



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CARRERA QUÍMICA INDUSTRIAL**



SEMINARIO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN: QUÍMICA INDUSTRIAL

TITULO

Análisis del proceso de obtención de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar, por hidrólisis ácida diluida, fermentación separada, UNAN-Managua 2019.

Autores:

Br. Gustavo Emmanuel corea vega

Br. Pablo Duvalieth Morales García

Tutor: PhD. DANILO LÓPEZ VALERIO

Managua, Nicaragua 26 de mayo del 2019



ASPECTOS GENERALES



Título

ANÁLISIS DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR, POR HIDRÓLISIS ÁCIDA DILUIDA, FERMENTACIÓN SEPARADA, UNAN-Managua 2019.



Dedicatoria

Dedicado principalmente a Dios por darnos la fortaleza para superar las dificultades, a nuestra amada patria que por ella y para ella daremos siempre lo mejor de nosotros, nuestras familias que siempre nos dieron palabras de aliento para reponernos y finalizar esta etapa, amigos por creer y confiar en nosotros y a nuestros docentes que nos guiaron en este amplio camino.

Con sinceridad

Br. Gustavo Emmanuel Corea Vega

Br. Pablo Duvalieth Morales García

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme todo lo que tengo y he logrado, a toda mi familia especialmente a: mis padres por dar lo mejor de ellos, a mi tía Graciela Morales por todo lo que ella ha hecho y me ha dado, sin ella este sueño no sería realidad, a mis hermanos Octavio Morales e Ilich Morales por su carisma y consuelo, a mi hermano de otra madre Gustavo Corea que, desde hace tiempo es un miembro más de mi familia; a todos mis profesores que me guiaron y me ilustraron en este camino, en mención especial al doctor Danilo López Valerio, por inspirarme, por su ayuda, su guía y por ser un buen amigo con quien contar; finalmente agradezco a todas mis amistades que me ayudaron a crecer y ser mejor en esta vida.

Br. Pablo Duvalieth Morales García

Agradezco a Dios por acompañarme a cada momento de esta carrera, a mi madre Ester Vega por siempre creer en mí y brindarme la oportunidad de una buena formación, tanto académica como personal, a mis hermanas por darme su incondicional cariño y apoyo cuando más lo necesite, a mi sobrina por darme una razón más para no desistir, a mi amigo incondicional Pablo Morales por demostrarme lo que es tener un hermano de otra madre, a mi amigo, tutor y mentor doctor Danilo López por brindarme experiencias que me formaron como profesional y persona, valores, consejos y que el camino del aprendizaje no tiene límites, a mis docentes que me instruyeron en este largo camino y por ultimo pero no menos importante agradezco a todas esas personas y amistades que me brindaron de su ayuda para culminar esta etapa de mi vida.

Br. Gustavo Emmanuel Corea Vega



CARTA AVAL DEL TUTOR

El presente trabajo de seminario bajo el título: "Análisis del proceso de obtención de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar, por hidrólisis ácida diluida, fermentación separada, destilación simple." ha sido realizado por los bachilleres Gustavo Emmanuel Corea Vega, Pablo Duvalieth Morales García. Bajo la dirección, tutoría del PhD. Danilo López Valerio.

Doy fe que los bachilleres han cumplido con todas las disposiciones y requisitos del Art.64 según la normativa de modalidad de Graduación del régimen académico estudiantil, aprobado por el Vicerrectorado de Docencia y Dirección de Docencia de Grado en cuanto a la elaboración del presente para optar al título de licenciado en Química Industrial

Danilo López Valerio, PhD.

Docente

Departamento de Química

UNAN-Managua

Resumen

Los combustibles de origen fósil son productos con alta demanda en el mercado mundial, esto ocasiona una explotación masiva de los pozos petroleros, lo cual provoca el agotamiento de los mismos, cuando disminuyen las reservas del crudo su costo de obtención aumenta, a parte, estos contribuyen al deterioro ambiental, he aquí la necesidad de un combustible alternativo con la capacidad de sustituir parcial o totalmente a la gasolina.

Este trabajo contiene una revisión bibliográfica del proceso de obtención de bioetanol, se ha comparado y analizado los rendimientos de glucosa obtenidos por hidrolisis y bioetanol por fermentación a partir del bagazo

Se indagaron las propiedades físicas y químicas, de la caña de azúcar, siendo el % promedio de hemicelulosa 25%, celulosa 50 %, lignina 20% y 5% otros.

Además, se realizó el análisis de resultados reportados por varios autores referido al bagazo de caña de azúcar, para obtener un combustible alternativo, renovable y benéfico para el ambiente; el bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar es una clara opción para la sustitución parcial de la gasolina.

El mejor rendimiento reportado en la revisión bibliográfica, proporciona el proceso y las condiciones ideales a seguir, de las cuales la cantidad de glucosa obtenida fue 458 g Glucosa /Kg de bagazo

El proceso sugiere un pretratamiento físico de reducción de tamaño, y un pretratamiento químico alcalino, y finalmente, una hidrólisis enzimática, que mejora considerablemente los rendimientos de glucosa.

Los rendimientos teóricos de etanol a partir de bagazo se calcularon de las concentraciones de glucosa reportadas en los trabajos consultados, siendo el mayor de 119 g de Etanol/ Kg de bagazo y el menor de 7.82 g de Etanol/ Kg de bagazo.



Contenido

Capítulo I.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Justificación del problema.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivo específico.....	4
Capítulo II.....	4
2.1 Marco teórico.....	5
2.1.1 Caña de azúcar.....	5
2.1.2 Bioetanol.....	26
2.1.3 Proceso tecnológico.....	27
2.1.4 Combustibles.....	42
2.2 Antecedentes.....	45
2.3 Preguntas directrices.....	49
Capítulo III.....	49
3.1 Diseño metodológico.....	50
3.1.1 Descripción del ámbito de estudio.....	50
3.1.2 Tipo de estudio.....	50
3.1.3 Población y muestra.....	50
3.1.4 Identificación de variables.....	50
3.1.5 Materiales y métodos.....	51
Capítulo IV.....	52
4.1. Análisis de resultados.....	53
4.1.1. Propiedades físico químicas del bagazo, de caña de azúcar.....	53
4.1.2. Conversión a azúcares.....	55
4.1.3. Conversión a bioetanol.....	57
4.1.4. Condiciones óptimas del proceso de hidrólisis.....	58
Capítulo V.....	60



5.1. Conclusiones.....	61
5.2. Recomendaciones.....	62
5.3. Bibliografía.....	63
Anexos	64



Capítulo I



1.1 Introducción

En la actualidad los combustibles son imprescindibles para las industrias y la sociedad en general, la mayoría de estos son derivados fósil, petróleo que se encuentra en lugares inhóspitos, y más profundo, lo que incrementa los costos de perforación, además la mayoría de pozos petroleros han sido sobreexplotados y la contaminación del medio ambiente ha ascendido a niveles exuberantes, esto ha generado grandes problemas económicos y un descontrol en el ecosistema, respectivamente. Por esta razón grupos de investigadores están en busca de alternativas que pueda sustituir parcialmente al combustible fósil y al mismo tiempo sea amigable con el medio ambiente.

En Nicaragua hay muchas microempresas que se dedican al procesamiento de materia primas agrícolas, las cuales generan residuos sin valor agregado. Un ejemplo es la producción de dulce artesanal que genera como residuo el bagazo, utilizado para generar calor, por medio de su combustión, este en invierno no puede ser utilizado, por lo que recurren a la incineración de llantas usadas (incremento del CO).

El bagazo es un residuo fibroso, compuesto principalmente de material lignocelulósicos; 75% de Holocelulosa [50% Celulosa (37% alfa celulosa y 13% beta y gamma celulosa) y 25% Hemicelulosa], 20% de Lignina y 5% Otros componentes.

El presente trabajo de investigación, se basa en la recopilación y análisis de información en la obtención de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar, por hidrólisis ácida, fermentación separada y destilación simple; técnicas de la caracterización de las propiedades físicas y químicas del bagazo tales como: hemicelulosa, celulosa, lignina y humedad; posteriormente calcular la concentración y rendimiento de azúcares totales obtenidos de la celulosa en el bagazo, finalmente determinar la conversión y rendimiento de bioetanol obtenido de los azúcares totales presentes, a partir de la información recopilada.

1.2 Planteamiento del problema

La revolución industrial trajo como iniciativa idearse metodologías con el fin de generar más trabajo en poco tiempo; las primeras máquinas a vapor utilizaban el carbón como combustible y facilitaron mucho el trabajo de los seres humanos. Desde ese entonces, a pesar de las mejoras tecnológicas ha sido inevitable el uso de un combustible para facilitar las labores cotidianas (transporte, energía eléctrica) e industriales (calentamiento, procesos de combustión, etc.).

Hoy en día, los países en vías de desarrollo sufren con los altos costos de los combustibles; la codependencia y el consumo excesivo de estos, han llevado al agotamiento de muchos pozos petroleros y a aumentar los índices de contaminación, que deterioran la salud y poco a poco favorece la destrucción de la capa de ozono.

Desde hace varios años, se ha investigado la viabilidad de la sustitución parcial o total de los combustibles fósiles, por medio del bioetanol; este es obtenido de residuos ricos en celulosa y azúcares, tales como: el bagazo de la caña de azúcar, el bagazo del sorgo dulce, el olote de maíz, paja de trigo, remolacha, cachaza, entre otros. Cabe señalar que estos residuos no poseen valor agregado y algunos son arrojados al medio ambiente.

En los trapiches productores de dulce artesanal generan aproximadamente 960 000 kg de bagazo anualmente, del cual 160 000kg de este se pierde en temporada de invierno; por lo que, los trapicheros se ven obligado a detener sus operaciones o bien producir calor con otra materia, como llantas usadas, contribuyendo a la contaminación y el deterioro continuo del medioambiente.

1.3 Justificación del problema

Nicaragua es un país agroproductor, se dedica a la agricultura y ganadería. Estas actividades económicas, principalmente la agricultura genera residuos, sin valor agregado, estos pueden ser transformados en combustibles amigables con el medio ambiente, para ser usada en motores de combustión.

La producción del dulce, genera el bagazo como residuo, aproximadamente 960 000kg anuales por trapiche; alrededor del 16.6% de este se pierde en temporada de invierno. En este trabajo se indago la tecnología para la obtención de bioetanol a partir del bagazo, definiendo las variables operacionales adecuadas con el fin de determinar el mayor rendimiento de etanol.

Además, valorizar los residuos generados en las microempresas para la posibilidad potencial de producir alcohol como combustible sustituto parcial de la gasolina o bien elaborar mezclas de este con la gasolina, tales como: 90/10, 95/5 o 50/50; disminuyendo el uso de los combustibles fósiles, y a su vez reduciendo la contaminación que generan los vehículos con motores de combustión interna.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- ✓ Explicar el proceso de obtención de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar, por hidrólisis ácida diluida, fermentación separada, destilación simple.

1.4.2 Objetivo específico

- ✓ Indagar en investigaciones previas, las propiedades fisicoquímicas (hemicelulosa, celulosa, humedad) del bagazo de la caña de azúcar.
- ✓ Analizar la conversión de la materia prima y rendimiento de los productos en las etapas de hidrólisis y fermentación.
- ✓ Mencionar las condiciones óptimas del proceso de obtención de bioetanol a partir del bagazo de caña de azúcar a nivel de laboratorio.



Capítulo II



2.1 Marco teórico

2.1.1 Caña de azúcar.

La caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) pertenece a la familia de las gramíneas, dicha planta posee un tallo cilíndrico, interrumpido de trecho en trecho por nudos llenos, hojas alternas que nacen de estos nudos y abrazan al tallo, flores muy sencillas, dispuestas en espigas o en panojas. Tal como se ilustra en la figura 5.1.

- ✓ **Tallo:** Macizo, cilíndrico (5-6 cm de diámetro), alargado (altura de 2-5 m) y sin ramificaciones.
- ✓ **Raíz:** el sistema radicular lo compone un robusto rizoma subterráneo.
- ✓ **Hojas:** Largas, delgadas y planas; recubiertas por pequeñas vellosidades con numerosas aperturas estomáticas.
- ✓ **Inflorescencia:** panícula que en sus ejes secundarios presentan pares de espiguillas unidas mediante un pedicelo y con una sola flor.

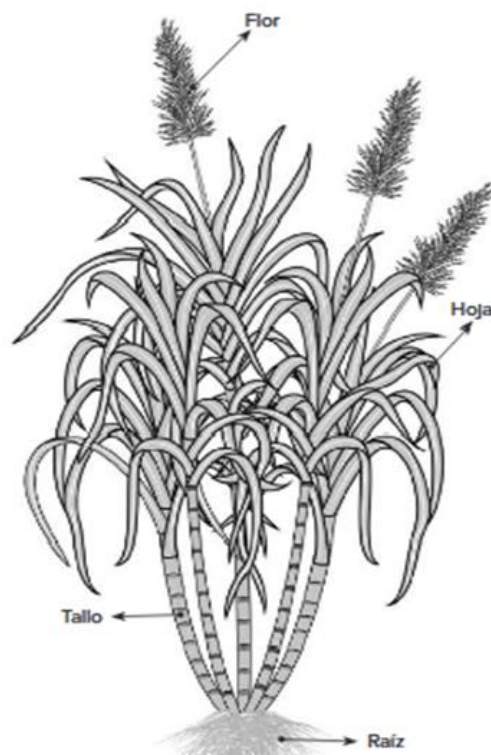


Figura 2 1: Taxonomía de la caña de azúcar (INATEC 2018)

2.1.1.1 Variedad.

La Caña Veteada

Alcanza una altura de unos tres y medio metros; resiste muy bien a los efectos del frío, es precoz y se distingue de las otras por su agradable aspecto rayado de amarillo y rojo violeta. En la figura 2.2 se ilustra la apariencia de la caña veteada.



Figura 2.2. Caña Veteada

Fuente: <http://cristianmauricioplaza.blogspot.com/>

La Caña Violeta

Tiene los tallos con una coloración violeta y las hojas ofrecen un color verde intenso. Tiene la ventaja de resistir mejor que las otras a las bajas de temperatura y ser también más precoz. Una de sus desventajas es su tendencia a secarse rápidamente y ser menos jugosa que sus congéneres. En la figura 2.3. se muestra el aspecto físico de la caña violeta.



Figura 2.3 Caña Violeta

Fuente: <http://cristianmauricioplaza.blogspot.com/>

La Caña Cristalina

Suelen adquirir sus tallos hasta seis y medio metros. El nombre de Cristalina procede del aspecto de su tallo, cuyos cañutos están cubiertos de una capa de vello blanquecino que le comunican brillantes reflejos; el color de sus hojas, es de un verde más oscuro que el de las otras variedades. Tal como se muestra en la figura 2.4 este tipo de caña es robusto y tiene mayor resistencia a las adversas condiciones meteorológicas; pero tiene el defecto de ser muy dura, exigiendo con este motivo mayor gasto de energía en los trapiches.



Figura 2.4. Caña Cristalina

Obtenido de: <http://cristianmauricioplaza.blogspot.com>

La Caña Criolla

Esta posee mayor cantidad de jugo y más riqueza de sacarosa, es dotada de gran vitalidad, pues a pesar de su larga estancia en los campos, no ha degenerado en lo más mínimo. No obstante, tiene el inconveniente de que es muy sensible a las temperaturas extremas de calor y frío, por lo que suele enfermarse algunas veces. Llega a alcanzar tres metros y medio de altura y sus cañutos son delgados.



Figura 2.5. Caña Criolla

Obtenido de: <http://cristianmauricioplaza.blogspot.com/>

Otras variedades se agrupan en claves y están compuestas por letras y números. Las letras señalan el lugar de origen de la variedad, y el número el año en que fue producida y a la serie que corresponde. Algunas de las clasificaciones más conocidas, son las siguientes:

Barbados (**B**); Coimbatore, India (**Co**); Campos, Brasil (**CB**); Canal Point, Florida (**CP**); Demerara, Guyana (**D**); Formosa (**F**); Hawái (**H**); Natal, África del Sur (**N**); Santa Rosa, Argentina (**NA**); Cruzada en Coimbatore, seleccionada en Natal (**NCo**); Colectadas en Nueva Guinea (**NG**); Proefstation Oost Java (**POJ**); Puerto Rico (**PR**); Luisiana (**L**); Lyallpur, Pakistan (**L**); Mayagüez, Puerto Rico (**M**); Queensland, Australia (**Q**); Alagoas, República de Brasil (**RB**); Sao Paulo (cruzada en Camamu, Bahía) (**SP**); Tucumán, Argentina (**Tuc**); Clones experimentales, Departamento de Agricultura de Estados Unidos (**US**) (ZafraNet, 2012).

