



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

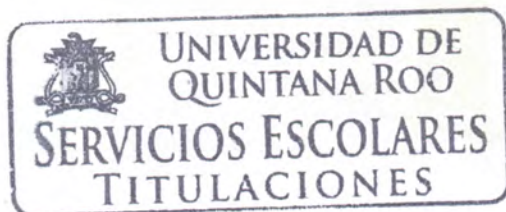
**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A
PARTIR DE DESECHOS LIGNOCELULÓSICOS DE
MADERA TZALAM (*Lysiloma latisiliquum*)**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA
NORINELIA PUC BLANCO

DIRECTOR
DRA. NORMA ANGÉLICA OROPEZA GARCÍA

ASESORES
M.C. JUAN CARLOS ÁVILA REVELES
DR. RICARDO ENRIQUE VEGA AZAMAR
DR. VÍCTOR HUGO DELGADO BLAS
M.C. LAURA PATRICIA FLORES CASTILLO



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2017



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**TRABAJO DE TESIS ELABORADO BAJO LA SUPERVISIÓN DEL
COMITÉ DE TESIS DEL PROGRAMA DE LICENCIATURA Y
APROBADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:**

INGENIERO AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS



DIRECTOR:

Norma A. Oropeza García

DRA. NORMA ANGÉLICA OROPEZA GARCÍA

ASESOR:

Juan Carlos Ávila Reveles

M.C. JUAN CARLOS ÁVILA REVELES

ASESOR:

Ricardo Enrique Vega Azamar

DR. RICARDO ENRIQUE VEGA AZAMAR

CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2017.



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	3
ANTECEDENTES	3
JUSTIFICACIÓN	8
OBJETIVOS	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos	9
CAPÍTULO II	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1 Lignocelulosa	10
2.2 Celulosa.....	12
2.3 Hemicelulosa.....	13
2.4 Lignina	14
2.5 Tzalam.....	15
2.6 Biocombustibles	17
2.6.1 Biocombustibles de Primera Generación	18
2.6.2 Biocombustibles de Segunda Generación (2G).....	18
2.7 Bioetanol	19
CAPITULO III	21
METODOLOGÍA	21
3.1 Materia prima	21
3.2 Prehidrólisis.....	22
3.4 Hidrólisis	23

3.5 Detoxificación	24
3.6 Fermentación.....	25
3.7 Deshidratación.....	26
3.8 Prueba de Etanol	27
3.8.1 Prueba de ebullición del bioetanol	27
3.8.2 Prueba de Lucas	27
3.9 Determinación de azúcares reductores	28
3.9.1 Prueba de Fehling.....	28
3.9.2 Método del ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS)	29
Diagrama de Flujo.....	30
CAPITULO IV	33
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
CAPITULO V.....	49
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS	51
ANEXOS	56
Anexo A	56
Anexo B	59
Anexo C	61
Anexo D	65
Anexo F	66

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Representación de la pared celular con fibras de celulosa (verde), lignina (marrón) y hemicelulosa (verde claro). _____	10
Figura 2. Degradación enzimática hipotética de la lignocelulosa. _____	11
Figura 3. Estructura química de la celulosa (n –5000-10,000). _____	12
Figura 4. Principales componentes de la hemicelulosa. _____	13
Figura 5. Estructura química de la lignina. _____	14
Figura 6. Veteado de la madera tzalam. Superficie: cara tangencial (izquierda) y radial, tamaño natural (derecha). _____	15
Figura 7. Aserrín de madera tzalam (<i>Lysiloma latisiliquum</i>). _____	21
Figura 8. Prehidrólisis con NaOH. _____	22
Figura 9. Hidrólisis ácida. _____	23
Figura 10. Neutralización del hidrolizado. _____	24
Figura 11. Fermentación. _____	25
Figura 12. Deshidratación. _____	26
Figura 13. Prueba de Lucas con diferentes alcoholes. _____	27
Figura 14. Reacción de la Prueba de Fehling. _____	28
Figura 15. Muestras del hidrolizado. _____	29
Figura 16. Diagrama del Proceso de Producción de Bioetanol. _____	30
Figura 17. Curva de calibración de los ART. _____	36
Figura 18. Concentración promedio de ART para los hidrolizados de cada prueba. _____	43
Figura 19. Aserradero ejidal de Petcacab, Q. Roo. _____	56
Figura 20. Almacenamiento del aserrín de diversas especies de maderas. _____	56

Figura 21. Tabla de tzalam. _____	57
Figura 22. Almacenamiento de madera tzalam en tablas. _____	57
Figura 23. Calles del Ejido Petcacab con desechos de diversas maderas, incluso con madera tzalam. _____	58
Figura 24. Especies más representativas con base a su existencia. _____	66
Figura 25. Volumen de la existencia de diversas especies en el ejido Petcacab y Polinkín. Fuente: Plan de manejo forestal del Ejido Petcacab y Polinkín. _____	66
Figura 26. Distribución de productos de anualidad 6 (2017). _____	67
Figura 27. Cuantificación y clasificación de las superficies del Ejido Petcacab. ____	68

Lista de tablas

	Pág.
Tabla I. Métodos utilizados para la obtención de bioetanol con diversas materias primas utilizadas.	4
Tabla II. Propiedades físicas de la madera <i>L. bahamensis</i> y <i>L. acapulcensis</i>	16
Tabla III. Propiedades físicas y químicas del etanol.	19
Tabla IV. Resultado promedio de las pruebas en la etapa de acondicionamiento, prehidrólisis, hidrólisis, apreciación organoléptica y prueba de Fehling.	33
Tabla V. Cuantificación de azúcares reductores.	36
Tabla VI. Cuantificación de azúcares reductores.	37
Tabla VII. Costos de producción por reactivos y sustancias utilizados.	38
Tabla VIII. Costos de consumo de energía.	38

Tabla IX. Costos de producción por procesos, incluyendo el costo por sustancias, reactivos y consumo energético. Metodología sin Acondicionamiento.	39
Tabla X. Costos de producción por procesos, incluyendo el costo por sustancias, reactivos y consumo energético. Acondicionamiento en autoclave.	39
Tabla XI. Rendimientos reportados para la generación de bioetanol.	40
Tabla XII. Propiedades físicas de diferentes especies forestales.	41
Tabla XIII. Estimación teórica del rendimiento de etanol por concentración promedio de azúcares obtenidos en cada prueba.	44
Tabla XIV. Tabla comparativa de la concentración de ART y el rendimiento etanol/glucosa de diferentes fuentes.	46
Tabla XV. Calibración de ART.	59
Tabla XVI. Resultados de las réplicas de cada prueba.	61
Tabla XVII. Cuantificación de azúcares reductores.	63

INTRODUCCIÓN

El bioetanol (C_2H_5OH) es un combustible que se obtiene a partir de recursos renovables y puede contribuir con la reducción de combustibles fósiles que generan grandes cantidades de CO_2 provocando el calentamiento global, en los últimos años se han estudiado diferentes técnicas y materiales para la obtención de bioetanol, buscando así el de mayor productividad.

Entre los diferentes sustratos para la preparación de bioetanol, principalmente en la literatura se encuentran los siguientes: la fécula de maíz (Cardona, *et al.*, 2005), cáscara de arroz (Rojas y Cabanillas, 2008), cáscara de naranja y piña (Tejeda, *et al.*, 2010), debido a que estos tienen gran contenido de almidón y este sirve como materia prima para producir azúcar y, por ende, alcohol. La antigua Office of Technological Assessment (OTA) del gobierno estadounidense ha calculado que sólo de un 1 a un 2% del consumo de combustibles podría cubrirse con el alcohol procedente del almidón de maíz sin necesidad de aumentar los precios de los alimentos de Estados Unidos (Rennerberg, 2008).

Por otra parte, se está optando la utilización de biomasa lignocelulósica en lugar del almidón ya que ésta no es comestible y, por lo tanto, no compite con los alimentos, lo que resulta ser la principal desventaja de los biocombustibles de primera generación. La lignocelulosa se compone de polímeros como la lignina, la hemicelulosa y celulosa, siendo esta última la principal productora de azúcares, dado que, consta de componentes de glucosa que al fermentarse pueden resultar la obtención de alcohol.

Cabe mencionar, que la biomasa lignocelulósica tiene como ventaja ser un material de bajo costo, además de que, es muy fácil de obtener en cualquier parte del mundo sin necesidad de tener cuidados especiales con respecto al clima u otras condiciones ambientales, sin embargo, los costos de la tecnología para el tratamiento y producción del bioetanol resultan ser elevados, lo cual, imposibilita la utilización de este material (Cuervo, *et al.*, 2009).

En este trabajo se pretende evaluar la producción de bioetanol con la madera *Lysiloma latisiliquum*, que se producen en la comunidad ejidal Petcacab, como parte de los residuos se obtiene aserrín. Este desecho al no tener utilidad para los productores se quema después de

ser acumulado en grandes cantidades, de ahí, el interés por encontrar un uso adecuado para el residuo.

Para evaluar la producción de bioetanol a partir de la *Lysiloma latisiliquum* el proceso constó de diferentes técnicas con ventajas en bajos costos y fácil manejo. El desarrollo metodológico para evaluar la producción bioetanol a partir de desechos lignocelulósicos, incluye las siguientes etapas: a) Prehidrólisis, la cual, consiste en reducir la lignina de la madera para facilitar la degradación de la celulosa. b) Hidrólisis, consiste en degradar la celulosa, para la obtención de la glucosa. c) Neutralización de residuos ácidos a través de la adición de NaOH a la solución obtenida en la hidrólisis hasta alcanzar un pH de 5. e) Fermentación, después de la neutralización se llevó a cabo el proceso de fermentación utilizando levadura *Saccharomyces cerevisiae*. f) Deshidratación, mediante destilación simple utilizando cloruro de sodio para mejorar su eficiencia.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

Las energías producidas por hidrocarburos son de las más demandadas en el mundo, y debido a que generan CO₂ en grandes cantidades, se han efectuado energías más limpias provenientes de recursos naturales casi inagotables capaces de emitir muy bajas concentraciones de CO₂.

En México, sólo 9.5% de la oferta total de energía es renovable, mientras que en Brasil 38.7% de su energía es de fuentes renovables. Además, habría que aclarar que la poca energía renovable que se produce en México, a diferencia de Brasil, es fundamentalmente hidráulica, solar y eólica, y no se utilizan hasta el momento la producción comercial de biocombustibles a partir de cultivos agrícolas o forestales (Becerra, 2006).

El bioetanol, es una de las posibilidades que más se está investigando, puesto que tiene muchas ventajas; siendo la principal: su uso como combustible en el sector del transporte (Eckholt, 2011). El bioetanol es una energía limpia que se puede obtener a partir de melazas de caña de azúcar, del maíz y de residuos maderables.

Se han realizado diferentes estudios demostrando los diferentes métodos para la obtención del bioetanol (**Tabla I**), se menciona que en la actualidad las técnicas de mayor uso e interés en las materias primas contempladas en relación con el pre-tratamiento de la cascarilla de arroz son la hidrólisis ácida con H₂SO₄, explosión de vapor (bagazo de caña y subproductos cítricos), técnicas dirigidas a atacar la hemicelulosa, acompañadas con hidrólisis enzimática con celulasas o combinadas con otras enzimas comerciales (dirigidas a la celulosa) (Sánchez, *et al.*, 2010).

Para casos de elaboración de bioetanol a partir de madera se utilizó *Pinus radiata*, en la cual, para la extracción de hemicelulosas se realizó mediante hidrólisis en ácido diluido a diferentes condiciones de temperatura, concentración de ácido y tiempo, determinando estadísticamente la mejor combinación de estas variables para la maximización de extracción de azúcares como monómeros (Eckholt, 2011).

Respecto a la etapa de detoxificación en las comparaciones de los métodos de desintoxicación, el tratamiento con hidróxido de calcio (overliming: adición de CaOH_2) ha surgido como uno de los métodos más eficientes (Jönsson y Alriksson, 2013).

En la siguiente tabla se pueden observar los diferentes métodos utilizados para la producción de bioetanol, con diferentes materias primas.

Tabla I. Métodos utilizados para la obtención de bioetanol con diversas materias primas utilizadas.

Método	Metodología	Referencia
Prehidrólisis	50 g de cáscaras de piña y naranja en una solución de NaOH 0.1N durante 15 min.	Tejeda, <i>et al.</i> , 2010
	La materia prima (material lignocelulósico) se pone en contacto con amoníaco en una relación de 2 kg de NH_3 por cada kg de material sólido a 90 °C por 30 min.	Triana, 2010 (tomado de)
	Una solución al 2 % (w/w) de H_2SO_4 o HCl se mezcla con el material sólido y es calentada a 121°C por 3 a 4 horas. Para material lignocelulósicos.	Triana, 2010 (Tomado de)
	Ácido sulfúrico diluido (1,0%) en agua a 135 °C con una relación 3.0 solución acida/ mezcla de madera.	Frederick, <i>et al.</i> , 2008

Hidrólisis

100 g de hueso seco de aceituna y 300 mL de disolución de H_2SO_4 de concentración 0,025 M. Las temperaturas máximas de hidrólisis fueron 190, 195, 200, 205, 210 y 215°C. La temperatura máxima se mantuvo durante 5 min.

50 mL de ácido sulfúrico al 5% por cada 100 g de cáscara de fruta, a una temperatura de 125°C y 15 psi.

50 g de hueso seco y 300 mL de disolución de HNO_3 (0,025 M). y con una velocidad de agitación igual a 250 rpm.

25 mL de solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, con una dilución al 5% a cada 50g de muestra (residuos de poda)

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ con pH 10.

Con hidróxido de sodio el pH del hidrolizado se ajustó a un valor de 12 usando el NaOH. Las condiciones de la detoxificación fueron de 60 °C a 150 rpm por 1 hora.

