



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
ENERGÍA - FUENTES RENOVABLES

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE DESECHOS  
AGROINDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE  
BIOETANOL A PARTIR DEL MANGO Y PLÁTANO**

**T E S I S**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**DOCTOR EN INGENIERÍA**

**P R E S E N T A:**  
**M.I. LUIS FERNANDO SANTIS ESPINOSA**

**TUTOR PRINCIPAL:**  
**Dr. PATHIYAMATTOM JOSEPH SEBASTIAN**  
IER - UNAM

**MIEMBROS DEL COMITÉ:**  
DR. PATHIYAMATTOM JOSEPH SEBASTIAN - IER UNAM  
DR. GAMBOA SÁNCHEZ SERGIO ALBERTO - IER UNAM  
DR. ESCALANTE LOZADA JOSÉ ADELFO - IBT UNAM  
DR. SALDAÑA TRINIDAD SERGIO - UP CHIAPAS  
DRA. JUANTORENA UGÁS ALINA - UAEM

**MÉXICO, D.F. ABRIL 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



---

# JURADO ASIGNADO:

---

Presidente: Dr. Gamboa Sánchez Sergio Alberto

Secretario: Dr. Saldaña Trinidad Sergio

Vocal: Dr. Pathiyamattom Joseph Sebastian

1<sup>er</sup> Suplente: Dr. Escalante Lozada José Adelfo

2<sup>do</sup> Suplente: Dra. Juantorena Ugás Alina

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

**Instituto de Energías Renovables**

**Universidad Politécnica de Chiapas**

**Instituto de Biotecnología** - Universidad Nacional de Colombia

**TUTOR DE TESIS:**

**Dr. Sebastian Pathiyamattom Joseph**

-----  
FIRMA



---

# Dedicatoria

---

A mis hijos, Hailin Yamilet y Ian Fernando:

Que por ellos se hace y se deja todo, que son el motor de mi inspiración, para dejarles este legado y ejemplo.

A mi esposa, Rosita:

Que con su paciencia, su comprensión, su amor ha sabido brindar su apoyo para con nosotros.

A la memoria de mi padre, Fernando:

Que con sus manos supo cultivar la tierra, cumpliendo su deber y tratar de darnos la mejor educación.

A mi madre, Vicki:

A su generosidad, su esfuerzo y amor incondicional, siempre tratando de darnos la mejor educación.

A mis Hermanos:

Que con su esfuerzo siempre me han apoyado.

A mis abuelitos, Alejandro y María:

Porque me han enseñado a enfrentar las adversidades sin perder nunca la dignidad, sin su apoyo no hubiese sido posible llegar a esta etapa.

A mis sobrinos, Fernando, Kendra:

Para dejarles este ejemplo.



---

# Agradecimientos

---

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Al Instituto de Energías Renovables (IER).

A la Unidad Administrativa de Posgrado (UAP).

A los integrantes del comité tutorial:

Dr. Sergio Alberto Gamboa Sánchez

Dr. Sergio Saldaña Trinidad Sergio

Dr. Sebastian Joseph Pathiyamattom

Dr. José Adelfo Escalante Lozada

Dra. Alina Juantorena Ugás

A mi tutor y director de tesis, el Dr. Sebastian Joseph Pathiyamattom, con especial reconocimiento por brindar su apoyo y amistad, admirando sus logros académicos y su calidez humana.

A los proyectos 224765 y 221086 de CONACYT, por el apoyo obtenido durante el desarrollo de este trabajo.

A mi país, su pueblo y al CONACYT por el financiamiento durante la realización de la tesis.

A la Universidad Politécnica de Chiapas.



Al Dr. Sergio Saldaña, por tiempo dedicado en el asesoramiento, observaciones y sugerencias para mejoras de este trabajo.

Al Instituto de Biotecnología, al Laboratorio de Tecnología de Enzimas y al Departamento de Química pertenecientes a la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

A la Dra. Ana Lucía, por los análisis de HPLC.

Al Mtro. Mauricio Bernal, por su colaboración en la técnica de morfología y proporcionar levadura.

Al Dr. Gustavo Buitrago Hurtado, por el asesoramiento durante la experimentación.

Al Dr. Humberto Zamora y la Técnico Claudia Parra por su colaboración en los análisis de proximales.

Al Dr. Carlos Alberto Guerrero Fajardo, por su aceptación en la pasantía y asesoramiento durante el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos: Bianca, Gabi, Nayeli, Rafa, Erick, por compartir y colaborar durante esta etapa de formación profesional.

A Sigifredo y su familia, por su atención, estima, su calidez humana y apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

A mi familia por su compañía y apoyo durante esta etapa de formación profesional.

A la familia de mi esposa, que ya es también mía, gracias por su estima y aprecio, que con su apoyo me facilitaron cerrar esta etapa. A la abuelita Lupita, la Sra. Rosi, el Sr. Ovidio, Carito, Cielo y Kendra.

Esta tesis es resultado de una experiencia de vida que ha permitido cruzarme en el camino con grandes personas, con grandes maestros de la vida y de conocimiento científico. Esta tesis, es pues, resultado de un esfuerzo personal, pero es un trabajo colectivo en la que muchas aportaciones fueron bien recibidas para el mejoramiento del mismo, así como también en el mejoramiento profesional. Estas líneas no bastan para agradecerles a todas aquellas personas e instituciones que de alguna manera participaron durante el desarrollo de este trabajo. Gracias.

---

# Contenido

---

<b>Abstract</b>	<b>13</b>
<b>Resumen</b>	<b>15</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>17</b>
1.1. Contexto energético internacional . . . . .	19
1.2. Contexto energético nacional . . . . .	20
1.3. Justificación . . . . .	24
1.4. Antecedentes . . . . .	25
1.5. Objetivos . . . . .	27
1.5.1. Objetivo general . . . . .	27
1.5.2. Objetivos específicos . . . . .	27
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>29</b>
2.1. Producción de energías renovables . . . . .	29
2.2. Biomasa . . . . .	30
2.2.1. Desechos agroindustriales . . . . .	34
2.2.2. Mango ( <i>Mangifera indica L.</i> ) . . . . .	41
2.2.3. Plátano ( <i>Musa paradisiaca L.</i> ) . . . . .	48
2.3. Biocombustibles . . . . .	55
2.3.1. Conversión de azúcares a etanol mediante la fermentación alcohólica . . . . .	57
2.3.2. Bioetanol . . . . .	58
2.3.3. Sistemas de fermentación . . . . .	62
2.4. Secado solar . . . . .	63

2.4.1.	Proceso de convección natural . . . . .	65
2.4.2.	Contenido de humedad . . . . .	65
2.4.3.	Cinética de secado . . . . .	67
2.4.4.	Secado solar de alimentos . . . . .	72
<b>3.</b>	<b>Secado de mango (<i>Mangifera indica L.</i>) mediante la energía solar como pretratamiento para la producción de bioetanol</b>	<b>73</b>
3.1.	Abstract . . . . .	73
3.2.	Resumen . . . . .	73
3.3.	Introducción . . . . .	74
3.3.1.	Mango ( <i>Mangifera indica L.</i> ) . . . . .	74
3.3.2.	Secado solar . . . . .	75
3.4.	Experimental . . . . .	77
3.4.1.	Materiales y métodos . . . . .	77
3.5.	Resultados y discusiones . . . . .	83
3.6.	Conclusiones . . . . .	87
3.7.	Agradecimientos . . . . .	88
<b>4.</b>	<b>Análisis de secado solar del plátano (<i>Musa paradisiaca L.</i>) como pretratamiento para la producción de bioetanol.</b>	<b>89</b>
4.1.	Abstract . . . . .	89
4.2.	Resumen . . . . .	90
4.3.	Introducción . . . . .	91
4.3.1.	El plátano o banano ( <i>Musa paradisiaca L.</i> ) . . . . .	91
4.3.2.	Secado solar . . . . .	92
4.4.	Experimental . . . . .	94
4.4.1.	Materiales y métodos . . . . .	94
4.5.	Resultados y discusiones . . . . .	100
4.6.	Conclusiones . . . . .	107
4.7.	Agradecimientos . . . . .	108
<b>5.</b>	<b>Evaluación de los desechos agroindustriales para la producción de bioetanol: caso de estudio mango (<i>Mangifera indica L.</i>)</b>	<b>109</b>
5.1.	Abstract . . . . .	109
5.2.	Resumen . . . . .	109

5.3.	Introducción . . . . .	110
5.4.	Materiales y métodos . . . . .	111
5.4.1.	Materia prima . . . . .	111
5.4.2.	Microorganismo y preparación del inóculo	112
5.4.3.	Fermentación . . . . .	112
5.4.4.	Diseño experimental . . . . .	112
5.4.5.	Métodos analíticos y cálculos . . . . .	113
5.5.	Resultados y discusión . . . . .	113
5.5.1.	Estrategia experimental de la fermentación alcohólica . . . . .	113
5.5.2.	Fermentación con pulpa de mango . . .	114
5.5.3.	Fermentación con pulpa y cáscaras de mango . . . . .	116
5.6.	Conclusiones . . . . .	119
<b>6.</b>	<b>Evaluación de la producción de bioetanol a partir de desechos agroindustriales de plátano (<i>Musa paradisiaca</i> <i>L.</i>) y mango (<i>Mangifera indica L.</i>)</b>	<b>121</b>
6.1.	Abstract . . . . .	121
6.2.	Resumen . . . . .	122
6.3.	Introducción . . . . .	122
6.3.1.	El plátano o banano ( <i>Musa paradisiaca</i> <i>L.</i> ) . . . . .	125
6.3.2.	El mango ( <i>Mangifera indica L.</i> ) . . .	126
6.4.	Materiales y métodos . . . . .	127
6.4.1.	Sustratos . . . . .	127
6.4.2.	Microorganismo y condiciones de cultivo	127
6.4.3.	Análisis proximal . . . . .	128
6.4.4.	Pretratamiento . . . . .	128
6.4.5.	Análisis de sustratos y productos . . . .	128
6.4.6.	Fermentación . . . . .	129
6.4.7.	Diseño experimental . . . . .	130
6.5.	Resultados y discusiones . . . . .	131
6.5.1.	Análisis bromatológicos del plátano y man- go . . . . .	131
6.5.2.	Análisis de azúcares por DNS . . . . .	131
6.5.3.	Análisis de Carbohidratos por HPLC . . .	132
6.6.	Fermentación del plátano y mango . . . . .	134
6.7.	Conclusiones . . . . .	138



---

# Lista de Figuras

---

1.1.	Oferta total mundial de energía primaria por tipo combustible de 1971 a 2012 (13,371 Mtep). . .	18
1.2.	Producción mundial de energía primaria, 2012 (13,371 MMtep). . . . .	20
1.3.	Participación porcentual por energético en las importaciones y exportaciones totales, 2012. . .	21
1.4.	Estructura de la producción de energía primaria, 2013 (9,020.21 PJ). . . . .	22
1.5.	Consumo nacional de energía, 2013(Petajoules).	22
1.6.	Consumo final energético por sector y energético, 2013. . . . .	23
2.1.	Porcentajes de producción de mango en el mundo	43
2.2.	Porcentaje de participación de los principales países productores de mango (promedio de los años 2000 a 2006). . . . .	44
2.3.	Rendimiento en t·ha-1 de los principales países productores de mango. . . . .	45
2.4.	Superficie de mango sembrada (Ha), 2013. . . .	46
2.5.	Producción nacional de mango (Ton), 2013. . .	47
2.6.	Principales variedades de mango que se producen en México. . . . .	48
2.7.	Principales países productores de plátano en el mundo. . . . .	52
2.8.	Países con mayor exportación de plátano o banano en el mundo. . . . .	53

2.9. Principales estados Mexicanos que cultivan plátano (Ha). . . . .	54
2.10. Estados con mayor producción de plátano (milles de Ton). . . . .	55
2.11. Proceso simplificado para la producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos . . . .	60
2.12. Curva de secado . . . . .	68
2.13. Curva de velocidad de secado . . . . .	69
3.1. Secadores solares deshidratando Mango . . . . .	78
3.2. Curva de secado del mango y radiación solar . . . . .	84
3.3. Curva de velocidad de secado . . . . .	85
3.4. Temperatura en el interior del secador . . . . .	86
3.5. Curva de calibración de fructuosa . . . . .	87
4.1. Secadores solares y deshidratación del plátano. . . . .	101
4.2. Curva de secado del plátano y irradiancia . . . . .	103
4.3. Curva de velocidad de secado del plátano . . . . .	104
4.4. Temperatura en el interior del secador y radiación solar . . . . .	105
4.5. Muestra de sólido seco de plátano y análisis DNS . . . . .	106
4.6. Curva de calibración de fructosa . . . . .	107
5.1. Cinética de crecimiento de la levadura <i>S. cerevisiae</i> Y2034 y reducción de azúcares durante la fermentación alcohólica de la pulpa del mango para tres diferentes concentraciones de azúcares reductores iniciales (◆ 200 g/L, * 150 g/L, ● 100 g/L). . . . .	115
5.2. Cinética de tres diferentes concentraciones de SST °(Brix), temperatura y pH de la fermentación alcohólica de la pulpa del mango. . . . .	116
5.3. Cinética de crecimiento de la levadura <i>S. cerevisiae</i> Y2034 y reducción de azúcares durante la fermentación alcohólica del mango completo (pulpa y cascara) en tres concentraciones diferentes de azúcares reductores iniciales (◆ 200 g/L, * 150 g/L, ● 100 g/L) . . . . .	117

