituto Nacional de Ecología). Elementos para el desarrollo de combustibles oxigenadas a partir de etanol. Instituto Nacional de Ecología. Documento de trabajo. Grupo Interinstitucional. México. Julio 26.
- Irvine, J.E. (1999). Saccharum species as horticultural classes. *Theor Appl Genet.* 98:186 -194.
- ISO (1998). (International Sugar Organization). Uevdopntenfs ir National I;id Alcohol (hiofitel) 1’rogrurn.s: inrjdicaaiions for world sirgar trade. International Sugar Organization. Market Evaluation Consumption And Statistics Cornmittee (MECAS) (98) 26. Canadá. Diciembre 4.
- Larrahondo, J.E. (1995). CENICANA. Recuperado el 20 de agosto de 2010, de www.cenicana.org: <http://www.cenicana.org>
- León, F.J.G. (2003). La Incorporación del Etanol en la Cadena de las Gasolinas Automotor. In. Seminario Internacional de Alcohol Carburante. Santiago de 29 Cali, Colombia, Junio 17 y 18 del 2003. Memoria. Cali, ASOCAÑA, CORPODIB y TECNICAÑA. 46 p.

- Licht. (1998). Brasil - Sugar, cum and alcohol production 1998/99. F.O. Licht's International Molasses and Alcohol Report. Vol. 35, No. 11, pp. 224.
- López, C.H. (1986). Glosario de términos técnicos para industria sucro alcoholera Instituto de Azúcar y de Alcohol (1AA)-Planalsucar. Río de Janeiro, Brasil.
- Maloney, W. (2003). Fuel Ethanol as a World Commodity In. Seminario Internacional de Alcohol Carburante. Santiago de Cali, Colombia, Junio 17 y 18 del 2003. Memoria. Cali, ASOCAÑA, CORPODIB y TECNICAÑA. 27 p.
- Martín, P.C. (2005). El uso de la caña de azúcar para la producción de carne y leche. Rev. Cubana Ciencia. Agricultura. Tomo 39, Numero especial.
- Martini, A., Martini, A.V. (1999). Grape must fermentation past and present. In: Yeast technology. Springer Overflag, Belin, 34, 105-123.
- Meade, G.P., Chen, J P. (1977). Sugar cane handbook. En J. W. Sons, Sugar cane handbook (pág. 947-968). Nueva York: Willey-Interscience.
- Murtagh, J. (1995). Molasses as a feedstock for alcohol production. En Lyons TP, Kelsall DR, Murtagh JE (Eds.). The Alcohol Textbook. Nottingham University Press. Nottingham, RU. pp. 89-96.
- Nagel, C., Herrick, I. (1989). Efectos de la temperatura en la concentración intracelular de los azúcares y ácidos orgánicos. Am. J. Enol. Vitec. 40, 81-84.
- Nastari, P.M. (1987). Etanol la solución renovable y ecológicamente segura. En GEPLACEA. Alcohol carburante: posibilidades para el desarrollo. Colección GEPLACEA. Serie MERCADO y ESTADISTICA. México. pp. 119-149.
- Owen, P. (1991). Biotecnología de la Fermentación. Editorial Acribia. Zaragoza, España, 27-36p.
- Palacio, H.L. (1956). Fabricación del Alcohol; SALVAT Editores S.A.; Barcelona-España.
- Pelczar, M., et al. (1987). Microbiología. México: Mc Graw-Hill.

- Posadas, J. (2006). "Producción de etanol mediante caña de azúcar". Trabajo de grado de la Universidad Nacional de Honduras.
- Poy, M. (1998). "Perspectivas para la producción de etanol". Cámara Nacional de la Industria Azucarera y Alcoholeras, México, D.F.
- Quezada, W. (2007). Agroindustria Panelera; Editorial Creadores Gráficos. Ibarra – Ecuador.
- Quintero, R. (1981). Ingeniería Bioquímica. Ed. Alambra Mexicana. 1 E México.
- RFA (2003). Renewable Fuels Association. Etanol Industry 2003. Washington, USA, February.16 p.
- Ribéreau, G. J., Peynaud, E., Ribéreau, G.P., Sundraud, P. (2000). Science and technology of the wine. 2, 78-81.
- Robinson J. (2006). "The Oxford Companion to Wine" Third Edition pg 267-269 Oxford University Press 2006 ISBN 0198609906
- Robinson, J. (2003). Robinson's Wine Course Third Edition pg 74-84 Abbeville Press 2003 ISBN 0789208830
- Ruiz, S. F. (1995). El cultivo de la caña de azúcar. Editorial Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica. 448p.
- Sachs, J. (2005). Después del "Katrina" EL TIEMPO, Bogotá septiembre 20 de 2005.
- Sánchez, J., Cardona C., (2005). Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas. Interciencia 30 (11).
- SIAP. (2011). Anuario de Estadística Básica. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. <http://www.siap.gob.mx>.
- SIAP. (2010). Sistema Información Agroalimentaria y Pesquera, <<http://www.siap.gob.mx>>/ Consultado: 27 de Abril de 2012/
- Subirós, F. (1995). El cultivo de la caña de azúcar 1 ed. San José, Costa Rica. Edit. EUNED.