Detoxificación	Detoxificación con carbón activado. El hidrolizado se mezcló con 3.75 g de carbón activado, 2.5 %p/p, a una temperatura de 60 °C, 150 rpm por 1 hora.	Castillo, 2014
	Se utilizó Cal viva (Ca(OH) ₂) a condiciones de operación de 60 °C, un pH 11 y un tiempo de residencia de 30 min.	Triana, 2010
	Overliming (Ca(OH) ₂) es llevado a cabo a un pH 10 and 12, temperatura de 25 y 60°C y un tiempo de 15, 30 and 60 min.	Andary, <i>et al.</i> , 2013
	Overliming. El pH del hidrolizado se aumentó a 10 mediante la adición de Ca(OH) ₂ y la temperatura se aumentó a 60 ° C y se mantuvo durante 30 min mientras se mantenía el pH a 10 mediante la adición de Ca(OH) ₂ .	Okuda, <i>et al.</i> , 2008
	Levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> a 30 °C y 200 rpm por 5 horas.	Tejeda, <i>et al.</i> , 2010
Levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Cardona, <i>et al.</i> , 2005	

Fermentación	Levadura <i>Pachysolen tannophilus</i> .	Saleh, 2014
	Levadura <i>Pachysolen tannophilus</i>	Converti, <i>et al.</i> , 2000
	La fermentación se llevó a cabo con La levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> a una temperatura de 30 ± 1 oC, con agitación magnética por 24 horas.	Castillo, 2014
Deshidratación	Con tamices moleculares de adsorción por oscilación de presión 2: A 116°C 1.7 atm (adsorción) 0.14 atm (desorción) 10 min	Triana, 2010
	Mediante el paso a través de un lecho de tamices moleculares.	Frederick, <i>et al.</i> , 2008
	Destilación salina Destilación al vacío Destilación azeotrópica Tamices moleculares	López y Lozada, 2005
	Destilación azeotrópica. Destilación de absorción con tamices moleculares.	Pedraza, 2012

JUSTIFICACIÓN

Actualmente se están creando nuevos combustibles capaces de reducir las emisiones de CO₂, entre estos combustibles están los derivados de material lignocelulósicos con los que se puede obtener bioetanol. El bioetanol tiene la ventaja de ser un producto que se puede obtener de recursos renovables, que es lo contrario a la gasolina que se obtiene del petróleo el cual es un recurso no renovable además de que causa fuertes emisiones de CO₂.

Quintana Roo es un estado rico en recursos naturales encontrándose el principal recurso en sus selvas, de acuerdo con el Inventario Estatal Forestal y Suelos 2013 la superficie que abarcan los recursos forestales es 3, 773, 023.27, los cuales son aprovechados de diferentes formas sustentables.

El estado cuenta con varias comunidades ejidales cuyo principal ingreso económico es el aprovechamiento de la madera. La comunidad ejidal Petcacab es uno de los siete ejidos más potenciales en el aprovechamiento de sus recursos, solo que existe un problema, debido a que es mucha madera que trabajan se generan grandes cantidades de residuos (aserrín) las cuales no son más que almacenadas y llegando a un cierto límite estos son quemadas, causando emisión de CO₂ y erosión en los suelos.

El género más abundante de la selva alta en el estado de Quintana Roo es *Bursera* seguido del *Lysiloma* con un número de individuos de 11, 343 representando el 7. 05% (Conafor y Semarnat, 2013). Entre las maderas de más comercialización en la comunidad ejidal Petcacab están, la caoba (*Swietenia macrophylla*) el tzalam (*Lysiloma latisiliquum*) y el zapote (*Manilkara zapota*).

Por lo anterior, se pretende evaluar la producción bioetanol con los residuos del tzalam en forma de aserrín, ya que existe una gran cantidad de estos residuos a los cuales no se les da un uso adecuado, beneficiando a la comunidad ejidal y al ambiente con la reducción de CO₂.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la producción de Bioetanol a partir del desecho lignocelulósico *Lysiloma latisiliquum*.

Objetivos específicos

- Obtener el porcentaje de rendimiento en la obtención de bioetanol utilizando como materia prima los desechos lignocelulósicos de *Lysiloma latisiliquum*.
- Calcular los costos de producción para el bioetanol a nivel laboratorio obtenido a partir de los desechos lignocelulósicos derivados de *Lysiloma latisiliquum*.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Lignocelulosa

La lignocelulosa está constituida por tres componentes: la celulosa (un polímero lineal que consta de componentes de glucosa), la hemicelulosa (asimismo un polisacárido, pero que consta de cadenas largas de la pentosa xilosa) y la lignina (**Figura 1**), una molécula compleja aromática (Rennerberg, 2008).



Figura 1. Representación de la pared celular con fibras de celulosa (verde), lignina (marrón) y hemicelulosa (verde claro) (Splettstößer, 2017).

La lignocelulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) es el principal y más abundante componente de la biomasa producida por la fotosíntesis, anualmente se forman 200,000 millones de toneladas en el mundo (tomado de (Cuervo, *et al.*, 2009). La creciente demanda hacia los biocombustibles ha permitido el desarrollo de nuevas energías en las que principalmente se está utilizando los materiales lignocelulósicos, principalmente de los residuos forestales como el aserrín, los residuos leñosos, maderas corrompidas (maderas podridas) y arboles pequeños.

El principal combustible obtenido a partir de biomasa lignocelulósica es el etanol, países como Brasil y Estados Unidos son unos de los principales productores de este biocombustible, obteniéndolo de caña de azúcar y almidón de maíz. Para la obtención del etanol se requieren de diferentes procesos los cuales pueden ser químicos, térmicos y biológicos.

Para la producción de bioetanol se necesita del rompimiento de la biomasa lignocelulósica con el fin de, separar las fibras de celulosa y degradar la lignina (**Figura 2**). Después de obtener los azúcares se somete a una fermentación tradicional utilizando levaduras y esta es convertida en alcohol.

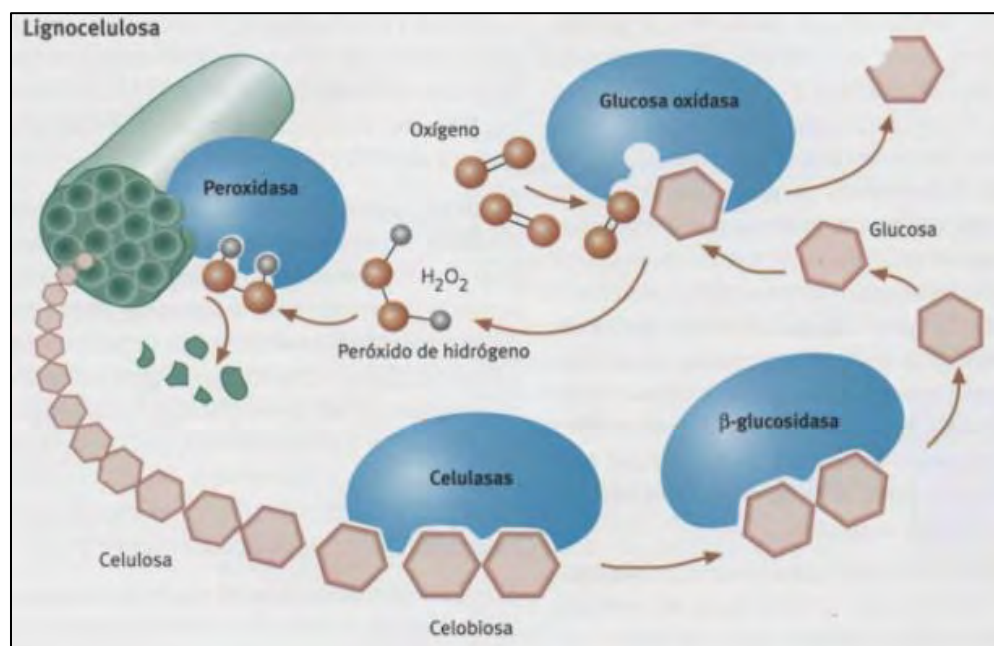


Figura 2. Degradación enzimática hipotética de la lignocelulosa (Rennerberg, 2008).

En el material lignocelulósico se dispone de una gran cantidad de azúcares fermentables, sin embargo, su utilización se puede ver impedida por la recalcitrancia intrínseca del material, una solución a este problema han sido los diversos métodos fisicoquímicos y biológicos que se han desarrollado para liberar los azúcares fermentables y obtener bioetanol (Cuervo, *et al.*, 2009).

2.2 Celulosa

La celulosa, como sustancia de sostén, es el componente principal de las paredes celulares de las plantas y el hidrato de carbono más ampliamente extendido. Las maderas de las coníferas y de los árboles de fronda constan de 40-50% de celulosa, junto con 25-30% de hemicelulosa y otro tanto de lignina incrustada. La celulosa es una sustancia incolora, insoluble en agua y en la mayor parte de los disolventes orgánicos (Hans y Wolfgang, 1987).

La hidrólisis de la celulosa produce celobiasa y, en último término, glucosa. Su estructura es una cadena lineal de unidades de glucopiranosas unidas entre sí por enlaces β -glicosídicos entre el carbono 1 de una unidad y del grupo hidroxilo del carbono 4 de otra unidad (Ege, 1998), su estructura química se puede observar en la **Figura 3**.

La celulosa es un polímero de elevado peso molecular formado por moléculas de glucosa unidas por enlaces β -glicosídicos. Estos enlaces forman cadenas lineales muy estables originando fibras compactas, impenetrables por el agua y resistentes al ataque químico (Nogués, *et al.*, 2010)

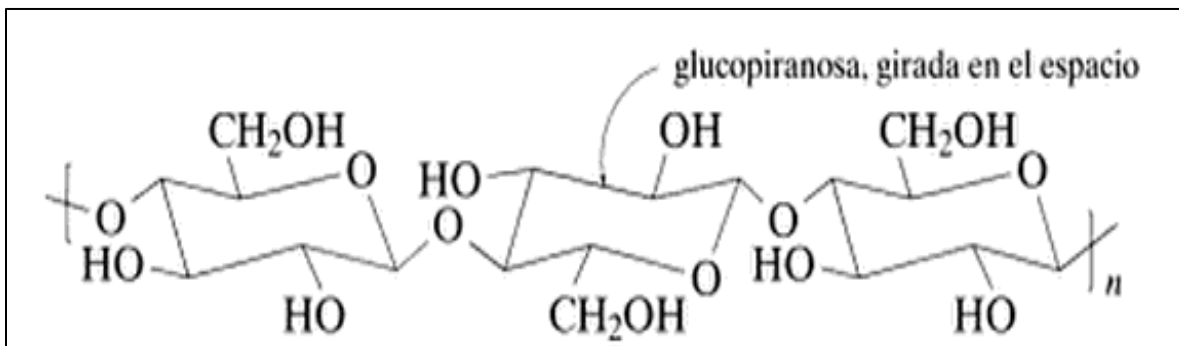


Figura 3. Estructura química de la celulosa ($n = 5000-10,000$).

La celulosa se utiliza en aplicaciones industriales como la producción de papel y cartón, fabricación de explosivos, también existen productos derivados de la celulosa como las fibras de rayón que se utilizan como tela.

La celulosa al ser un polímero lineal que consta de componentes de glucosa se utiliza para la producción de biocombustible, principalmente de etanol, puesto que, es una energía más limpia que los combustibles fósiles.

2.3 Hemicelulosa

La hemicelulosa son polisacáridos no celulósicos que aparecen en las paredes celulares (Blasco, 1970). La poliosa está compuesta por diferentes azúcares formando cadenas más cortas y ramificadas. Estos azúcares se pueden dividir en diferentes grupos como las pentosas (xilosa, ribosa), hexosas (glucosa, manosa, galactosa) y deoxihexosas (ramnosa y fucosa), su estructura química con los diferentes grupos se observa en la **Figura 4**. La cadena principal de la poliosa puede consistir en una sola unidad (homopolímero), como los xilanos, o en dos o más unidades (heteropolímero), como los glucomananos. La naturaleza ramificada de la hemicelulosa la hace amorfa y más fácil de hidrolizar que la celulosa. El contenido de la hemicelulosa, tanto por cantidad como variedad difiere mucho en función de las especies. En el caso de las maderas se puede apreciar una mayor cantidad de manosa y galactosa en las coníferas, mientras que la xilosa y los grupos acetil son más abundantes en las frondosas (Nogués, *et al.*, 2010).

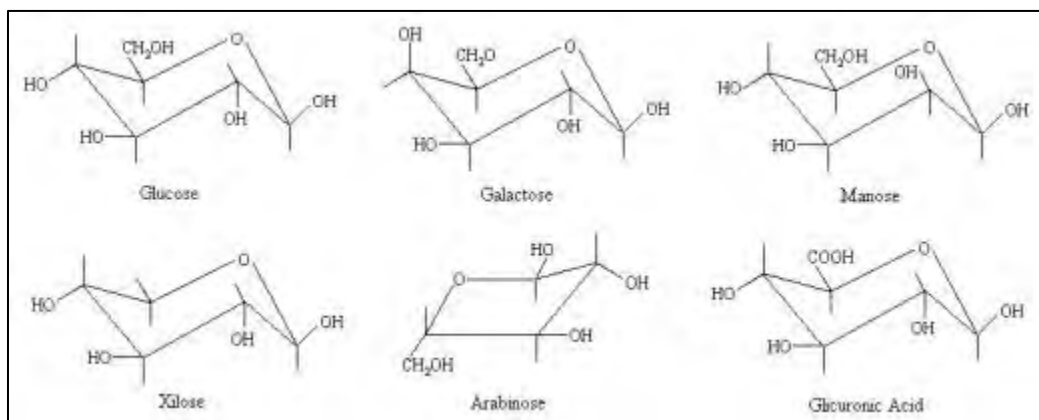


Figura 4. Principales componentes de la hemicelulosa.