5.4.	Cinética de tres diferentes concentraciones de SST °(Brix), temperatura y pH de la fermentación alcohólica del mango completo (pulpa y cascara).	118
5.5.	Espectro infrarrojo del análisis del bioetanol . . .	119
6.1.	Curva de calibración de fructosa . . . . .	132
6.2.	Cromatograma de los patrones de carbohidratos.	133
6.3.	Cromatograma de la muestra de plátano. . . . .	134
6.4.	Cromatograma de la muestra de mango. . . . .	134
6.5.	Producción de bioetanol y consumo de azúcares durante la fermentación discontinua de los sustratos del plátano y mango. . . . .	137





---

# Lista de Tablas

---

1.	Tabla de Principales Nomenclaturas. . . . .	11
2.1.	Energía primaria en México (PJ). . . . .	30
2.2.	Residuos que contienen azúcares libres . . . . .	37
2.3.	Residuos que contienen almidón . . . . .	38
2.4.	Residuos agroindustriales que contienen celulosa	40
2.5.	Composición proximal y fisicoquímica los mangos crudos (base de peso fresco). . . . .	42
2.6.	Composición fisicoquímica de la pulpa de mangos (base de peso fresco). . . . .	42
2.7.	Los principales países producciones, exportadores e importadores de mango en el mundo. . . . .	44
2.8.	Producción nacional de mango, 2007-2013 (Mi- llones de toneladas). . . . .	47
2.9.	Características del plátano a diferentes etapas de maduración. . . . .	50
2.10.	Composición proximal teórica de la pulpa y la cáscara del plátano. . . . .	50
2.11.	Principales países productores de plátano. . . .	51
2.12.	Producción nacional de plátano, 2007-2013 (Mi- llones de toneladas). . . . .	54
3.1.	Datos de secado de mango. . . . .	83
4.1.	Análisis de bromatología de la fruta de plátano	101
4.2.	Datos cinéticos de secado del plátano. . . . .	102

5.1.	Diseño experimental para la fermentación alcohólica del mango. . . . .	114
5.2.	Espectro infrarrojo de etanol y otros compuestos.	119
6.1.	Análisis de bromatología, composición del mango y plátano . . . . .	131
6.2.	Análisis de azúcares reductores totales. . . . .	132
6.3.	Análisis de carbohidratos del plátano y mango por HPLC. . . . .	133
6.4.	Diseño experimental y resumen de variables dependientes en la producción de bioetanol: caso de estudio plátano. . . . .	135
6.5.	Diseño experimental y resumen de variables dependientes en la producción de bioetanol: caso de estudio mango. . . . .	136
6.6.	Rendimientos en la producción de bioetanol de diferentes sustratos y resultados en este estudio.	138

Tabla 1: Tabla de Principales Nomenclaturas.

<b>Siglas</b>	<b>Significado</b>
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
IEA	International Energy Agency.
REN21	Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
LPDB	Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.
Mtep	Millones de toneladas equivalentes de petróleo
MMtep	Mil millones de toneladas equivalentes de petróleo
<b>Símbolos</b>	<b>Significado</b>
Ha	Hectáreas
atm	Atmosferas
cm	Centímetros
mg	Miligramos
g	Gramos
kg	Kilogramos
l	Litros
m	Metros
mL	Mililitros
SHF	Hidrólisis y fermentación separada por su sigla en ingles
SSF	Sacarificación y fermentación Simultánea por su sigla en ingles
g m.s.	Gramos de materia seca
g s.s.	Gramos de sólido seco
b.s.	Base seca
b.h.	Base húmeda
pH	Potencial de Hidrógeno
PJ	Petajoules
in	Pulgadas
SST	Sólidos solubles totales
UFC	Unidades formadoras de colonia
rpm	Revoluciones por minuto
°C	Grados Celsius
DNS	Ácido 3,5-dinitrosalicílico
ATCC	American Type Culture Collection
FDN	Fibra de Detergente Neutro
FDA	Fibra Detergente Ácido
HPLC	High Performance Liquid Chromatography



---

# Abstract

---

In recent years the use of renewable energy has been a viable option for primary energy generation alternative. Biomass meanwhile has represented a significant percentage of renewable energy sources transformed into bioenergy, particularly in the production of bioethanol. Solar energy on the other hand has become another primary source in the transformation of energy. In this study the kinetics of drying is carried out and characterization of agro-industrial waste of the fruit of the banana (*Musa paradisiaca* L.) and mango (*Mangifera indica* L.). As the first stage of the research, is a bromatologic analysis and HPLC, where minor components of these fruit mature, are lignocellulosic material. Solar drying for conserving carbohydrates present in the banana and mango were developed, by analyzing kinetics sedated, the drying curve, the speed curve and the drying temperature curve was obtained. Moisture removed during drying was 94.15 % and 95.6 % for 28 h drying for banana and mango respectively. The average radiation and temperature were  $758.6 \text{ W/m}^2$  and  $46.6 \text{ }^\circ\text{C}$ . As a second stage, carried out the alcoholic fermentation performance and behavior of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* in mango pulp and peel. The process to produce ethanol comprises the following stages: substrate preparation, preparation of the YPD medium (yeast extract, peptone, dextrose), the growth of the yeast *s. cerevisiae*, the fermentation of alcohol and distillation. On the other hand, and as a final stage of research substrates of agro-industrial wastes of the banana and mango are evaluated. The amounts of sugars and the increase of this

value when they occur when the substrates are pre-treated with acid, sterilization and pasteurization, likewise the main sugars are fructose and glucose. Fermentations by the yeast *S. cerevisiae* ATCC 26603 in studied substrates are bioethanol production is greater when the substrates are sterilised and begin with values pH 5, temperature 30 °C, sugar of 100 and 80 g/L for the banana and mango, respectively. Under these conditions are achieved values of performance of 64.2 and 68.7 % for substrates of the banana and mango, respectively. Batch fermentations were carried out during 48 hours. All experiments were conducted in triplicate.

---

# Resumen

---

En los últimos años el uso de las energías renovables ha sido una alternativa viable para la generación primaria de energía. La biomasa por su parte ha representado un porcentaje importante en las fuentes renovables de energía transformada en bioenergía, particularmente en la producción de bioetanol. La energía solar por otra parte se ha convertido en otra fuente primaria en la transformación de la energía. En este trabajo se lleva a cabo la cinética de secado y caracterización de los residuos agroindustriales de la fruta del plátano (*Musa paradisiaca L.*) y mango (*Mangifera indica L.*). Como primer etapa de la investigación, se realiza un análisis bromatológico y HPLC, donde los componentes minoritarios de estas frutas maduras, son materia lignocelulósica. El secado solar para la conservación de carbohidratos presentes en el plátano y mango fueron desarrollados, mediante el análisis de la cinética de secado, se obtuvo la curva de secado, la curva de velocidad de secado y la curva de temperatura. La humedad removida durante el proceso de secado fue de 94.15 % y 95.6 % durante 28 h de secado para el plátano y mango, respectivamente. La radiación y temperatura promedio fueron de  $758.6 \text{ W/m}^2$  y  $46.6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Como segunda etapa, lleva a cabo el desempeño de la fermentación alcohólica y el comportamiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* NRRL Y2034 en pulpa de mango y la cáscara. El proceso para producir etanol comprende las siguientes etapas: preparación del sustrato, preparación del medio YPD (Yeast extract, peptone and dextrose), el crecimiento de la levadura *S. cerevisiae*,



La fermentación y destilación de alcohol. Por otra parte y como etapa final de la investigación se evalúan los sustratos de los desechos agroindustriales del plátano y mango. Las cantidades de azúcares reductores y el incremento de este valor se dan cuando los sustratos son pre-tratados con ácido, esterilización y pasteurización, así mismo los principales azúcares son la fructosa y glucosa. Las fermentaciones mediante la levadura *S. cerevisiae* ATCC 26603 en los sustratos estudiados muestran que la producción de bioetanol es mayor cuando los sustratos son esterilizados e inician con valores de pH 5, temperatura 30 °C, azúcares de 100 y 80 g/L para el plátano y mango, respectivamente. Bajo estas condiciones se logran valores de rendimiento de 64.2 y 68.7% para los sustratos del plátano y mango, respectivamente. Las fermentaciones discontinuas se realizaron durante 48 horas. Todos los experimentos se llevaron a cabo por triplicado.

---

# Capítulo 1

## Introducción

---

A nivel mundial en los últimos años ha venido surgiendo una concientización cada vez mayor sobre la importancia del uso y aprovechamiento sustentable de la energía, particularmente por el uso de las fuentes renovables y la eficiencia energética. La agencia internacional de energía (IEA) ha reportado que el sector energético proveniente de los hidrocarburos, es responsable de más de la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera en el mundo. Siendo las emisiones de CO<sub>2</sub> el contribuyente más importante, que ha sido asociado a los efectos negativos en el medio ambiente proveniente de combustibles convencionales [1, 2].

En la actualidad las necesidades de energía en todos los sectores, han sido cubiertas por las energías convencionales. En la figura 1.1, se observa la evolución que ha tenido en las últimas décadas la oferta mundial de energía por tipo de combustible.

Por lo tanto, con el objetivo de minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, el calentamiento global y efectos del cambio climático, surge la necesidad de investigar fuentes alternativas de producción de energía, que permitan minimizar la dependencia de recursos derivados de los hidrocarburos. En ese sentido, la comunidad científica internacional se ha enfocado en investigar fuentes renovables de energía, de tal manera que estas alternativas permitan obtener fuentes energéticas eficien-

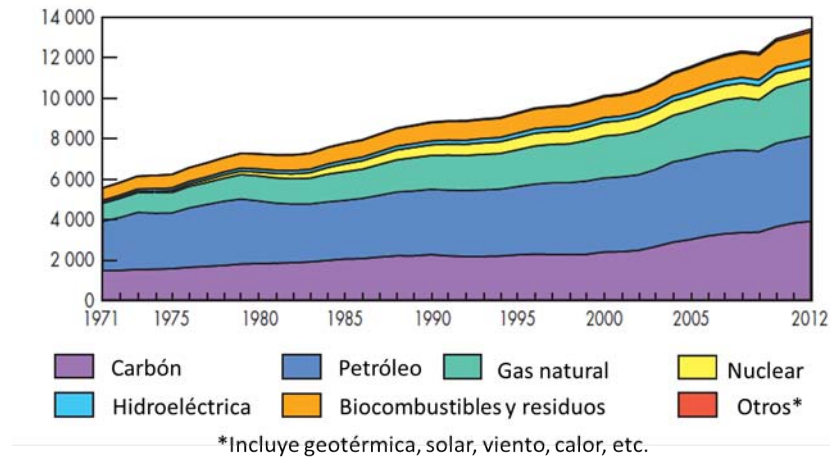


Figura 1.1: Oferta total mundial de energía primaria por tipo combustible de 1971 a 2012 (13,371 Mtep).

Fuente:[3]

tes y sustentables.

Tal es el caso de la bioenergía y los biocombustibles a partir de desechos, residuos y cultivos energéticos tanto del sector de la industria como del sector agrícola, que pueden proporcionar una fuente de energía viablemente económica, social, amigable y limpia para el medio ambiente. De tal suerte que se desarrollen dentro del marco regulatorio de las leyes y acuerdos para su procesamiento y producción. Esto con el fin de no afectar y competir con otras áreas del sector agrícola y alimentario particularmente.

En México, durante el 2008 con la entra en vigor de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB) cuyo objetivo es impulsar el desarrollo y crecimiento de una industria de biocombustibles como una alternativa para contribuir al desarrollo rural, diversificar las opciones energéticas del país y contribuir a la reducción de GEI. Por tal motivo, se han emitido programas encaminados a impulsar el desarrollo de bioetanol (etanol anhidro) y biodiesel.

En ese sentido se ha emitido marcos regulatorios como, La ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos y La NOM-086, indicando el uso de etanol como oxigenante de las gasolinas

con un valor mínimo del 2 % del volumen producido. Sin embargo, en México solamente se cubre el 20 % de la demanda de etanol, utilizando a la caña de azúcar como materia prima[4]. El cual, representa un costo elevado para la obtención de este biocombustible, debido a, que la caña de azúcar se emplea para la producción nacional de azúcar. Por tal motivo, se han buscado alternativas, ya que se disponen de grandes cantidades de desechos agrícolas en el país, y estos últimos pueden ser materias primas potenciales para la producción de bioetanol. Tal es el caso de los cultivos de plátano y mango, los cuales se reportan en abundante producción [5].

## 1.1. Contexto energético internacional

De acuerdo con información de la Agencia Internacional de Energía (IEA) en su reporte Key World Energy Statistics publicado en 2014, la producción mundial de energía primaria totalizó en 13,371 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MMtep) 2 % mayor que en 2011.

Los países con mayor producción primaria de energía, fueron China, Estados Unidos, Rusia, Arabia Saudita e India, con participaciones de 18.8, 13.4, 9.9, 4.6 y 4 %, respectivamente. Para el caso de México se situó en el décimo lugar, con 1.6 % de la energía total producida en el mundo [3].

La figura 1.2, muestra que el 31.2 % de la producción mundial correspondió al petróleo, 29.4 % al carbón y sus derivados, 21.2 % al gas natural, 13.4 % a las energías renovables y 4.8 % a la nucleenergía.

Del total de la producción mundial de las fuentes primarias de energía, se observaron incrementos en la producción del carbón y sus derivados, con 2.4 % respecto al año anterior. La producción mundial de energías renovables incrementó 3.3 %, la de petróleo 1.9 %, y la de gas natural 1.7 %, mientras que la nucleenergía disminuyó 4.7 %[2],[6].

En la figura 1.3, se observa que el petróleo es el energético con los mayores flujos entre países, representando el 42.8 %

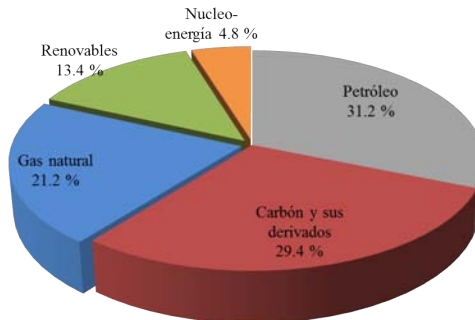


Figura 1.2: Producción mundial de energía primaria, 2012 (13,371 MMtep).