Tabla 2.1. variedades de las cañas de azúcar cultivadas en Nicaragua

Características	Variedades		
	CPL - 6014	PR - 980	CP72 – 2086
Crecimiento del tallo	Erecto	Erecto	Erecto
Altura (m)	3	2.5 - 3.3	3.4
Floración	Abundante a regular	Escasa	Escasa a regular
Longitud de hojas (m)	1.64	1.65	1.86
Resistencia	Carbón y roya	-	Sequía
Susceptibilidad	Barrenadores	-	-
Rendimiento (t/ha)	115	130 – 200	173 – 193
Coloración del tallo	Verde con vetas color vino	Verde amarillento	Verde amarillento

(INATEC, 2018)

2.1.1.2 Plagas.

2.1.1.2.1 Chinche salivosa (homóptera: Cercopidae).

La chinche salivosa es un insecto con aparato bucal picador-chupador que se alimenta de la xilema de la caña de azúcar. Los huevos dan origen a la primera

generación de ninfas de la plaga, lo que ocurre al inicio de la estación lluviosa de cada año. En la figura 2.6 se ilustra el ciclo biológico de chinches salivas.

Tanto las ninfas como los adultos utilizan su estilete para elaborar túneles de alimentación que finalizan en los elementos de la xilema. Es debido a la baja calidad nutritiva de la savia de la xilema que su estado de ninfa se prolonga en al menos 30 días, formando una espuma alrededor de su cuerpo blando y permaneciendo localizadas en las raíces adventicias del cultivo. Cuando alcanza el estado adulto migra hacia el follaje y al alimentarse introduce una sustancia tóxica que destruye e interfiere con la formación de clorofila se altera, tanto el desarrollo normal de la planta, como la acumulación de sacarosa, con efecto sobre el tonelaje de caña y producción de azúcar.



Figura 2.6. Ciclo biológico de la chinche salivosa (CENGICAÑA , 2017)

2.1.1.2.2 EL SALTÓN COLUDO (*Homóptera: Delphacidae*).

Saccharosydne saccharivora, conocido como saltón coludo, es un insecto con aparato bucal picador- chupador. Su presencia provoca un daño directo por la alimentación de las colonias, debilitando el desarrollo de los brotes. Posteriormente, debido a la producción de melaza, ocurre daño indirecto por el desarrollo de fumagina (*Capnodium* spp.), interfiriendo con la fotosíntesis y la transpiración normal de las hojas. En la figura 2.7 se muestran las ninfas, adulto y el daño que causan a la cosecha.

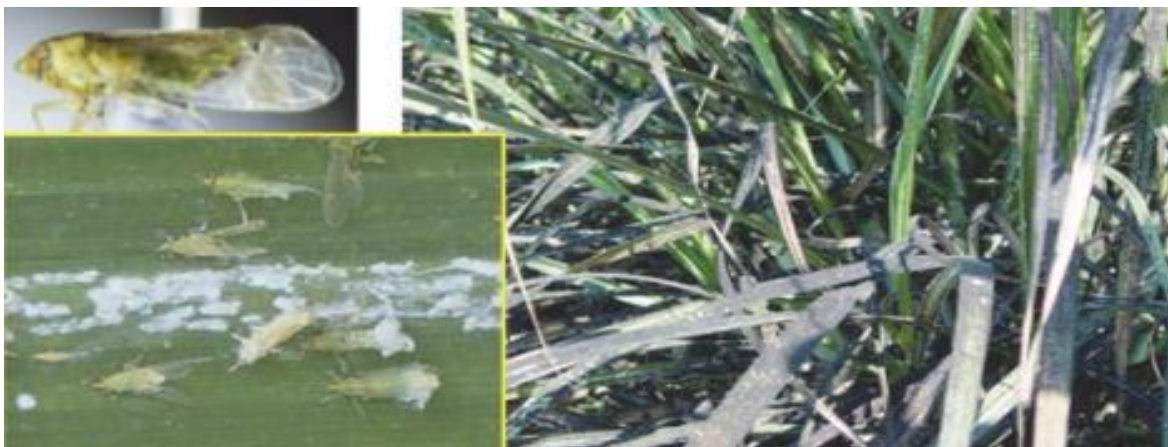


Figura 2.7. Adultos y ninfas del saltón coludo, seguido del daño que causan a los cultivos (CENGICAÑA, 2017)

2.1.1.2.3 Barrenadores del tallo en caña de azúcar (*lepidoptera: crambidae*). Los barrenadores con importancia económica y mayor distribución geográfica corresponden al género ***Diatraea***, principalmente ***D. crambidoides*** (Grote) con 73 por ciento y ***D. saccharalis*** (Fabricius) con 27 por ciento de ocurrencia en la zona baja. El daño es el resultado de la actividad alimenticia del estado larval que puede provocar la muerte del meristemo apical (corazón muerto) en la etapa de macollamiento, así como, por la construcción de galerías en las etapas fenológicas de elongación y maduración, tal y como se muestra en la figura 2.8.

Se afecta la calidad de jugo ya que en las galerías prolifera el hongo ***Calleotrichum falcatum***, responsable del muermo rojo causando reducciones en el Pol y brix, mientras que el porcentaje de fibra aumenta.



Figura 2.8. Larva del barrenador y síntomas en la caña (CENGICAÑA , 2017)

2.1.1.2.4 Complejo de plagas de la raíz.

La abundancia relativa de los insectos que afectan a la raíz depende de la altitud, número de socas y tipos de suelo. A continuación, se muestra la tabla 2.2 con los nombres de los insectos más importantes.

Tabla 2.2. complejo de insectos que atacan a la raíz de la caña de azúcar

Nombre	Géneros/Especies	Síntomas
Gallina ciega	Phyllophaga dasypoda; Phyllophaga latipes; Phyllophaga parvisetis; Phyllophaga menetriesi; Phyllophaga anolaminata	Puntas secas, amarillamiento del follaje, secamiento y acame de macollas.
Gusano alambre	Dipropus spp; Horistonotus spp; Agrypnus spp; Dilobitarsus spp.	Fallas en la germinación de la caña por daño a las yemas
Chinche hedionda	Scaptorocoris talpa	Amarillamiento y retardo en el crecimiento
Termitas subterráneas	Heterotermes convexinotatus; Microcerotermes nr. Gracilis; amitermes beaumontil; nasutitermes nigriceps	Fallas en la germinación y perforación de tallos molederos de agosto hacia la cosecha.
Ronrón cornudo	Podischnus agenor	Muerte de brotes en macollamiento y perforación de túneles en tallos en la etapa de elongación.

Mayate negro

Euetheola bidentata Burmeister

Fallas en la germinación de las yemas en siembra de áreas nuevas con caña de azúcar.

2.1.1.2.5 Gallina Ciega (coleóptera: scarabaeidae).

La mayoría de especies son de ciclo anual, con excepción de *P. parvisetis*, que es bianual. El ciclo de vida inicia con la emergencia de adultos y el proceso de oviposición en el suelo entre abril y mayo, para luego iniciar el desarrollo de tres instares larvales debajo de las raíces de la caña; en la figura 2.9 se muestra el estado larval y adulto de la gallina ciega.



Figura 2.9. Larva y escarabajos adultos de la gallina ciega (CENGICAÑA , 2017)

La severidad del daño depende de muchos factores como la época crítica de ocurrencia en el cultivo, la especie y los niveles de infestación. Los síntomas externos incluyen retardo en el crecimiento, amarillamiento, puntas secas y susceptibilidad al acame, llegando a provocar pérdidas de hasta 0.62 t de caña/ha, por cada larva por metro cuadrado de incremento promedio en campo (Márquez et al., 2005; citado por (CENGICAÑA , 2017))

2.1.1.2.6 Gusano alambre (coleóptera: Elateridae).

El género **Dipropus** es el de mayor abundancia larval entre julio y septiembre, sin embargo, el efecto de altas poblaciones se observa en las siembras de renovación, como reducción de la germinación de las yemas. En la figura 2.10 se muestra al gusano alambre en su infancia y madurez.



Figura 2.10. Etapas de vida del gusano alambre (CENGICAÑA , 2017)

2.1.1.2.7 Termitas subterráneas (Isóptera: Rinoitermitidae).

La especie de mayor abundancia en los campos de caña es **Heterotermes convexinotatus**. Ocurren todo el tiempo en el cultivo de la caña de azúcar, ocupando y alternando el suelo, el sistema radicular de la caña soca o los esquejes en siembras de renovación, así como los residuos de la cosecha anterior. En la figura 2.11 se ilustra el daño que ocasionan las termitas subterráneas.



Figura 2.11. Termitas subterráneas y daños a los cultivos (CENGICAÑA , 2017)

El inicio de la estación lluviosa en combinación con la cobertura del cultivo son los factores que promueven el ascenso de las termitas a la superficie del suelo donde invaden los residuos de cosecha, permitiendo su reproducción masiva.

A partir de ahí infestan los tallos al final de la estación lluviosa (septiembre-octubre). Cuanto más tiempo transcurra hasta la cosecha, mayor será el nivel de daño que puede esperarse. Se ha determinado un factor de pérdida de 0.45 y 0.22 toneladas métricas de caña por hectárea, por cada uno por ciento de tallos dañados por termitas, para la variedad CP72-1312 y CP72-2086, respectivamente.

2.1.1.2.8 *Mayate negro* (Coleoptera: Dynastidae).

Euethiella bidentata es una plaga ocasional, no exclusiva de la caña de azúcar. El daño lo causa el adulto que, por su hábito alimenticio, inicia la búsqueda de nuevos brotes en el proceso de germinación, afectando su base, inmediatamente por debajo de la superficie del suelo. Se observa primero amarillamiento y luego, marchitamiento y muerte de las plantas. Las áreas de renovación, que antes fueron pastizales, son las que están más expuestas a este tipo de daño (CENGICAÑA , 2017). En la figura 2.12 se muestra al mayate negro y daño al cultivo.



Figura 2.12. *Mayate* adulto y daños a los cultivos (CENGICAÑA , 2017)

2.1.1.3 **Enfermedades.**

2.1.1.3.1 *Carbón* (*Ustilago scitaminea*).

Daño: el síntoma característico de la afección lo constituye la formación de una estructura semejante a un látigo en la parte terminal de los tallos afectados. Pueden tener una longitud que varía desde pocos centímetros a más de un metro, ser erectos o ligeramente curvados, y los muy largos pueden tomar una forma de colicho; en la figura 2.13 se aprecia el daño que causa el *Ustilago scitaminea*

Manejo: eliminar la cepa, para ello se debe embolsar el “látigo” con la finalidad de que al extraer la cepa las esporas no se diseminen, luego hay que incinerar todo este material infectado y enterrarlo, utilizar variedades resistentes. Selección de semilleros sanos, rotación de cultivo para romper el ciclo.



Figura 2.13. *Ustilago scitaminea* y sus afecciones a la caña de azúcar

2.1.1.3.2 Raya roja (*Xanthonomas rubrilineans*).

Daño: provoca rayas rojas que se extienden paralelas a los nervios de la hoja. En casos de infección severa puede provocar incluso la pudrición del cogollo y del tallo

de la planta. En la figura 2.14 se puede apreciar el alto daño que causa la *Xanthonomas rubrilineans*

Manejo: es efectivo el empleo de variedades resistentes. Buena agrotecnia al cultivo. No utilizar semillas infectadas. No se recomienda entresacar plantones enfermos.



Figura 2.14. cultivos con *Xanthonomas rubrilineans*

2.1.1.3.3 Virus del mosaico (*Sugarcane mosaic virus (SMV)*).

Daño: se transmite a través de áfidos. Produce pequeñas manchas de colores que pueden ir desde el verde hasta una tonalidad más blanquecina. El síntoma característico del Virus de Mosaico es la disminución de la clorofila en la hoja debido a la reducción del número y tamaño de los cloroplastos, provocando áreas verdes normales sobre un fondo de verde más claro a amarillento; a como se puede apreciar en la figura 2.15.

Manejo: los sistemas más comunes consisten en la eliminación de plantas enfermas, uso de semilla libre de la enfermedad, siembra de variedades resistentes y algunas prácticas de cultivo. Con la eliminación de plantas enfermas es posible mantener niveles bajos de incidencia, pero esto depende de la variedad y variante del virus y de la abundancia de los vectores presentes en la zona del cultivo.



Figura 2.15. Cultivos con SMV (*Virus mosaico de la caña de azúcar*)

2.1.1.4 Área de producción en Nicaragua.

Nicaragua para el año 2016 reflejó un área total de 130 mil kilómetros cuadrados, el cual, 34.7% están ocupados por bosques; el 13.3% se utiliza en tacotales; el 11.7% del territorio lo conforman las fuentes de agua; y el grupo de poblados, ciudades y áreas urbanas representa el 0.4% del territorio nacional. En relación a la producción, el 34% se dedica a la parte pecuaria (pastos naturales y mejorados); y la producción meramente agrícola está en 5.5% de todo el país (INTA, 2016).

La caña de azúcar representa el 13.5% de la producción con una extensión de 133,156.70 manzanas, concentradas en Chinandega, León, Carazo, Managua y Masaya. Para el año 2016 se produjeron 7.1 millones de quintales, valoradas en US\$113.8 millones y el consumo aparente de azúcar del año 2016 se estimó en 6.1 millones de quintales.

En el año 2017 se cosecharon 105.9 miles de manzanas, con una producción de 16.1 millones de quintales de azúcar, 13.4% superior (14.2 millones de quintales de azúcar) y 100% de cumplimiento de la meta establecida en el plan de producción (16.1 millones de quintales).

2.1.1.5 Residuos generados en el proceso de la caña.

2.1.1.5.1 Bagazo.

El bagazo es un residuo fibroso resultante de la trituración, presión o maceración de la caña de azúcar al extraer su jugo. Su principal composición es lignocelulosa, se utilizaba en la elaboración de papel, cartón y en los trapiches como fuente de energía para generar calor, mediante su incineración.

Esta biomasa tiene la capacidad de producir bioetanol de segunda generación de alta calidad. Brasil, Cuba, Estados Unidos y España han desarrollado tecnologías para generar etanol carburante, en Nicaragua los trapiches productores de dulce artesanal, generan aproximadamente 960 000 Kg de bagazo anualmente, el cual no se le da un valor agregado

El bagazo consta principalmente de dos partes:

- ✓ La fibra: Fibras relativamente largas, derivadas principalmente de la corteza y otros haces de fibra del interior del tallo. La longitud media de las fibras del bagazo es de 1 a 4 milímetros y su ancho varía entre 0,01 y 0,04 milímetros.
- ✓ El meollo: Se deriva del parénquima, parte de la planta donde se almacena el jugo que contiene el azúcar.

2.1.1.5.1.1 Propiedades físico químicas.

En la tabla 2.3 se muestra la composición promedio porcentual del bagazo cuando sale del molino; cabe resaltar que cada uno de los grupos tienen un valor de cien, es decir, que, para un cien por ciento de la muestra de bagazo de caña, tiene los

siguientes porcentajes: 50% humedad, 5% sólidos solubles y un 45% sólidos insolubles (fibra cruda).

Tabla 2.3. Porcentajes de la composición física y química del bagazo.

Parámetros	Valor (%)
<i>Humedad</i>	50
<i>Sólidos solubles</i>	5
<i>Sólidos insolubles o fibra cruda</i>	45
<i>Carbono</i>	47
<i>Hidrogeno</i>	6,5
<i>Oxigeno</i>	44
<i>Cenizas</i>	2,5
<i>Holocelulosa</i>	75
<i>Lignina</i>	20
<i>Otros componentes</i>	5

Obtenido de: (EcuRed https://www.ecured.cu/Bagazo_de_ca%C3%B1a)

2.1.1.5.1.2 Composición química del bagazo.

Casi todos los polisacáridos contienen cientos de monómeros y, en ocasiones, varios miles; estos, se encuentran como cadenas lineales o ramificadas, que a su vez pueden estar integrada por un solo tipo de monosacárido (homopolisacárido) o por varios tipos de monosacáridos (heteropolisacárido). De cualquier forma, sus componentes siempre están unidos regularmente a una secuencia y estructura repetitivas, representando polímeros con un alto grado de ordenación (Dergal, 2006).

De acuerdo con la función biológica de los polisacáridos se dividen en dos grandes grupos; los que constituyen la estructura celular y confieren rigidez a los tejidos (celulosa, pectina, gomas, entre otros) y los que representan la reserva energética de los animales (glucógeno) y vegetales (inulina y almidón).

2.1.1.5.1.2.1 Celulosa.

La celulosa es el polisacárido estructural de todo el reino vegetal; este compuesto es considerado el más abundante e inagotable en la tierra, ya que, esta se renueva continuamente con la fotosíntesis (Dergal, 2006). En cambio (Abril & Navarro, 2012) infieren que la celulosa es un polímero de cadena lineal formado por la unión de unidades de anhidroglucosa, estas están unidas por enlaces β -(1,4)-glucosídicos. Debido a este tipo de unión se ha establecido a la celobiosa como la unidad repetida en las cadenas de celulosa; tal y como se representa en la figura 2.16.