2.4 Lignina

Es el polímero más abundante en el mundo vegetal y su función es proporcionar rigidez a la pared celular, asegurar protección contra la humedad, los agentes atmosféricos y el ataque de los microorganismos, además de actuar como elemento de la unión de las fibras de la celulosa.

La lignina es un compuesto formado por un tipo de moléculas distintas de los azúcares. Químicamente, es un polímero tridimensional amorfo constituido a partir de unidades de fenilpropano que se unen entre sí por enlaces tipo alquilo-éter o carbono-carbono (**Figura 5**).

Su estructura y composición, así como su contenido relativo en la biomasa lignocelulósica, dependen de las diferentes especies, las coníferas presentan generalmente un contenido más elevado en la lignina que las frondosas (Nogués, *et al.*, 2010).

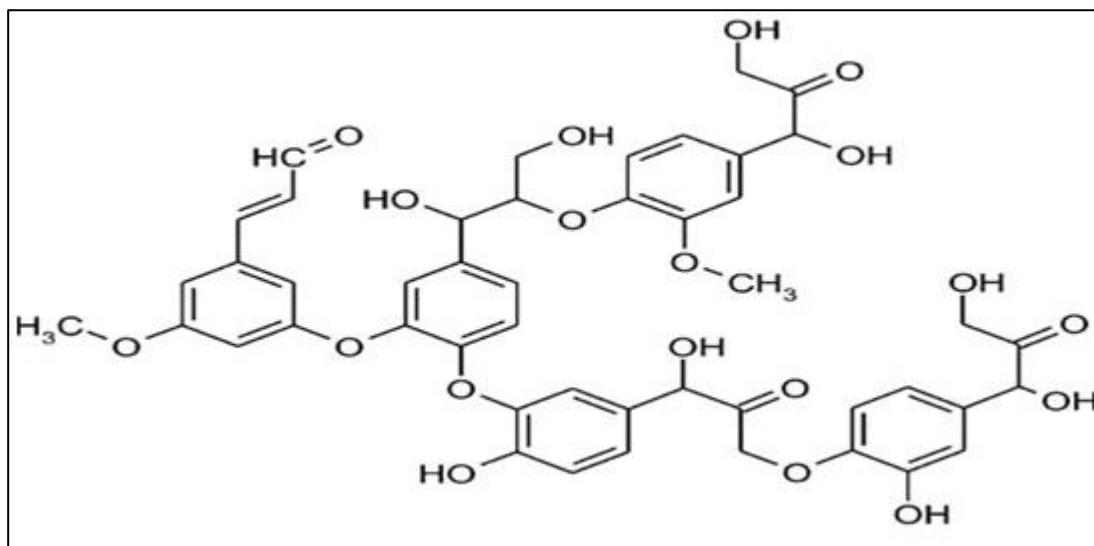


Figura 5. Estructura química de la lignina.

2.5 Tzalam

Nombres botánicos: *Lysiloma* spp.

Familia Fabaceae-Mimosoideae.

Distribución geográfica: México, Centro América y Caribe.

Otros nombres: Dzalam, tzukté, tepehuaje (MEX), abey, sabicú (CUBA), tavernon (HAITI).

Estatus protección CITES: No protegido.

Características de la madera

Albura de color crema amarillenta, claramente diferenciada del duramen de color café claro a oscuro con matiz ‘cobre’ o morado. Anillos de crecimiento débilmente marcados o ausentes. Hilo recto a entrecruzado, ocasionalmente muy irregular. La madera puede tener un veteadado de suave ha pronunciado, y en algunas ocasiones sin veteadado (**Figura 6**). Textura mediana, superficie algo lustrosa; madera seca sin olor o sabor característico (Silva, *et al.*, 2010).



Figura 6. Veteadado de la madera tzalam. Superficie: cara tangencial (izquierda) y radial, tamaño natural (derecha) (Silva, *et al.*, 2010).

El Tzalam es un árbol de porte mediano, que mide de 7 a 20 m, tronco recto muchas veces inclinado, ramas ascendentes, luego horizontales y péndulas, la copa tiene una apariencia redondeada, puede alcanzar un diámetro normal de hasta de 1.2 m, pero el más frecuente es de 30 cm. La corteza externa es variable, lisa o con fisuras finas, gris parduzco, con algunas lenticelas circulares del mismo color. El grosor total de la corteza varía de 7 a 15 mm. La madera es dura y pesada de color crema amarillenta, con vasos grandes y parénquima vasicéntrico. Los frutos son vainas de 9 x 2 a 15 x 4 cm, dehiscentes, aplanadas, agudas de color pardo moreno, brillantes y contienen numerosas semillas (tomado de (Negreros y Martínez, 2011).

En la **Tabla II**, se presentan los datos técnicos con respecto a las maderas *L. bahamensis* y *L. acapulcensis*, especies más ampliamente distribuidas en México. De acuerdo con la literatura disponible las propiedades y usos de ambas maderas no difieren significativamente entre sí (Silva, *et al.*, 2010).

Tabla II. Propiedades físicas de la madera *L. bahamensis* y *L. acapulcensis*.

Propiedades físicas		
Peso verde	~ 1200 (kg/m ³)	
Densidad seca al aire (12-15%)	0.70—0.88 [g/cm ³]	
Contracción	Total*	Normal**
	Radial [%]	~ 1.0
	Tangencial [%]	~ 2.1
Estabilidad dimensional	Buena a Regular	

*verde a seco (0% de humedad); **verde a 12% de humedad (Silva, *et al.*, 2010).

2.6 Biocombustibles

Los biocombustibles son aquellos biocarburantes como alcoholes, éteres, ésteres y otros productos químicos que provienen de compuestos orgánicos de base celulósica (biomasa) extraída de plantas silvestres o de cultivo, que sustituyen en mayor o en menor parte el uso de la gasolina en el transporte o destinados a producir electricidad (Salinas y Gasca, 2009).

Los biocombustibles son generalmente menos contaminantes que los combustibles fósiles ya que emiten menos CO, HC, SO₂ y material particulado. El impacto de los biocombustibles (etanol y biodiésel) en las emisiones de NO_x generalmente es de poca magnitud y puede tener signo positivo o negativo dependiendo de las condiciones. Por otro lado, presentan menos riesgo de toxicidad en su manipulación que los combustibles de origen fósil (Gómez, *et al.*, 2008).

Principales ventajas comparativas de los biocombustibles como sucedáneos de los combustibles fósiles son:

- Su carácter renovable, lo que significa, en teoría, que no deberían agotarse.
- Precios con baja interferencia política, más adherentes a la oferta y demanda que a otros factores.
- Las posibilidades de producción en todos los países del mundo que dispongan del área potencial para ampliar su superficie cultivada.
- El bajo impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, por el ciclo cerrado del carbono y, en muchos casos, de nitrógeno.

Las materias primas para su producción serán definidas con base en los siguientes criterios:

- Balance energético altamente positivo.
- Alto poder calorífico inferior.
- Alta densidad energética por unidad de área.

- Carbono neutro o positivo.
- Costo viable para los consumidores.
- Disponibilidad de materia-prima o facilidad de producción
- Facilidad de inventario, portabilidad y seguridad.
- Amplia distribución y acceso.

2.6.1 Biocombustibles de Primera Generación

Los biocombustibles de primera generación (Bioetanol, Biodiesel y Biogás) son aquéllos provenientes de la biomasa, especialmente de cultivos agrícolas destinados a la alimentación humana, para diferenciarlos de la segunda generación que no compite con la producción de alimentos. En la actualidad, las tecnologías de producción de aquéllos de primera generación son más simples y económicas y, en consecuencia, éstos se diferencian de los de segunda generación por el tipo de biomasa de donde se obtienen, y en la tecnología que se utiliza para su procesamiento (Cavieres, 2008).

2.6.2 Biocombustibles de Segunda Generación (2G)

Los biocombustibles de segunda generación (2G) se distinguen de los de primera generación en dos aspectos: se obtienen de vegetales que no tienen una función alimentaria, y se producen con innovaciones tecnológicas que permitirán ser más ecológicos y avanzados que los actuales. Como se obtienen de materias primas no alimentarias, se pueden cultivar en tierras marginales que no se emplean para el cultivo de alimentos. En este sentido, permiten una mayor diversificación con nuevas materias primas, nuevas tecnologías y nuevos productos finales, promoviendo de esta forma el desarrollo agrícola y agroindustrial (Salinas y Gasca, 2009).

2.7 Bioetanol

El etanol, de fórmula química C_2H_5OH , es un alcohol incoloro e inflamable que también funciona como combustible biodegradable de alto octanaje derivado de los azúcares, almidones y material celulósico que se encuentran en las plantas.

Las principales propiedades físicas y químicas del etanol se muestran en la **Tabla III**.

Tabla III. Propiedades físicas y químicas del etanol.

Propiedades físicas y químicas del etanol.	
Estado físico a 20 °C	Líquido
Color	Incoloro
Olor	Dulce, éter
Punto de fusión (°C)	-117 °C
Punto de ebullición (°C)	79 °C
Presión de vapor, 20 °C	59 mmHg
Densidad relativa al agua	0.7893
Solubilidad en agua (% en peso)	60%
Límites de explosión- inferior (%)	3.3
Límites de explosión- superior (%)	19

La diferencia que existe entre el etanol y el bioetanol es el proceso de producción, ya que el primero se obtiene del petróleo y el segundo de biomasa. Desde tiempos remotos se ha obtenido el alcohol a partir de la fermentación de bebidas alcohólicas como la cerveza, la sidra y el vino después de la fermentación se lleva a una destilación para obtener un grado de pureza más alto. De forma química el etanol se obtiene mediante la hidratación de etileno, con ácido fosfórico o ácido sulfúrico.

El etanol también es utilizado por la industria farmacéutica y cosmética, debido a que puede matar muchos organismos y sirve para la elaboración de perfumes y ambientadores. Al ser un producto altamente inflamable, los vapores pueden llegar a un punto de ignición ocasionando un incendio, por lo tanto, es importante tener precauciones al tratar con este químico ya que, de igual forma, puede ocasionar irritación de ojos, dolor de cabeza, vomito, coma, dermatitis e incluso la muerte.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Materia prima

La madera está compuesta por la celulosa, la lignina y la hemicelulosa, para la obtención del bioetanol se necesita la separación de los polímeros de la madera y para ello se requiere de un proceso (**Figura 16**) en el que se aplican métodos químicos, biológicos y físicos.

La madera que se utilizó proviene del aserradero de la comunidad ejidal Petcacab perteneciente al municipio de Felipe Carrillo Puerto, exactamente de los residuos desechados en forma de aserrín del aserradero de la comunidad en donde es procesada (**Anexo A**). Los residuos de aserrín utilizados son de madera tzalam (*Lysiloma latisiliquum*) (**Figura 7**), la cual, es una madera dura con un alto valor comercial en la comunidad.

Se realizaron tres réplicas de cada prueba con 50 g de los desechos de aserrín de madera *L. latisiliquum*.



Figura 7. Aserrín de madera tzalam (*Lysiloma latisiliquum*).

3.2 Prehidrólisis

El objetivo de la prehidrólisis o el pretratamiento es reducir la lignina de la madera para facilitar la degradación de la celulosa en la siguiente etapa, la cual es, la hidrólisis. Es importante conocer la temperatura y otras condiciones del tratamiento, dado que, las propiedades de cada materia prima son diferentes y no todos los métodos se adecuan y no logran ser efectivos.

De acuerdo con los datos obtenidos, para esta etapa se utilizó Hidróxido de sodio (NaOH) al 8% a una temperatura de 120 °C (López-Miranda, *et al.*, 2009), ya que la materia prima utilizada también es aserrín de una madera forestal. El tiempo del procedimiento fue de 85 min removiendo frecuentemente (**Figura 8**).



Figura 8. Prehidrólisis con NaOH.

Posteriormente, se tomó la muestra y se eliminó la lignina por medio de filtración y la celulosa sobrante se lavó con agua destilada y se filtró con una malla.

Seguidamente, se llevó a peso seco a 50 °C por 24 horas, después del tiempo transcurrido se pesó.

3.4 Hidrólisis

Para este proceso se pueden utilizar diferentes métodos químicos y biológicos. Los primeros emplean ácidos y los segundos de hongos y bacterias capaces de degradar la celulosa.

Para el tratamiento del aserrín se optó por realizar la hidrólisis ácida, de este tipo de tratamiento se obtienen una parte líquida, la cual, contiene azúcares fermentables y otra sólida que contiene celulosa y lignina.

Con relación a lo reportado, se agregó H_2SO_4 al 15%, a una temperatura de $125\text{ }^\circ\text{C}$ (Tejeda, *et al.*, 2010) y, a un tiempo de 6 horas (**Figura 9**), con una agitación de 150 rpm (Saleh, 2014).



Figura 9. Hidrólisis ácida.

Seguidamente, la solución resultante de sólido y líquido se separó por filtración y se lavó con agua destilada.

3.5 Detoxificación

Después de la hidrólisis acida se pueden formar compuestos como ácido acético, compuestos fenólicos, furfural, entre otros, que pueden inhibir la fermentación. Por lo tanto, la detoxificación consiste agregar una base para disminuir los compuestos tóxicos que se formaron para una mejor fermentación.

La base que se utilizó fue el hidróxido de sodio al 10% (NaOH) conocido comúnmente como sosa caustica, dado que, neutraliza y precipita inhibidores.

A cada prueba se le adicionó NaOH hasta alcanzar el pH= 5 (**Figura 10**). Después de obtener el pH deseado se filtró y lavó con agua destilada para la eliminación de las sales sobrantes.



Figura 10. Neutralización del hidrolizado.