Fuente:[2]

de las exportaciones totales. De acuerdo con datos de la IEA-2014, los países con los mayores volúmenes de exportación de energía fueron Rusia (11.4 %), Arabia Saudita (8.5 %), Indonesia (5.4 %), Estados Unidos (5.0 %) y Canadá (4.9 %). Por su parte México ocupó el vigésimo primer puesto, con una participación de 1.5 %.

Para el caso de las importaciones totales de energía en el mismo año, ascendieron a 5,145.52 MMtep, 2.7 % superior a 2011. Esto se debió principalmente al incremento en las importaciones de carbón y sus derivados, las cuales representaron el 60 % del crecimiento total.

Los países con mayores niveles de importación fueron Estados Unidos (12.3 %), China (9.9 %), Japón (8.7 %), India (6.1 %) y Corea del Sur (5.6 %). México se situó en el décimo noveno puesto, con 1.0 % [2].

## 1.2. Contexto energético nacional

De acuerdo con datos de la SENER, en su último informe del balance nacional de energía 2013, la producción nacional de energía primaria totalizó 9,020.21 PJ, 0.4 % menor, con respecto a 2012, como se muestra en la figura 1.4.

La producción de petróleo, sigue siendo el principal energético

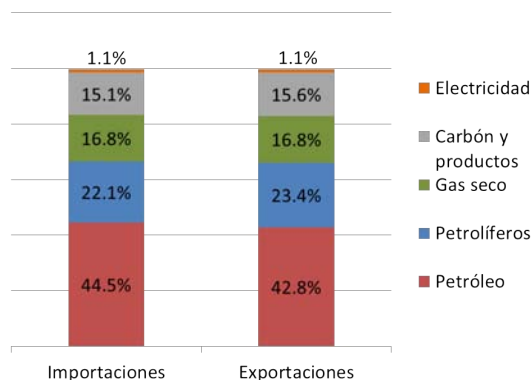


Figura 1.3: Participación porcentual por energético en las importaciones y exportaciones totales, 2012.

Fuente: [2]

primario nacional. El cual se reportó con una disminución de 2.0 % respecto a 2012. Esto, fue asociado principalmente a la menor producción del principal campo del Activo Cantarell, que se encuentra en declinación [7].

En cuanto a la producción bruta de gas natural, se observó un incremento de 0.8 % comparado con el año 2012, debido a una mayor producción en los activos Ku-Maloob-Zaap (22.9 %) y Abkatún-Pol-Chuc (10.7 %).

Para el caso de la producción de carbón mineral, durante 2013 totalizó 316.27 PJ, lo que representó 1.8 % mayor respecto a 2012.

Por su parte la producción de energía nuclear, aumentó 34.3 %, para pasar de 91.32 PJ en 2012 a 122.60 PJ en 2013. Se reportó que, este aumento se debe a la regularización de las operaciones en la central nucleoelectrónica Laguna Verde.

### Consumo nacional de energía

El consumo nacional de energía aumentó 2.3 %, en el 2013, respecto al año anterior, al totalizar con 9,011.83 PJ. Este flujo es el agregado de la energía que se envía a las distintas actividades o procesos para su utilización y principalmente comprende dos divisiones: consumo del sector energético y consumo final total, como se muestra en la figura 1.5.

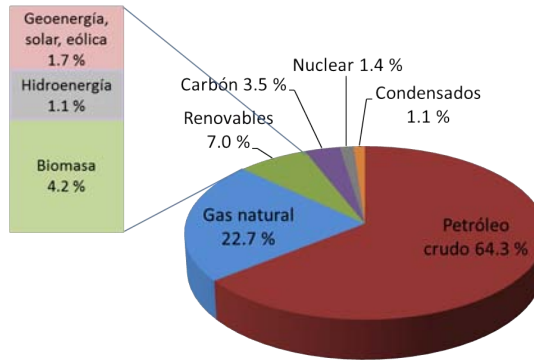


Figura 1.4: Estructura de la producción de energía primaria, 2013 (9,020.21 PJ).

Fuente: [6]

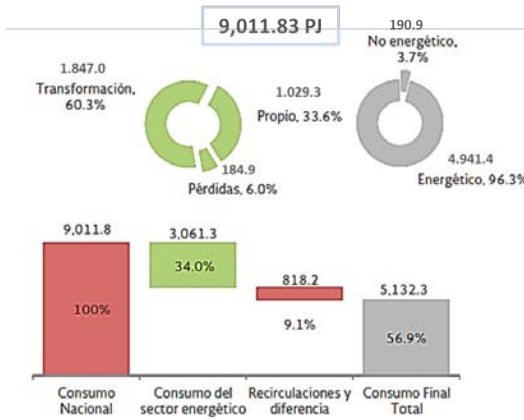


Figura 1.5: Consumo nacional de energía, 2013(Petajoules).

Fuente: [6]

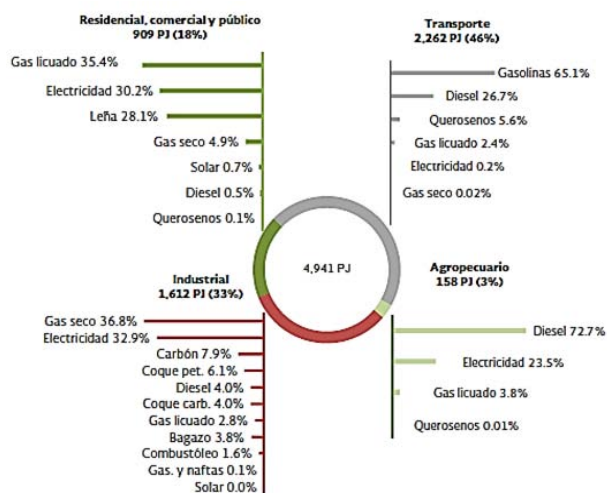


Figura 1.6: Consumo final energético por sector y energético, 2013.

Fuente: [6]

Para el caso del consumo del sector energético, en las actividades propias del sector energético se empleó 34 % del consumo nacional, 2.7 puntos porcentuales por encima de lo observado durante 2012.

De acuerdo con el reporte del balance nacional 2013, este consumo se integra por la energía requerida en la transformación (60.3 %); es decir, aquella utilizada en los procesos para obtener energía secundaria a partir de primaria, y a la energía que se considera como consumo propio (33.6 %); es decir, aquella energía que absorben los equipos que dan soporte o seguridad a los procesos de transformación.

Por otra parte el consumo final energético por sectores creció 0.8 % respecto a 2012, con 4,941 PJ. El consumo del sector industrial mostró el mayor incremento y fue 5.9 % mayor que el del año anterior. La figura 1.6 presenta el consumo final por sectores durante 2013.



### 1.3. Justificación

Actualmente, Brasil y los Estados Unidos siguen representando la mayor parte de la producción mundial de bioetanol, ambos suman más del 70 por ciento de toda la producción de etanol en el mundo. Los E.U. que lo obtiene a partir del maíz y Brasil a partir de la caña de azúcar [8]. Para el caso de la caña de azúcar, que es una de las materias primas más viables para la producción de bioetanol comparado con el maíz que utilizan los E.U., las partes del tallo de la caña, que se presentan como residuo antes y después de la fermentación, se pueden quemar para alimentar la destilería, lo que favorece a la reducción del uso de combustibles fósiles. Así mismo, cuando es quemado por los vehículos, el bioetanol reduce los gases de efecto invernadero que produce el petróleo. La desventaja es que estos cultivos, sólo crece en climas tropicales. Además, que se utiliza normalmente como alimento para los seres humanos o animales, lo que genera una controversia en la producción de bioetanol o alimentos.

En México la industria cañera produce 45 millones de litros por año de bioetanol que no se usan como combustible sino para la producción de bebidas alcohólicas y la industria química, por lo cual la demanda es de 164 millones de litros por año. Sin embargo para realizar la mezcla de 6 % gasolina-etanol de acuerdo a las Prospectivas de Energías Renovables 2012-2026, se requerirá anualmente de 658 a 823 millones de litros solo para las principales áreas metropolitanas de México [4]. Por tal motivo, se han buscado diversas materias primas y residuos agro-industriales que puedan ser aprovechados por su alto contenido de azúcares fermentables para la obtención de bioetanol como combustible. Entre estas materias se encuentra el mango (*Mangifera indica L.*) y plátano (*Musa paradisiaca L.*).

El mango al igual que el plátano, han sido reportados como residuos agroindustriales, los cuales contienen una gran cantidad de carbohidratos.

Para el caso del plátano se ha indicado que contiene entre 50 y 60 % de almidón [9], entre 10 y 35 % de azúcares, que varían en función de la coloración del fruto [10],[11].

El mango por su parte, se reporta con alta concentración de azú-

cares (16-18 % w/v), donde: Sacarosa, glucosa y fructosa son los carbohidratos principales del mango maduro, con cantidades de celulosa, hemicelulosa y pectina [12],[13].

Por lo tanto, ambos productos pueden ser aprovechados para la producción de bioetanol a partir de la conversión de los carbohidratos, mediante un método bioquímico.

En este sentido estas son las justificaciones de manera general para el estudio de éste proyecto de investigación que se pretende evaluar y caracterizar los sustratos para la fermentación alcohólica y por ende la producción de bioetanol, a partir de estas materias primas, por ser frutas abundantes en México con alto contenido de azúcares fermentables, y que anualmente se reporta pérdidas en miles de toneladas ya sea por la calidad de los frutos o son rechazados por los estándares de calidad para su exportación, por disponibilidad de mercado debido, producción en masa, entre otros.

## 1.4. Antecedentes

La biomasa se ha venido estudiando como una alternativa sostenible para la producción de bioenergía y su procesamiento en biocombustibles. La producción de bioetanol en los últimos años, ha sido liderada por los Estados Unidos, seguido por Brasil y la Unión Europea.

Actualmente en Brasil, el etanol producido de caña de azúcar ya sustituye la mitad de la gasolina, aun costo competitivo, derivado de los subsidios iniciales, que permitió viabilizar el programa. Eso se logró en cerca de 30 años a partir de la creación del Proálcool, programa lanzado en este país a mediados de la década de los 70 para reducir la dependencia de la importación de petróleo [14]. En 2013 produjeron 6.3 billones de galones, que represento aproximadamente el 27 % de la producción en el mundo.

Mientras los Estados Unidos, el gran productor mundial de etanol a base de maíz con 13.3 billones de galones, el cual fue estimado en 57 % de la producción mundial en el 2013. Su programa es más reciente y sus justificaciones son la eliminación de

aditivos en la gasolina y la reducción de las emisiones de gases que provocan el calentamiento global.

Por otra parte, los países de la Unión Europea, producen etanol, a partir del trigo y de la remolacha con 1.4 billones de galones en 2013, que fue estimado con el 6 % de la producción mundial. Para estos países el costo del etanol es de dos a cuatro veces más elevado que en Brasil, debido a, subsidios internos y barreras aduaneras que protegen las industrias locales, impidiendo la importación del etanol de Brasil [15], [8]. Así mismo, la producción de etanol en Tailandia y Australia han reportado progresos de producción, mientras que el Sur y Centro América, los países de Argentina, Perú, Paraguay y Guatemala también han clasificado entre los diez principales productores del mundo [16].

Actualmente diversas instituciones y centros de investigación nacional e internacional busca alternativas de producción de bioetanol, a partir de residuos agrícolas y subproductos generados en la agroindustria, principalmente de la biomasa lignocelulósica [17], [18]. Estudios publicados sobre la producción de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar, muestran ser una alternativa, del cual se obtienen concentraciones de 19 g/L de etanol [19]. Así como también, a partir de la biomasa conocida como rastrojos del maíz comparado con el maíz, donde muestra ser más compatible con las prioridades de las políticas energéticas [20], [21].

Otras publicaciones muestran casos de fermentaciones de variedades de mango para la producción de vinos, con resultado que pueden obtenerse concentraciones entre 8 a 10 % (w/v) de alcohol etílico (bioetanol) [22]. Así mismo, se ha indicado que es posible obtener cantidades considerables de azúcares reductores de la fruta del plátano y su residuo lignocelulósico [23], [24]. De acuerdo a Gaber Z. Breisha, 2010., es posible obtener 16 % de bioetanol, con 35 % de sacarosa, empleando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en el proceso de fermentación alcohólica [25].

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Desarrollar una metodología para la producción de bioetanol a partir de los desechos agroindustriales del mango y plátano, mediante la fermentación alcohólica de los azúcares disponibles en los sustratos.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Caracterización de los sustratos utilizados como materias primas.
- Establecer un pre-tratamiento que permita conservar los carbohidratos presente en los sustratos.
- Establecer un proceso de fermentación de los sustratos estudiados para la producción de bioetanol.
- Estimar la producción de bioetanol resultante de las fermentaciones de los sustratos empleados.



---

## Capítulo 2

# Marco Teórico

---

### 2.1. Producción de energías renovables

Se ha reportado que durante la década pasada, y particularmente en años recientes, han sido posibles avances en tecnologías de energía renovable, incrementos en la capacidad de generación a nivel mundial, así como rápidas reducciones de costos [26].

Particularmente en México la generación de energía a partir de las fuentes renovables, aportó el 7 % (figura 1.4) de la energía primaria producida durante el 2013. Las cuales comprenden la generación de energía a partir de la geoenergía, solar, eólica, hidráulica y biomasa. Esta última, una las fuentes renovables que aporta el 4.2 % del total que producen las fuentes renovables.

La generación de energía de las hidroeléctricas por su parte, disminuyó su producción de 12.2 % debido a un menor factor de planta observado en diversas centrales.