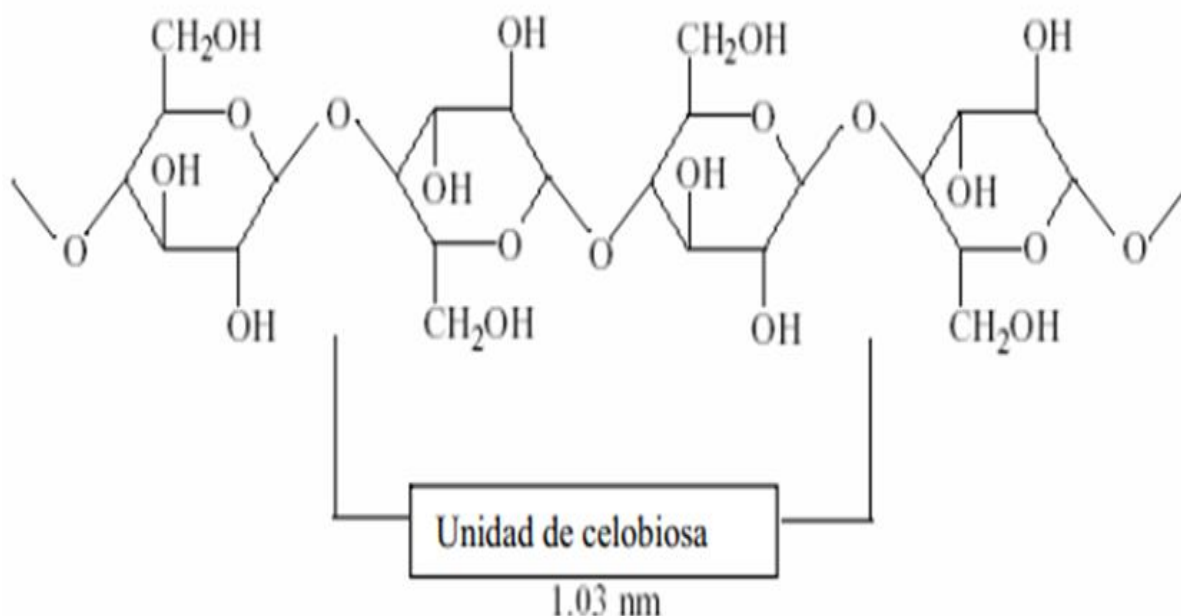


Figura 2.16. Estructura de la celulosa (Abril & Navarro, 2012)

Desde el punto de vista actual, la celulosa es el polímero orgánico más abundante del mundo. Se estima que representa alrededor del $1,5 \times 10^{12}$ toneladas de la producción total anual de biomasa y se considera una fuente de materia prima casi inagotable para la demanda creciente de productos sostenibles con el medio ambiente (Morales de la Rosa, 2015).

Entre algunos de los usos de la celulosa se encuentran: La MCC (celulosa micro cristalina “la cual es una forma des polimerizada”, esta se obtiene a partir de una hidrolisis ácida controlada de la celulosa), la MCC presenta excelentes propiedades emulsificantes y estabilizantes de productos aireados; se aplica en aderezos, salsas y productos elaborados a base de jitomate, productos lácteos, productos de panificación y como sustituto de la grasa.

La carboximetil celulosa es otro derivado importante de la celulosa, esta actúa como aglutinante espesante y estabilizante; utilizado en productos como tortillas, en la elaboración de jugos y néctares, etc.

Se puede resaltar, que, la celulosa es un polímero de alto peso molecular (llegando a ser de varios millones), posee una alta resistencia mecánica y química (se debe a que sus cadenas paralelas se alinean sobre un eje longitudinal y establecen un gran número de puentes de hidrógenos intermoleculares, lo que, da origen a micro fibrillas altamente estructuradas) y tiene un alto grado de polimerización (GP).

El grado de polimerización de la celulosa se define como el número a repetir de unidades de anhidroglucosa (β -D-glucopiranosas) unidas entre sí mediante un enlace glucosídicos entre el carbono 1 y 4 en la cadena polimérica (Morales de la Rosa, 2015).

El grado de polimerización (GP) de la celulosa nativa está en el rango de 7 000 – 15 000 [(GP)= Masa molecular de la celulosa/ masa molecular de la glucosa] (Abril & Navarro, 2012); sin embargo, a mayor GP, es más difícil hidrolizar la celulosa y por esta razón, muchos autores deciden centrarse en disolventes con la capacidad de disolver la celulosa, independientemente de su cristalinidad o GP, sin tratamiento, sin degradar o derivar el biopolímero.

Para romper o penetrar esta estructura, se requieren severos tratamientos y condiciones, que permitan incrementar la accesibilidad de la celulosa. La estructura de la celulosa no es el único factor que limita su accesibilidad.

Otros componentes que están íntimamente vinculados a la celulosa en el vegetal, como son la lignina y las hemicelulosas, juegan un importante rol en los procesos utilizados para el aprovechamiento de los materiales lignocelulósicos, como son los procesos físico-químicos, por microorganismos y enzimáticos (Cowling, 1975; citado por (Abril & Navarro, 2012)).

2.1.1.5.1.2.2 Hemicelulosa.

Es un grupo muy extenso de polisacáridos con diversos tipos de monómeros (heteropolisacáridos) que se localizan principalmente en la pared celular, y que son muy distintos a la celulosa o al almidón (Dergal, 2006). La hemicelulosa está compuesta por polímeros de diferentes azúcares con cadenas más cortas y ramificadas, lo que la hace más amorfa y más fácil de hidrolizar en sus azúcares constituyentes que la celulosa (Morales de la Rosa, 2015), el papel principal de la hemicelulosa es, suministrar la unión entre la lignina y la celulosa para proporcionar rigidez a la pared celular.

La composición química de esta se basa en la unión glucosídica de distintos monosacáridos, sobre todo pentosas (vg. arabinosa y xilosa), hexosas (glucosa, manosa y galactosa), ácidos urónicos (galacturónico y glucurónico) y algunos desoxiazúcares (Dergal, 2006). Siendo Los xilanos y mananos, los grupos de hemicelulosas más importantes presentes en los materiales lignocelulósicos. En general, las hemicelulosas tienen bajos grados de polimerización (<200) (Abril & Navarro, 2012). En la figura 2.17 ilustran los principales grupos que componen a la hemicelulosa.

En general, las hemicelulosas y en particular los xilanos, pueden ser solubilizados de manera eficiente por la hidrólisis en medio ácido débil (Wilkie, 1979; (Abril & Navarro, 2012)), pero para lograr una solubilización de la glucosa presente en la celulosa, en proporción semejante a la que se logra con las hemicelulosas, se requiere un tratamiento mucho más drástico de hidrólisis ácida, o una combinación de hidrólisis ácida con tratamiento enzimático.

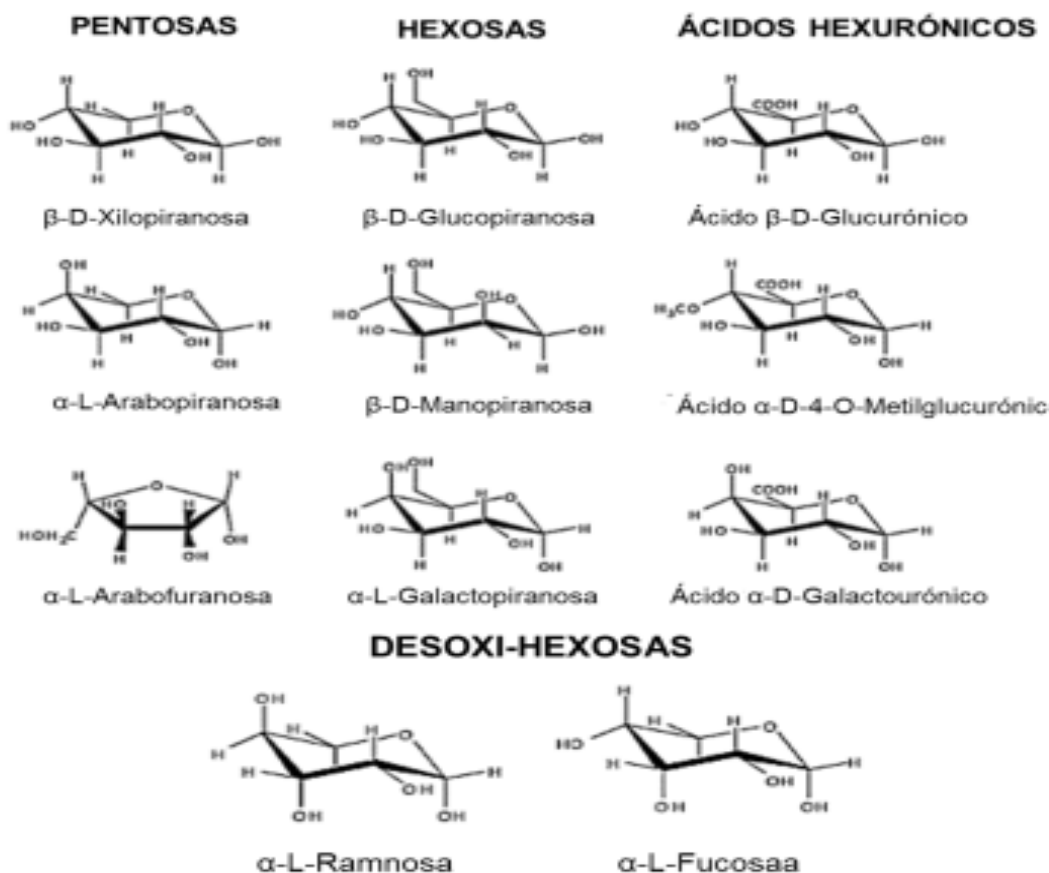


Figura 2.17. Diferentes posibles monómeros presentes en cadena principal y cadena lateral de hemicelulosas (adaptado de Fengel y Wegener, citado por (Morales de la Rosa, 2015)).

La relativa facilidad de extracción de azúcares de las hemicelulosas, la han convertido en una fuente de obtención de combustibles, alimento animal y productos químicos (Thompson, 1983; Overend y Chornet, 1987; (Abril & Navarro, 2012)).

Cabe resaltar que también, se encuentran las sustancias pécticas (pectinas) que son polisacáridos heterogéneos y contienen un alto porcentaje de ácidos galacturónicos, estos son polisacáridos con estructuras y propiedades físico-químicas altamente variados que se encuentran en la pared celular y que al igual que la celulosa, hemicelulosa confieren resistencia a la estructura vegetal (Morales de la Rosa, 2015).

2.1.1.5.1.2.3 Lignina.

La lignina es un polímero condensado de alto peso molecular y estructura amorfa. Está constituida por unidades fenilpropano (Abril & Navarro, 2012); se considera que la lignina cumple dos funciones fundamentales en los vegetales: Dar resistencia y servir de pegamento a la pared celular y aportar resistencia al ataque de los microbios.

La lignina que, aun cuando no es un hidrato de carbono, sino más bien una cadena de compuestos fenólicos como la vanillina, el aldehído siríngico y los alcoholes coniferílico, sinapílico y cumarílico, siempre se encuentra asociada a ellos y es un compuesto no digerible por el tracto digestivo del humano (Dergal, 2006); (tal y como se ilustra en la figura 2.18).

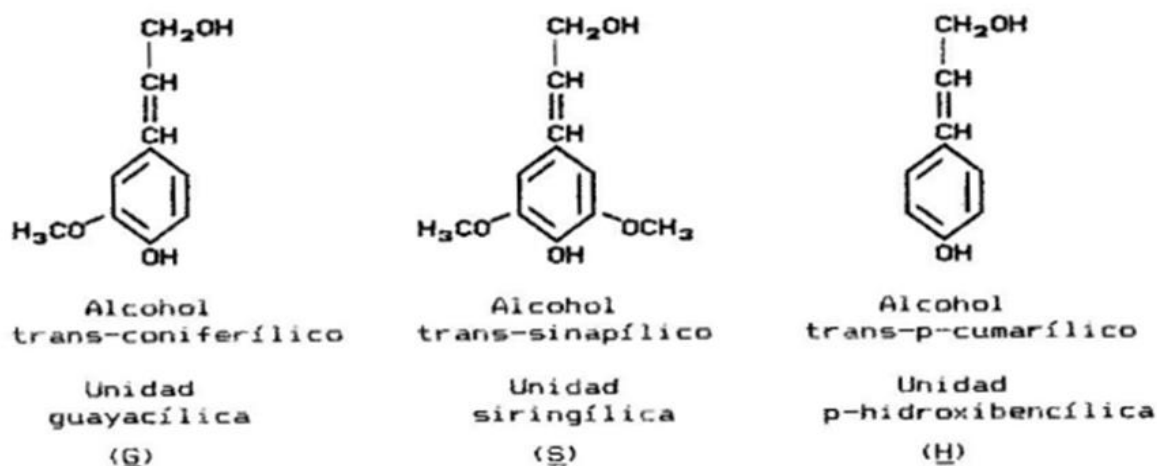


Figura 2.18. Estructura química de los alcoholes p-coumaril, coniferil y sinapil. Principales precursores en la biosíntesis de la lignina. (Theander y Åman, 1984), citado por (Abril & Navarro, 2012).

La lignina tiene una composición química muy compleja, pero de forma muy básica se pueden diferenciar tres tipos de unidades que se encuentran repetidas a lo largo de su estructura ramificada y amorfa. Estas unidades son: Unidad H (cumaril) que deriva del alcohol p-cumárico, la unidad G (guaiacil) que deriva del alcohol coniferílico y la unidad S (siringil) que deriva del alcohol sinapílico. Se diferencian

en la sustitución con un grupo metoxilo (-OMe) en las posiciones 3 y 5 de la unidad aromática (Morales de la Rosa, 2015).

Las ligninas guayacílicas, ricas en residuos de guayacil, se encuentran en las gimnospermas (maderas blandas). Las maderas duras contienen tanto grupos guayacílicos como siringílicos en una relación que puede variar de 4:1 a 1:2. El último y posiblemente más complejo grupo de ligninas son las ligninas de las plantas anuales. Las mismas contienen los tres residuos aromáticos en cantidades significativas (Nimz et al., 1981; citado por (Abril & Navarro, 2012)).

Estos tipos de lignina son muy diferentes de las ligninas de maderas, ya que poseen ácidos fenólicos (PAC), ácidos p-coumárico y ferúlico y amino ácidos estrechamente asociados con el núcleo de la matriz de lignina (Van Soest, 1982; (Abril & Navarro, 2012)). Los PAC se encuentran enlazados a la lignina por enlaces éter o éster (Billa et al., 1993); así como se presenta en la figura 2.19.

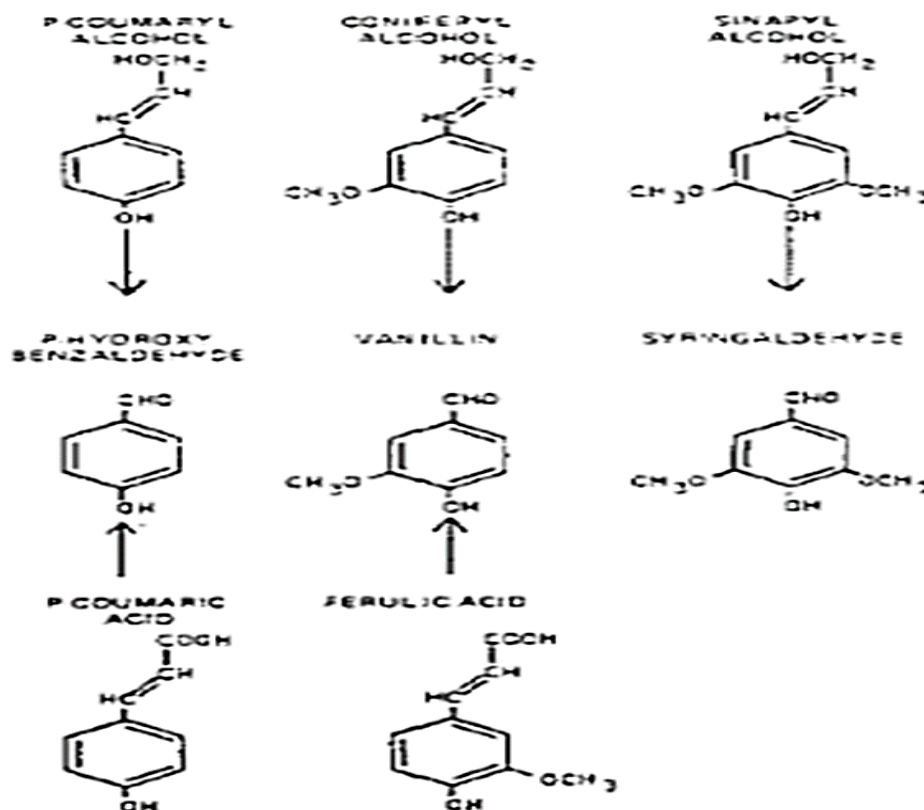


Figura 2.19. Relación entre alcoholes cinamílicos, ácidos y sus productos de oxidación por nitrobenzeno. (Harris y Hartley, 1976)

Los fuertes enlaces covalentes en la estructura de la lignina (por ejemplo: C-C y enlaces de éter, hace a la lignina muy resistente a la acción hidrolítica de Las ligninas guayacílicas, ricas en residuos de guayacil (Abril & Navarro, 2012).