Por último, se llevó a peso seco cada una de las muestras a una temperatura de 50 °C por 24 horas. Después del tiempo transcurrido se pesó nuevamente.

3.6 Fermentación

La etapa de fermentación consiste en transformar los azúcares liberados en la etapa de hidrólisis enzimática en etanol y dióxido de carbono por medio de microorganismos adecuados, levaduras principalmente.

De acuerdo a fuentes consultadas señaladas en los antecedentes, se optó por usar la levadura *Saccharomyces cerevisiae*.

El proceso de fermentación de la solución para cada muestra fue llevado con una relación de la siguiente proporción por cada 10 g de materia prima se agregó 5 g de levadura *Saccharomyces cerevisiae* amarga de la marca comercial La Realeza y 100 mL de agua.

Seguidamente, se selló la boca del matraz con algodón y gasa para mantenerlo semi-aerobia, como se puede observar en la **Figura 11**.



Figura 11. Fermentación.

Las muestras se mantuvieron a temperatura ambiente durante 72 horas.

3.7 Deshidratación

La deshidratación se hace a partir de diferentes técnicas de destilación, con el fin de solucionar el proceso de azeotropía que tiene la mezcla etanol-agua.

En esta fase se llevará a cabo la destilación sencilla (**Figura 12**) con el fin de separar el alcohol obtenido.

Para una mejor eficiencia a la solución se le agregará cloruro de sodio (NaCl) ya que es una de las sales comúnmente utilizadas, además de que son fáciles de obtener un tienen un precio accesible (López y Lozada, 2005).



Figura 12. Deshidratación.

3.8 Prueba de Etanol

Para comprobar que el producto resultante es bioetanol se someterá a dos pruebas que se presentan a continuación:

3.8.1 Prueba de ebullición del bioetanol

En esta etapa se probará que el producto obtenido sea bioetanol mediante una prueba de ebullición, es decir, lo pondremos en contacto con una fuente de calor externa para ver a que temperatura empieza la ebullición, ya que el etanol su grado de ebullición es de 78.3 °C.

3.8.2 Prueba de Lucas

Esta prueba es usada para identificar alcoholes de baja densidad, el reactivo Lucas reacciona con los alcoholes primarios, secundarios y terciarios, siendo el etanol un alcohol primario.

Para la preparación del reactivo se realizó lo siguiente: se añadió 68 g de $ZnCl_2$ a 45 mL de HCl concentrado, manteniendo fría la disolución.

Por último, en tubos de ensayo se agregó 0.5 mL de la solución obtenida de la destilación y 3 mL del reactivo de Lucas (**Figura 13**), agitándose durante 15 segundos.



Figura 13. Prueba de Lucas con diferentes alcoholes.

3.9 Determinación de azúcares reductores

3.9.1 Prueba de Fehling

El catión cúprico (Cu^{++}) del reactivo de Fehling reacciona con los glúcidos reductores pasando a óxido cuproso, que es un precipitado de color rojo ladrillo (**Figura 14**). Esta es una reacción que resulta positivo solo si el glúcido es reductor. Los glúcidos reductores se manifiestan en medio alcalino, pero el Cu^{++} en ese medio tiende a precipitar espontáneamente como óxido cúprico, de manera que es necesaria la presencia de tartrato de doble sodio y potasio en el reactivo para “secuestrar” al catión Cu^{++} , al fin de evitar la formación del óxido cúprico y permitir que reaccione con los glúcidos reductores.

Procedimiento

El procedimiento consiste en verter en tubos de ensayo 2 mL de la solución A de Fehling y 2 mL de la solución B de Fehling. Seguidamente, se le agrega 1 mL de la solución muestra y se calienta en baño María durante 10 min, por último, se retiran y se observa el contenido.



Figura 14. Reacción de la Prueba de Fehling.

3.9.2 Método del ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS)

Es un método de colorimetría en el que se utiliza ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS), el procedimiento se basa en una reacción redox que ocurre entre el DNS y los azúcares reductores totales (ART) presentes en las muestras a analizar.

Para la cuantificación de azúcares reductores por este método las muestras se mandaron a analizar (**Figura 15**) en el laboratorio del Instituto Tecnológico de Toluca a cargo del M.C. Julio César Gómora Hernández. La descripción del procedimiento se encuentra descrito en el **Anexo B**.



Figura 15. Muestras del hidrolizado.

Diagrama de Flujo

Producción de Bioetanol

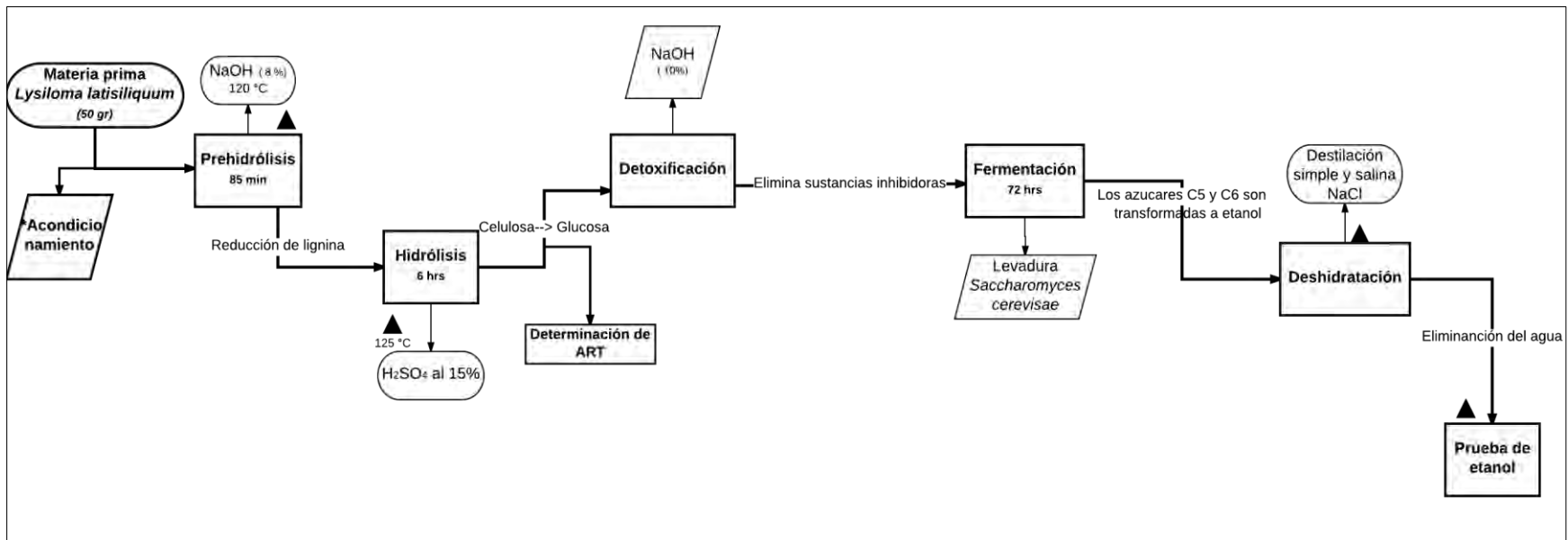


Figura 16. Diagrama del Proceso de Producción de Bioetanol.

Prueba 1. Metodología original (MSA). Consistió en seguir la metodología original sin acondicionamiento.

Para obtener un mejor rendimiento se procedió a agregar un acondicionamiento del aserrín para eliminar posibles inhibidores, cada ensayo tuvo pequeñas variaciones que se describen a continuación:

Acondicionamiento

Prueba 2. Ebullición (EBL). Consistió en agregar agua destilada a las muestras y poner a hervir durante 10 min, después del tiempo transcurrido se filtró y se puso a secar por 24 horas a 50 °C.

Prueba 3. Autoclave Sin prehidrólisis (ASP). Consistió en colocar las muestras en un Autoclave Modelo 25X-1, llegando a una temperatura de 127 °C y 15 psi, durante 15 min, sin pasar por la etapa de prehidrólisis.

Prueba 4. Autoclave Con prehidrólisis (ACP). Consistió en colocar las muestras en un Autoclave Modelo 25X-1, llegando a una temperatura de 127 °C y 15 psi, durante 15 min.

Prueba 5. Remojo (RMJ). Consistió en agregar agua destilada a las muestras y dejar reposar por 24 horas, después del tiempo transcurrido se filtró por una malla y se puso a secar por 24 horas a 50 °C.

Prueba 6. Madera suave (MSU). Consistió en utilizar una madera suave (pino) y seguir con la metodología normal.

Prueba 7. Autoclave con agua/prehidrólisis (AACP). Consistió en agregar agua a las muestras y colocarlas en una Autoclave Modelo 25X-1, a una temperatura de 127 °C y 15 psi, durante 15 min.

Prueba 8. Autoclave con agua y sin prehidrólisis (AASP). Consistió en duplicar la cantidad de materia prima utilizada y, por ende, los reactivos. También se excluyó la etapa

de la prehidrólisis. Se agregó agua a las muestras y se colocaron en una Autoclave Modelo 25X-1, a una temperatura de 127 °C y 15 psi, durante 15 min.

Cada prueba se realizó por triplicado y se promediaron para tener un resultado más exacto, los cuales se encuentran descritos más adelante. Los resultados a detalle de cada replica para las pruebas se encuentran el **Anexo C**.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre los resultados se encuentra la pérdida de materia orgánica debido a la reducción de lignina durante el proceso metodológico, la apreciación organoléptica y los resultados de la prueba de Fehling (**Tabla IV**).

Tabla IV. Resultado promedio de las pruebas en la etapa de acondicionamiento, prehidrólisis, hidrólisis, apreciación organoléptica y prueba de Fehling.

Prueba	Materia prima inicial	Acondicionamiento	Prehidrólisis	Hidrólisis	Detoxificación	Apreciación organoléptica	Prueba de Fehling
1 MSA	<i>Lysiloma latisiliquum</i>	Metodología Original Sin Acondicionamiento	NaOH 8% 120 °C 85 min	H ₂ SO ₄ 15% 125 °C 150 rpm 6 hrs	NaOH 10%		
	50 g	N/A	37.88 g	N/A	23.43 g	+	✓
2 EBL	<i>Lysiloma latisiliquum</i>	Agregar agua y hervir por 10 min.	NaOH 8% 120 °C 85 min	H ₂ SO ₄ 15% 125 °C 150 rpm 6 hrs	NaOH 10%		
	50 g	48.87 g	35.39 g	N/A	29.02 g	+++	✓

3 ASP	<i>Lysilom</i>	Autoclave	N/A	H ₂ SO ₄	NaOH		
	<i>a</i>	127 °C		15%,	10%		
	<i>latisiliqu</i>			125 °C			
	<i>um</i>	15 psi		150			
		15 min		rpm			
				6 hrs			
	50 g	50 g	N/A	N/A	28.53 g	+	✓
4 ACP	<i>Lysilom</i>	Autoclave	NaOH	H ₂ SO ₄	NaOH		
	<i>a</i>	127 °C	8%	15%	10%		
	<i>latisiliqu</i>		120 °C	125 °C			
	<i>um</i>	15 psi	85 min	150 rpm			
		15 min		6 hrs			
	50 g	50 g	36.76 g	N/A	12.74 g	++	✓
5 RMJ	<i>Lysilom</i>	Agregar agua	NaOH	H ₂ SO ₄	NaOH		
	<i>a</i>	y dejar	8%	15%	10%		
	<i>latisiliqu</i>	reposar	120 °C	125 °C			
	<i>um</i>	durante 24	85 min	150 rpm			
		hrs.		6 hrs			
	50 g	43.76 g	35.51 g	N/A	10.5 g	++	✓
6 MSU	Madera	N/A	NaOH	H ₂ SO ₄	NaOH		
	suave		8%	15%	10%		
			120 °C	125 °C			
			85 min	150 rpm			
				6 hrs			
	50 g	N/A	41.74 g	N/A	25.52 g	++	✓

7 AAC P	<i>Lysilom</i>	Agregar agua	NaOH	H ₂ SO ₄	NaOH		
	<i>a</i>	Autoclave	8%	15%	10%		
	<i>latisiliqu</i>		120 °C	125 °C			
	<i>um</i>	127 °C	85 min	150 rpm			
		15 psi		6 hrs			
	15 min						
	50 g	44.02 g	38.76 g	N/A	26.06 g	++	✓
8 AAS P	<i>Lysilom</i>	Agregar agua	N/A	H ₂ SO ₄	NaOH		
	<i>a</i>	Autoclave		15%	10%		
	<i>latisiliqu</i>			125 °C			
	<i>um</i>	127 °C		150 rpm			
		15 psi		6 hrs			
	15 min						
	100 g	88.08 g	N/A	N/A	61.64 g	++	✓

N/A. No Aplica
+++ Muy dulce
++ Moderadamente dulce
+ Dulce
✓ Positivo ART

También se obtuvo la cuantificación de los azúcares reductores totales (los detalles se observan en la **(Tabla VI)** por el método del ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS) y se realizó la curva de calibración **(Figura 17)**.

Tabla V. Cuantificación de azúcares reductores.