Por su parte, la geoenergía totalizó 131.33 PJ durante 2013. Dicha producción presentó una disminución de 1.4 % respecto a 2012, debido a producto de retiros de centrales que alcanzaron su vida útil.

En lo que respecta a la energía eólica, durante el 2013 incrementó el 14.8 % respecto a 2012, pasando de 13.12 PJ a 15.07

PJ. Lo anterior se debió a que las centrales Oaxaca I, II, III, IV y La Venta III entraron en operación normal y aportaron 5.85 PJ.

En lo que se refiere a la producción de energía solar, esta aumentó un 12.7 % respecto a 2012. Fue resultado de un incremento de 11.2 % en el área total instalada de calentadores solares y de 28.6 % en la capacidad total instalada en módulos fotovoltaicos.

La producción de biogás, mostró un incremento de 8.1 %, pasando de 1.82 PJ en 2012 a 1.97 PJ en 2013. Por su parte, la biomasa, que se integra principalmente, por bagazo de caña (32.7 %) y leña (67.3 %) pasó de 351.82 PJ en 2012 a 379.26 PJ en 2013.

La tabla 2.1, sintetiza la producción nacional de energía primaria correspondiente al 2013, donde se muestran los datos de producción por tipo de fuente de producción.

Tabla 2.1: Energía primaria en México (PJ).

	2012	2013	Variación Porcentual (%) 2013/2012	Estructura Porcentual (%) 2013
<b>Total</b>	<b>9,059.05</b>	<b>9,020.21</b>	<b>-0.43</b>	<b>100</b>
Carbón	310.81	316.27	1.76	3.51
Hidrocarburos	8,035.66	7,945.54	-1.12	88.09
Petróleo	5,918.86	5,798.74	-2.04	64.29
Condensados	87.69	101.20	15.40	1.12
Gas natural	2,029.11	2,045.61	0.81	22.68
Nucleoenergía	91.32	112.60	34.26	1.36
Renovables	621.27	635.80	2.34	7.05
Hidroenergía	114.69	100.66	-12.23	1.12
Geenergía	133.14	131.33	-1.36	1.46
Solar	6.67	7.52	12.75	0.08
Energía eólica	13.12	15.07	14.84	0.17
Biogás	1.82	1.97	8.13	0.02
Biomasa	351.82	379.26	7.80	4.20
Bagazo de caña	95.08	123.83	30.24	1.37
Leña	256.74	255.42	-0.51	2.83

Fuente:[6].

## 2.2. Biomasa

El término biomasa se refiere a toda la masa de materia orgánica, no fósil, de origen biológico, tales como los cultivos energéticos, desechos agrícolas, desechos forestales y sus sub-

productos y el estiércol o la biomasa microbiana.

La biomasa es producida por los vegetales, mediante la energía solar en energía química, a través de la fotosíntesis. La biomasa ha sido siempre una de las principales fuentes de energía para la humanidad y actualmente se ha estimado que contribuye del orden de 10 a 14 % del suministro de energía del mundo [3].

Desde el punto de vista energético, se considera dentro de esta clasificación a los árboles y cultivos de alimentos y forrajes, que constituyen lo que se llama biomasa primaria, y los residuos agrícolas, forestales, animales, industriales y urbanos, que constituyen la biomasa secundaria [27].

La biomasa está disponible sobre una base renovable, ya sea a través de procesos naturales, o puede estar disponible como un subproducto (residuos orgánicos) de las actividades humanas [28].

Se conoce que la biomasa contiene cantidades variables de celulosa, hemicelulosa, lignina y pequeñas cantidades de otras sustancias extractivas. Algunas especies de plantas leñosas se caracterizan por un crecimiento lento y se componen de fibras unidas fuertemente, dando una superficie externa dura. Mientras que las plantas herbáceas son generalmente perennes, con fibras unidas más débiles, lo que indica una menor proporción de lignina, que une las fibras celulósicas: ambos materiales son ejemplos de polisacáridos; polímeros naturales de cadena larga. Las proporciones relativas de celulosa y lignina es uno de los factores determinantes en la identificación idónea de las especies de plantas para su procesamiento como cultivo energético.

La celulosa es generalmente la fracción más grande, lo que representa alrededor del 40 al 50 % de la biomasa en peso; la porción de hemicelulosa representa el 20 al 40 % del material en peso.

Los recursos de biomasa para uso energético se pueden clasificar en seis grandes grupos que se denominan: recurso forestal, recurso agrícola, recurso acuático, recurso pecuario, recurso industrial y recurso urbano.



Por otro lado, uno de los criterios más importante para seleccionar el proceso de conversión a utilizar es el contenido de agua de la biomasa. Una biomasa con elevado contenido de humedad puede ser usada sólo en procesos acuosos debido a la pérdida de eficiencia que implica su secado cuando se la quiere emplear, por ejemplo, en combustión directa.

La mayoría de la biomasa tiene un contenido de humedad, medida en base húmeda, superior al 70 %, mientras que la madera de árboles recién cortados contiene alrededor del 50 % de agua.

Para el procesamiento de la biomasa a una forma de energía más elaborada de acuerdo a su aplicación, se conocen dos grandes grupos de conversión de la biomasa a energía. Estos son los *procesos termoquímicos* y los *procesos bioquímicos* [29].

#### ■ **Procesos termoquímicos**

La conversión termoquímica de la biomasa se refiere a la reacción química mediante la cual se libera energía directamente o se convierte la biomasa en combustible gaseoso o líquido. Se pueden clasificar en:

- **Combustión directa.** La forma más directa de aprovechamiento de la biomasa es su combustión directa (quemado). La energía térmica, así obtenida puede ser usada tanto para fines domésticos (cocción, calefacción) como industriales (calor de procesos, generación de energía mecánica o eléctrica, etc.). La biomasa que más se emplea es la leña.
- **Pirólisis.** Es un proceso de oxidación parcial y controlada (quemado casi en ausencia de aire), a temperatura elevada (promedio de 230 °C), que permite obtener como producto una combinación variable de combustibles sólidos (carbón vegetal), líquido (efluente piroleñoso) y gaseosos (gas pobre). Los procesos modernos de pirólisis se realizan a temperaturas más elevadas, hasta 700 °C.
- **Gasificación.** La gasificación es un proceso similar a la

pirólisis, pero llevado a mayor temperatura y/o presión, en presencia de cantidades limitadas de aire u oxígeno.

- Licuefacción. La licuefacción de biomasa se basa en hidrogenación indirecta. Las moléculas complejas de celulosa y lignina son rotas, el oxígeno es removido, y se adicionan átomos de hidrógeno. El producto de esa reacción química es una mezcla de hidrocarburos que al enfriarse se condensan en un líquido.

#### ■ Procesos bioquímicos

La conversión bioquímica se basa en ciertas reacciones que ocurren en presencia de enzimas (catalizadores naturales) provistas por microorganismos vivos.

Estas reacciones, denominadas fermentaciones, se pueden dividir en dos grandes grupos: las anaeróbicas que se producen en ausencia de aire y las aeróbicas que se producen en presencia de aire. Las primeras pueden dar lugar a productos energéticos y eventualmente residuos sólidos valorables (por ejemplo abonos). Las segundas tienen poco interés desde el punto de vista de la producción de energía.

Por lo tanto, se distinguen dos procesos bioquímicos de conversión de la biomasa:

- Fermentación metánica. La fermentación o digestión metánica es la descomposición bacteriana de materia orgánica en la ausencia de aire, produciendo una mezcla gaseosa, denominada biogás, con un 50 a 70 % de metano, un 30 a 45 % de dióxido de carbono, de 0,5 a 3 % de nitrógeno, 1 % de hidrógeno, 1 % de oxígeno y vestigios de anhídrido sulfuroso y de otros gases [30], [31], [32].

Como la conversión enzimática se produce en un estricto proceso anaeróbico, se considera frecuentemente la fermentación metánica como sinónimo de fermentación anaeróbica. El sedimento o lodo que queda al extraer el biogás, retiene eficientemente nitrógeno presente en la biomasa, proveyendo un excelente fertilizante sin olor para cultivos agrícolas.

- Fermentación alcohólica. La hidrólisis y posterior fermentación de biomasa con alto contenido de azúcares, almidones o celulosa, puede utilizarse para la producción de alcohol etílico (bioetanol), igual al que resulta de la destilación del petróleo. Los carbohidratos, compuestos naturales formados por carbono, hidrógeno y oxígeno, son la materia prima del proceso; se clasifican en tres categorías generales, en orden de complejidad creciente: azúcares, almidones y celulosas.

Existen otros procesos, siendo el más importante la producción de aceites vegetales a partir de plantas oleaginosas como el girasol, soja, maní, semilla de algodón, palma, etc.; en general, las semillas son procesadas para extraer el aceite y puede emplearse solventes para aumentar el rendimiento. En el caso de la soja, el aceite es separado sólo por acción de solventes. Estos aceites permiten reemplazar al gas-oil en los motores de combustión interna, de ahí su importancia energética. También es posible producir combustible para motores diesel por transesterificación de los aceites vegetales formando lo que se ha llamado biodiesel [27].

### **2.2.1. Desechos agroindustriales**

Entre los diferentes enfoques que pueden existir para definir a la “agroindustria”. Se dice que la “agroindustria”, es una actividad que integra la producción primaria agrícola, pecuaria o forestal, el proceso de transformación, así como la comercialización del producto, sin dejar de lado los aspectos de administración, mercadotecnia y financiamiento.

Escrito en otros términos, se conoce como una actividad económica que combina el proceso productivo agrícola primario con el industrial para generar, producir y/o transformar, almacenar y comercializar productos, así como alimentos o materias primas semi-elaboradas destinadas al mercado. Dentro de estos productos y variedades que se industrializan están: frutas, verduras, raíces, semillas, hojas, tubérculos y vainas; algunos se comercializan en fresco y otros son transformados en néctares, jugos, mermeladas, ensaladas, harinas, aceites, vinos, concentrados en

polvo y conservas, por mencionar algunos.

Datos actuales de la FAO revelan que la tendencia mundial es el notable crecimiento en la generación de residuos, derivado del incremento en la generación de productos comercializables.

A partir del marco de referencia anterior, se puede entonces decir que los residuos agroindustriales son materia en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o durante su industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social.

En general, las características de los residuos y desechos agroindustriales son muy variadas, dependen de la materia prima y del proceso que los generó, no obstante, comparten una característica principal que es el contenido de materia orgánica, constituida por diferentes porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina. Dentro de este rubro se incluyen otros residuos, como los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, la hojarasca de parques y jardines, así como los residuos domésticos y residuos sólidos urbanos [33].

En México durante el 2010, se produjeron 75.73 millones de toneladas de materia seca proveniente de 20 cultivos [34], de los cuales 60.13 millones de toneladas corresponden a residuos primarios, obtenidos al momento de la cosecha, entre los que destacan: hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. El resto, 15.60 millones de toneladas corresponden a residuos secundarios obtenidos del procesamiento post-cosecha, entre los que están: bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, así como pulpa de café [35].

Por otro lado, de acuerdo con datos de SAGARPA durante el 2013 se reportaron desechos agrícolas de mango y plátano en un estimado de 130 mil toneladas [5].

Otros reportes revelan la abundante producción de residuos

en sectores agrícolas y durante su procesamiento industrial. Las materias primas que contienen disacáridos principalmente, incluyen: sorgo dulce, remolacha azucarera, plátano, mango, sandía, caña de azúcar entre otras frutas; estos son ejemplos de materias primas con concentraciones altas de azúcares libres, que pueden ser fermentados fácilmente mediante el uso de diferentes microorganismos [36].

En el mismo sentido, otras investigaciones se han enfocado en estudiar materias primas presentes como residuos y/o desechos derivados de la cadena agroindustrial que contengan una significativa cantidad de azúcares o materias que pueden ser tratadas para obtener azúcares, tales como residuos con contenidos de azúcares libres, con contenido de almidón y celulósicos [37], [38].

Algunas de las investigaciones sobre producción de bioetanol a partir de residuos de frutas y verduras se muestran en la tabla 2.2.

Durante el procesamiento de estas materias se realizan pre-tratamientos de hidrólisis con enzimas y ácidos; esto es necesario, debido a que tienen una gran cantidad de fibra que necesitan ser hidrolizado para mejoras del rendimiento de producción de bioetanol [39].

Tabla 2.2: Residuos que contienen azúcares libres

Materia prima	Liberación de azúcares	Proceso de intervención	Rendimiento de etanol	Referencias
Desechos de frutas (pulpa madura de manzana y plátano).	-----	Fue lavado en permanganato de potasio (KMNO <sub>4</sub> ) al 5%.	Rendimiento de 38 % de etanol después de 36 horas de fermentación.	[40]
Residuos de frutas y verduras como: manzana, zanahoria, Mango, naranja, piña, zapote, tomate, otros.	La hidrólisis ácida y enzimática se utilizó previa a la fermentación para la liberación de azúcares de los residuos.	SHF	Manzana: rendimiento de 79.8%, Zanahoria: rendimiento del 70%, Mango: rendimiento de 82.8%, Naranja: rendimiento de 91.3%, Piña: rendimiento de 75.4%, Zapote: rendimiento de 97.7%, Tomate: rendimiento de 72.4%.	[39]
Cáscara de café	-----	-----	La producción de etanol fue de 84.9 +/- 2.9 g/kg base seca.	[41]
Residuos flotante de algas marinas	Pretratamiento ácido (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), fermentación de hidrólisis enzimática.	SHF	EL rendimiento máximo de glucosa alcanzó 277.5 mg/g(fsw) que fue de 80.8% fermentado a etanol.	[42]
Jugo de tallo de la caña de azúcar	-----	-----	EL rendimiento teórico fue de 88%.	[43]

Los residuos o materias que contienen moléculas de almidón son polisacáridos formados por cadenas largas de glucosa unidas covalentemente.