De acuerdo a mediciones analíticas (Wayman y Chua, 1979a), los alcoholes fenilpropanoides presentes en el núcleo de la lignina, producen p-hidroxibenzaldehído, vainillina y siringaldehído cuando se someten a moderada oxidación. La oxidación de los ácidos p-coumárico y ferúlico puede también dar p-hidroxibenzaldehído y vainillina (Abril & Navarro, 2012).

La presencia de PAC en las ligninas de pajas y plantas anuales, tiene importantes consecuencias en la eficiencia de los tratamientos químicos utilizados para incrementar la utilización de estos materiales. Los PAC de las ligninas de pajas y plantas anuales, se pueden disolver cuando se someten a tratamientos con álcalis en frío.

Otras ligninas que no contienen enlaces lábiles a la acción de álcalis, no son afectadas. Para lograr la deslignificación de cualquier material lignocelulósico, los enlaces éter entre los precursores de la lignina tienen que ser rotos por tratamientos con agentes oxidantes o tratamientos con agentes químicos a altas temperaturas (Abril & Navarro, 2012).

2.1.2 Bioetanol.

El bioetanol o etanol de biomasa con fórmula C_2H_5OH , es obtenido a partir de materias primas ricas en almidones, azúcares o biomásas (material celulósico), dependiendo de esta, se caracteriza la naturaleza del mismo. Los pretratamientos y desarrollo tecnológico para la obtención de bioetanol dependen de la materia prima. En caso de materias ricas en azúcares se pasa directamente a la fermentación, en cambio, en las biomásas es necesaria la hidrolización de esta.

2.1.3 Proceso tecnológico.

2.1.3.1 Pretratamiento.

Es un proceso que se realiza antes de la obtención del bioetanol, consiste en adecuar la materia prima y mejorar las condiciones, para el procesamiento tecnológico con mayor eficiencia, el pretratamiento está en dependencia de la materia prima.

2.1.3.1.1 Técnicas de pretratamiento físico.

a) Fragmentación mecánica

Es un proceso que se utiliza con el objetivo de aumentar el área de contacto de la materia prima con el ácido, en la hidrólisis; entre mayor contacto exista las cantidades de azúcares obtenidas aumentan.

Existen varios métodos con los que se puede fragmentar la biomasa como; la molienda, resultando el molino de bolas el más eficaz, la irradiación y la extrusión. Todos ellos mejoran los resultados obtenidos en la hidrólisis no solo por la reducción del tamaño de partícula sino porque se mejoran las características de transferencia de masa. En estos procesos, la energía requerida es mayor que el contenido energético teórico disponible en la biomasa. Estos métodos son caros y es probable que no se utilicen a gran escala (Morales de la Rosa, 2015)

b) Pirolisis

La pirolisis se lleva a cabo en ausencia de aire y temperaturas superiores a los 300 °C. Durante el calentamiento de la biomasa se forman gases, líquido y residuos calcinados en diferentes proporciones dependiendo del sistema de pirolisis que se utilice. La hemicelulosa se descompone entre 250 y 400 °C, la celulosa requiere temperaturas un poco más altas entre 310-430 °C y la lignina se descompone entre 300-530 °C. A temperaturas aún más altas, se produce una ruptura de los enlaces C-C y CH, dando lugar a C₂-4 oxigenados y productos de gasificación como: CO, CO₂, H₂ y CH₄. (Morales de la Rosa, 2015)

c) Explosión de vapor

La explosión de vapor es el método más utilizado para el tratamiento de materiales lignocelulósicos y está reconocido como uno de los métodos más rentables. En este método la biomasa se trata con vapor de agua saturada a presión alta (a unas temperaturas entre 160-260 °C con unas presiones correspondientes entre 0,69 a 4,83 MPa), a continuación, la presión se reduce súbitamente, lo que provoca una descompresión explosiva en los materiales. Finalmente, el material se enfría rápidamente. El proceso causa la degradación de la hemicelulosa y la transformación de la lignina. (Morales de la Rosa, 2015)

d) Explosión de fibra de amoniaco

Este método es un tratamiento físico-químico de la biomasa lignocelulósica que se expone con amoniaco anhídrido líquido a altas temperaturas (60-100 °C) y presión alta (1,7 - 2 MPa) durante un periodo de tiempo corto y a continuación se reduce rápidamente la presión. Es un proceso similar al de explosión de vapor. Casi todo el amoniaco se puede recuperar y reutilizar. (Morales de la Rosa, 2015).

e) Explosión con CO₂

Es un tratamiento similar al de explosión por vapor y explosión de fibra de amoniaco. Se utiliza esta metodología con CO₂ supercrítico porque requiera de menor temperatura y un gasto menor que con la explosión de amoniaco. Esta temperatura más baja impide que se produzca la descomposición de monosacáridos. (Morales de la Rosa, 2015)

f) Pirolisis por impulsos de campo eléctrico

En este tratamiento se aplica una ráfaga corta de alta tensión a una muestra que se coloca entre dos electrodos. Se genera un campo eléctrico entre dos placas de electrodos paralelos, la intensidad de campo (I),

Este tratamiento tiene grandes efectos en la estructura de los tejidos de la planta. Con una intensidad alta, se aplica un campo eléctrico externo y se induce un potencial eléctrico crítico a través de la membrana celular, lo que conduce a una

ruptura eléctrica rápida y de esta manera se producen cambios estructurales en la membrana celular, la pared celular y por tanto en el tejido de la planta. Este método está en proceso de desarrollo. (Morales de la Rosa, 2015)

2.1.3.1.2 Pretratamiento químico.

a) Ozonólisis

Es un tratamiento químico con ozono que reduce el contenido de lignina en los materiales lignocelulósicos. La degradación se limita principalmente a la lignina. La hemicelulosa queda afectada ligeramente, pero la celulosa no le afecta. Estos procesos se llevan a cabo a temperatura y presión ambiente. El inconveniente principal de la ozonólisis es que se requiere una gran cantidad de ozono y hace que el proceso sea caro. (Morales de la Rosa, 2015)

b) Hidrolisis alcalina

El tratamiento alcalino es capaz de separar tanto la hemicelulosa como la lignina, sin tener grandes efectos sobre los demás componentes. Los reactivos más utilizados son NaOH, NH₃, CaO y Ca(OH)₂, y a diferencia de los tratamientos ácidos, no necesitan temperaturas tan altas, por lo general, los tiempos de reacción son más prolongados, además no degradan tanto los azúcares

El uso de un álcali provoca la degradación del éster y cadenas laterales alterando la estructura de la lignina. De esta manera se provoca una pérdida de la cristalinidad de la celulosa y solvatación parcial de la hemicelulosa. Sin embargo, este tratamiento tiene como desventaja, que algunas bases se convierten a sus sales no pudiendo recuperarlas y algunas de estas sales pueden quedar incorporadas en la biomasa en el proceso del tratamiento. (Morales de la Rosa, 2015)

c) Organosolv

Los métodos de tratamiento “organosolv” están diseñados para fraccionar la madera en sus principales componentes. La lignina y hemicelulosa se despolimerizan y se recuperan como sólidos secos, mientras que la fracción fibrosa de la celulosa se convierte en una disolución acuosa concentrada de glucosa que se obtiene por medio de la hidrólisis enzimática.

En el proceso “organosolv”, se utiliza una mezcla de disolvente orgánico acuoso u orgánico con catalizadores ácidos (HCl o H₂SO₄), de esta manera se rompe la lignina interna y los enlaces de la hemicelulosa. Los disolventes usados comúnmente en este proceso son metanol, etanol, acetona, etilenglicol, trietilenglicol y alcohol tetrahidrofurfurilo. Otros ácidos orgánicos tales como el ácido oxálico, ácido acetilsalicílico, también pueden ser utilizados como catalizadores en este proceso. (Morales de la Rosa, 2015).

2.1.3.2 Hidrólisis ácida.

Es bien conocido que la hidrólisis ácida de biomasa lignocelulósica puede resultar una mejora en la obtención de azúcares fermentables. Ácidos tales como H₃PO₄, H₂SO₄ y HCl se han utilizado para el tratamiento de materiales lignocelulósicos. Las condiciones de concentración y temperatura son variables. De este proceso, se obtiene una fracción líquida, rica en azúcares fermentables y una fracción sólida compuesta principalmente de celulosa y lignina. El tratamiento ácido, es eficiente en la disolución de la hemicelulosa, en especial el xilano. Sin embargo, este método, no resulta efectivo para la eliminación de la lignina. Aunque son poderosos agentes para hidrólisis de la celulosa, estos ácidos concentrados son tóxicos, corrosivos y peligrosos, y por lo tanto requieren de procesos resistentes a la corrosión, lo que provoca un encarecimiento de costes.

El objetivo de la hidrólisis es romper el polímero de los polisacáridos, presentes en la fracción de sólidos insolubles en agua, que se producen en el pretratamiento. Este sólido está constituido principalmente por celulosa. En la hidrólisis, la celulosa es transformada en glucosa, esta reacción es catalizada por un ácido u enzima (celulasa) (Valencia, 2011).

La hidrólisis ácida es un proceso químico en el que se utiliza un ácido prótico que puede ser ácido sulfúrico o ácido clorhídrico para catalizar la escisión de los enlaces químicos de la hemicelulosa a través de una reacción de sustitución nucleófila con la adición de agua, este método tiene por objetivo convertir la masa viscosa obtenida en el pretratamiento en azúcares en forma de oligómeros para después

convertir los azúcares oligoméricos en azúcares monoméricos como la glucosa y xilosa (Montiel Centeno & Romero Castro, 2015)

Bajo condiciones ácidas fuertes es posible hidrolizar los enlaces de los polisacáridos a temperatura superiores a 160°C, sin embargo, los procesos comerciales típicos operan por debajo de 120°C, para minimizar la degradación de fructosa y glucosa. La glucosa y fructosa se degradan a temperaturas superiores a 106°C y un pH menor a 2. Los principales productos de degradación son 5-hidroximetilfurfural (5-HMF), el cual también se puede hidrolizar hasta degradarse a ácido fórmico y levulínico.

Es posible emplear temperaturas entre 121 y 160°C para los procesos de hidrólisis los rendimientos de la azúcar pueden ser del 70% e incluso mayores al 90% de acuerdo a las condiciones y el material. La hemicelulosa es generalmente más susceptible a la hidrólisis ácida que la celulosa, se pueden obtener rendimientos de más del 85% con una sola pequeña conversión de celulosa a glucosa.

2.1.3.3 Fermentación.

La fermentación es la etapa en la que, los azúcares monosacáridos se oxidan y se van descomponiendo hasta convertirse en etanol, esta oxidación es generada por microorganismos entre los cuales pueden resaltarse *S. Cerevissae*, *E. Coli*, etc.

El lugar donde se realiza la fermentación, es un sistema complejo en el que se conjugan una gran cantidad de parámetros físicos, químicos, bioquímicos y biológicos, estrechamente relacionados entre sí. En términos generales, el principal interés del proceso de fermentación consiste en producir la mayor cantidad de alcohol, cumpliendo algunos requerimientos especiales de seguridad, calidad, o ambientales. En el biorreactor los azúcares simples son convertidos a etanol mediante el cultivo de microorganismos en suspensión (Díaz Ch & Herrera).

2.1.3.3.1 Factores que afectan la etapa de fermentación.

La fermentación es una de las etapas de mayor importancia en el proceso de obtención de biocombustibles, en ocasiones esta se puede ver afectada por ciertos factores, reduciendo el rendimiento de alcohol y la conversión de los azúcares contenidos en líquido a fermentar entre estos factores tenemos: deficiencias nutricionales, sustancias inhibidoras.

a) Deficiencias nutricionales

La fermentación se ve afectada por la falta de nutrientes presentes en el medio permitiendo en ocasiones una fermentación lenta y de bajo rendimiento, es porque el sistema presenta deficiencia de nutrición en:

- ✓ Nitrógeno: en algunos casos las paradas o fermentaciones lentas parecen ser debidas a unos niveles insuficientes de nitrógeno asimilable por la levadura (Chiva Tomás, 2010). De modo que la cantidad de nitrógeno presente en el medio es un factor importante para un óptimo crecimiento de levaduras en el fermentador.

Se ha establecido que la cantidad mínima requerida para una fermentación normal está en torno a 120-140 mg N/L, aunque estas concentraciones dependen de las distintas cepas. El uso de nitrógeno está influido por la presencia de oxígeno y de la concentración de glucosa. Una baja concentración inicial de nitrógeno limita el crecimiento y la formación de biomasa por parte de la levadura; dando lugar a un bajo nivel de catabolismo de azúcar en levaduras (Chiva Tomás, 2010)

- ✓ Oxígeno: El metabolismo de la levadura durante la fermentación depende del oxígeno disuelto en el medio, que es rápidamente consumido. Su disminución provoca una inhibición en la biosíntesis de ácidos grasos y esteroides, disminuyéndose así la biomasa producida y la glicólisis (Chiva Tomás, 2010)

- ✓ **Minerales y vitaminas:** El ion magnesio es importante tanto para las funciones metabólicas como fisiológicas de las levaduras. Es necesario para llevar a cabo la glicólisis, ya que varios enzimas de la ruta requieren el magnesio para su actividad. Además, ayuda a mantener la integridad celular por la estabilización de los ácidos nucleicos, proteínas, polisacáridos y lípidos (Chiva Tomás, 2010)

b) Sustancias inhibidoras

Las sustancias inhibidoras principales durante la fermentación son el etanol, los ácidos grasos de cadena media y el ácido acético. El etanol inhibe el crecimiento y la viabilidad celular de las levaduras, ya que provoca diferentes efectos negativos sobre la célula como son la inhibición de permeasas de aminoácidos y del sistema de transporte de glucosa

2.1.3.3.2 Reacciones bioquímicas.

La fermentación se define como el conjunto de reacciones bioquímicas de una sustancia de origen vegetal como los carbohidratos o sus derivados por medio de ciertos microorganismos (bacterias, mohos y levaduras) y que generalmente van acompañada de un desprendimiento gaseoso y producción de energía, en 1810 Gay-Lussac, señaló que para la fermentación alcohólica es necesario la presencia de una sustancia azucarada y un fermento particular del reino animal como; bacterias, mohos y levaduras, la reacción general es representada por



Las principales responsables de esta transformación son las levaduras. La *Saccharomyces Cerevisae*, es la especie usada con más frecuencia, No obstante, para producir alcohol se utilizan hongos y bacterias, como la *Zymomonas mobilis*, pero la explotación a nivel industrial es mínima.

Aunque parece estequiométricamente, una transformación simple, la secuencia de transformaciones, para degradar la glucosa hasta dos moléculas de alcohol y dos

moléculas de bióxido de carbono, es un proceso complejo llamado glicólisis, donde las levaduras ocupan la energía producida por unas series de reacciones bioquímicas para su reproducción y funcionamiento.

En la glicólisis hay tres reacciones que constituyen puntos de control. La primera es la reacción de la glucosa para producir glucosa 6-fosfato catalizada por la hexoquinasa; la segunda es la producción de Fructosa-1,6-bisfosfato, es catalizada por la Fosfofructoquinasa y la última es la reacción que permite la conversión de fosfoenolpiruvato a piruvato, catalizada por la piruvato quinasa.

Las hexoquinasa presentan características, reguladoras, siendo los reguladores uno de los sustratos y dos de los productos de la reacción: ATP, ADP y Glucosa 6-fosfato (G6P) respectivamente. Cuando el consumo de energía es alto el aumento de ADP activa a la hexoquinasa y aumenta la velocidad de movilización de glucosa para ir al mismo paso con la demanda por mas ATP. Cuando el consumo de energía declina el nivel intracelular de Glucosa 6-fosfato (G6P) se incrementa en respuesta a una menor demanda de energía.

La elevación del nivel de ATP y G6P inhibe el funcionamiento de la hexoquinasa y disminuye la movilidad de la glucosa, dando lugar al primer control de la vía glucolítica.

La piruvato quinasa es la enzima que cataliza la última reacción o el tercer punto de control de la vía glucolítica. Es una enzima aldostérica que se inhibe en presencia de ATP. La conversión de fosfoenolpiruvato a piruvato se hace más lenta cuando la célula tiene alta concentración de ATP, es decir cuando la célula no tiene gran necesidad de energía en forma de ATP (Galvis Jacome, 2009), tal y como se muestra en la figura 2.20.