- Toala, G., Astudillo, J. (2010). Proyecto de implementación de una planta productora de etanol en base a la caña de azúcar, en la península de Santa Elena, provincia del Guayas. Guayaquil – Ecuador.
- Torija, M. (2002). Ecología de las levaduras. Selección y adaptación a fermentaciones vínicas. Trabajo de grado para la obtención del título de doctorado en bioquímica. Universitat Rovira I Virgili. Departamento de bioquímica y biotecnología. Facultad de Enología. Taragona, España. Extraída el 23 de Noviembre de 2008. http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_URV/AVAILABLE/TDX-0621102-115207//Tesis.pdf
- Usayán, A., Gil, I., Aguilar, J., Rodríguez, R. (2006). Producción de alcohol carburante por destilación extractiva: simulación de un proceso con glicerol. Revista ingeniería e investigación 26, 45-50.
- Uscátegui, C. (1985). Mejoramiento genético de la caña de azúcar en Venezuela (1962-1982). II Selección de variedades introducidas. Caña de azúcar. Vol. 03 No 1. Pp: 21-33.
- USDA. (2010). United States Department of Agriculture (USDA). http://www.usda.gov/wps/portal/!ut/p/_s.7_0_A/7_0_1OB?navtype=SU&navid=AGRICULTURE.
- Vera, F., Alcolea, R. (1979). Agrotecnia de la caña de azúcar. Empresa Editorial Oriente, Santiago de Cuba pp:9-23.
- Villena, D.M. (2003). Alcohol Carburante: Experiencia Europea. In. Seminario Internacional de Alcohol Carburante. Santiago de Cali, Colombia, Junio 17 y 18 del 2003. Memoria. Cali, ASOCAÑA, CORPODIB y TECNICAÑA. 47 p.
- Watson, K. (1987). Temperature relations: Yeast and environmental. Academic Press Limited. 50, 41-32.
- Wheals, A.E., Basso L.C., Alves, D.M.G., Amorim, H.V. (1999). Fuel ethanol after 25 years. TIBTECH, vol. 17, no. 12, pp. 482-487.

Paginas web.

[www.revistaeidenar.univalle.edu.co/edicion.](http://www.revistaeidenar.univalle.edu.co/edicion) (s.f.). (2011). Febrero de 2011:http://www.revistaeidenar.univalle.edu.co/edicion3/revista3_8a.phtml

www.invenia.es.2006

[Www.monografias.com/destilación.htm.](http://Www.monografias.com/destilación.htm) (Consultada: 15/06/2010).

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Prueba de Tukey para el peso del tallo de las variedades.

Variedades	Medias
COLPOSCTMEX 05-223	42.97 a
COLPOSCTMEX 05-204	40.12 b
COLPOSCTMEX 05-051	30.58 c
COLPOSCTMEX 05-003	31.25 c
MEX 02-16	29.58 c
COLPOSCTMEX 05-214	27.89 c
COLPOSCTMEX 05-224	25.52 d

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Anexo 2. Prueba de Tukey para cantidad de jugo

Variedades	Medias
COLPOSCTMEX 05-223	48.2 a
COLPOSCTMEX 05-204	44.89 a
COLPOSCTMEX 05-051	35.13 b
COLPOSCTMEX 05-003	33.4 b
MEX 02-16	31.57 b
COLPOSCTMEX 05-214	29.95 b
COLPOSCTMEX 05-224	27.5 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Anexo 3. Prueba de Tukey para el final de la fermentación.

Variedades	Brix final
MEX 02-16	5.95 a
COLPOSCTMEX 05-003	5.94 a
COLPOSCTMEX 05-204	5.93 a
COLPOSCTMEX 05-051	5.80 a
COLPOSCTMEX 05- 214	5.49 b
COLPOSCTMEX 05- 224	5.44 b
COLPOSCTMEX 05-223	5.44 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Anexo 4. Prueba de Tukey de tres niveles de levadura, brix final de la fermentación

Cantidad de fermento (mg)	Brix final
20	5.75 a
15	5.70 a
25	5.69 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Anexo 5. Prueba de Tukey al final de la fermentación

Variedades	Medias
COLPOSCTMEX 05-051	3.38 a
COLPOSCTMEX 05-003	3.35 ab
COLPOSCTMEX 05-223	3.29 ab
COLPOSCTMEX 05-204	3.27 abc
COLPOSCTMEX 05-214	3.23 bc
COLPOSCTMEX 05- 224	3.17 c
MEX 02-16	3.09 d

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Anexo 6. Prueba de Tukey de tres niveles de fermento, del pH final de la fermentación

Cantidad de fermento (mg)	pH final
15	3.29 a
20	3.24 a
25	3.24 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Anexo 7. Prueba de Tukey del contenido de grado alcohólico en las variedades.

Variedades	Grado alcohol (Destilación)
COLPOSCTMEX 05-051	59.28 a
COLPOSCTMEX 05.223	59.27 a
COLPOSCTMEX 05-204	59.11 a
COLPOSCTMEX 05-003	59.03 a
MEX 02-16	58.84 a
COLPOSCTMEX 05-224	58.65 a
COLPOSCTMEX 05-214	58.61 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Anexo 8. Prueba de Tukey del contenido de grado alcohólico de tres niveles de fermento

Cantidad de fermento	Grado alcohol
15	59.34 a
20	58.87 a
25	58.70 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Anexo 9. Prueba de Tukey del contenido de grado alcohólico en bidestilación.

Variedades	Grado alcohol (Bidestilación)
COLPOSCTMEX 05-204	90.75 a
COLPOSCTMEX 05-003	89.86 a
COLPOSCTMEX 05-224	89.67 a
COLPOSCTMEX 05-223	89.67 a
MEX 02-16	89.64 a
COLPOSCTMEX 05- 214	89.40 a
COLPOSCTMEX 05-51	89.39 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)