Co (g/L)	Abs
0.5	0.146
1	0.2985
1.5	0.464
2	0.6055
2.5	0.759
3	0.891
3.5	1.047
4	1.211
4.5	1.2795
5	1.439
5.5	1.5975
6	1.615

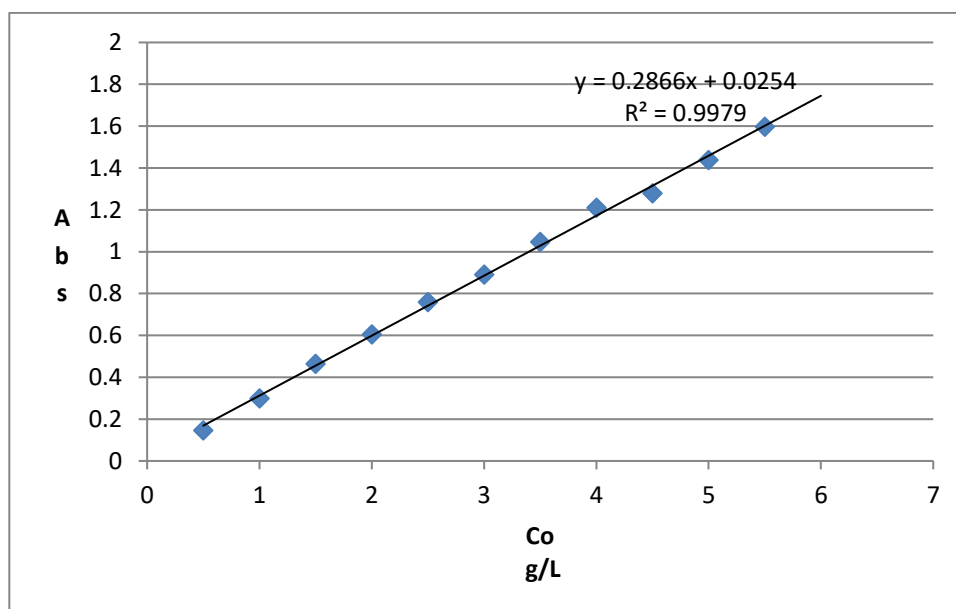


Figura 17. Curva de calibración de los ART.

En la **Tabla VI** se puede apreciar los azúcares reductores cuantitativamente obtenidos a partir de la curva de calibración (**Figura 17**) por el método DNS.

Tabla VI. Cuantificación de azúcares reductores.

No. prueba	Clave de Prueba	AbsProm	[ART] g/L	Desvprom	Error
<i>1</i>	MSA	0.92933333	31.539893	0.02326122	0.08747097
<i>2</i>	EBL	0.61316667	20.5082577	0.04070714	0.20309076
<i>3</i>	ASP	1.07066667	36.4712724	0.03489184	0.09888031
<i>4</i>	ACP	0.59916667	20.019772	0.0290765	0.1034705
<i>5</i>	RMJ	0.97216667	33.0344266	0.01744592	0.05662388
<i>6</i>	MSU	0.45883333	15.1232845	0.01744592	0.11840902
<i>7</i>	AACP	0.70016667	23.5438474	0.02907653	0.1180196
<i>8</i>	AASP	0.6655	22.3342638	0.01744592	0.07556587

Metodología original Sin Acondicionamiento (MSA). Ebullición (EBL). Autoclave Sin Prehidrólisis (ASP). Autoclave Con Prehidrólisis (ACP). Remojo (RMJ). Madera Suave (MSU). Autoclave con Agua y Con Prehidrólisis (AACP). Autoclave con Agua y Sin Prehidrólisis (AASP).

Costos de producción

A continuación, se presentan los costos de producción por cada 50 gr de materia prima utilizada:

Tabla VII. Costos de producción por reactivos y sustancias utilizados.

Reactivo	Cantidad	Pesos (MXN)
NaOH	54 g	21.06
H ₂ SO ₄	45 ml	8.35
Levadura <i>S. cerevisiae</i>	5 g	1.2
Agua destilada	1050 ml	12.32
Agua potable	40000 ml	0.54
Total		43.47

Tabla VIII. Costos de consumo de energía.

Tratamiento	Aparato	Potencia (W)	KWh	Tiempo de duración	Pesos (MXN)
Acondicionamiento	Autoclave	1050	0.7318	15 min	0.18
Prehidrolisis	Parrilla eléctrica	698	0.4865	85 min	0.68
	Horno eléctrico	924	0.6440	24 hrs	15.45
Hidrolisis	Parrilla eléctrica	698	0.4865	6 hrs	2.91
Detoxificación	Parrilla eléctrica	698	0.4865	30 min	0.24
	Horno eléctrico	924	0.6440	24 hrs	15.45
Destilación	Parrilla eléctrica	698	0.4865	5 hrs	2.43

Tabla IX. Costos de producción por procesos, incluyendo el costo por sustancias, reactivos y consumo energético. Metodología sin Acondicionamiento.

Tratamiento	Pesos (MXN)
Materia prima	0.00
Prehidrolisis	28.01
Hidrolisis	14.78
Detoxificación	30.91
Fermentación	2.96
Destilación	2.97
Costo total	79.63
Costo del etanol por mL	3.95

Tabla X. Costos de producción por procesos, incluyendo el costo por sustancias, reactivos y consumo energético. Acondicionamiento en autoclave.

Tratamiento	Pesos (MXN)
Materia prima	0.00
Acondicionamiento autoclave	0.18
Hidrolisis	14.78
Detoxificación	30.91
Fermentación	2.96
Destilación	2.97
Costo total	51.8
Costo del etanol por mL	2.22

Esta es la primera vez que se trabaja con madera Tzalam para la obtención de bioetanol, sin embargo, existen antecedentes de producción de bioetanol con diferentes tipos de materia prima, mayormente utilizando biomasa como caña de azúcar, maíz, arroz, entre otras.

Existen reportes del rendimiento de bioetanol utilizando biomasa agroindustrial (**Tabla XI**) pero con similitudes al proceso metodológico utilizado en este trabajo, por ejemplo, otros autores realizaron hidrólisis acida utilizando ácido sulfúrico y levadura *S. cerevisiae* para la fermentación obteniendo un porcentaje de rendimiento de etanol por biomasa tratada del 25% (.199 g etanol/g biomasa) con cascaras de arroz y un rendimiento de etanol por glucosa obteniendo 0.39 g etanol/ g glucosa (Rojas y Cabanillas, 2008).

Tabla XI. Rendimientos reportados para la generación de bioetanol.

Materia prima	Rendimiento de bioetanol (g/g)	Referencia
Pulpa de café	0.132	Rodríguez y Cárdenas, 2009
Cascara de piña	0.066	Niño, 2015
Residuos cítricos	0.127	Coll, 2008
Fécula de maíz	0.352	Cardona, <i>et al.</i> , 2005
Caña de azúcar	0.059	

g de etanol/ g de biomasa

Una de las especies forestales utilizadas para la producción de bioetanol es el *P. radiata*, dando un posible rendimiento de 0.015 y 0.023 g de etano/g de biomasa en temperaturas a 130 °C y 170 °C en la hidrólisis. Es importante mencionar, que este tipo de

madera a diferencia del *L. latisiliquum*, es una madera que se encuentra en la clasificación de maderas suaves y blandas, por lo tanto, las características físicas (**Tabla XII**) y químicas son relativamente diferentes. Las diferentes propiedades es un factor importante para impedir la degradación de celulosa.

El *Eucalyptus globulus* es una especie forestal de madera dura parecida a la madera *L. latisiliquum* (**Tabla XII**). El *Eucalyptus globulus* fue evaluada para la producción de etanol, obteniendo un rendimiento de 0.48 g etanol/ g de xilosa (Mendes, *et al.*, 2009), a diferencia de la evaluación del *P. radiata* en g etanol/g de biomasa, esta se evaluó con una relación g etanol/ g de xilosa.

Tabla XII. Propiedades físicas de diferentes especies forestales.

Tipos de maderas	Propiedades físicas Especies	Contracción total					Rendimiento de etanol
		Peso verde (kg/m ³)	Densidad seca al aire (12-15% u) [g/cm ³]	Radial [%]	Tangencial [%]	Estabilidad dimensional	
Maderas duras	Tzalam	~ 1200	0.70 - 0.88	2.7 - 3.0	5.5- 7.8	Buena a Regular	0.51 g etanol/ g glucosa ^a
	Caoba	900 - 100	0.47 – 0.55 – 0.63	3.03- 3.3	4.1 – 5.5	Muy buena	ND
	Eucalipto globulus	~ 1300	0.55 – 0.73 – 0.80	4.5 – 9.8	9.0 – 16.0	Regular a mala	0.48 g etanol/ g de xilosa
Maderas	Ceiba	500 - 700	0.21- 0.27 – 0.42	2.1 – 2.9	4.1 – 5.5	Buena a regular	ND

Pino blanco	~ 1200	0.47 – 0.51 – 0.61	4.2 – 4.6	8.0 – 10.4	Regular	ND
Pino radiata	679 - 451	0.51 – 0.45	4.2	7.0	Buena a regular	0.015 y 0.023 g de etanol/g de biomasa

a) Fuente Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas (Silva, *et al.*, 2010).

b) Fuente Tesis de Caracterización de madera de *Pinus radiata* D. Don sometido a un proceso de modificación térmica usando un ambiente de inmersión (Ariete, 2010).

^a Rendimiento máximo teórico.

ND. No disponible.

El rendimiento de etanol se ha evaluado de diferentes maneras: g etanol/ g de biomasa; g etanol/g de sustrato consumido; g etanol/g de azúcar; g etanol/g de glucosa; g etanol/g de xilosa. Se han evaluado diferentes tratamientos de detoxificación (Sin detoxificar, con hidróxido de sodio (NaOH), con carbón activado (CA) y una combinación de CA+NaOH) y obtuvo los rendimientos de etanol en g etanol/g de biomasa y g etanol/g de glucosa, utilizando como materia prima *P. máxima*. Los rendimientos reportados para la generación de bioetanol, a partir del tratamiento sin detoxificar, con hidróxido de sodio (NaOH), carbón activado (CA) y combinación de CA+NaOH son de 0.063 g etanol/ g biomasa, 0.075 g etanol/ g biomasa, 0.053 g etanol/ g biomasa, 0.050 g 0.034 g etanol/ g glucosa,, 0.56 g etanol/ g glucosa, 0.33 g etanol/ g glucosa, 0.43 g etanol/ g glucosa, respectivamente (Castillo, 2014). Cómo se puede observar el tratamiento con NaOH muestra mejores resultados que los otros tratamientos utilizados. Entre otras especies estudiadas similares a *P. máxima* está el pasto maralfalfa (*Pennisetum sp.*) con un rendimiento de 0.117 g etanol/ g biomasa, pasto gigante (*Pennisetum purpureum*) con un rendimiento de 0.067 g etanol/ g biomasa (como se cita en Castillo, 2014). Se realizó un pretratamiento con agua caliente (LHW) sobre la producción de etanol en *Miscanthus lutarioriparius* obteniendo un rendimiento de 0.248 g etanol/ g biomasa para solidos suspendidos y 0.236 g etanol/ g biomasa para solidos precipitados (Li, *et al.*, 2013). En resumen, el mejor resultado con relación al rendimiento g etanol/ g biomasa fue el de Li, *et al*, (2013) utilizando *Miscanthus lutarioriparius*. La variación del rendimiento de etanol puede deberse a; 1) las diferentes propiedades físicas y químicas de cada materia prima utilizada; 2) los diferentes

tratamientos; 3) al reactivo utilizado, de acuerdo con el sustrato; 4) incluso la temperatura puede resultar una variable que afecta la concentración de azúcares obtenidos. Cabe mencionar, que el organismo seleccionado para la fermentación también va a influir en el rendimiento de etanol, ya que hay organismos que no son capaces de consumir todos los azúcares productores de etanol.

Para el *L. latisiliquum*, se determinaron las concentraciones de azúcares reductores para los hidrolizados de cada prueba descrita en los resultados, el mejor resultado se obtuvo en la prueba 3, ya que fue la prueba con mayor concentración de ART (**Figura 18**).

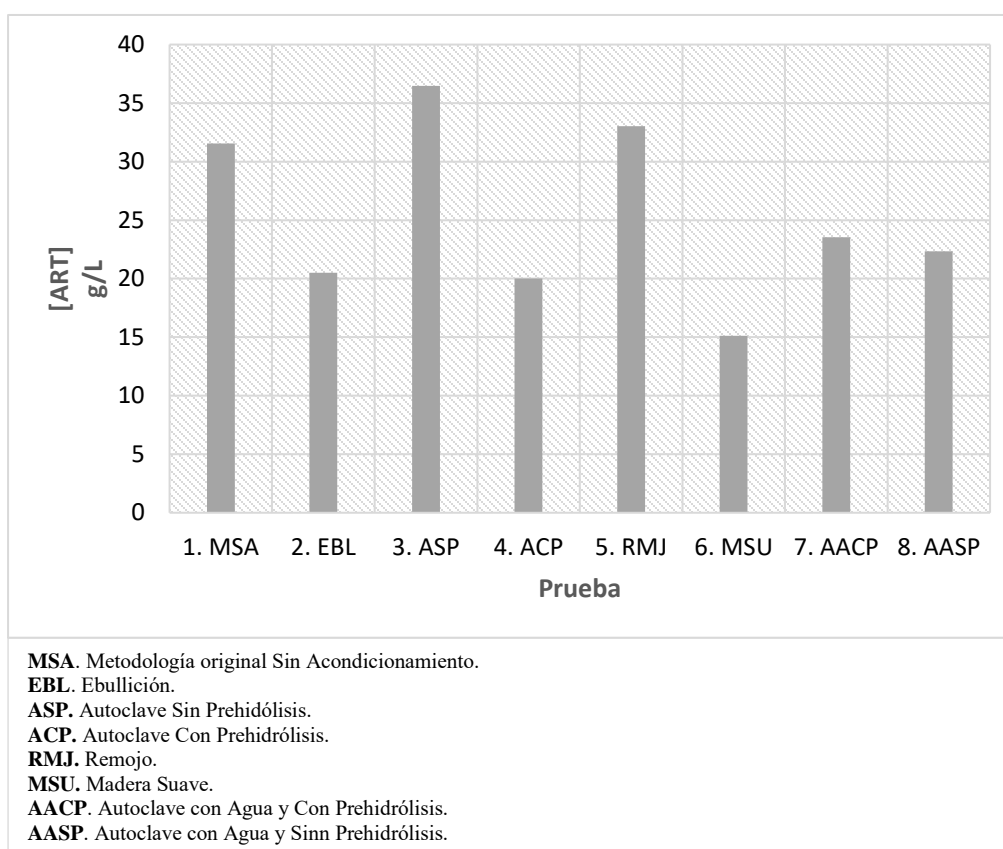


Figura 18. Concentración promedio de ART para los hidrolizados de cada prueba.