Para estos residuos, previo al proceso de fermentación, es importante someter a un pretratamiento que rompan las moléculas a glucosa simples.

Los granos como cereales, frijol, yuca, maíz, trigo, papa, camote entre otros cereales son ejemplos de materiales ricos en almidón que puede ser utilizado para la producción de bioetanol. Sin embargo, estas materias primas juegan el papel más importante en la cadena de la alimentación humana, dado a que son las fuentes primarias de alimentos en muchos países.

La tabla 2.3, reporta el uso de algunos residuos con contenido de almidón en la producción de bioetanol. Dentro de los pretratamientos y técnicas necesarias para la producción de bioetanol

se puede encontrar el uso predominante de la sacarificación y fermentación simultánea y/o separada (SSF, SHF).

Tabla 2.3: Residuos que contienen almidón

Materia prima	Liberación de azúcares	Proceso de intervención	Rendimiento de etanol	Referencias
Residuos de alimentos	La hidrólisis fue realizado por las enzimas	SSF	Las concentraciones de etanol fueron de 19, 35 y 39 g/dm <sup>3</sup> . Cuando las concentraciones de residuos de alimentos fueron 50, 100 y 120 g/dm <sup>3</sup> .	[44]
Almidón de maíz crudo	Sacarificación enzimática	SSF	La mayor producción de etanol fue de 85 g/kg (materia prima).	[45]
Residuos de almidón de patata	Hidrólisis ácida (HCl y H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	SHF	El rendimiento máximo de etanol fue de 5.52 g/L.	[46]

Por otra parte, mediante el uso de los residuos que contienen materiales celulósicos son otra forma de producir bioetanol. Algunos ejemplos de estas materias son bagazo, paja, papel, cartón, madera y materiales de fibras celulósicas tales como la planta de cañamo, caña común, los árboles de eucalipto entre otros.

Se conocen que los recursos celulósicos son inmensamente extensos y encuentran abundantemente en todas partes. Por lo tanto, estos materiales celulósicos tienen el potencial mayor de ser utilizados para la producción de bioetanol [47].

Los materiales celulósicos, también son llamados lignocelulósico porque están compuestos de lignina, celulosa y hemicelulosa [36]. En los últimos años el residuo celulósico ha sido el más reportado para la producción de etanol como se muestra en la tabla 2.4.

Por su parte para el procesamiento de estos residuos, unos de los procesos de hidrólisis más empleados para la sacarificación

del bagazo son, enzimáticos. Debido a la ineficiencia de hidrólisis de otros tipos, además, muchos estudios ha demostrados que mediante la sacarificación y fermentación simultáneas (SSF), se puede reducir un paso del proceso que favorece al ciclo de producción [48], [49].



Tabla 2.4: Residuos agroindustriales que contienen celulosa

Materia prima	Liberación de azúcares	Proceso de intervención	Rendimiento de etanol	Referencias
Fibra de fruta de palma	Pretratamiento ácido/alcalino	SSF	37.8 g/L de etanol (Rendimiento de bioetanol de 0.45 g etanol/g glucosa) después de 60 horas.	[48]
Bagazo de la caña de post-cosecha	Pretratamiento alcalino (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) para eliminar la lignina y hidrólisis ácida (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ).	SHF	Producción de etanol de 335.67 mg/L después de 12 días de fermentación	[50]
Los residuos agrícolas y heno (trigo, cebada, triticale y paja y cebada, triticale y heno de sorgo dulce).	Pretratamiento químico (NaOH o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) y hidrólisis enzimática.	SHF	Producción entre 52% y 65.82% del rendimiento teórico.	[51]
Tallo de algodón, triticale heno, cebada, triticale y paja de trigo.	La hidrólisis enzimática de la lignocelulosa.	SHF	Los rendimientos de etanol oscilan entre 0.21 y 0.28 (g/g azúcares reductores).	[51]
Paja de trigo	Distintos tipos de hidrólisis como pretratamiento	SSF	EL rendimiento de etanol más grande obtenido fue del 81%.	[52]
Paja de trigo	Distintos tipos hidrólisis como pretratamiento.	SHF	Rendimiento de etanol que van desde 65% a 99% del valor teórico.	[52]
Residuos de la producción de canola	Tratamiento previo alcalino (NaOH), Ácido (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )), seguido por hidrólisis enzimática.	SHF	EL mejor rendimiento fue de 45% en la producción de etanol, alrededor de 95 L por tonelada materia seca.	[53]
Residuos de mazorca (Maíz)	Pretratamiento químico (ácido o alcalino) e hidrólisis enzimática.	SSF	EL rendimiento de producción de etanol estuvo entre 25.2% a 27.1% del valor teórico.	[54]
Flotantes residuos de algas marinas (FTS)	Tratamiento previo con ácido (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), hidrólisis enzimática.	SHF	EL rendimiento máximo fue 80.8% convertido a etanol (La glucosa alcanzó 277.5 mg/g FSW).	[42]
Bagazo de caña de azúcar	Pre tratado por explosión de vapor en 200 °C, Remoción de lignina con NaOH e hidrólisis enzimática.	SSF	La concentración etanol fue mayor a 25 g/L.	[55]
Las plantas de arroz	Pretratamiento físico y químico, y sacarificación enzimática	SSF	La producción de etanol fue de 169 g/kg de materia seca.	[56]
Residuos de <i>Lycoris radiata</i> (flor del infierno perteneciente a las Amarilidáceas).	Previo a la fermentación el residuo se hidrolizo con enzimas.	SHF	No determinado	[57]
Bagazo de caña de azúcar	Hidrólisis enzimática.	SHF	EL rendimiento teórico fue del 88%	[43]
Cascos de sojas	Hidrólisis enzimática	SSF	Se obtuvieron concentraciones de etanol de 25 a 30 g/L	[58]
Bagazo de caña de azúcar	Pretratamiento mecánico e hidrólisis enzimática	SHF	Rendimiento del 56.9% de la producción teórica	[49]
Bagazo de caña de azúcar	Pretratamiento mecánico por molienda de bolas e hidrólisis enzimática.	SSF	Rendimiento del 52.9% de la producción teórica.	[49]
Rastrojo de maíz	Hidrólisis enzimática	SSF	EL rendimiento fue de 69% a 98% de la producción teórica de etanol.	[59]

### 2.2.2. Mango (*Mangifera indica* L.)

El mango (*Mangifera indica* L.) es un producto que a nivel nacional e internacional, representa un papel importante económico y social para las naciones productoras. Más de 1000 variedades de mango están disponibles en todo el mundo. Dentro de estas variedades disponibles, sólo unas pocas se cultivan en escalas comerciales[60].

En los últimos reportes se ha documentado que esta fruta ocupa la segunda posición como cultivos tropicales a nivel mundial, en cuanto a su producción, superficie utilizada e importación, sólo por detrás de los plátanos. En la actualidad, se cultiva en una superficie de aproximadamente 3.7 millones de hectáreas en todo el mundo.[61]. Para México es una muy importante fuente de empleo, ingreso y generación de divisas, según datos de SAGARPA [62].

EL mango (*Mangifera indica* L.) es una de las frutas tropicales más populares y abundantes en el sureste de Asia, de donde es originario, específicamente de la región Indo - Birmanesa, cultivándose en la India desde hace más de cuatro siglos [12]. Este fruto fue introducido a México a través de los españoles, quienes trajeron las primeras variedades de las Islas Filipinas. Como en el caso de muchos otros productos (plátano, limón, etc.), a pesar de no ser un cultivo nativo del continente americano ha llegado a ocupar un lugar primordial en cuanto a los porcentajes de producción a nivel mundial.

El mango (*Mangifera indica* L.) pertenece a la familia Anacardiáceas y las variedades se diferencian entre sí por la zona de cultivo, el color de la piel, la pulpa, la variedad del sabor, el aroma del fruto y el tamaño, entre otras características [13]. Por sus propiedades bromatológicas, el mango, incluyendo cáscaras y semillas, es una fuente importante de vitamina A y C, riboflavina (vitamina B2), compuestos fenólicos, carotenoides y fibra dietética, entre otros elementos importantes para el organismo humano[63].

Dependiendo de las variedades de mango, la cáscara compone aproximadamente el 7 al 24 % del peso total de una fruta [64], mientras que aproximadamente 20 % lo constituye la semilla,

el resto es pulpa[60]. Además se ha reportado que las cáscaras de mango son una rica fuente de fibra dietética con contenidos importantes de celulosa, hemicelulosa, lípidos, proteínas, enzimas y pectina [65]. Por todos estos contenidos se conoce que el mango es una fruta de gran interés dietético y nutricional [66],[67]. En la tabla 2.5, se muestra la composición proximal y fisicoquímica los mangos crudos [68] y la tabla 2.6 se muestra la composición fisicoquímica de la pulpa de mango [69], [70], [71].

Tabla 2.5: Composición proximal y fisicoquímica Los mangos crudos (base de peso fresco).

<b>Composición</b>	<b>Fruta de mango</b>
Agua (%)	72.1-85.5
Proteína (%)	0.30-5.42
Fibra cruda (%)	0.30-2.38
Ceniza (%)	0.29-1.13
Sólidos solubles totales (%)	8.5-10.6
pH (%)	4.0-5.6
La acidez titulable, como el ácido cítrico (%)	0.327

Tabla 2.6: Composición fisicoquímica de la pulpa de mangos (base de peso fresco).

<b>Composición/Propiedad</b>	<b>Pulpa de mango</b>
Los sólidos solubles totales (%)	14.2-14.5
Valor de pH	4.0-4.4
La acidez (% de ácido cítrico equiv.)	0.25-0.32
El ácido ascórbico (mg/100 g)	15.56
Azúcares totales (%)	12.6-13.1
Azúcares reductores (%)	1.9-2.5
Azúcares no reductores (%)	10.5-10.7
Los carotenoides (mg/100 g)	3.95

### **Producción mundial de mango (*Mangifera indica L.*)**

El mango se cultiva principalmente en 85 países. De acuerdo con la FAO en 2013 la cosecha de mango se registró con 42.66 millones de toneladas.

Asia y los países orientales durante el 2013 produjeron el 72 %

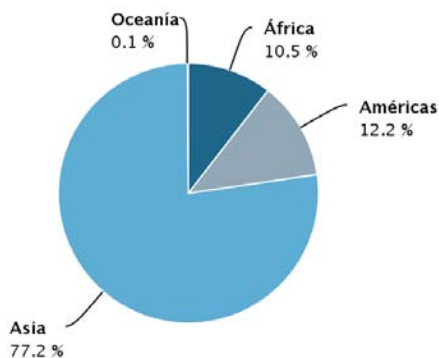


Figura 2.1: Porcentajes de producción de mango en el mundo  
Fuente: [72]

de producción total del mundo, seguido con el 12.2 % que se produjo en América, 10.5 % en África y con el 0.1 % en oceánica. De estos datos reportados se informa que el 72 % de producción lo contempla Asia, China, India, Filipinas, Pakistán y Tailandia, el 12.2 % en América por México y Brasil, mientras que el 10.5 % en el continente africano. En la figura 2.1, se muestra la producción porcentual de mango en el mundo.

Sin embargo, los principales países productores de mango son liderados por la India, China, México y Pakistán [73]. En los últimos años los principales países productores han presentado promedios de volumen de producción, exportación e importación como se observa en la tabla 2.7, donde, los principales países que destacan son India, China, Pakistán, México, Tailandia, Indonesia y Brasil [72].

Tabla 2.7: Los principales países producciones, exportadores e importadores de mango en el mundo.

Países	Estadísticas de producción de mango (Millones de Ton.)	
	2012	2013
India	17.099	18.002
China	4.593	4.620
Tailandia	3.063	3.141
Indonesia	2.217	2.058
México	1.831	1.901
Total Mundial	40.438	42.663
	Estadísticas de Los principales exportadores (Mil Ton.)	
Mexico	195	22.64
India	223	20.25
Brazil	114	13.18
Pakistán	49	6.94
Países Bajos	69	6.42
Total Mundial	1,483,611	1,648,185
	Estadísticas de Los principales importadores (Mil Ton.)	
Estas Unidos	261	32.70
Países Bajos	98	10.62
Emiratos Árabes Unidos	51	6,82
Arabia Saudita	51	5.32
China	19	4.91
Total Mundial	480	60.37

Fuente:[72].

Tomando en cuenta los volúmenes de producción en los últimos años, México ha ocupado el cuarto lugar en cuanto a volumen de producción. En la figura 2.2, se representa el porcentaje del volumen producido de los principales países productores.

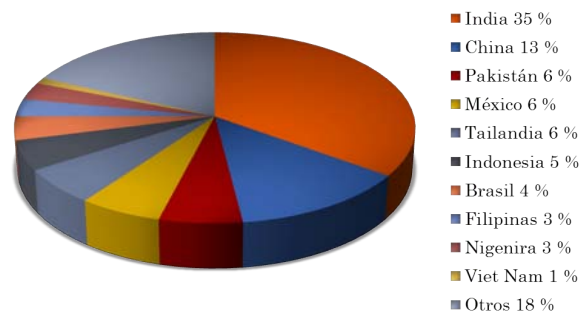


Figura 2.2: Porcentaje de participación de los principales países productores de mango (promedio de los años 2000 a 2006).