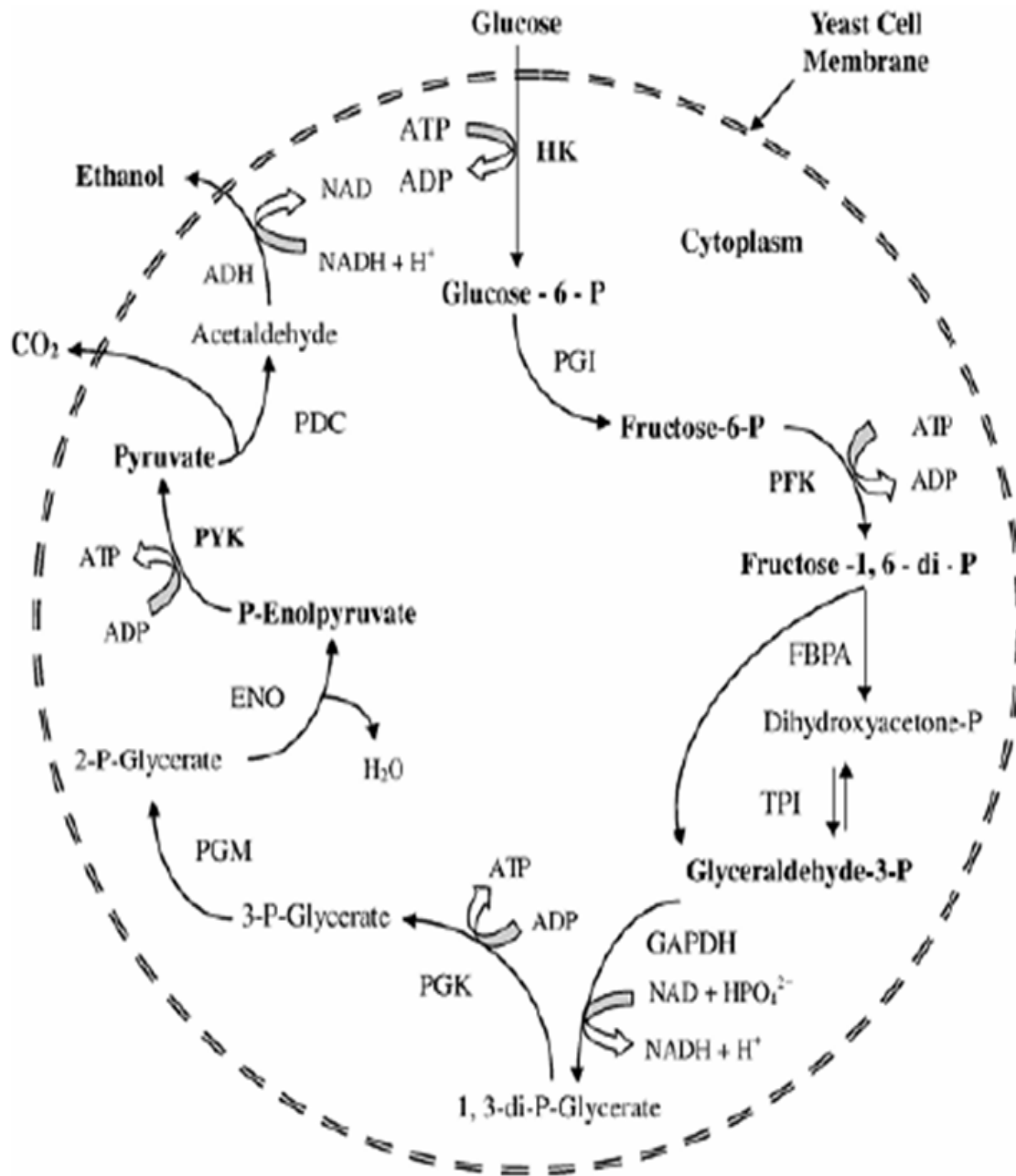


Figura 2.20. Ruta metabólica para la fermentación y producción de etanol empleando *S.cerevisiae*. abreviaturas: HK: Hexoquinasa; PGI: Glucosa fosfato isomerasa; PFK: Fosfofructoquinasa; FBPA: Fructosa bifosfato aldolasa; TPI: Triosa fosfato isomerasa; GAPDH; Gliceraldehído 3-fosfato deshidrogenasa; PGK: Fosfoglicerato quinasa; PGM: Fosfogliceratomutasa; ENO: Enolasa; PYK: Piruvato quinasa; PDC: Piruvato decarboxilasa; ADH: Alcohol deshidrogenasa (Galvis Jacome, 2009)

2.1.3.3.3 Tipos de Fermentadores.

a) **Unidad básica de fermentación con agitación mecánica**

Este equipo presenta las características de un biorreactor donde puede haber crecimiento de células o tejidos, el proceso puede ser aeróbico o anaeróbico, en la fermentación de los azúcares a bioetanol, esto depende del aprovechamiento de CO₂ obtenido en la reacción de glicolisis.

En la figura 2.21 podemos observar que esta unidad cuenta con una jarra de vidrio borosilicato esterilizable, se pueden fabricar jarras desde 1L hasta 15 L. Y éstas pueden ser enchaquetadas para controlar la temperatura con un baño recirculador o sin chaqueta para controlar la temperatura con manta de silicón.



Figura 5.21. Fermentador básico con agitación mecánica

La tapa es fabricada en acero inoxidable de 3/8 de espesor con nueve puertos de acero inoxidable con tapones del mismo material en los que puede adaptarse sin problema electrodo de PH, electrodo de oxígeno disuelto, burbujeador, entradas y salidas para dosificación de base y ácido, gases, antiespuma, termopozo; de una forma segura y delicada con sus aditamentos de PTFE y silicón para alta temperatura.

b) fermentador agitado por aire tipo Air-Lift

En el proceso de fermentación es de importancia la distribución uniforme de las levaduras o hongos, debido a que una mala distribución de estas, afecta significativamente el porcentaje de conversión de los azúcares a bioetanol, he aquí la importancia de este tipo de fermentador. Este fermentador induce la circulación del líquido y gases logrando con ello una excelente mezcla. Esta jarra puede ocuparse tanto para productos aeróbicos como para productos anaeróbicos, como en el estudio de aguas residuales. En la figura 5.22. Se ilustra el equipo tipo Air-Lift.



Figura 2.22. Fermentador con agitador tipo Air-lift.

El equipo consiste en una jarra externa con dos diámetros, que puede ser enchaquetada para trabajar con baño recirculador o sin chaqueta para que se use en cuartos con temperatura controlada y un tubo interno “bafle” que distribuye en la parte interna el flujo de gas para que éste agite la muestra en forma delicada y uniforme.

c) Fermentador Planta piloto

Este equipo es similar a los fermentadores con agitación mecánicas, la diferencia está en las dimensiones del equipo, un fermentador tipo planta piloto cuenta con mayor capacidad volumétrica y se diseña de acuerdo a las características únicas del proceso.

En el proceso de fermentación de azúcares a bioetanol, es de importancia que un fermentador este equipado con una unidad de homogenización, la cual permite una distribución uniforme de las levaduras, de igual manera elimina zonas muertas en el equipo permitiendo optimizar el proceso. De igual forma se debe controlar el pH y temperatura, por lo cual el fermentador debe de tener un electrodo con la capacidad de medir estas condiciones.

Estas condiciones se controlan utilizando un controlador, que es el encargado de dosificar las cantidades de ácido o base para mantener el pH adecuado para la fermentación. La temperatura se controla de igual manera utilizando un controlador de flujo de calor. En la figura 2.23 se muestra un fermentador tipo planta piloto.



Figura 2.23. Fermentador tipo planta piloto

2.1.3.3.4 Microbiología de la fermentación.

Durante la fermentación alcohólica las células de levaduras están expuestas a condiciones adversas o de estrés provocadas por el cambiante medio exterior, algunas hacen referencia al medio ambiente en el que se encuentran las mismas, incluyendo las altas temperaturas, limitaciones de nitrógeno o fuentes de carbono, deficiencia de nutrientes y contaminación. La capacidad para tolerar diversas condiciones suele ser uno de los criterios más importante para la selección de cepas que permitan una eficiente fermentación y producción de bioetanol.

Existen condiciones de estrés en el metabolismo celular debido a la acumulación de etanol y su correspondiente inhibición en el crecimiento de las células de levadura.

La membrana citoplasmática es la única barrera entre el citoplasma intracelular y el medio exterior.

Esta desempeña una importante función ayudando a la célula en su lucha contra los efectos de etanol y de la acidez del medio que le rodea. Esta membrana por sí sola no es permeable a macromoléculas o iones con excepción de los protones (H^+). La acumulación de etanol en el medio de fermentación, interacciona con el funcionamiento de la membrana plasmática al ser la interfaz entre el medio y la parte interna de la célula.

El principal efecto de etanol es hacer que la membrana permita el paso de protones e inhibir la actividad de la bomba de protones ATPasa, la cual se encarga de mantener la homeóstasis del pH de la célula de levadura. Por lo tanto, las células se encuentran en la obligación de consumir más energías para mantener la homeóstasis de pH, hasta que el equilibrio entre la entrada pasiva de electrones y su expulsión por la actividad de la bomba de protones ATPasa no puede ser mantenido dando lugar a la muerte de la célula. (Galvis Jacome, 2009).

2.1.3.4 Destilación.

Es una operación de separación que se utiliza a nivel industrial, esta se basa en separar mezclas homogéneas de líquidos por medio de sus diferentes puntos de ebullición y así separar dos fases una líquida y otra gaseosa que es condensada.

2.1.3.4.1 Destilación industrial.

La destilación a nivel industrial es una operación unitaria molecular de separación basada en la volatilidad de los compuestos, tomando en cuenta la transferencia de energía y la transferencia de masa entre sí, esta operación se produce en los equipos llamados torres de destilación.

Las torres de destilación se diseñan de acuerdo a las características del proceso, o a las propiedades de la mezcla a separar, debido a estos, dos parámetros se define cuanta energía (calor) debe suministrarse o retirarse al equipo, con cuantos intercambiadores de calor estará equipada la torre, definir los flujos de entrada o salida de la torre para obtener un proceso estable y óptimo.

2.1.3.5 Purificación.

Luego del proceso de destilación de la mezcla fermentada sigue el proceso de purificación del bioetanol, debido a que las cantidades de agua contenida en el bioetanol producen una reacción de oxidación que afecta el buen funcionamiento de los motores, disminuyendo la capacidad de combustión del bioetanol y reduciendo la vida útil del motor, de modo que el bioetanol al 95 % obtenido en la etapa de destilación debe someterse a un proceso de purificación.

Este consiste en someter el bioetanol al 95 % a un proceso de adsorción donde el bioetanol desciende a través de unos tanques equipados con tamices moleculares, contruidos de un material con alta capacidad de adsorción donde el agua restante contenida en el bioetanol proveniente de la etapa de destilación, es captado por las moléculas del material adsorbente quedando ligadas a los tamices, obteniendo como producto final bioetanol al 99.5%, puesto que el etanol carburante debe de tener una alta pureza para evitar oxidación en los motores, de este parámetro depende la calidad que tendrá el bioetanol y el desempeño como combustible.



Figura 2.24. Equipo de purificación de bioetanol a escala piloto

2.1.4 Combustibles.

2.1.4.1 Consumo mundial de los combustibles.

El consumo de combustible está en función del desarrollo del país, debido que, al poseer mayor cantidad de industrias y enormes números de habitantes, esto genera un incremento de mayor amplitud, ya que las personas se movilizan utilizando vehículos que funcionan con gasolina de modo, que entre más ciudades desarrolladas tenga un país mayor será su consumo.

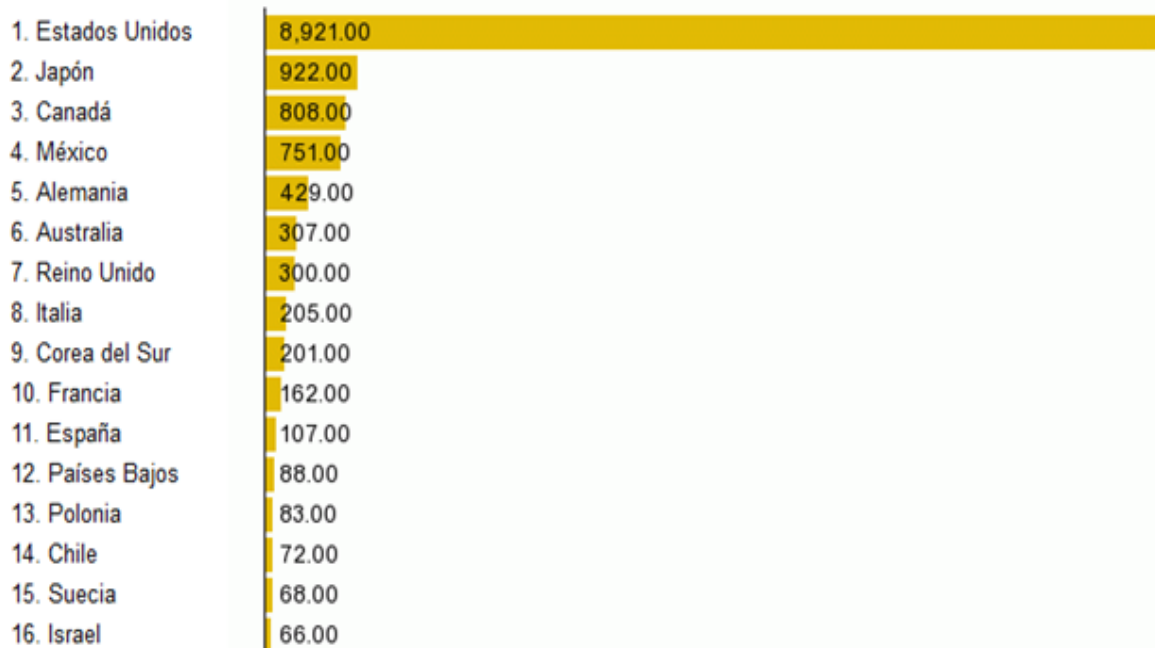


Figura 2.25. Consumo mundial de combustibles (millones de barriles por año) (Global petrol prices, 2018).

En la Figura 2.25 se presentan los países que tienen mayor índice (millones de barriles por año) de consumo de combustibles, es importante mencionar que Nicaragua no aparece entre esta lista de países ya que el consumo de Nicaragua no excede los 10 millones de barriles por año.

2.1.4.2 Consumo Nacional de combustible.

El crecimiento demográfico, el incremento de la actividad económica, la llegada de más remesas familiares y mayor facilidad en el acceso al crédito para vehículos son factores que empujan al incremento del consumo de combustible en los últimos años (González Álvarez, 2016).

El aumento del consumo de combustibles en Nicaragua en los últimos años presenta una tendencia al crecimiento, en el año 2014 el consumo fue de 2,051,200 barriles de gasolina y para el año 2015 el consumo fue de 2,337,400 barriles según (Guerrero, 2016), de acuerdo con las estadísticas del banco central de Nicaragua

(BCN), desde enero hasta agosto del año 2016 los nicaragüenses consumieron 12.12% más gasolina en comparación con el mismo lapso del 2015. (González Álvarez, 2016). En la figura 2.26 se muestra la evolución del consumo de gasolina en Nicaragua.

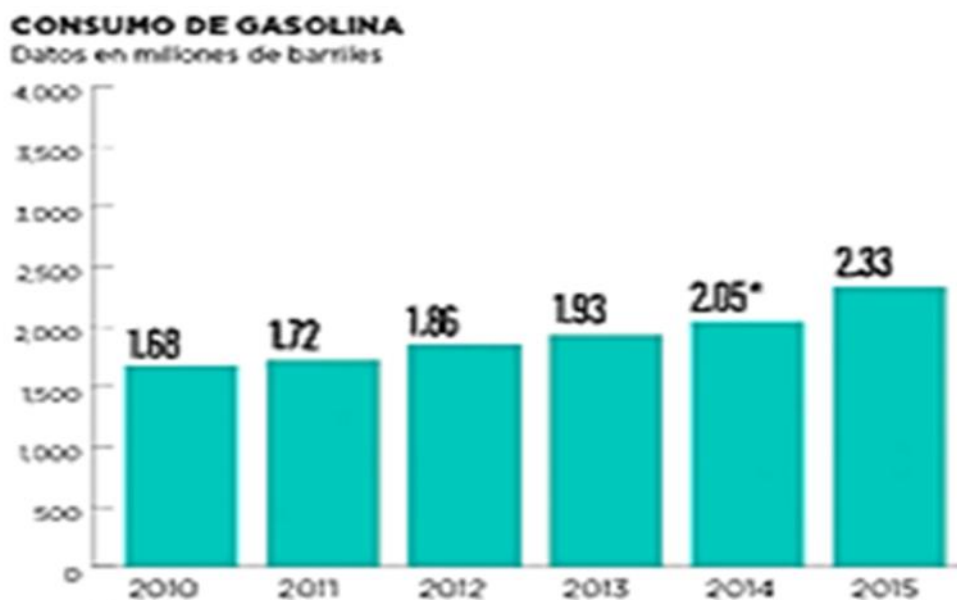


Figura 2.26. Tendencia de consumo de combustibles en Nicaragua (Guerrero, 2016)

2.1.4.3 Precios de los combustibles.

El precio medio de la gasolina en todo el mundo es de 1.19 (U.S. Dollar) por litro. Hay una diferencia sustancial en estos precios entre los diferentes países, como regla general, los países más ricos tienen los precios más altos, mientras que los países más pobres y los países que producen y exportan petróleo tienen precios significativamente más bajos.