La concentración máxima de ART fue de 36.47 g/L para la prueba 3 y la mínima fue de 15.12 g/L para la prueba 6 (**Figura 18**). También, se realizó una estimación del rendimiento máximo teórico de g etanol/ g glucosa de acuerdo con los cálculos descritos en el **Anexo D** y se obtuvo que para cada prueba el rendimiento máximo teórico de etanol es

0.51 g/ g azúcar (**Tabla XIV**). Así que, teniendo en cuenta la concentración promedio de cada prueba se obtuvo una estimación del rendimiento de etanol para cada una (**Tabla XIII**).

Tabla XIII. Estimación teórica del rendimiento de etanol por concentración promedio de azúcares obtenidos en cada prueba.

Prueba	Clave de prueba	Rendimiento estimado (g/g) *
1	MSA	16.12 / 31.53
2	ABL	10.4 / 20.05
3	ASP	18.65 / 36.4
4	ACP	10.23 / 20.01
5	RMJ	16.89 / 33.03
6	MSU	7.73 / 15.12
7	AACP	12.4 / 23.54
8	AASP	11.42 / 22.33

* g etanol /g glucosa

Metodología original Sin Acondicionamiento (MSA). Ebullición (EBL). Autoclave Sin Prehidrólisis (ASP). Autoclave Con Prehidrólisis (ACP). Remojo (RMJ). Madera Suave (MSU). Autoclave con Agua y Con Prehidrólisis (AACP). Autoclave con Agua y Sinn Prehidrólisis (AASP).

Otros autores hicieron una relación de g etanol/ g azúcar e incluso determinaron azúcares reductores en g/L de su hidrolizado, entre esta relación se evaluó la producción de etanol a partir del bagazo de caña de azúcar realizando dos ensayos y cada uno con pretratamientos diferentes, el primero con Peróxido de Hidrogeno (H_2O_2) y el segundo con Hidróxido de Calcio (NaOH) y también determinó la concentración en g/L de azúcares reductores totales (ART) en muestras de fermentación del hidrolizado partir del Test H_2O_2

obtuvo 29.64 g/L y para el Ensayo 1 CaOH_2 obtuvo 30.31 g/L (Amezquita, 2007). En cuanto, rendimiento de etanol para el Test H_2O_2 fue de 0.36 g etanol/ g azúcar; para el Ensayo 1 0.37 g etanol/ g azúcar en H_2O_2 y 0.38 g etanol/ g azúcar en NaOH (**Tabla XIV**), por último, para el Ensayo 2. 0.37 g etanol/ g azúcar en H_2O_2 y 0.39 g etanol/ g azúcar en NaOH (Amezquita, 2007), cabe mencionar, que el rendimiento de etanol es igual a la concentración máxima de etanol producido sobre la concentración de azúcar inicialmente presente. Con una concentración total de azúcares de 41.05 ± 0.9 g/L, el rendimiento de etanol fue 0.41 g etanol/ g de azúcar para hidrólisis y fermentación separada (SHF) y 0.33 g etanol/ g de azúcar para la sacarificación y fermentación simultánea (SSF) (Saha y Cotta, 2006) (**Tabla XIV**).

Por otra parte, Triana (2010) realizó ensayos con diferentes métodos para determinar el mejor pretratamiento en la producción de azúcares. Las concentraciones de ART del pretratamiento a partir de hidrólisis ácida, autoclave, hidrólisis alcalina son de 33.41 g/L, 4.94 g/L y 1.54 g/L, respectivamente. Como se puede observar el de mejores resultados es la hidrólisis alcalina, por lo tanto, descarto los otros métodos y realizó la detoxificación de la muestra del pretratamiento de la hidrólisis ácida y obtuvo una concentración inicial de azúcares de 19.5 g/L en la fermentación (Triana, 2010). Para el rendimiento de etanol reporta g etanol producido/ g de sustrato consumido probando con tres microorganismos para la producción de etanol los resultados son 0.34 g etanol/g sustrato, con *Candida lusitanae*, 0.23 g etanol/g sustrato y con *Pichia stipitis*, 0.41 g etanol/ g sustrato, todas estas muestras tenían una concentración final de ART igual 19.6 g/L (Triana, 2010). Asimismo, consiguió un rendimiento de etanol para zoca de café de 0.191 g etanol/g biomasa (Triana, 2010).

Saleh (2014) obtuvo concentraciones máximas de azúcares reductores totales en hidrolizados de H_2SO_4 y HNO_3 para hueso de aceituna son 41.08 g/L a 210 °C y 38.16 g/L a 205 °C, respectivamente. Además de esto, obtuvo el rendimiento de etanol con relación a la glucosa en diferentes concentraciones del hidrolizado con H_2SO_4 a 0.010 M el rendimiento fue de 0.5124 g etanol/ g glucosa y a 0.025 M el rendimiento fue igual de 0.5124 g etanol/ g glucosa (Saleh, 2014) (**Tabla XIV**). También, señaló el rendimiento g etanol/ g biomasa para el H_2SO_4 a 0.010 M fue 0.103 g etanol/ g biomasa y 0.094 g etanol/ g biomasa H_2SO_4 a 0.025 (Saleh, 2014). Por último, Tejeda, *et al* (2010) obtuvo una concentración de azúcares reductores de 80 g/l en cáscaras de naranja y 45 g/L en cáscaras de piña y el rendimiento de

etanol fue de 0.008 g de etanol/ g biomasa (cascaras de naranja) y 0.001 g de etanol/ g de biomasa (cascaras de piña).

Tabla XIV. Tabla comparativa de la concentración de ART y el rendimiento etanol/glucosa de diferentes fuentes.

Biomasa	Tratamiento	ART (g/L)	Etanol/ azúcar (g/g)	Referencia
Caña de azúcar	Test H ₂ O ₂	29.64	0.36	(Amezquita, 2007)
	Ensayo 1. CaOH	30.31	0.38	
Paja de trigo	SHF	41.5 ± 0.9	0.41	(Saha y Cotta, 2006)
	SSF		0.33	
Tzalam	Hidrólisis acida	36.4 ± 15.07	0.51 ^a	Este trabajo
Hueso de aceituna	H ₂ SO ₄	41.08	0.5108 ^b	(Saleh, 2014)
	0.010			
	0.025			

^a Rendimiento máximo teórico.

^b g etanol/ g de glucosa

Hidrolisis y fermentación separada (SHF)

Sacarificación y fermentación simultanea (SSF)

Los resultados teóricos del rendimiento de etanol son buenos, de manera física no se pudo obtener, ya que existen posibles efectos inhibidores, los cuales pueden ser los siguientes: formación de compuestos químicos como el ácido láctico, sulfitos (Oliva-Neto, *et al.*, 2013), furfural, el ácido acético, y compuestos fenólicos, la temperatura (Oliva-Neto, *et al.*, 2013) y, un pH demasiado alto destruye algunos azúcares disponibles y reduce el rendimiento de etanol (Mohagheghi, *et al.*, 2006);

Es importante mencionar que, en 2006 en México, sólo 9.5% de la oferta total de energía era renovable, mientras que en Brasil 38.7% de su energía es de fuentes renovables. Además, habría que aclarar que la poca energía renovable que se produce en México, a diferencia de Brasil, es fundamentalmente hidráulica, solar y eólica, y no se utilizan hasta el momento la producción comercial de biocombustibles a partir de cultivos agrícolas o forestales (Becerra, 2006).

En 2015 en México, la energía hidráulica representó la mayor participación del total regional de energías renovables y, la mayor parte de la capacidad en operación renovable continúa siendo hidroeléctrica, que en suma con la energía eólica representan el 80% de la capacidad instalada en energías limpias (SENER, 2016).

Los avances que México presenta al 2016 en biocombustible se centran en el diseño y fortalecimiento de la política pública para fomentar la producción y uso de biocombustibles e introducirlo en la gama de productos que diversifiquen la matriz energética del país. Una de las principales tecnologías para la producción de biocombustibles es: El bioetanol que se produce por la fermentación de la glucosa contenida en algunos productos agrícolas (SENER, 2016), por otra parte, también existen los biocombustibles de segunda generación hechos a partir de desechos lignocelulósicos, como es el aserrín de madera tzalam.

Cabe mencionar que, Quintana Roo cuenta con una superficie total de 1,986,070.0 Ha que es apta para ser aprovechada para la producción de biocombustibles (SENER, 2016), además, tiene 7 ejidos potenciales en el aprovechamiento de sus recursos forestales y tres con certificación FSC (Forest Stewardship Council) que garantiza que los productos tienen su origen en bosques y selvas bien manejados y que proporcionan beneficios ambientales, sociales y económicos, los ejidos acreedores de esta certificación son: Tres Garantías, Petcacab y Noh-Bec, por lo tanto, en estos ejidos, además del ejido Petcacab existe generación de desechos lignocelulósicos que pueden ser aprovechados para la producción de bioetanol.

De acuerdo con el Plan de Manejo Forestal (PMF) de Petcacab, este cuenta con una superficie de producción maderable y no maderable de 41,776 Ha y una existencia real de madera tzalam de 99,509.43 m³ VTA (Volumen Total por Árbol), una distribución de productos de la anualidad 6 (2017) de 2,996.6 m³ VTA y en desperdicios se tiene 881.87 m³

(Anexo F). Además, de las 22 las especies dominantes con respecto al volumen, número de árboles y área basal, ya que en conjunto contienen el 65.2% del volumen total. Las especies dominantes con base en estas variables son: Tzalam, Chicozapote, Amapola, Ya'axnik, Chakah, Ramón, Chechem, Zapotillo y Caoba.

Debido a la cantidad de distribución y características tales como el tamaño del diámetro, es que además de la caoba, la especie tzalam se encuentra entre las especies más comerciadas del ejido, esto conlleva a que la mayor cantidad de residuos será de estas dos especies que se pueden utilizar como aprovechamiento de biomasa para hacer biocombustibles.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El aserrín de madera *Lysiloma latisiliquum* demostró tener una buena concentración de azúcares reductores totales en comparación con otras referencias, que ya fueron descritas anteriormente.

El mejor acondicionamiento consistió en colocar las muestras en un Autoclave Modelo 25X-1, llegando a una temperatura de 127 °C y una presión de 15 psi, durante 15 min, sin pasar por la etapa de prehidrólisis, siendo este el acondicionamiento de la prueba 3, la cual, contiene la mayor concentración de ART (36.47 g/L) respecto a las otras pruebas. Y el acondicionamiento en el que se obtuvo la menor concentración de ART fue el de la Prueba 6 (15.12 g/L), la cual, consistió en utilizar una madera suave (pino) y seguir con la metodología normal. Siguiendo con este razonamiento, concluimos que el tratamiento de prehidrólisis podría excluirse de la metodología, ya que se ahorraría en costos de producción.

Respecto al rendimiento máximo teórico del etanol resulta que la madera *L. latisiliquum* tiene un gran potencial para la obtención de etanol, ya que el rendimiento máximo teórico es de 0.51 g de etanol/ g de glucosa. Y el rendimiento teórico de etanol respecto a la concentración más alta de ART obtenidos en la prueba 3 sería de 18.65 g de etanol / 36.4 g de ART. Es importante mencionar, que este resultado podría variar, ya que solo se cuantificaron los ART del hidrolizado y en la etapa de detoxificación, que es después de la hidrólisis y antes de la fermentación, existen una reducción de ART que no fueron cuantificados, lo que señala un posible menor rendimiento de etanol comparado con el rendimiento máximo teórico.

Aunque los resultados teóricos del rendimiento de etanol son buenos, de manera física no se pudo obtener, ya que existen posibles efectos inhibidores en la fermentación para la producción de este combustible. Los efectos inhibidores pueden ser los siguientes: formación de compuestos químicos y la temperatura.

Otras recomendaciones son los diferentes usos que se le puede dar al aserrín de madera tzalam, teniendo en consideración reducir el impacto ambiental que provoca la quema

del aserrín con los gases invernaderos que genera hacer esto. Cabe mencionar, que en la comunidad ejidal estudiada el aserrín era quemado cuando sobrepasaba los límites de almacenamiento.

Se considera que utilizar el aserrín para abono sería más factible, ya que, debido a las propiedades que tiene sirve para fortalecer el crecimiento de las plantas y no se necesita de tratamiento o cuidado especial.

Otro uso favorable para el aserrín son los pellets, los cuales son una clase de biocombustible formado a base de serrín prensado y virutas de madera. Los pellets tienen como ventaja ser un combustible renovable con la alternativa más ecológica de la energía térmica. Además, su propia composición, hace que también sea el combustible más barato del mercado.

Otro uso que se le pueda dar al aserrín es para hacer carbón activado, este es un tipo de carbón especialmente poroso que tiene la cualidad de atrapar diferentes compuestos como metales pesados, gases, toxinas, algunas proteínas y productos de desecho. En el enfoque ambiental el carbón activado es muy importante ya que es utilizado para el tratamiento de aguas.

Además de la especie tzalam otra que se puede utilizar para la producción de etanol es la caoba (*Swietenia macrophylla*) ya que tiene gran importancia comercial, no solo en el ejido Petcacab, sino en los 7 ejidos potenciales en el aprovechamiento de sus recursos. De igual manera, se puede aprovechar todos los desechos de estas dos especies y ya no solo el aserrín.