Fuente: [72]

México además de ser uno de los principales productores de

mango, ocupa el primer lugar a nivel mundial como el mayor exportador de mango con cerca de 313 mil toneladas que equivale a 40.5 % de la exportación mundial durante el 2014. Donde, Estados Unidos es el país que absorbe el mayor volumen de exportaciones [62]. Así mismo, se han reportado datos de rendimiento promedio mundial de 7.9 toneladas por hectárea de acuerdo con los datos estadísticos reportados por la FAO. En base a estos datos, se ha indicado que algunos países obtienen hasta 40 toneladas por hectárea, como sucede en Samoa, o como en las Polinesias Francesas donde reportan más de 31 toneladas por hectárea. Pero estos países son muy pequeños y no son competitivos debido a que tienen muy poca superficie cultivada en relación a los grandes productores mundiales. Como Brasil, Pakistán y México, los cuales han reportado los mayores rendimientos en los últimos años, en la figura 2.3, se puede ver el rendimiento de cultivo en toneladas por hectárea.

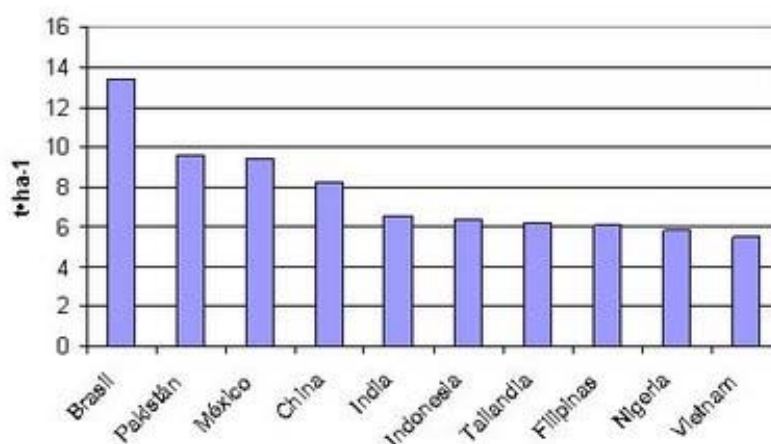


Figura 2.3: Rendimiento en t·ha-1 de los principales países productores de mango.

Fuente: [72]

### Producción nacional de mango

Para el caso de la producción nacional de mango, la superficie de cultivo ha sido reportado de acuerdo a los datos estadísticos

del SIAP, que en el ciclo 2013 existía una superficie sembrada de 186,964.21 hectáreas. En la figura 2.4, se muestra la superficie total sembrada en el país, así como la aportación de los principales estados que cultivan el mango.

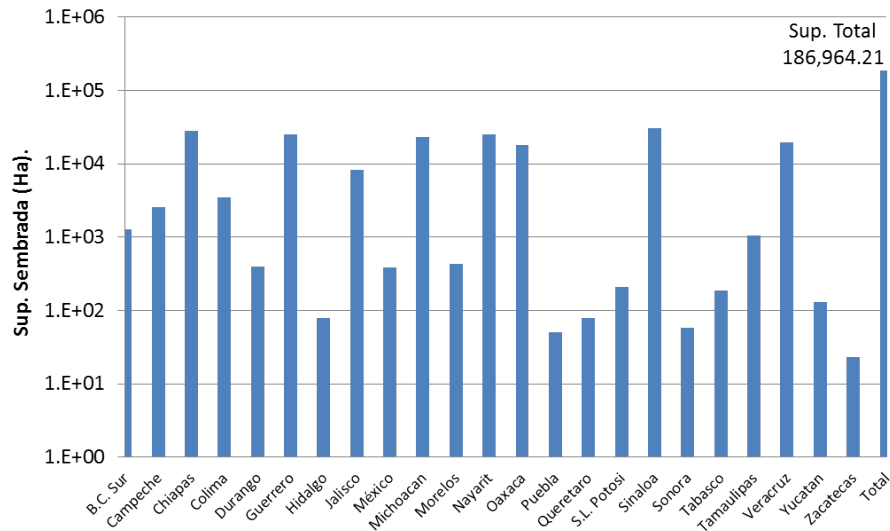


Figura 2.4: Superficie de mango sembrada (Ha), 2013.  
[5]

Se ha reportado que durante producción nacional de mango para el mismo ciclo de cosecha (2013), tomando en cuenta los cultivos de riego y temporales. La superficie cosechada fue 178,262.95 hectáreas del total de la superficie sembrada. Por lo tanto de estos datos se estima que no cosechan la superficie de 8,701.26 hectáreas. Así mismo se estima que se generan 78,311.34 toneladas de mango sin procesamiento. Ya que, de acuerdo con lo publicado por el SIAP se obtiene un rendimiento promedio de 9 toneladas por hectárea.

En la figura 2.5, se muestra la producción nacional de mango durante el 2013, con una producción de 1,603,809.53 toneladas. Así como también, los principales estados productores de mango en el país [5].

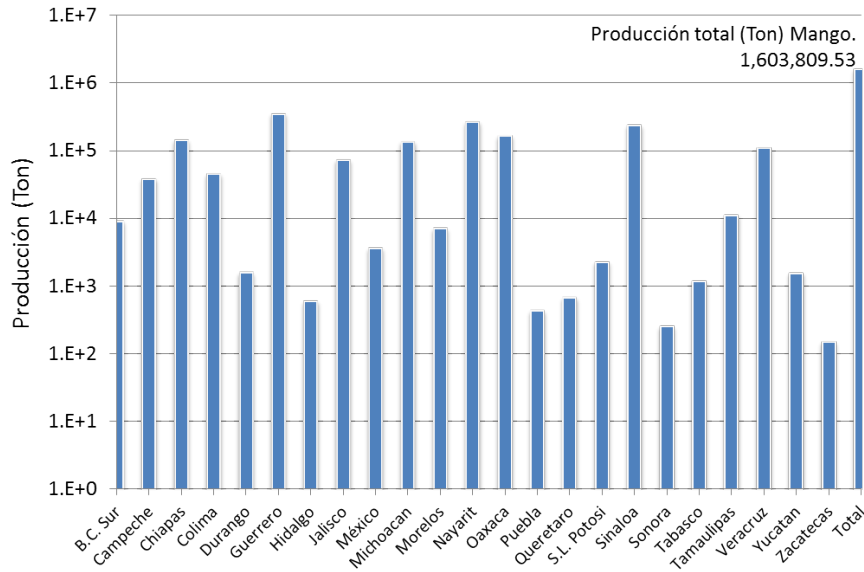


Figura 2.5: Producción nacional de mango (Ton), 2013. [5]

Por otro lado de acuerdo con el último informe de SAGARPA existe un historial de producción del 2007 al 2013 como se muestra en la tabla 2.8 [5].

Tabla 2.8: Producción nacional de mango, 2007-2013 (Millones de toneladas).

Concepto	Datos anuales						
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Mango	1.643	1.717	1.509	1.633	1.537	1.703	1.603

Fuente: [62]

En México se producen mangos de diversos cultivos los cuales son consumidos o demandados para diversos fines. La mayor parte de la superficie cultivada como se muestra en la figura 2.10 se ubica en los estados de Veracruz, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Nayarit, Sinaloa y Chiapas. Estos son los estados que encabezan el mayor volumen de producción.

Las variedades de mango que se cultivan en México son Manila, Ataulfo, Haden, Tommy Atkins, Kent, Keit y Manililla. Las cuales son seis las variedades que concentran el 90 % del volumen y



valor de producción entre ellas esta las variedades del Ataulfo, Manila, Tommy, Haden, Kent y Keitt [5]. En la figura 2.6, se observa el valor y las principales variedades de mango que se producen en México.

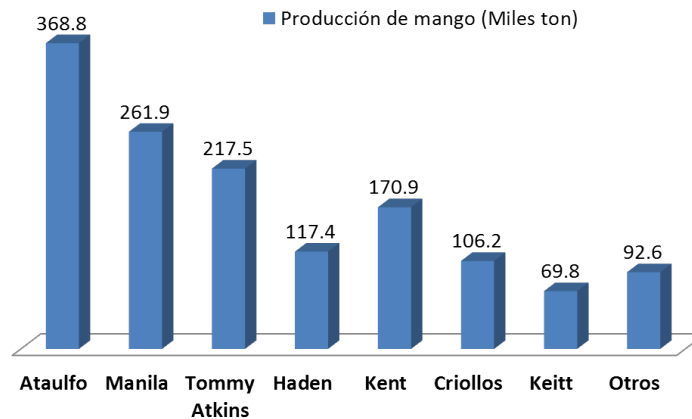


Figura 2.6: Principales variedades de mango que se producen en México.

[5]

### 2.2.3. Plátano (*Musa paradisiaca L.*)

El plátano (*Musa paradisiaca L.*), también conocido como banano tiene su origen en Asia meridional, siendo conocido desde el año 650, la especie llegó a las Canarias en el siglo XV y se introdujo al continente americano en 1516. Su cultivo comercial se inició a finales del siglo XIX y principios del XX.

El plátano es considerado el principal cultivo de las regiones húmedas y cálidas del suroeste Asiático. Existen reporte que alguno consumidores como en el hemisferio norte lo aprecian como postre, sin embargo en muchos países tropicales y subtropicales constituye una parte esencial de la dieta diaria de sus habitantes[74].

Los plátanos o bananos existen en distintas variedades que van desde las más grandes como el plátano macho, que llega

a pesar unos 200 gramos o más cada unidad, hasta los más pequeños como el bananito, cuyo peso oscila entre los 100 y 120 gramos. Su color de la piel de los frutos puede ser amarillo verdoso, amarillo, amarillo-rojizo o rojo. El plátano macho tiene una piel gruesa y verdosa y su pulpa es blanca; en el bananito, la pulpa es de color marfil y la piel fina y amarilla.

Los plátanos se pueden cosechar todo el año y son más o menos abundantes según la estación. Para el caso del comercio exterior es de suma importancia que para el transporte de la fruta se realice en condiciones de refrigeración con una temperatura aproximada de 14 °C.

Los plátanos destacan por su contenido de carbohidratos, por lo que su valor calórico es elevado. Los nutrientes más representativos del plátano son el potasio, el magnesio, el ácido fólico y sustancias de acción astringente; sin pasar por alto su elevado aporte de fibra, del tipo fruto-oligosacáridos.

Los plátanos contienen una gran cantidad de carbohidratos y materia lignocelulósica, tales como: celulosa, hemicelulosa y lignina. Se ha indicado que este fruto contiene entre 50 y 60 % de almidón [75],[76], y se ha reportado que cambian dramáticamente durante la maduración, es decir la cantidad de almidón se reduce durante esa etapa [77]. Así la maduración del plátano se ha clasificado en ocho etapas de acuerdo con color de la piel. Donde se conoce que el almidón es el componente principal de los plátanos verdes, los cuales sufren cambios importantes durante las etapas de maduración.

El contenido medio de almidón se reduce de 70 a 80 % en el período pre-climaterio (previo a la descomposición del almidón) a menos de 1 % al final de la transformación del almidón a azúcares, mientras que estos azúcares, principalmente sacarosa, se acumulan a más del 10 % de peso de la fruta fresca. Por lo tanto, el contenido de azúcar soluble total puede alcanzar el 16 % o más del peso fresco de la fruta (alrededor del 80 % del contenido de la fruta es agua), lo que indica una alta tasa de conversión [78].

Durante la hidrólisis del almidón la enzima *Amilasas* es la que participan en esa conversión, sin embargo, es probable que

no están vinculados con la síntesis de la sacarosa, a lo que es la transformación de almidón-sacarosa, si no que de acuerdo con lo reportado por B.R. Cordenunsi, et al. 1995, durante la maduración de los plátanos implica la acción de varias enzimas y por más de una vía. A pesar de la importancia de esta transformación en términos de fisiología de la fruta, se sabe poco sobre los mecanismos implicados [79].

Como fue mencionado en el párrafo anterior se sabe que composición del banano cambia dramáticamente durante su maduración. Von Loesecke, 1950., clasificó la maduración del banano en 8 etapas de acuerdo a su color de cáscara. Se ha indicado que almidón es el principal componente del plátano, el cual tiene cambios importantes durante su maduración. La tabla 2.9 muestra las propiedades a diferentes etapas de maduración.

Tabla 2.9: Características del plátano a diferentes etapas de maduración.

Etapa	Color (cáscara)	Almidón (%)	Azúcares Reductores (%)	Sacarosa (%)	Temperatura de gelatinización (°C)
1	Verde	61.7	0.2	1.2	74-81
2	Verde	58.6	1.3	6.0	75-80
3	Verde/traza de amarillo	42.4	10.8	18.4	77-81
4	Más verde que amarillo	39.8	11.5	21.4	75-78
5	Más amarillo que verde	37.6	12.4	27.9	76-81
6	Amarillo con puntas verdes	9.7	15.0	53.1	76-80
7	Amarillo	6.3	31.2	51.9	76-83
8	Amarillo/pocos puntos marrón	3.3	33.8	52.0	79-83
9	Amarillo/muchos puntos marrón	2.6	33.6	53.2	-

Fuente:[77].

Por otro lado en la tabla 2.10, se presenta la composición de la pulpa y cáscara de plátano.

Tabla 2.10: Composición proximal teórica de la pulpa y la cáscara del plátano.

Propiedades (%)	Plátano verde		Plátano maduro	
	Fruto	Cáscara	Fruto	Cáscara
Materia Seca	20.0	18.0	20.0	13.0
Extracto libre	88.2	33.5	82.9	67.7
Proteína	5.5	9.5	5.6	7.0
Extracto etéreo	1.1	8.3	0.9	7.0
Fibra Bruta	1.3	26.7	5.2	5.7
Cenizas	4.0	22.0	5.5	12.6
Almidón	57.45	48.2	26.5	12.7

Fuente:[80], [81].

### Producción mundial de plátano (*Musa paradisiaca* L.)

El plátano (*Musa paradisiaca*), conocido también como banana es una fruta tropical que se encuentra entre los cultivos más importantes de alto consumo especialmente en países de África, Latinoamérica y el Caribe. Alrededor del 85 % de la producción se consume en el mercado nacional, mientras que el 15 % restante se distribuye en el comercio internacional.