Una excepción es los E.E.U.U, un país económicamente avanzado con los bajos precios de gasolina. La diferencia entre países se debe al sinnúmero impuestos y subsidios para la gasolina. Todos los países tienen acceso a los mismos precios del petróleo en los mercados internacionales, pero se imponen varios impuestos. Como resultado, los precios de la gasolina son diferentes (Global petrol prices, 2018).

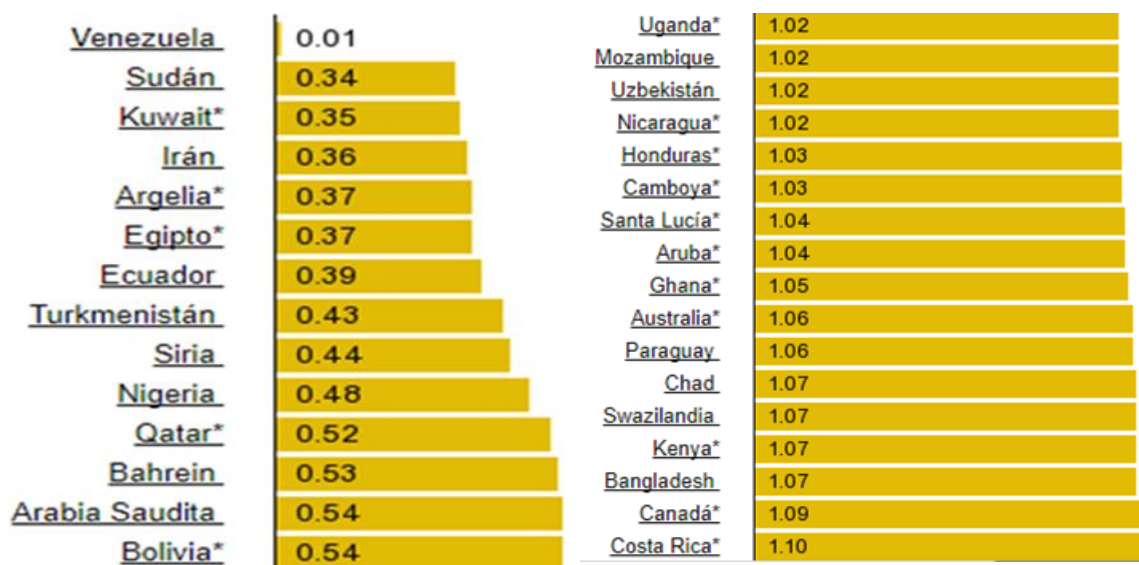


Figura 2.27. Precios internacionales de los combustibles (Global petrol prices, 2018)

2.2. Antecedentes

En el año 2014 Y. C. Wong y V. Sanggari de la universidad de Kelantan Malaysia, facultad de agroindustria alimentaria, elaboraron un trabajo con el tema: **“Producción de bioetanol de bagazo de caña de azúcar mediante proceso de fermentación”** el cual fue publicado en la revista “Oriental Journal of Chemistry (diario oriental de química)”. El trabajo consistió en obtener bioetanol a partir de la caña de azúcar y determinar el efecto del pH y la temperatura en el rendimiento de bioetanol; usaron enzimas como alfa amilasa y glucoamilasa, las cuales, descomponen la celulosa contenida en el bagazo, también, utilizaron en el experimento de fermentación la levadura (*saccharomyces cerevisiea*).

Prepararon cinco muestras a diferente pH, esto para determinar los efectos del pH en el rendimiento del etanol, manteniendo una temperatura de 37°C y otras muestras para determinar el efecto de la temperatura en el rendimiento del etanol con un pH constante de 4.5. las concentraciones de bioetanol fueron determinadas por (HPLC); los resultados mostraron que la mayor concentración de etanol fue obtenida con un pH de 4.5 y una temperatura de 35°C.

En el año 2015 Soha R. A. Khalil, A.A. Abdelhafez, E. A. M Amer de la facultad de agricultura de la universidad Ain Shams, el Cairo, Egipto llevaron a cabo una investigación: **“Evaluación de la producción de bioetanol a partir del jugo y el bagazo de algunas variedades de sorgo dulce”**. El estudio consistió en evaluar la explotación del jugo y el bagazo de cinco variedades de sorgo dulce, para la producción de bioetanol; las variedades de sorgo dulce fueron: GK-coba, Mn-1054, Ramada, MN-4508 y SS-301, estas se analizaron por su productividad y el contenido de azúcar y fibra.

Ellos utilizaron dos variedades de microorganismos (*Saccharomyces cerevisiae* ATCC 7754 y *Zymomonas mobilis* ATCC 29191). Los tallos de las variedades GK-coba, Mn-4508 y SS-301 tenían un alto contenido de azúcar y se emplearon para la producción de bioetanol directamente del jugo. Los tallos de las variedades Mn-1054, Ramada y SS-301 poseían un mayor contenido de fibras, su bagazo fue usado para la elaboración de bioetanol. El bagazo fue pre tratado e hidrolizado termoquímicamente con 2% (v/v) de ácido sulfúrico al 98% a 120°C por 60 min y filtrado; por otra parte, el jugo rico en azúcar fue filtrado, neutralizado y complementado con nutrientes para la producción de bioetanol.

La fermentación del sorgo dulce o el hidrolizado ácido del bagazo hidrolizado a bioetanol fue efectuada por una mezcla de ambos organismos o mezclado de culturas (*Sacch. Cerevisae* y *Z. mobilis*) a una proporción 1:1. La más alta producción de etanol fue obtenida del jugo y el bagazo de la variedad SS-301, por el tratamiento de culturas mezcladas. Del jugo, la concentración de bioetanol fue 50.26 mL L⁻¹, mientras que, a partir del bagazo, la concentración de bioetanol fue de 10.5 mL L⁻¹. Finalmente, se podría estimar que se pueden producir 160mL de bioetanol por cada kg de la variedad SS-301, cuando se usan tanto el jugo y el bagazo.

En el año 2015 en Quito, Ecuador, en la Escuela Politécnica Nacional, facultad de ingeniería química, en los laboratorios de operaciones unitarias. Albarracín K.; Jaramillo L. y Albuja M. efectuaron un estudio con el tema “obtención de bioetanol anhidro a partir de paja (*Stipa lchu*)”. El cual tuvo como finalidad obtener bioetanol

de concentración igual al 99.6 % v/v a partir de paja ***Stipa ichu***. En donde se caracterizó la materia prima obteniendo como resultado la siguiente composición en base seca (45.9 % celulosa, 18.2 % lignina, 5.5 % pentosanos y 5.6 % cenizas).

La humedad en base seca fue igual a 57.7% y el contenido de ceras, resinas y grasas igual a 6.7 %). La materia prima se sometió a hidrólisis ácida, como resultado se determinaron las mejores condiciones para la hidrólisis (concentración de ácido sulfúrico de 8 % w/w y tiempo de reacción de 6 horas), alcanzando un rendimiento de 0.41 gramos de azúcares reductores por cada gramo de paja hidrolizada, donde emplearon una relación (sólido/líquido de 50 g de paja por cada litro de solución ácida).

El producto se sometió a fermentación alcohólica, donde obtuvieron un rendimiento de (0.46 g etanol/g azúcares reductores). El fermentado lo destilaron y rectificaron hasta alcanzar una concentración cercana al 85 % de etanol w/w; luego fue sometido a destilación extractiva empleando glicerina como agente de separación. Lograron obtener bioetanol anhidro en los ensayos de destilación extractiva empleando una relación molar glicerina: etanol igual a 3:1.

Ese mismo año en la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua Montiel Kiara y Romero Leticia trabajaron la monografía con el tema: “**Obtención de bioetanol a partir de la coronta de maíz variedad HS-5, por el método hidrolisis ácida diluida-fermentación separada**”. Caracterizaron la coronta de maíz según los procedimientos de la norma TAPPI; obteniendo que la coronta posee (0.2020% de humedad, 0.1140% de cenizas, 0.3627% de extractivos totales, 36.7052% de celulosa, 19.7272% de lignina y 43.5676% de hemicelulosa).

Con el diseño experimental Taguchi determinaron las combinaciones y optimización de variables para la hidrolisis y fermentación, de lo cual obtuvieron que para la etapa de hidrolisis (20g de celulosa, 7% concentración de ácido sulfúrico, 1.5 horas y 100°C). cuantificaron azúcares reductores totales mediante el método espectrofotométrico DNS obteniendo una respuesta de 38%. En el proceso de fermentación determinaron que (12% para la masa de levadura y 8 día, para el

tiempo de fermentación). Efectuando un análisis cromatográfico obtuvieron que el bioetanol poseía un 24% de conversión y 30% de rendimiento para el proceso general.

Dos años más tarde Malagón Martha y Zabala Diego; en la Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia se efectuó un estudio acerca de la **“Evaluación de la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos generados en una industria de producción de pulpa de fruta”**.

Los residuos fueron sometidos a un pretratamiento con hidróxido de sodio y una hidrólisis empleando la enzima Multifect B; determinaron la cantidad de azúcares reductores mediante el método DNS; emplearon una cepa etanólica para el proceso de fermentación; realizaron una destilación simple, y determinaron el bioetanol por el método de dicromato de potasio.

Sus resultados determinaron que, la mezcla de residuos de lulo(Naranja)-limón fue la de mayor concentración de azúcares reductores, con (2.08 g glucosa/L mezcla) y un rendimiento de (9.22 g bioetanol/kg de residuos). El rendimiento producto/sustrato fue de (0.87 g bioetanol/g glucosa en promedio).

En ese mismo período de tiempo, Malagón Martha, Garay Carlos y Peña Natalia; en la revista “semilleros formación investigativa” de la Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. Presentaron un trabajo titulado **“Obtención de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos”**. Los residuos fueron (frutas, hojas y tallos de plantas como material lignocelulósico, además de almidones).

Dichos residuos fueron pre tratados para, separar la lignina. De la celulosa y hemicelulosa obtuvieron azúcares reductores por medio de una hidrólisis (ácida, básica o enzimática). Los azúcares fueron llevados a un proceso de fermentación con cepas de levaduras. La mayor cantidad de bioetanol obtenida fue de 200 mL/Kg de cáscaras de naranja.



2.3 Preguntas directrices

¿Es de importancia conocer las propiedades fisicoquímicas (hemicelulosa, celulosa, humedad) del bagazo de caña para la obtención de bioetanol?

¿Por qué es importante realizar un análisis de las conversiones en los procesos de hidrólisis y fermentación?

¿Conocer las condiciones óptimas del proceso de obtención de bioetanol ayudara a obtener mayor cantidad de bioetanol?

Capítulo III



3.1 Diseño metodológico

3.1.1 Descripción del ámbito de estudio.

La revisión bibliográfica para el estudio de la obtención de bioetanol a partir de bagazo de la caña de azúcar, se realizó en la biblioteca virtual de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua; así mismo se tomó en cuenta las revistas internacionales u otros trabajos los cuales son de relevancia para la investigación.

3.1.2 Tipo de estudio.

El trabajo presenta un estudio de tipo mixto, descriptivo analítico donde se describe el proceso de obtención de bioetanol a partir del bagazo de caña de azúcar, y se analiza las propiedades del bagazo, rendimiento de los productos y la conversión de la materia prima.

3.1.3 Población y muestra.

3.1.3.1 Población.

La población es el bagazo producido en los trapiches que se encuentran en el municipio de Santa Teresa, Carazo.

3.1.3.2 Muestra.

La muestra de bagazo se tomará en el trapiche del señor Alberto Morales, ubicado en la comunidad los castillos del municipio Santa Teresa.

3.1.3.2.1 Criterios de inclusión.

- ✓ Frescura del bagazo.
- ✓ Variedad.

3.1.3.2.2 Criterios de exclusión.

- ✓ Bagazo con varios días al sol.
- ✓ Bagazo afectado por plagas.

3.1.4 Identificación de variables.

3.1.4.1 Variables dependientes

- ✓ Porcentaje de azúcar (%)

3.1.4.2 Variables independientes

- ✓ Concentración de ácido
- ✓ Temperatura de hidrolisis
- ✓ Tiempo de hidrolisis

Tabla 3.1. indentificación de variables		
Variables dependientes		
Variable	Concepto	Indicadores
Porcentaje de azúcar	Concentración de azúcares producidas de la muestra hidrolizada	$\%(\text{CH}_2\text{O})_n$
Variables independientes		
Concentración del ácido sulfúrico(H_2SO_4)	Porcentaje de ácido en ml presente en una solución a utilizar para la etapa de hidrolisis	Porcentaje de ácido []
Temperatura de hidrolisis	Cantidad de energía calorífica a la que se realizara la etapa de hidrolisis ácida.	Grados Celsius(C^0)
Tiempo de hidrolisis	Lapso de tiempo en el cual las partículas de bagazo de caña serán hidrolizadas	horas
Cantidad de materia prima (bagazo de caña)	Masa en gramos de muestra de bagazo de caña previamente tratado para reducir su tamaño	masa

3.1.5 Materiales y métodos.

3.1.5.1 Materiales para recolectar información.

Para la elaboración de este documento se llevó a cabo revisión bibliográfica, fundamentada en investigaciones sobre el tema de interés, artículos científicos, tesis de grado, libros de textos, etc. Los cuales sustentan la investigación. De cada uno de los materiales anteriormente mencionados, se elaboraron resúmenes.

3.1.5.2 Materiales para procesar información.

Para poder procesar la información y los datos presentes se hizo uso de herramientas básicas como:

- ✓ Microsoft Word: herramienta para la elaboración, edición y procesamiento de información.
- ✓ Foxit Reader: software que permite la lectura de pdf, garantizando una fácil movilización a través del documento.

3.1.5.3 Método

Se tomarán en cuenta métodos certificados, aceptados y aprobados, por organismos internacionales como: AOAC, TAPPI, entre otros. Por otro lado, se podrían utilizar métodos estadísticos que permitan un trabajo eficiente en cada una de las experimentaciones.

La obtención de bioetanol se realizaría por el método de hidrólisis ácida diluida, fermentación separada y posteriormente se determinaría el % de etanol obtenido por cromatografía gaseosa. Para calcular la conversión y rendimiento de los azúcares totales a celulosa es necesario conocer algunas características de la materia prima tales como: porcentaje de celulosa, en el cual, se utiliza el método de kurschner Hoffer.

El porcentaje de lignina se determina utilizando el método especificado por la Asociación Técnica de la Celulosa y el Papel (TAPPI 222 om-88), para la determinación del porcentaje de azúcares totales, se utilizará el método de Miller (DNS) y posteriormente, se calcula la conversión de azúcares a bioetanol y el rendimiento del bioetanol.



Capítulo IV



4.1. Análisis de resultados

4.1.1. Propiedades físico químicas del bagazo, de caña de azúcar.

La composición del bagazo se compone por Celulosa, polisacárido estructural de todo el reino vegetal; este compuesto es considerado el más abundante e inagotable en la tierra, ya que, esta se renueva continuamente con la fotosíntesis, además de Hemicelulosa, Lignina y otros. Para el estudio de obtención de biocombustibles a partir del bagazo de caña de azúcar es importante conocer la composición de la materia prima. En la Tabla 9.1 se muestran los resultados de la composición química del bagazo en el proceso de obtención de azúcar.

Tabla 4.1.

Composición química del bagazo

Bagazo caña azúcar	(Abril & Navarro, 2012)	(Valencia, 2011)	(Chandler, 2012)	(Fernández, & Macedo, 2014)
Celulosa	43 - 47	35.7	62. 25	65.03 ± 2.34
Hemicelulosa	28 – 32	20.7	7. 99	10.95 ± 0.19
Lignina	20 – 22	17	12. 49	8.12 ± 0.31
Extractivos	2.5 – 3.0	23	17. 88	10.08 ± 0.58
Cenizas	1.5 – 2.5	3.1	-	-

En la tabla 4.1. se observa que el porcentaje de celulosa reportado en la investigación de (Fernández, & Macedo, 2014) es el doble en comparación con los datos presentados por (Valencia, 2011), esta diferencia puede ser causada por el tipo de pretratamiento; en la investigación de (Fernández, & Macedo, 2014) la materia prima (bagazo) es sometido a distintos pretratamiento, el valor expresado en la Tabla 4.1 corresponde al pretratamiento ácido-alcalino, reportando 65.03% mientras en la investigación de (Valencia, 2011) la materia prima carece de

pretratamiento químico, obteniendo como resultado de la cuantificación de celulosa 35.7%, siendo este el %celulosa más bajo de ambas investigaciones.

Sin embargo en el porcentaje de Hemicelulosa registrado por (Valencia, 2011) es dos veces más alto que el valor reportado por (Fernandes, & Macedo, 2014), cabe mencionar que el porcentaje de hemicelulosa puede variar debido al pretratamiento ácido-alcalino utilizado por (Fernández, & Macedo, 2014) luego del pretratamiento la muestra se somete a un secado, con la posibilidad de pérdida de materia, además la composición química del bagazo estará directamente relacionada con la variedad de la caña de azúcar.