Otra recomendación importante es que se debería de utilizar otras fuentes de energía, ya que, debido a los gastos de consumo de esta, no es factible la producción de etanol, por lo tanto, se recomienda utilizar un tipo de energía solar, en la que se puedan reducir los costos.

REFERENCIAS

- Amezquita Fonseca, N. A. (2007). *Obtención de etanol por la fermentación alcohólica del hidrolizado enzimático del bagazo de caña de azúcar*. (Tesis de licenciatura). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Andary, J., Maalouly, J., Ouaini, R., Chebib, H., Beyrouthy, M., Rutledge, D., y Ouaini, N. (2013). Phenolic Compounds from Diluted Acid Hydrolysates of Olive Stones: Effect of Overliming. *Advances in Crop Science and Technology*, 1(103), 1-7. <https://dx.doi.org/10.4172/2329-8863.100010>
- Becerra, L. A. (2006). La industria del etanol en México. Sinaloa, México. Recuperado el 03 de noviembre de 2016, de <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econunam/pdfs/16/06luisarmando.pdf>
- Bellido Díez, C. (2013). *Obtención de bioetanol 2G a partir de hidrolizados de paja de trigo. Fermentación de los penta y hexa carbohidratos con Pichia stipitis*. (Tesis de doctorado, Universidad de Valladolid). Recuperado de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/4556/1/TESIS501-140301.pdf>.
- Blasco, M. (1970). *Microbiología de Suelos*. Turrialba: Bib. Orton IICA / CATIE.
- Cardona, C., Sánchez, O., Montoya, M., y Quintero, J. (30 de agosto de 2005). Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz. *Scientia et Technica*, XI (28), 187-192.
- Castillo Saldarriaga, C. (2014). *Obtención de un hidrolizado detoxificado a partir de biomasa lignocelulósica de Panicum maximum para su uso como sustrato en la fermentación alcohólica*. (Tesis para magister, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/46027/1/2822323.2014.pdf>.
- Cavieres, P. (2008). Biocombustibles de Primera Generación. *Electro INDUSTRIA*. Recuperado de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=959>

- Coll, C. (2008). *La utilización de los residuos frutícolas para obtener bioetanol de Segunda Generación*. Recuperado de http://www.imecal.com/perseo/images/Jor_CCLimatico_CCL.pdf
- Conafor, y Semarnat. (2013). *Inventario Estatal Forestal y Suelos*. Quintana Roo.
- Converti, A., Domínguez, J., Perego, P., da Silvia, S., y Mario, Z. (2000). Wood Hydrolysis and Hydrolysate Detoxification for Subsequent Xylitol Production. *Chemical Engineering & Technology*, 23, 1013-1020.
- Cuervo, L., Folch, J. L., y Quiroz, R. E. (2009). Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol. *BioTecnología*, 13(3), 11-25.
- Eckholt, M. A. (2011). *Utilización de la madera de P. radiata para producción integrada de etanol y pulpa de celulosa Kraft blanqueada*. (Tesis de maestría. Universidade Federal de Viçosa, Brasil). Recuperado de <http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/5913/texto%20completo.pdf?sequence=1>.
- Ege, S. (1998). *Química orgánica: estructura y reactividad* (Vol. II). Barcelona: Editorial Reverté, S. A.
- Frederick, W. J., Lien, S. J., Courchene, C. E., DeMartini, N. A., Ragauskas, A. J., y Iisa, K. (2008). Co-production of ethanol and cellulose fiber from Southern Pine: A technical and economic assessment. *Biomass and bioenergy*, 32, 1293-1302. <https://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.03.010>
- Gómez, J. J., Samaniego, J., y Antonissen, M. (2008). *Consideraciones ambientales en torno a los biocombustibles líquidos*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Hans, B., y Wolfgang, W. (1987). *Manual de química orgánica*. Barcelona: Editorial Reverté, S. A.
- Jönsson, L., y Alriksson, B. (2013). Bioconversion of lignocellulose: inhibitors and detoxification. *Biotechnology for Biofuels*, 6(16), 1-10. <https://dx.doi.org/10.1186/1754-6834-6-16>

- Li, H. Q., Li, C. L., Sang, T., y Xu, J. (2013). Pretreatment on *Miscanthus lutarioriparius* by liquid hot water for efficient ethanol production. *Biotechnology for Biofuels*, 6(76), 1-10. <https://dx.doi.org/10.1186/1754-6834-6-76>
- López Jiménez, J. y Lozada Salgado, H. (2005). *Obtención de etanol anhidro a partir de un proceso de destilación con adición de electrolitos*. (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1175/1/jimmyandreslopezjimenez.2005.pdf>.
- López-Miranda, J., Soto-Cruz¹, N., Rutiaga-Quiñones, O., Medrano-Roldán, H., y Arévalo-Niño, K. (2009). Optimización del proceso de obtención enzimática de azúcares fermentables a partir de aserrín de pino. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(2), 95-102.
- Mendes, C. V., Carvalho, M. G., Baptista, C. M., Rocha, J. M., Soares, B. I., y Sousa, G. D. (2009). Valorisation of hardwood hemicelluloses in the kraft pulping process by using an integrated biorefinery concept. *Food and Bioproducts Processing*, 87, 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2009.06.004>
- Mohagheghi, A., Ruth, M., y Schell, D. (2006). Conditioning hemicellulose hydrolysates for fermentation: Effects of overliming pH on sugar and ethanol yields. *Process Biochemistry*, 41, 1806-1811.
- Negreros-Castillo, Patricia, y Martínez-Salazar, Imelda. (2011). Crecimiento y regeneración avanzada de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth en una selva de Quintana Roo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 2(5), 15-27. Recuperado en 17 de febrero de 2017, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000300003&lng=es&tlng=es.
- Niño García, E. Y. (2015). *Obtención de bioetanol a partir de la cáscara de la piña "Ananas sativus (Lindl) schult" de la zona de Cerritos - Pereira utilizando un bioreactor agitado tipo Batch, diseñado y construido en la escuela de Química – UTP*. (Tesis de Doctorado, Universidad Tecnológica de Pereira). Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5339/66028449N623.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- Nogués, F. S., García-Galindo, D., y Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Okuda, N., Soneura, M., Ninomiya, K., Katakura, Y., y Shioya, S. (2008). Biological Detoxification of Waste House Wood Hydrolysate Using *Ureibacillus thermosphaericus* for Bioethanol Production. *Journal Of Bioscience And Bioengineering*, 106(2), 128-133. <https://dx.doi.org/10.1263/jbb.106.128>
- Oliva-Neto, P., Dorta, C., Carvalho, A., Gomes, V., y Fernandes, D. (2013). The Brazilian technology of fuel ethanol fermentation - yeast inhibition factors and new perspectives to improve the technology. *Formatex*, 371-379.
- Pedraza Berenguer, R. M. (2012). *Deshidratación de etanol mediante destilación azeotrópica con hidrocarburos componentes de la gasolina. Estudio de la viabilidad del proceso escala semi-planta piloto*. (Tesis doctoral, Universidad de Alicante). Recuperado de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/33032/1/Tesis_Pedraza%20Berenguer.pdf.
- Renneberg, R. (2008). *Biotecnología para principiantes*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Rodríguez Jaramillo, E. A. y Cárdenas Hernández, V. A. (2009). *Evaluación de la producción de bioetanol a partir de la degradación de la pulpa de café*. (Tesis de licenciatura). Universidad de la Salle, Bogotá D.C. Recuperado de <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14554/T41.09%20R618e.pdf?sequence=1>
- Rojas, R., y Cabanillas, J. (2008). Producción de alcohol de residuos lignocelulósicos – cáscaras de arroz (*Oriza sativa*). *Revista virtual REDESMA*, 1-13. Obtenido de <http://microindustrial9.wikispaces.com/file/view/arroz.pdf>
- Saha, B. C., y Cotta, M. A. (2006). Ethanol Production from Alkaline Peroxide Pretreated Wheat Straw. *Biotechnology Progress*, 22(2), 449-453. <https://dx.doi.org/10.1021/bp050310r>

- Salinas, E., y Gasca, V. (2009). Los Biocombustibles. *El Cotidiano (en línea)*, 75-82. Recuperado el 18 de junio de 2017, de <http://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>
- Sánchez, A. M., Gutiérrez, A. I., Muñoz, J. A., y Rivera, C. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*, 5, 61-91.
- SENER. (2016). *Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030*. México: Secretaría de Energía.
- Silva, J. A., Fuentes, F. J., Rodríguez, R., Torres, P. A., Lomelí, M. G., Ramos, J., . . . Richter, H. G. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. Guadalajara: Amaya Ediciones S de R L De C V.
- Splettstößer, T. (16 de junio de 2017). *SCIstyle*. Recuperado de Scientific Illustration: <http://portfolio.scistyle.com/Lignocellulose>
- Tejeda, L., Quintana, J., Pérez, J., y Young, H. (2011). Obtención de Etanol a partir de residuos de poda, mediante hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 14(1), 111-116.
- Tejeda, L., Tejada, C., Villabona, Á., Alvear, M., Castillo, C., Henao, D., y Marimón, W. (2010). Producción de bioetanol a partir de la fermentación alcohólica de jarabes glucosonados derivados de cascaras de naranja y piña. *Revista Educación en Ingeniería*, 10, 120-125.
- Triana Caranton, C. F. (2010). *Producción de etanol a partir de residuos provenientes del cultivo de café*. (Tesis de maestría) Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

ANEXOS

Anexo A

Evidencia fotográfica



Figura 19. Aserradero ejidal de Petcacab, Q. Roo.



Figura 20. Almacenamiento del aserrín de diversas especies de maderas.



Figura 22. Almacenamiento de madera tzalam en tablas.



Figura 21. Tabla de tzalam.



Figura 23. Calles del Ejido Petcacab con desechos de diversas maderas, incluso con madera tzalam.

Anexo B

Método del ácido 3,5 dinitrosalicílico

El procedimiento consiste en preparar el reactivo DNS, se agregó 30 g de tartrato de sodio y potasio hidratado ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 2 N. se adicionó 1 g de ácido dinitrosalicílico ($\text{C}_7\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_7$), se aforó con agua destilada hasta un volumen final de 100 mL y se almacenó en ausencia de luz.

Las muestras empleadas para la determinación de azúcares reductores fueron los hidrolizados, de los cuales se tomaron 300 μL y se diluyeron con agua destilada hasta un volumen final de 3 mL, manejando una dilución 1:10. Las alícuotas obtenidas se ajustaron a un pH superior a 8 con 8 con NaOH a fin de evitar la precipitación y decoloración. Posteriormente, se centrifugaron a 10,000 rpm durante 5 min, se tomaron 500 μL del sobrenadante y se mezclaron en un tubo de vidrio de 12 mL con 500 μL de reactivo DNS. Cada uno de los tubos se colocó en baño María a 92 °C durante 5 min, después se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se diluyeron con 10 mL de agua destilada. La absorbancia se determinó contra un blanco utilizando una longitud de onda 540 nm y se calculó la concentración de azúcares con relación a una curva de calibración **Figura 17**.

Tabla XV. Calibración de ART.

Co (g/L)	Abs 1	Abs 2	Abs prom	Desvprom	Error
0.5	0.148	0.144	0.146	0.00	1.94
1	0.299	0.298	0.2985	0.00	0.24
1.5	0.464	0.464	0.464	0.00	0.00
2	0.607	0.604	0.6055	0.00	0.35
2.5	0.76	0.758	0.759	0.00	0.19
3	0.891	0.891	0.891	0.00	0.00
3.5	1.046	1.048	1.047	0.00	0.14
4	1.213	1.209	1.211	0.00	0.23
4.5	1.279	1.28	1.2795	0.00	0.06

5	1.44	1.438	1.439	0.00	0.10
5.5	1.598	1.597	1.5975	0.00	0.04
6	1.615	1.615	1.615	0.00	0.00

Anexo C

Tabla XVI. Resultados de las réplicas de cada prueba.

Prueba	Replic	MP	Acondicionamient	Prehidrólisis	Hidrolisis	Detoxificació	Apreciación	Prueba de
a	a	inicial	o			n	organoléptic	Fehling
							a	
1 MSA	1	50 g	N/A	41.42 g	N/A	26.60 g	+	✓
	2	50 g	N/A	37.12 g	N/A	22.11 g	+	✓
	3	50 g	N/A	35.12 g	N/A	21.60 g	+	✓
2 EBL	1	50 g	49.65 g	36.06 g	N/A	28.89 g	+++	✓
	2	50 g	49.90 g	34.62 g	N/A	29.52 g	+++	✓
	3	50 g	47.07 g	35.51 g	N/A	28.65 g	++	✓
3 ASP	1	50 g	50 g	N/A	N/A	28.76 g	+	✓
	2	50 g	50 g	N/A	N/A	30.09 g	+	✓
	3	50 g	50 g	N/A	N/A	26.76 g	+	✓
4 ACP	1	50 g	N/A	36.17 g	N/A	8.66 g	+++	✓
	2	50 g	N/A	36.75 g	N/A	17.67 g	+	✓
	3	50 g	N/A	37.36 g	N/A	11.89 g	++	✓
5 RMJ	1	50 g	43.87 g	35.97 g	N/A	6.99 g	+	✓
	2	50 g	43.74 g	35.65 g	N/A	13.05 g	+++	✓
	3	50 g	43.68 g	34.93 g	N/A	11.46 g	++	✓

6 MSU	1	50 g	N/A	43.14 g	N/A	22.26 g	+	✓
	2	50 g	N/A	41.82 g	N/A	20.68 g	+++	✓
	3	50 g	N/A	40.27 g	N/A	12.26 g	++	✓
7 AACP	1	50 g	45.77 g	35.90 g	N/A	25.90 g	+++	✓
	2	50 g	43.07 g	40.50 g	N/A	28.40 g	+	✓
	3	50 g	43.23 g	39.90 g	N/A	23.90 g	++	✓
8 AASP	1	100 g	85.09	N/A	N/A	65.99 g	+	✓
	2	100 g	86.28	N/A	N/A	55.42 g	+++	✓
	3	100 g	89.87	N/A	N/A	63.52 g	++	✓

Metodología original Sin Acondicionamiento (MSA). Ebullición (EBL). Autoclave Sin Prehidólisis (ASP). Autoclave Con Prehidrólisis (ACP). Remojo (RMJ). Madera Suave (MSU). Autoclave con Agua y Con Prehidrólisis (AACP). Autoclave con Agua y Sinn Prehidrólisis (AASP).