Los plátanos son la fruta más popular del mundo y uno de los alimentos básicos más importantes del mundo, junto con el arroz, el trigo y el maíz. En 2013, la producción de plátano fue de 105,956,705.00 toneladas de los cuales, se produjeron en más de 130 países en el 0.1 por ciento de la superficie agrícola del mundo. Alrededor de dos tercios de los plátanos se exportan desde América Latina, con aproximadamente la misma cantidad destinada a Europa o Estados Unidos.

La India, Filipinas y China son los tres más grandes productores de plátano con cerca de 27, 9 y 9 millones de toneladas. Por su parte México ocupó en el 2012 el décimo lugar con 2.6 millones de toneladas, según datos de la FAO. En la tabla 2.11, se presentan los principales productores de plátano.

Tabla 2.11: Principales países productores de plátano.

País	Área cosechada (Ha)	Rendimiento (Ton/Ha)	Producción (Ton)
India	748,100	36.1	26,996,600
Filipinas	446,400	20.2	9,013,190
China	350,224	25.7	9,006,450
Ecuador	216,115	35.3	7,637,320
Brasil	479,614	14.1	6,783,480
Indonesia	105,000	59.7	6,273,060
Tanzanía	534,354	6.0	3,219,000
Guatemala	59,391	42.8	2,544,240
Costa Rica	42,591	55.5	2,365,470
México	75,810	29.4	2,232,360
Colombia	74,112	27.3	2,020,390
Viet Nam	71,893	21.3	1,532,420
Tailandia	112,391	13.6	1,528,080
Nueva Guinea	75,493	15.7	1,187,020
Egipto	27,000	40.7	1,100,000
Resto	1,505,096	-	13,939,192
Total mundial	4,923,584	-	97,378,272

Fuente: [82].

Así mismo, en la figura 2.7, se indica la participación porcentual de los principales países que cultivan plátano en el mundo.

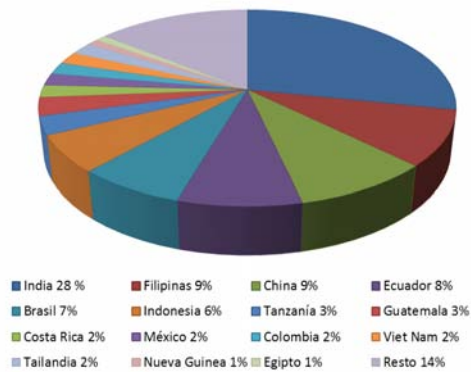


Figura 2.7: Principales países productores de plátano en el mundo.

Fuente: [72]

De acuerdo con los datos que reportó la FAO, en 2012 el volumen de las exportaciones mundiales de plátano o banano alcanzó un máximo histórico de 16.5 millones de toneladas. El aumento se explica principalmente por el crecimiento de las exportaciones de América Latina y el Caribe de 12.5 a 13.0 millones de toneladas. En Ecuador, el mayor exportador de banano en el mundo. Los principales productores exportadores de plátano en el mundo se muestran en la figura 2.8.

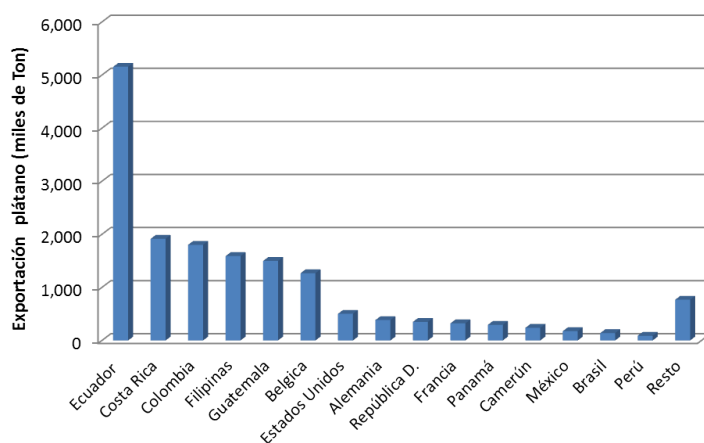


Figura 2.8: Países con mayor exportación de plátano o banano en el mundo.

Fuente: [72]

### Producción mundial de plátano (*Musa paradisiaca L.*)

El plátano es una de las frutas más consumidas en México y en el mundo. En nuestro país, en el 2013, la superficie sembrada dedicada a este cultivo alcanzó 75 mil hectáreas, con una producción de 2.1 millones de toneladas, rendimiento promedio de 29.3 ton/ha. Sin embargo del total de la superficie que se reporta sembrada, no toda se cosecha, de ahí que existe una considerable pérdida de 61,727.9 Ton, de acuerdo con los datos reportados por la SIAP.

La figura 2.9, muestra los principales Estados que cultivan el plátano, así como también las superficies sembradas para cada caso.

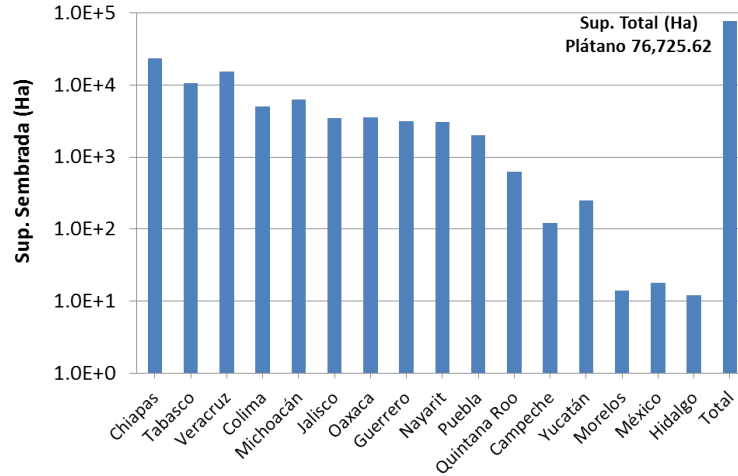


Figura 2.9: Principales estados Mexicanos que cultivan plátano (Ha).

Fuente: [72]

La producción nacional de plátano no ha presentado una variación importante en los últimos diez años tomando en cuenta los datos publicados por la SIAP. Sin embargo, se reporta que los fenómenos meteorológicos como los huracanes, lluvias intensas e inundaciones han afectado el rendimiento y siniestrado las plantaciones en algunos años. Por lo cual ha habido una ligera variación. La tabla 2.12, detalla el historial de producción del plátano durante el 2007 al 2013.

Tabla 2.12: Producción nacional de plátano, 2007-2013 (Millones de toneladas).

Concepto	Datos anuales						
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Plátano	1 965	2 151	2 232	2 103	2 139	2 226	000

Fuente: [5]

Se observó (fig. 2.9) que los principales estado que cultivan el plátano, donde Chiapas lidera la superficie sembrada (24,426 hectáreas) y ha sido en los últimos años el Estado con el mayor volumen de producción, con 743,293 toneladas de plátano por

año. Así, el segundo Estado que más producción ha registrado es Tabasco con 541,986 toneladas que lo obtiene de una superficie sembrada de 10,506.05 hectáreas. La figura 2.10, muestra los principales estados de país productores de plátano, así como los volúmenes de producción.

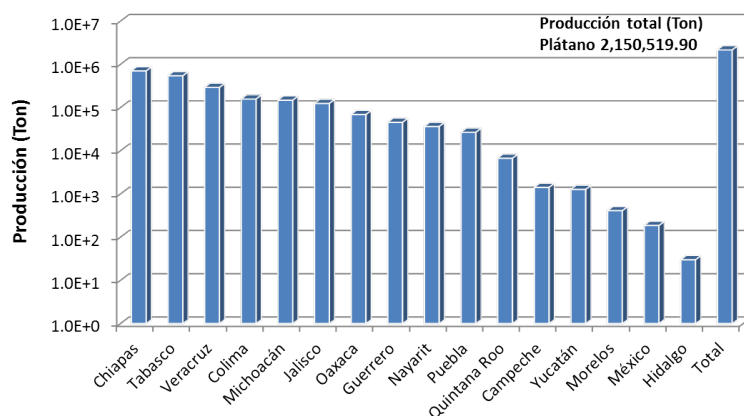


Figura 2.10: Estados con mayor producción de plátano (miles de Ton).

Fuente: [5]

## 2.3. Biocombustibles

El término biocombustible, es el combustible que se produce directa o indirectamente a partir de la biomasa, tales como la leña, el carbón vegetal, el bioetanol, el biodiésel, el biogás (metano) o el biohidrógeno. Sin embargo, comúnmente se hace referencia a los biocombustibles que suelen estar asociados con los biocombustibles líquidos (bioetanol, biodiésel y aceite vegetal ordinario) que se utilizan en el sector del transporte. Los biocombustibles pueden ser producidos a través de diversas materias primas renovables como el aceite vegetal (por ejemplo aceite de palma), el aceite no comestible (por ejemplo, la jatrofa) y la biomasa lignocelulósica (por ejemplo, madera y residuos agrícolas o forestales). La producción de biocombustibles no sólo pretende reducir la dependencia del petróleo, sino que



también reduce las incertidumbres causadas por las fluctuaciones en los precios del petróleo [83].

Los biocombustibles son reconocidos como una importante fuente de energía renovable y sostenible para reemplazar a los combustibles fósiles o mitigar los efectos negativos de estos. Esto se debe a que los biocombustibles se derivan de la biomasa, y durante el ciclo de producción y el consumo de estos reduce la emisión de dióxido de carbono [84]. Así mismo la liberación de gases contienen menos monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), hidrocarburos no quemados y partículas en suspensión comparado con los combustibles fósiles [85]. En los últimos años los biocombustibles han sido clasificados en cuatro tipos y se diferencian principalmente por tipo de materia prima y tecnología para su producción, son pues considerados como biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación [84].

- Biocombustibles de primera generación: provienen de fuentes de alimentos (maíz, trigo, cebada y caña de azúcar). La tecnología de conversión es simple y de bajo costo comparada con los biocombustibles de segunda generación [86].
- Biocombustibles de segunda generación: derivados de fuentes de biomasa, materias primas lignocelulósicas, son los residuos en su mayoría agrícolas, residuos de la explotación forestal, no compiten con los cultivos de alimentos. Sin embargo, los biocombustibles de segunda generación tienen bajas tasas de conversión y los procesos de conversión no son económicamente viables en este momento [87]. Para este caso el pretratamiento de la materia prima es la etapa de mayor costo, se necesita de tecnologías más desarrolladas para que sea rentable la conversión de la biomasa lignocelulósica a biocombustibles [88], [84], [89].
- Biocombustibles de tercera generación: son obtenidos a partir de algas, se puede cultivar en estanques, puede utilizar aguas residuales o agua de mar. El crecimiento de las microalgas puede acelerarse a través de la cuidadosa selección de especies adecuadas con el entorno y la condición correcta. Normalmente, las microalgas se cultivan en grandes estanques abiertos o fotobiorreactor (PBR) para producir

biomasa, y posteriormente, para su posterior procesamiento de biocombustibles [90][91]. .

- Cuarta generación: estos biocombustibles, también son obtenidos de algas y otros microorganismos. Se basan en la modificación genética e ingeniería metabólica de algas con alto rendimiento, alto contenido de lípidos y mayor habilidad en la captura de CO<sub>2</sub>, esta tecnología se encuentra en las primeras fases de investigación y desarrollo[86].

Por tal motivo los biocombustibles se han visto como fuentes potenciales para satisfacer la demanda futura de energía. Se ha establecido un rápido crecimiento global en los biocombustibles líquidos en los últimos años, donde los de primera generación han llegado a nivel comercial y ya establecido en EE.UU., Brasil y la Unión Europea. Sin embargo el impacto de estos biocarburantes en el sector del transporte es aún limitada debido a la competencia directa con los alimentos para el uso de cultivos y tierras agrícolas. Por lo cual se han realizado mayor investigación en la producción de biocombustibles viables de segunda hasta cuarta generación. [92],[93].

### **2.3.1. Conversión de azúcares a etanol mediante La fermentación alcohólica**

El proceso de obtención de bioetanol es un proceso complicado puesto que la transformación de los recursos biológicos cultivos ricos en energía como la caña de azúcar, maíz o la biomasa lignocelulósica que requieren de acondicionamientos o tratamientos previos para la fermentación de azúcares por los microorganismos y convertirlos en bioetanol[94]

La fermentación alcohólica o etílica, es un proceso anaerobio realizado por microorganismos (levaduras, hongos y bacterias), los cuales metabolizan y transforman los azúcares simples contenidos en el mosto, convirtiéndose en etanol, dióxido de carbono y energía principalmente.

#### **Hidrólisis de la lignocelulosa**

La producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica comprende las siguientes etapas principales: La hidrólisis de la

celulosa y la hemicelulosa, la fermentación de azúcar, la separación de los residuos de lignina y, por último, la recuperación y la purificación del etanol para cumplir con las especificaciones de los combustibles. La tarea de hidrolizar lignocelulosa a monosacáridos fermentables es todavía técnicamente problemática porque la digestibilidad de la celulosa se ve dificultada por muchos factores físico-químicos, estructurales y compositivos. Debido a estas características estructurales, el tratamiento previo de hidrólisis es un paso esencial para la obtención de azúcares fermentables. El objetivo del pretratamiento es la de romper la estructura de la lignina y romper la estructura cristalina de la celulosa para mejorar la accesibilidad de enzimas a la celulosa durante el paso de hidrólisis [95].

Un proceso de pretratamiento universal es difícil de visualizar debido a la diversidad de materias primas (biomasa). Sin embargo diferentes tecnologías de pretratamiento se han sugerido en las últimas décadas, de las cuales se pueden clasificar en los pretratamientos biológicos, físicos, químicos y fisicoquímicos, según las distintas fuerzas o la energía consumida en el proceso de pretratamiento. La combinación de estos métodos ha sido también estudiada. Por lo tanto los distintos pretratamientos que pueden emplearse para obtener monosacáridos fermentables están en función de la biomasa a tratar[88].