Con respecto a los resultados del % de Celulosa registrados por (Fernández, & Macedo, 2014) son aproximados con los registrados por (Chandler, 2012), con una diferencia mínima entre los valores reportados. Esta diferencia mínima, se debe a que el proceso del experimento es similar, ambos procesos constan de un pretratamiento de materia prima, siendo esto el origen de la similitud en los resultados de ambas investigaciones.

Los resultados de % de celulosa en el bagazo, de la investigación realizada por (Abril & Navarro, 2012) al compararlo con los obtenidos por, (Fernandes, & Macedo, 2014), (Chandler, 2012) se observa que los % de celulosa son menores, estos valores están en los rangos de las propiedades químicas que encontraron en el "Atlas Anatómico y morfológico del bagazo de caña. Diversificación, GEPLACEA/PNUD". Estos son lo más comunes en la caracterización de las distintas variedades de caña.

Se observa que los datos registrados por (Valencia, 2011), los extractivos son mayores 10 veces que los reportados por (Abril & Navarro, 2012), se infiere que, la extracción del jugo de caña en el proceso de elaboración de panela (dulce artesanal), es menos eficiente que en el proceso de elaboración de azúcar, por lo cual, presenta mayor cantidad de azúcares. Los que son aprovechados en la producción de bioetanol.

Cabe resaltar que en la estructuración y contenido de la caña de azúcar; influyen factores como la siembra, crecimiento, maduración y corte, además: la variedad de caña, tipo de suelo, el mantenimiento y control a los cultivos, quema antes del corte, almacenamiento, etc.

4.1.2. Conversión a azúcares.

Tras el rompimiento de los polímeros (celulosa y hemicelulosa) en la hidrólisis ácida, se obtienen los principales azúcares estructurales presentes en los polisacáridos; tales como la glucosa, xilosa, arabinosa, manosa, etc. En los hidrolizados de una hidrólisis ácida diluida, las concentraciones de glucosa son generalmente de 30 g/L y xilosa 15 g/L, estos deben someterse a una evaporación al vacío, para concentrar los azúcares. En la tabla 4.2 se presenta los resultados obtenidos de % de conversión de celulosa a glucosa.

Tabla 4.2.

% de conversión de la Celulosa a Glucosa

Investigación	(Valencia, 2011)	(Domínguez, Mayo de 2011)	(Fernández, & Macedo, 2014)	(Chandler, 2012)
% Conversión	11.73 %	4.18 %	85.15 %	10.78 %

Se observa una diferencia entre los datos reportados por (Fernandes, & Macedo, 2014) y los datos suministrados por (Domínguez, Mayo de 2011) siendo el porcentaje de conversión de (Fernandes, & Macedo, 2014) 20 veces mayor, probablemente se deba a amplias variaciones en el proceso, por ejemplo (Domínguez, Mayo de 2011) realiza una hidrólisis ácida sin pretratamiento alguno, reduciendo el área de contacto entre las partículas de la materia prima y el ácido, por el contrario (Fernández, & Macedo, 2014) utiliza un pretratamiento ácido-alcalino que mejora las condiciones de hidrólisis, cabe resaltar que la diferencia en los resultados de conversión de celulosa, es producto de la hidrólisis enzimática utilizada, más un pretratamiento que mejora las condiciones de hidrólisis, dando como resultado altos rendimientos de azúcares.

Según los resultados presentados por (Valencia, 2011) y (Chandler, 2012), se observa que hay una similitud entre estos valores, ya que la diferencia entre ellos es de 0.08 veces. Ambos investigadores utilizan un pretratamiento de la materia prima, reduciendo de tamaño del bagazo, generando mayor contacto entre el material celulósico y el ácido, también utilizan el mismo proceso de hidrólisis (hidrólisis ácida- diluida) (Chandler, 2012) en dos etapas, en la segunda etapa se aumenta la temperatura manteniendo la concentración del ácido al 1% en una relación 15:1 líquido-sólido, permitiendo la conversión de la hemicelulosa, registrando 41.68%.

El rendimiento de glucosa está relacionado con la conversión de la celulosa, esta se expresa como la cantidad producida de glucosa por 1 kg de bagazo. Los resultados de rendimiento presentados se muestran en la tabla 9.3, este valor determina la viabilidad del proceso.

Se observa en la tabla 4.3 la diferencia que existe entre los valores reportados por (Fernandes, & Macedo, 2014) son mayores a los de (Domínguez, Mayo de 2011), la diferencia porcentual entre estos dos valores es de 93 %, esta diferencia es ocasionada por los procesos de pretratamiento e hidrólisis, el rendimiento está relacionado a la conversión de celulosa a azúcares. De modo que, para un proceso de pretratamiento e hidrólisis enzimáticas, los rendimientos y conversión son mayores que un proceso sin pretratamiento.

Tabla 4.3.

Rendimiento de glucosa a partir de bagazo

azúcares	(Valencia, 2011)	(Domínguez, Mayo de 2011)	(Fernández, & Macedo, 2014)	(Chandler, 2012)
Glucosa	144.93 g/ Kg bagazo	30g/Kg de bagazo	458 g/Kg de bagazo	224 g/ kg de bagazo

Al comparar los rendimiento reportados por (Chandler, 2012), de 224 g/ kg de bagazo y, (Fernandes, & Macedo, 2014) de 458 g/Kg de bagazo se observa que

existe una diferencia significativa, sin embargo esta diferencia es menor comparándola con otros emparejamiento de datos reportados en la tabla 9.3, esta diferencia es causada por la etapa de hidrolisis, ya que (Fernandes, & Macedo, 2014) utiliza una hidrolisis enzimática y (Chandler, 2012) utiliza una hidrolisis ácida diluida en dos etapas. Los procedimientos utilizados por (Fernandes, & Macedo, 2014) utilizaron un pretratamiento de tipo ácido-alcalino, en cambio (Chandler, 2012) utiliza un pretratamiento de reducción de tamaño y tamizado.

4.1.3. Conversión a bioetanol.

Los azúcares obtenidos en la etapa de hidrolisis, son transformados el proceso de fermentación por medio de reacciones bioquímicas, el sustrato se fermenta siguiendo la ruta metabólica para la producción de bioetanol empleando levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Es importante conocer el comportamiento de las reacciones bioquímicas, estas proveen información sobre los rendimientos de los productos.

Se empleada la Glicólisis como ruta metabólica bajo condiciones anaeróbicas en la etapa final de la Glicólisis el piruvato es reducido a etanol con la liberación de CO_2 . Teóricamente el rendimiento (mol/mol) es de 0.511 y 0.489 para etanol y CO_2 respectivamente a partir de un mol de glucosa metabolizado.

Utilizando el rendimiento teórico de etanol a partir de glucosa es posible calcular los valores de rendimiento de etanol por Kg de bagazo. En la tabla 9.4 se muestran los rendimientos de etanol por Kg de bagazo, utilizando los valores de glucosa reportados en diferentes trabajos de investigación. El procedimiento de los cálculos realizados se muestra en el anexo 2.

Tabla 4.4.

Rendimiento de etanol a partir de bagazo.

investigación	(Valencia, 2011)	(Domínguez, Mayo de 2011)	(Fernández, & Macedo, 2014)	(Chandler, 2012)
Etanol	37.77 g/ Kg bagazo	7.82 g/Kg de Bagazo	119 g/Kg de bagazo	58.38 g/ kg de bagazo

Nota: los cálculos se realizaron utilizando el rendimiento teórico del etanol a partir de glucosa, en un proceso de fermentación con levadura Saccharomyces cerevisae

4.1.4. Condiciones óptimas del proceso de hidrólisis.

El rendimiento de bioetanol en el proceso de transformación del bagazo es afectado por las condiciones operacionales del proceso, mediante la comparación de la información recopilada de trabajos anteriores, se sugiere un conjunto de condiciones, que mejoren la operación del proceso tecnológico.

Tabla 4.5.

Condiciones de pretratamiento

Investigadores	pretratamiento	T(°C)	Tiempo (min)	Especificaciones
(Domínguez, Mayo de 2011)				Sin pretratamiento
(Chandler, 2012)	Reducción de tamaño	30-35	NE	NE
(Fernández, & Macedo, 2014)	Alcalino	121	30	El bagazo se sumerge en una solución de NaOH (4% p/p)
(Narkprasom, 2013)	Reducción de tamaño	30-35	NE	NE
	Alcalino	121	25	El bagazo se sumerge en una solución de NaOH (15% p/p)

En la tabla 4.5. se compara las condiciones de operación del pretratamiento y los rendimientos de glucosa por Kg de bagazo, el pretratamiento utilizado por (Fernández, & Macedo, 2014) produce mayor cantidad de glucosa a partir de bagazo, se observa la diferencia de implementar un pretratamiento al comparar los resultados de (Fernández, & Macedo, 2014) y (Domínguez, Mayo de 2011).

El uso de un pretratamiento mejora el contacto de la materia prima con los reactivos, que provoca el rompimiento de los enlaces en la etapa de hidrólisis. El proceso de la hidrólisis es una de las etapas esenciales para la obtención de bioetanol, las condiciones operacionales destacadas por diferentes investigadores se muestra en la tabla 9.6. se muestran las condiciones operacionales de (Fernández, & Macedo, 2014) presenta un resultado con altos rendimientos, sin embargo, se observa que el tiempo es mayor en comparación con las otras investigaciones.

Tabla 4.6.
Condiciones de Hidrolisis

Investigadores	Tipo de Hidrólisis	T(°C)	Tiempo (min)	Especificaciones	Rendimiento
(Domínguez, Mayo de 2011)	Hidrolisis acida diluida	45-60	60-90	$[H_2SO_4] = 2\% - 4\%$	30 g de glucosa/Kg de bagazo
(Chandler, 2012)	Hidrolisis acida diluida Etapa 1	140	3	$[H_2SO_4] = 1\%$	224 g de glucosa/Kg de bagazo
	Hidrolisis acida diluida Etapa 2	180	3	$[H_2SO_4] = 1\%$	
(Fernández, & Macedo, 2014)	Hidrólisis enzimática	50	2880	NE	458 g de glucosa/Kg de bagazo
(Narkprasom, 2013)	Hidrolisis acida diluida		160	El bagazo se sumerge en una solución de $[H_2SO_4] = 27\%$	148 g de glucosa/Kg de bagazo

Las condiciones óptimas del proceso estarán definidas por las características del proceso. Por ejemplo; las dimensiones del proceso influyen en la capacidad de producción, el tiempo es una variable importante si el flujo del proceso es constante o si es por lote, los factores económicos y viabilidad económica, en la tabla 4.7 se muestra un conjunto de sugerencias, estas se componen por diferentes operaciones ordenadas por etapas, este orden da lugar a un proceso combinado para la hidrólisis provocando un aumento en el rendimiento de glucosa.

Cabe resaltar que el proceso combinado para la hidrólisis, se seleccionó bajo el criterio de comparación de los rendimientos de glucosa, ya que estos se ven afectados por las diferentes operaciones, ya sea aumentándolos o disminuyéndolos. Se observó que en los trabajos consultados cada operación sugerida en la tabla 4.7, mejoraba el rendimiento de glucosa en la etapa de hidrolisis.

Tabla 4.7. Condiciones sugeridas

Etapa	Operación	Condiciones
Etapa 1 Pretratamiento	Reducción de tamaño	temperatura: 30-50 °C
Etapa 2 Pretratamiento	Pretratamiento químico-Alcalino	El bagazo se sumerge en NaOH (4% p/p) Tiempo: 30 min Temperatura: 121
Etapa 3 Hidrolisis	Hidrolisis enzimática	Tiempo: 48 h Temperatura: 50 °C

Capítulo V



5.1. Conclusiones

- ✓ Según la revisión bibliográfica la distribución química del bagazo de caña de azúcar es en promedio, celulosa 50 %, hemicelulosa 12% y lignina 37%.
- ✓ Los mayores rendimientos a azúcares se reportan con pretratamiento de reducción de tamaño, Químico-alkalino e igual a 224 y 458 g de Glucosa /Kg de bagazo respectivamente.
- ✓ Los mayores rendimientos de etanol se reportan con (Fernández & Macedo 2014) e igual a 119 g de Etanol /Kg de bagazo.
- ✓ Las condiciones adecuadas para obtener mejores rendimientos son las siguientes, un pretratamiento de reducción de tamaño, seguido de un pretratamiento químico-alkalino, posterior la hidrólisis enzimática y por último la fermentación.



5.2. Recomendaciones

- ✓ Indagar sobre otras materias primas lignocelulósicas potencial para la obtención de bioetanol.
- ✓ Realizar la parte experimental con las condiciones operacionales seleccionadas
- ✓ Experimentalmente utilizar otros microorganismos para la fermentación tales como, *Pichia stipitis*

5.3. Bibliografía

- Abril, A., & Navarro, E. A. (2012). *Etanol a partir de biomasa lignocelulósica*. Aleta Ediciones.
- CENGICAÑA . (Abril de 2017). Guía de Buenas Prácticas Agrícolas en Caña de Azúcar. Guatemala.
- Chiva Tomás, R. A. (2010). Mecanismos moleculares y bioquímicos implicados en la adaptación de *Saccharomyces cerevisiae* a las bajas temperaturas de fermentación. *UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI*.
- Cintia Chandler, N. V. (2012). Hidrólisis ácida diluida en dos etapas de bagazo de caña de azuúcar para la producción de azúcares fermentables. *Multiciencias*, 245 - 253.
- Dergal, S. B. (2006). *Química de los alimentos*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Domínguez Domínguez, M. M., Álvarez Castillo, A., Castrejón Rosales, T., Granados Baeza, M. J., Hernández Campos, F. J., Alcalá Octaviano, V., & Tapia Picazo, J. C. (Mayo de 2011). ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE LA HIDRÓLISIS ÁCIDA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR SIN PRETRATAMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES REDUCTORES. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Díaz Ch, J. O., & Herrera, F. (s.f.). *Produccion de etanol combustible a partir de lignocelulosas*. universidad del Cauca. Popayán, Colombia.
- Ecu Red*. (s.f.). Obtenido de https://www.ecured.cu/Bagazo_de_ca%C3%B1a
- Galvis Jacome, M. (2009). estudio del proceso de fermentacion de Glucosa para la produccion de bioetanol a partir de levaduras nativas . *universidad industrial de santander* .
- Global petrol prices*. (12 de febrero de 2018). Obtenido de Global petrol prices: http://es.globalpetrolprices.com/gasoline_prices/
- González Álvarez, D. (12 de diciembre de 2016). Crece el cosumo de combustible en Nicaragua . *La prensa*.
- Guerrero, R. (16 de febrero de 2016). se incrementa el consumo de combustibles . *El Nuevo Diario*.
- Guilherme, A., Dantas, P., Santos, E., Fernandes, F., & Macedo, G. (2014). Evaluation of composition, characterization and enzymatic hidrolysis of pretreated sugar. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33.
- INATEC. (2018). *Manual del protagonista Cultivos Agroindustriales* . Tecnologico Nacional.
- INTA. (20 de mayo de 2016). *Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria*. Obtenido de <http://www.inta.gob.ni/index.php/noticias/380-presentan-el-mapa-nacional-de-la-produccion>

- Jacome, M. G. (2009). *estudio del proceso de fermentacion de glucosa para la produccion de bioetanol a partir de levaduras nativas*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- K., A., & M, J. L. (2015). Obtención de bioetanol anhidro a partir de paja (Stipa ichu). *Revista Politecnica*.
- Montiel Centeno, K. Y., & Romero Castro, L. (Diciembre de 2015). Obtencion de bioetanol a partir de la coronta (olote) del maiz variedad HS-5, por el metodo de hidrolisis acida diluida-fermentacion separada, laboratorios de quimica UNAN-Managua, I-II Semestre. *Obtencion de bioetanol a partir de la coronta (olote) del maiz variedad HS-5, por el metodo de hidrolisis acida diluida-fermentacion separada, laboratorios de quimica UNAN-Managua, I-II Semestre*. Managua, Managua, Nicaragua.
- Morales de la Rosa, S. (2015). *HIDRÓLISIS ÁCIDA DE CELULOSA Y BIOMASA LIGNOCELULÓSICA ASISTIDA CON LÍQUIDOS IÓNICOS*. Madrid, españa: Instituto de catalisis y petroleoquimica, consejo superior de investigaciones cientificas.
- Narkprasom, N., Assavarachan, R., & Wongputtisin, P. (2013). Optimization of Reducing Sugar Production from Acid Hydrolysis of Sugarcane Bagasse by Box Behnken Design. *Journal of Medical and Bioengineering*, 238-241.
- Plaza, C. M. (2 de septiembre de 2009). *Cristian Mauricio Plaza*. Obtenido de Variedades de la caña: <http://cristianmauricioplaza.blogspot.com/>
- Soha R. A. Khalil, A. A. (2015). Evaluation of bioethanol production from juice and bagasse of some sweet sorghum varieties. *Annals of Agricultural science*, 317-324.
- Valencia, D. M. (2011). Producción de etanol a partir de bagazo de caña panelera mediante un sistema híbrido de fermentación y pervaporación. Manizales, Colombia.
- ZafraNet. (5 de 1 de 2012). *ZafraNet*. Obtenido de <http://www.zafranet.com/2012/01/variedades-de-caa-de-azcar/>