N/A. No Aplica

+++ Muy dulce

++ Moderadamente dulce

+ Dulce

✓ Positivo ART

Tabla XVII. Cuantificación de azúcares reductores.

Prueba	Replicas	AbsProm	CoProm (g/L)	Desvprom	Error
1	1	0.719	24.1835311	0.05233775	0.21641899
	2	0.957	32.5052338	0.0000000	0.0000000
	3	1.113	37.9309142	0.01744592	0.04599393
3	1	1.157	39.4836008	0.0000000	0.0000000
	2	1.0415	35.4535939	0.08722959	0.24603878
	3	1.0135	34.4766225	0.01744592	0.05060217
4	1	1.002	34.0753664	0.03489184	0.10239607
	2	0.7465	25.1605024	0.05233775	0.20801553
	3	0.049	0.82344731	0.0000000	0.0000000
5	1	0.952	32.3307746	0.03489184	0.10792143
	2	1.132	38.611305	0.0000000	0.0000000
	3	0.8325	28.1612003	0.01744592	0.06195019
6	1	0.435	14.2916957	0.03489184	0.24414063
	2	0.466	15.3733426	0.0000000	0.0000000
	3	0.4755	15.7048151	0.01744592	0.11108643
7	1	0.584	19.4731333	0.01744592	0.08958968
	2	0.811	27.3935799	0.05233775	0.19105846

	3	0.707	23.7648290	0.01744592	0.07341066
	1	0.638	21.3572924	0.01744592	0.08168600
8	2	0.715	24.0614096	0.03489184	0.14501160
	3	0.644	21.5840893	0.00000000	0.00000000

Anexo D

Cálculos para la obtención del rendimiento máximo del etanol.

$$1 \text{ mol de glucosa} = 2 \text{ mol de etanol}$$

REMT = Rendimiento de etanol maximo teórico

Peso molecular de glucosa = 180 g/mol

Peso molecular de etanol = 46.04 g/mol

Variable = Concentracion promedio de ART de la prueba deseada (g/L)

Numero de mol de glucosa Por variable = NMGPV

Número de mol de etanol Por variable = NMEPV

Peso del etanol De variable = PEPV

$$NMGPV = \left(\frac{\text{Variable}}{\text{Peso molecula de glucosa} * 1 \text{ mol glucosa}} \right)$$

$$NMEPV = \left(\frac{NMGPV * 2 \text{ mol de etanol}}{1 \text{ mol glucosa}} \right)$$

$$PEPV = \left(\frac{NMEPV * \text{Pesos molecular de etanol}}{1 \text{ mol de etanol}} \right)$$

$$REMT = PEPV / \text{Variable}$$

Anexo F

ORDEN	ESPECIE	DN	AT	NA	AB (m ² Ha-1)	AB (%)	VT (m ³ Ha-1)	VT (%)	VFL (m ³ Ha-1)	VFL (%)
1	TZALAM	37.3	11.9	21.93	2.38899	9.83	15.0295	11.35	8.57887	9.37
2	CHICOZAPOTE	29.5	9.6	42.04	2.528	10.59	10.070	10.01	7.194	9.51
3	AMAPOLA	31.3	10.4	26.85	1.99978	8.23	11.3763	8.59	8.23804	8.99
4	YAAXNIK	28.8	10.9	30.63	1.884	6.93	9.9055	7.48	5.76612	6.29
5	CHACAH	24.0	11.0	39.83	1.44332	5.94	8.3131	6.28	6.02258	6.57
6	RAMON	31.2	11.1	17.31	1.31742	5.42	7.7526	5.85	5.01784	5.48
7	CHECHEM	23.2	10.6	34.14	1.14102	4.70	6.3028	4.76	4.62415	5.05
8	ZAPOTILLO	16.2	8.1	73.13	1.40227	5.77	5.9553	4.50	4.28148	4.67
9	CAOBA	37.8	12.4	7.76	0.85072	3.50	5.6592	4.27	4.23672	4.63
10	JABIN	24.8	11.5	18.30	0.74107	3.05	4.4733	3.38	3.11489	3.40
11	TASTAB	16.8	10.7	35.70	0.72884	3.00	4.0083	3.03	3.08478	3.37
12	KANISTE	23.3	9.9	17.41	0.62556	2.57	3.2082	2.42	2.2466	2.45
13	SACCHAKA	22.8	10.5	15.96	0.55705	2.29	3.1633	2.39	2.31302	2.53
14	TABAQUILLO	14.8	8.5	39.74	0.7088	2.92	3.0507	2.30	2.25056	2.46
15	HUANO	16.2	9.1	25.12	0.51237	2.11	2.3476	1.77	2.2733	2.48
16	CHAKTECOC	18.5	9.8	14.02	0.3799	1.56	1.9397	1.46	1.44624	1.58
17	KATALOX	28.5	11.6	4.83	0.27222	1.12	1.7314	1.31	1.12613	1.23
18	JOBO	23.0	10.3	7.76	0.30746	1.27	1.6715	1.26	1.29282	1.41
19	PASAAK	20.4	9.7	9.55	0.28856	1.19	1.521	1.15	1.11572	1.22
20	CHAKTEVIGA	22.4	11.4	6.93	0.22899	0.94	1.3493	1.02	1.0329	1.13
21	KASKAAT	18.8	9.6	9.06	0.24015	0.99	1.2218	0.92	0.87545	0.96
22	BOPCHICH	16.7	8.5	13.68	0.24829	1.02	1.0926	0.83	0.76514	0.84
23	OTRAS	9.2	9.2	160.82	3.65581	15.05	18.0986	13.67	13.18523	14.39
TOTAL				673.3	24.2963	100.00	132.4324	100.00	91.6046	100.00

Donde: NA = Número de árboles por ha; AB = área basal (m² ha⁻¹); VFLHA = Volumen de fuste limpio (m³ ha⁻¹).

Figura 24. Especies más representativas con base a su existencia.

ANEXO UNICO
Cuadro 2. Resumen de existencias.

Calculos con la propuesta de volúmenes.

Especie	Existencias reales (m3 VTA)	Posibilidad (m3 VTA)	Residuales (m3 VTA)
Amapola	53299.728	6113.881	47185.848
Caoba	31138.686	5030.057	26108.628
Cedro	1126.476	0.000	1126.476
Chacteviga	6298.385	1168.655	5129.730
Chaka	118087.097	4978.756	113108.341
Chactecok	10082.567	752.256	9330.312
Chechen	101945.843	3441.561	98504.282
Granadillo	3444.610	302.723	3141.887
Jabin	26740.014	3497.476	23242.538
Katalox	31729.521	2097.494	29632.026
Negrito	22333.983	690.529	21643.454
Pich	86.733	0.000	86.733
Ramon	10817.957	765.547	10052.410
Sacchaca	47149.578	2355.710	44793.867
Siricote	1747.799	228.596	1519.203
Tzalam	99509.437	19891.534	79617.904
Yaaxnik	109832.228	11211.170	98621.058
Zapote	44262.161	9760.221486	34501.940
Palizada	387079.9676	38707.99676	348371.971
Otras	225672.1554	0	225672.1554
Total	1332384.928	110994.164	1221390.764

COMISARIADO EJIDAL
PETCACAB
MUNICIPIO DE FELIPE CARRILLO PUERTO
QUINTANA ROO

Dtilio Akec

Figura 25. Volumen de la existencia de diversas especies en el ejido Petcacab y Polinkín. Fuente: Plan de manejo forestal del Ejido Petcacab y Polinkín.

Cuadro 50. Distribución de productos de la anualidad 6 (2017).

ESPECIE	VFLHA	Volúmenes en metros cúbicos			
	TOTAL	Puntas y Ramas	Brazuelo	Desperdicio	VTA (M3)
	(m ³)				
		58.33%	14.58%	9.92%	17.17%
Amapola	141.701	35.425	24.089	41.701	242.916
Caoba	728.633	182.158	123.868	214.426	1249.086
Chacteviga	291.173	72.793	49.499	85.688	499.153
Chacáh rojo	634.658	158.664	107.892	186.771	1087.985
Chactecoc	361.776	90.444	61.502	106.466	620.187
Chechen	219.353	54.838	37.290	64.553	376.034
Granadillo	66.654	16.663	11.331	19.615	114.264
Jabin	526.895	131.724	89.572	155.058	903.249
Katalox	364.601	91.150	61.982	107.297	625.031
Negrilo	268.073	67.018	45.572	78.890	459.553
Ramon	337.118	84.279	57.310	99.209	577.916
Sacchaca	450.435	112.609	76.574	132.557	772.174
Siricote	42.385	10.596	7.206	12.473	72.661
Tzalam	2996.662	749.165	509.433	881.875	5137.135
Yaaxnik	1364.163	341.041	231.908	401.454	2338.566
Zapote	2997.310	749.328	509.543	882.066	5138.246
Palizada	7177.835	1794.266	1220.101	2111.336	12303.538
TOTAL	18969.426	4742.164	3224.671	5581.433	32517.694

Figura 26. Distribución de productos de anualidad 6 (2017). Fuente: Plan de manejo forestal del Ejido Petcacab y Polinkín.

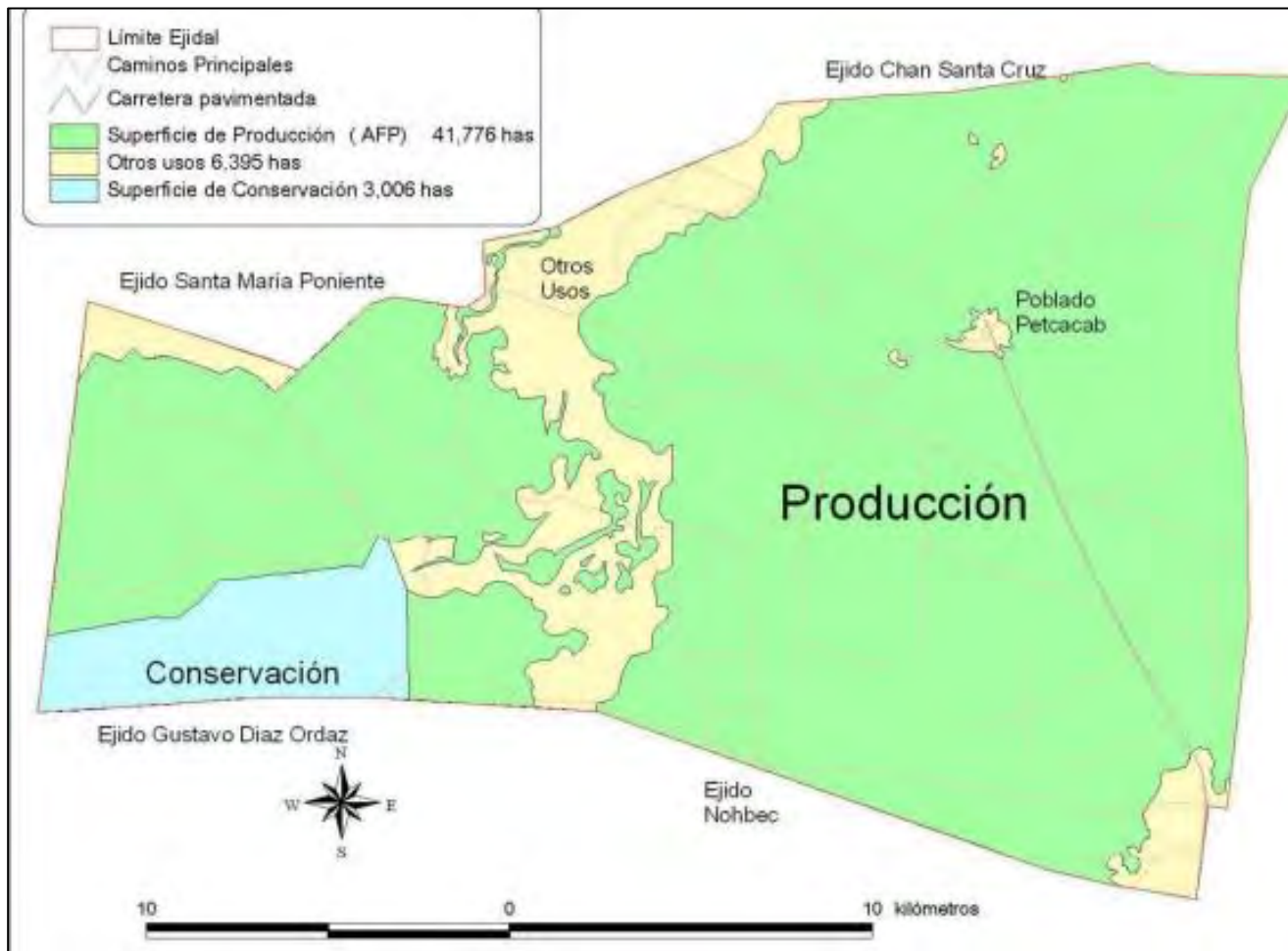


Figura 27. Cuantificación y clasificación de las superficies del Ejido Petcacab. Fuente: Plan de manejo forestal del Ejido Petcacab y Polinkín.