Anexos



Anexo 1

Determinación H (TAPPI T211 om-85)

- Materiales
 - ✓ Balanza analítica 0,1mg
 - ✓ Horno 105°C ± 3°C
 - ✓ Desecador
 - ✓ Capsulas de porcelana
- Método
 - ✓ Lavar las capsulas de porcelana y llevarlas a peso constante.
 - ✓ Se pesa 1g de muestra en las capsulas (peso húmedo)
 - ✓ Secar la muestra en un horno a 105°C durante 24h
 - ✓ Se deja enfriar en el desecador
 - ✓ Cuando las capsulas y muestras están frías, se pesan (peso seco)

$$H = \frac{P_h - P_s}{P_h}$$

% de cenizas totales con extractivos (TAPPI T211 om-85)

- Materiales
 - ✓ Crisol de cerámica
 - ✓ Mufla
 - ✓ Balanza analítica 0,1mg
- Método
 - ✓ Se pesa 2g en un crisol (peso inicial)

- ✓ La muestra es introducida en una mufla, calentándose lentamente hasta 100°C, posteriormente se aumenta la temperatura paulatinamente hasta 575°C ± 25°C, para carbonizar la muestra.
- ✓ Cuando el residuo cese de carbonizarse, se deja calcinar durante 3 horas más, hasta que no haya partículas negras en el residuo.
- ✓ Se enfría el crisol a temperatura ambiente en un desecador
- ✓ Se pesa y se anota el peso de las cenizas.

$$H = \frac{P_f}{P_i} \times 100$$

Extractivos totales (TAPPI 264 om-88)

- Materiales
 - ✓ Balanza analítica
 - ✓ Vidrio reloj
 - ✓ Beacker 100mL, Pyrex, clase A ± 0,5mL.
 - ✓ Probeta 100mL, Pyrex, clase A ± 1,0mL.
 - ✓ Balón de fondo redondo 500mL, pyrex
 - ✓ Soxhlet Bowel, refrigerante, mangueras, pinzas, soporte universal.
 - ✓ Embudo buchner
 - ✓ Matraz kitazato 250mL Pyrex
 - ✓ Bomba de vacío
 - ✓ Mangueras
- Reactivos
 - ✓ Agua destilada
 - ✓ Etanol 99,8%
 - ✓ Benceno 99,7%
- Método

- ✓ Se pesa 10g de muestra molida y tamizada.
- ✓ En una probeta se mide 100mL de etanol y 300mL de benceno y se depositan en un balón de 500mL.
- ✓ Se arma el montaje del equipo, depositando los 10g de muestra en un dedal, se inicia la extracción durante 6h.
- ✓ In posteriori se cambia el balón por otro de 500mL que contenga 400mL etanol y se inicia la extracción con etanol durante 5h.
- ✓ Se cambia el balón por otro que contenga 500mL de agua destilada caliente y se inicia la extracción por una hora.
- ✓ Se saca la muestra y se realiza un lavado al vacío con 500mL de agua destilada caliente.
- ✓ Se deja secar al aire libre.

Determinación de celulosa (método Kurschner & Hoffer)

➤ Materiales

- ✓ Balanza analítica
- ✓ Vidrio reloj
- ✓ Espátula
- ✓ Beacker 10mL Pyrex, clase A $\pm 0,05$ mL
- ✓ Matraz Erlenmeyer 250mL, clase A $\pm 0,05$ mL
- ✓ Probeta de 25mL, clase A $\pm 0,02$ mL
- ✓ Plancha de calentamiento
- ✓ Condensador
- ✓ Mangueras
- ✓ Termómetro
- ✓ Crisoles gooch

➤ Reactivos

- ✓ Etanol
- ✓ Ácido nítrico
- ✓ Acetato de sodio
- ✓ Agua destilada

➤ Método

- ✓ Se toma 1g de muestra anhidra libre de extractos, luego se coloca en un matraz, en el cual se vierten 20mL de etanol y 5mL de ácido nítrico concentrado.
- ✓ Se hierve en baño maría a reflujo durante 30min, la solución se pasa por un filtro gooch de porosidad media y peso conocido.
- ✓ Se desecha el líquido, la materia sólida es sometida a una segunda digestión con 25mL ácido nítrico-etanol, por 30min.
- ✓ Se realiza una decantación como en la etapa anterior y se efectúa una tercera digestión con 100mL de agua destilada por una hora. La muestra se filtra en el gooch. Se lava con agua destilada caliente y posteriormente con 100mL de solución saturada de acetato de sodio y por último con 500mL de agua destilada caliente.
- ✓ El residuo se seca en un horno eléctrico a una temperatura de $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$
- ✓ Cuando el residuo se seca, se procede a enfriarse en un desecador de cristal sobre sílica gel.

$$\% \text{Celulosa} = \frac{P_{\text{seco del residuo}}}{P_{\text{anhidrido de la muestra}}} \times 100$$

Determinación de lignina TAPPI T222om-88

➤ Materiales

- ✓ Balanza analítica 0,1mg
- ✓ Probeta 250mL
- ✓ Balón aforado 250mL, clase A
- ✓ Matraz Erlenmeyer 250mL
- ✓ Plancha de calentamiento
- ✓ Balón de fondo plano 250mL
- ✓ Crisoles gooch

- ✓ Termómetro
- ✓ Beacker
- ✓ Vidrio reloj
- ✓ Varilla de agitación
- ✓ Refrigerante
- ✓ Mangueras
- ✓ Horno
- Reactivos
 - ✓ Ácido sulfúrico 96,7%
 - ✓ Hielo
 - ✓ Agua destilada
- Método
 - ✓ Pesar 1g de muestra libre de extractos
 - ✓ Se prepara una solución de ácido sulfúrico 72%
 - ✓ A la muestra, se le agrega 15mL de ácido sulfúrico al 72%, manteniéndose en agitación en baño maría a 20°C±1°C.
 - ✓ Se transfiere a un matraz con 360mL de agua destilada para diluirlo hasta alcanzar una concentración acida del 3%
 - ✓ Se hierve a reflujo por 4h para asegurar un volumen constante de agua.
 - ✓ La solución se decanta manteniendo el matraz en una posición inclinada hasta que el material esté finalmente dividido. Durante 12h.
 - ✓ Se procede a filtrar a través de un crisol tipo gooch de porosidad fina, lavando con agua caliente para eliminar el ácido.
 - ✓ Se seca en un horno 105±3°C hasta alcanzar peso constante.

$$\%Lignina = \frac{P_{seco\ de\ lignina\ (g)}}{P_{anhidrido\ de\ la\ muestra\ (g)}} \times 100$$

Determinación de hemicelulosa

$$\%Hemicelulosa = 100 - (\%celulosa + \%lignina)$$

Cuantificación de azúcares reductores totales método Miller DNS (ácido 3,5-dinitrosalicílico).

- Materiales y equipos
 - ✓ Matraz volumétrico 100mL Pyrex con tapon, clase A±0,10mL.
 - ✓ Micro pipeta de 100μL, 500μL, 1000 μL, 5000 μL
 - ✓ Frasco de vidrio color ambar
 - ✓ Papel Kraft
 - ✓ Vasos de precipitados de 100mL y 250mL Pyrex, clase A±0,05mL
 - ✓ 15 vasos de precipitado de 50mL pyrex clase A±0,05mL
 - ✓ Baño maría
 - ✓ Hielo
 - ✓ Gradilla plástica forrada con plástico negro
 - ✓ Espátula
 - ✓ 40 tubos de ensayo de 16x150mm
 - ✓ Plancha de calentamiento
 - ✓ Plancha de agitación
 - ✓ Espectrofotómetro
 - ✓ Centrifuga
 - ✓ Varilla de agitación
 - ✓ Cronometro
- Reactivos
 - ✓ Tartrato de sodio y potasio (KNaC₄H₄.4H₂O) / sal de Rochelle 99,8%
 - ✓ Hidróxido de sodio (NaOH) 99%
 - ✓ Ácido 3,5 di nitrosalicílico (DNS) 99,9%
 - ✓ Agua destilada
- Método
 - ✓ Preparación de la solución de DNS

- 1- Disolver 1,6 g de hidróxido de sodio en 20mL de agua destilada en un vaso de precipitado de 250mL, se aplica agitación magnética hasta que se haya disuelto, posteriormente se adiciona 30mL de agua destilada y proceder a disolver en intervalos 43,8g de tartrato de sodio y potasio.
- 2- Se disuelve un 1g de DNS en 20mL de agua destilada en un vaso de precipitado de 100mL previamente forrado con papel kraft. Se tapa y se mantiene en agitación por 16horas aproximadamente.
- 3- Se mezclará solución del tartrato de sodio y potasio con la solución de DNS y se afora a 100mL con agua destilada. La solución presentará un color naranja translucido.
- 4- Se trasvasa la solución a un frasco de vidrio ámbar previamente forrado con papel kraft y se mantiene en un lugar frasco y protegido de la luz, la solución se usará después de las 14 horas de ser preparada.
 - ✓ Curva de calibración
- 1- Preparar una solución stock de glucosa a una concentración de 1g/L en un balón aforado de 100mL.
- 2- Preparar una serie de diluciones de concentraciones 0,02g/L, 0,04g/L, 0,06g/L, 0,08g/L, 0,10g/L en tubos de ensayo, dispuestos en una gradilla previamente forrada con plástico negro, con el objetivo de que la reacción se haga en la obscuridad, en cada tubo se deposita parte de la solución madre de glucosa, más agua y el reactivo DNS en relación 1:1 hasta completar 1mL. Se agita en la centrifuga con 900rpm 2 minutos.
- 3- Se colocan los tubos con las soluciones durante 5minutos en baño maría e inmediatamente, se pasan los tubos a un baño de hielo durante 5min, las soluciones deben de cambiar de un color amarillento a uno rojizo.
- 4- Posteriormente se adiciona 4mL de agua destilada, se agita en la centrifuga a 900rpm por 2min y se deja reposar durante 10min.
- 5- Se procede a leer la absorbancia a 540.5nm
- 6- Se grafica la absorbancia en función de la concentración (g/L). mediante regresión lineal se encuentra la ecuación correspondiente a la gráfica



elaborada. Se usa la curva estándar para determinar la concentración de glucosa en las muestras problemas.

✓ Curva de calibrado

- 1- Las lecturas se pueden realizar por cuadruplicado, posteriormente se debe de graficar y determinar incertidumbres asociadas.

Anexo 2

Cálculos del rendimiento de etanol, a partir de las concentraciones reportadas de glucosa.

Tabla 4.3.

Rendimiento de glucosa a partir de bagazo

azúcares	(Valencia, 2011)	(Domínguez, Mayo de 2011)	(Fernández, & Macedo, 2014)	(Chandler, 2012)
Glucosa	144.93 g/ Kg bagazo	30g/Kg de bagazo	458 g/Kg de bagazo	224 g/ kg de bagazo

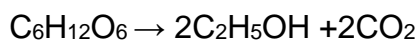
Calculo de rendimiento #2

(Valencia, 2011) Reporta 144.93 g glucosa/ Kg de bagazo, se calculan los valores de rendimientos de etanol de la siguiente manera

Se convierten los gramos de glucosa a moles de glucosa.

$$\frac{144,93 \text{ g de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{1 \text{ mol de glucosa}}{180 \text{ g de Glucosa}} = \frac{0,805 \text{ mol de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Se utiliza la relación estequiometria de la reacción compleja de glucolisis para calcular la cantidad en moles de etanol producido a partir de 0,805 mol de glucosa si el rendimiento de etanol es del 100%



$$\frac{0,805 \text{ mol de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{2 \text{ mol de Etanol}}{1 \text{ mol de Glucosa}} = \frac{1,61 \text{ mol de Etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Se multiplican los moles de etanol producidos a partir de 0,805 mol de glucosa, por el rendimiento teórico reportado en los trabajos consultados. Obteniendo los moles de etanol producidos por 0,805 mol de glucosa para un rendimiento del 51%

$$\frac{1,61 \text{ mol de Etanol}}{\text{Kg de bagazo}} * 0,51 = \frac{0,8211 \text{ mol de etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Utilizando el peso molecular del etanol, calculamos los gramos de etanol producidos por Kg de bagazo procesado.

$$\frac{0,8211 \text{ mol de etanol}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{46 \text{ g de etanol}}{1 \text{ mol de Etanol}} = \frac{37.8 \text{ g de etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Calculo de rendimiento #2

(Domínguez, Mayo de 2011) Reporta 144.93 g glucosa/ Kg de bagazo, se calculan los valores de rendimientos de etanol de la siguiente manera

Se convierten los gramos de glucosa a moles de glucosa.

$$\frac{30 \text{ g de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{1 \text{ mol de glucosa}}{180 \text{ g de Glucosa}} = \frac{0,166 \text{ mol de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Se utiliza la relación estequiometria de la reacción compleja de glucolisis para calcular la cantidad en moles de etanol producido a partir de 0,805 mol de glucosa si el rendimiento de etanol es del 100%



$$\frac{0,166 \text{ mol de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{2 \text{ mol de Etanol}}{1 \text{ mol de Glucosa}} = \frac{0,333 \text{ mol de Etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Se multiplican los moles de etanol producidos a partir de 0,805 mol de glucosa, por el rendimiento teórico reportado en los trabajos consultados. Obteniendo los moles de etanol producidos por 0,805 mol de glucosa para un rendimiento del 51%

$$\frac{0,333 \text{ mol de Etanol}}{\text{Kg de bagazo}} * 0,51 = \frac{0,17 \text{ mol de etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Utilizando el peso molecular del etanol, calculamos los gramos de etanol producidos por Kg de bagazo procesado.

$$\frac{0,17 \text{ mol de etanol}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{46 \text{ g de etanol}}{1 \text{ mol de Etanol}} = \frac{7.82 \text{ g de etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Calculo de rendimiento #3

(Fernández, & Macedo, 2014) Reporta 458 g glucosa/ Kg de bagazo, se calculan los valores de rendimientos de etanol de la siguiente manera

Se convierten los gramos de glucosa a moles de glucosa.

$$\frac{458 \text{ g de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{1 \text{ mol de glucosa}}{180 \text{ g de Glucosa}} = \frac{2.54 \text{ mol de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Se utiliza la relación estequiometría de la reacción compleja de glucólisis para calcular la cantidad en moles de etanol producido a partir de 0,805 mol de glucosa si el rendimiento de etanol es del 100%



$$\frac{2.54 \text{ mol de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{2 \text{ mol de Etanol}}{1 \text{ mol de Glucosa}} = \frac{5.08 \text{ mol de Etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Se multiplican los moles de etanol producidos a partir de 0,805 mol de glucosa, por el rendimiento teórico reportado en los trabajos consultados. Obteniendo los moles de etanol producidos por 0,805 mol de glucosa para un rendimiento del 51%

$$\frac{5.08 \text{ mol de Etanol}}{\text{Kg de bagazo}} * 0,51 = \frac{2,60 \text{ mol de etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Utilizando el peso molecular del etanol, calculamos los gramos de etanol producidos por Kg de bagazo procesado.

$$\frac{2,60 \text{ mol de etanol}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{46 \text{ g de etanol}}{1 \text{ mol de Etanol}} = \frac{119.4 \text{ g de etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Calculo de rendimiento #4

(Chandler, 2012) Reporta 224 de glucosa/ Kg de bagazo, se calculan los valores de rendimientos de etanol de la siguiente manera

Se convierten los gramos de glucosa a moles de glucosa.

$$\frac{224 \text{ g de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{1 \text{ mol de glucosa}}{180 \text{ g de Glucosa}} = \frac{1,24 \text{ mol de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Se utiliza la relación estequiometría de la reacción compleja de glucólisis para calcular la cantidad en moles de etanol producido a partir de 0,805 mol de glucosa si el rendimiento de etanol es del 100%



$$\frac{01,24 \text{ mol de Glucosa}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{2 \text{ mol de Etanol}}{1 \text{ mol de Glucosa}} = \frac{2.48 \text{ mol de Etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Se multiplican los moles de etanol producidos a partir de 0,805 mol de glucosa, por el rendimiento teórico reportado en los trabajos consultados. Obteniendo los moles de etanol producidos por 0,805 mol de glucosa para un rendimiento del 51%

$$\frac{2,48 \text{ mol de Etanol}}{\text{Kg de bagazo}} * 0,51 = \frac{1,27 \text{ mol de etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$

Utilizando el peso molecular del etanol, calculamos los gramos de etanol producidos por Kg de bagazo procesado.

$$\frac{1,27 \text{ mol de etanol}}{\text{Kg de bagazo}} * \frac{46 \text{ g de etanol}}{1 \text{ mol de Etanol}} = \frac{58.4 \text{ g de etanol}}{\text{Kg de bagazo}}$$