### **2.3.2. Bioetanol**

El bioetanol, puede ser producido por fermentación de azúcares presente en las fracciones de hidratos de carbono presentes en los materiales vegetales. El etanol producido a través de la fermentación de una variedad de cultivos que contienen azúcar, tales como caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha azucarera, y las frutas; así mismo como cultivos tales como maíz, trigo, patatas los cuales contienen almidón; y el llamado material lignocelulósico (hemicelulosas, celulosa, lignina; y otros como cenizas, extractivos) conocido como desechos agrícolas, de madera y residuos urbanos, comúnmente se refiere como bioetanol[96]. Se conoce que para la fermentación alcohólica, el microorganismo común, más usado en la historia es la levadura, especialmente, *Saccharomyces cerevisiae*, actualmente existen en variedades de cepas, aunque las especies bacterianas de *Zymomonas mobilis* es

también potencialmente utiliza hoy en día para este propósito. Sin embargo existen varios números de factores que influyen en gran medida la eficiencia en la fermentación, donde las condiciones de optimización es el punto clave para la producción de bioetanol[97].

Algunos de los residuos agroindustriales potencialmente utilizados en la producción de bioetanol fueron mencionados en las tablas 2.2, 2.3 y 2.4, respectivamente. Este producto derivado de la fermentación de los azúcares, debe ser sometido a un proceso que lo libere de agua, sólo entonces estará listo como biocombustible para ser mezclado con la gasolina común u utilizarlo en forma directa, que además de oxigenar a la gasolina permite aprovechar el alto nivel de octanaje que posee [98]

La producción de bioetanol a partir de azúcar y almidón es una tecnología bien establecida, que ha sido utilizado durante muchos años principalmente para la producción de bebidas alcohólicas, y en las últimas décadas como biocombustible. Actualmente, se conoce que el bioetanol para el mercado de combustible se produce a partir de caña de azúcar (Brasil) o almidón de maíz (EE.UU.) a precios más o menos competitivos.[99]. Por lo tanto, la producción de bioetanol a partir de una materia prima o cultivos energéticos, donde los carbohidratos fermentables están casi disponibles y no requieren de pretratamientos específicos para su liberación, comúnmente se le conoce como bioetanol de primera generación.

El bioetanol de segunda generación se produce a partir de materiales lignocelulósicos, es decir, hemicelulosa y celulosa disponibles en toda la biomasa. Para producir bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos es muy similar a la producción de bioetanol a partir de almidón. En primer lugar, los hidratos de carbono, celulosa y hemicelulosa, tienen que ser hidrolizados a azúcares monómeros y después llevar a cabo la fermentación por un microorganismo (por ejemplo, levadura) y producir bioetanol. Sin embargo, existen, dos diferencias importantes en comparación con el bioetanol obtenido del almidón:

- La estructura del material lignocelulósico es más difícil de romper debido a lazos más fuertes entre las moléculas de azúcar en la celulosa y la interacción entre la celulosa, hemicelulosa y lignina.

- Mientras el almidón y la celulosa están compuestos de totalmente de glucosa, la hemicelulosas comprenden una variedad de azúcares, en ambas se encuentran pentosas (es decir, azúcares con cinco carbonos) y hexosas (es decir, azúcares con seis carbonos), lo que hace que sea difícil encontrar un solo microorganismo que puede metabolizar todos estos azúcares durante la fermentación.

La figura 2.11, muestra el proceso de obtención de bioetanol a partir de la biomasa lignocelulósica.

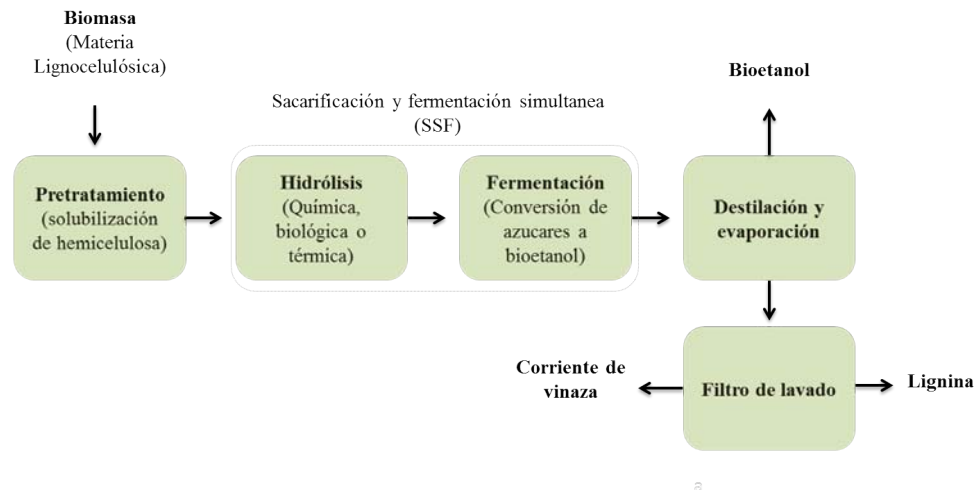


Figura 2.11: Proceso simplificado para la producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos

Estas etapas y procesos hacen que la producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos sea mucho más compleja y costosa que la producción de etanol a base de almidón o caña de azúcar. Un tercer factor que difiere es la presencia de lignina, el cual protege a los hidratos de carbono de la degradación enzimática y hace que la hidrólisis de estos, sea aún más difícil. Sin embargo, tener un subproducto como la lignina es también una posibilidad de mejorar la economía del proceso, ya que o bien se puede utilizar como un subproducto valioso para la industria química o utilizado para la producción de calor y electricidad, ya que tiene un valor calorífico superior a la biomasa original [100].

Uno de los principales impedimentos tecnológicos para la utilización de la biomasa vegetal es, en general, la ausencia de una tecnología de bajo costo dirigida a la recalcitrancia de la lignocelulosa. Sin embargo se han desarrollado diversos métodos que mejoran la hidrólisis de la lignocelulosa, como los pretratamientos fisicoquímicos y biológicos. Que ambas tienen la finalidad de un pretratamiento para remover la lignina, hidrolizar la hemicelulosa a azúcares fermentables, y reducir la cristalinidad de la celulosa para liberar la glucosa.

Entonces el bioetanol producido a partir de diferentes materias primas renovables constituye un combustible alternativo para motores de encendido por chispa. Es considerado biodegradable, por ser derivado de la biomasa. Es un biocombustible oxigenado y libre de azufre, es considerado que el carbono del bioetanol es de origen vegetal y, por lo tanto, cuando se libera durante el proceso de combustión, no contribuirá a aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub> [101],[102], [103].

### **Composición del material lignocelulósico**

La composición de materiales lignocelulósicos difiere de una especie a otra según su origen. Sin embargo, los principales componentes son del mismo tipo: alrededor de 50-60 % carbohidratos en forma de celulosa y hemicelulosa, 20-35 % de lignina, y algunos otros componentes valiosos como extractivos y cenizas[104]. La celulosa es un polímero de D-glucosa unida por enlaces glucosídicos  $\beta$ -1,4 que se estructuran en largas cadenas lineales (microfibrillas) unidas por puentes de hidrógeno y fuerzas de Van Der Waals intramoleculares, formando una estructura cristalina resistente a la hidrólisis y regiones amorfas susceptibles a la degradación enzimática [105]. Es también el componente principal en la pared celular de las células vegetales y es macromolécula más abundante en la tierra.

La hemicelulosa es un polímero complejo de heteropolisacáridos formado por pentosas (D-xilosa y L-arabinosa) y hexosas (D-glucosa, D-manosa y D-galactosa) que forman cadenas ramificadas y los ácidos 4-O-metilglucurónico, D-galacturónico y D-glucurónico, los azúcares están unidos por enlaces  $\beta$ -1,4 y ocasionalmente por enlaces  $\beta$ -1,3 [106]. El principal carbohi-

drato en la hemicelulosas, es la xilosa, que se encuentran en cultivos agrícolas y maderas duras, mientras la manosa está dominando en madera blanda.

La lignina es el principal componente no carbohidratos en materiales lignocelulósicos, es un heteropolímero amorfo, tridimensional y ramificado formado por alcoholes aromáticos que da soporte estructural, rigidez, impermeabilidad y protección a los polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa) y es altamente resistente a la degradación química y biológica [107].

Los extractivos que son los componentes orgánicos de bajo peso molecular. Se incluyen dentro de este grupo: carbohidratos de bajo peso molecular, terpenos, ácidos alifáticos y aromáticos, alcoholes, flavonoides, alcaloides, ligninas solubles, ceras, etc. Las cenizas por otro lado, son la fracción inorgánica del material está principalmente formada por sales inorgánicas de calcio, potasio, sodio, magnesio y sílice [108].

### 2.3.3. Sistemas de fermentación

Las fermentaciones alcohólicas se llevan a cabo en recipientes especiales comúnmente llamados tanque de fermentación o bioreactores. En estos fermentadores el sustrato es convertido a un compuesto o metabolito con la ayuda de un microorganismo mediante un proceso anaerobio.

Se conocen tipos de fermentaciones conocidas como *descontinua* o *batch*, *semicontinua* o *fed – batch* y *continuo*.

Una fermentación *discontinua (batch)*, puede ser considerada como un "sistema cerrado". Al inicio de la operación se añade la solución esterilizada de nutrientes y se inocula con el microorganismo, sin que esta sea alterada por nutrientes adicional o lavada. Mientras que a lo largo de toda la fermentación no se añade nada, excepto:

- oxígeno (en forma de aire)
- un agente antiespumante
- un ácido o una base para controlar el pH.

La composición del medio de cultivo, la concentración de la biomasa y la concentración de los metabolitos cambia generalmente como resultado del metabolismo de las células, observándose las cuatro fases típicas de crecimiento:

- fase de latencia
- fase logarítmica
- fase estacionaria
- fase de muerte

En los procesos se emplean extensamente tanto en el laboratorio como a escala industrial. En este proceso la fermentación frecuentemente se interrumpe al final de la fase logarítmica o antes de que comience la fase de muerte.

La fermentación *semicontinua* (*fed – batch*). Aquí los sustratos se añaden escalonadamente a medida que progresa la fermentación. La formación de muchos metabolitos secundarios disminuye debido a la cantidad de glucosa que está en el medio (efecto glucosa), por esta razón en este tipo de fermentación los elementos críticos de la solución de nutrientes se añaden en pequeñas concentraciones al principio del proceso y continúan añadiéndose en pequeñas dosis durante la fase de producción. Este tipo de fermentación se utiliza en la producción de sustancias como la penicilina.

Para el caso de la fermentación *continua* se establece un sistema abierto. La solución nutritiva estéril se añade continuamente al tanque de fermentación (biorreactor) y una cantidad equivalente es retirada como productos continuamente junto con los microorganismos, son retirados simultáneamente del sistema[109].

## 2.4. Secado solar

El secado se puede definir como el proceso de eliminar la humedad de un producto con respecto al tiempo, y puede ser realizado en dos etapas.

En la primera etapa, la humedad en el interior del producto se lleva a la superficie, y el vapor de agua se elimina mediante



un flujo constante de aire seco. La segunda etapa implica una velocidad de secado lenta y en esta etapa el proceso de secado está relacionado con las propiedades del material a secar [110]. El secado, un proceso básico en la preservación de los cultivos y algunos alimentos, se puede realizar utilizando la radiación solar como la fuente principal de energía. La cantidad de energía requerida para secar un producto depende de las características de los materiales a secar, así como la tecnología empleada para el tratamiento [111].

Existen dos métodos para eliminar la humedad: la evaporación y la vaporización.

La evaporación podría ser definido como, cuando la presión de vapor de la humedad en la superficie sólida es igual a la presión atmosférica. Esto se hace mediante el aumento de la temperatura en la humedad hasta el punto de ebullición y se forma en una fase gas insaturado. Se han reportado experimentos con la evaporación de agua caliente en un recipiente. El cual calienta el agua a una temperatura determinada y luego se deja enfriar; el enfriamiento causa un gradiente de temperatura inestable [112]. En los sistemas naturales, tales como lagos y océanos, la evaporación del agua puede ocurrir debido a la absorción de la radiación del sol. El componente IR de la radiación es absorbida dentro de una capa delgada en la parte superior. En estas situaciones también puede que no haya ninguna convección en el agua.

En la vaporización, el secado se lleva a cabo por convección, es decir, haciendo pasar aire caliente sobre el producto. En este caso, la presión de vapor saturado de la humedad en el sólido es menor que la presión atmosférica. Los factores que afectan la velocidad de secado incluyen la temperatura del aire, velocidad del aire, tipo de producto, espesor del producto, el contenido de humedad del producto, método de secado, la temperatura, la humedad difusividad y la estructura del sistema de secado. La tasa de la temperatura del aire de secado y el flujo es importante en aplicaciones de secado de acuerdo a un reporte por [113], [114].

### 2.4.1. Proceso de convección natural

Un fluido que se mueve de un punto a otro, además de transporte de momentum y masa, también lleva energía. Convección de calor depende en gran medida de las características del mecanismo de flujo, es decir, la distribución de velocidades y el régimen de flujo (laminar o turbulento). La ecuación 2.1 corresponde a la ley de Fourier para calcular el flujo de calor [115],

$$q = -k_f \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) y = 0 \quad (2.1)$$

Donde  $k_f$ , es la conductividad térmica del fluido.

La transferencia de calor por convección depende de la densidad, la viscosidad, la velocidad del fluido, la conductividad térmica y el calor específico del fluido [115].

### 2.4.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad de un alimento se expresa generalmente como porcentaje de humedad. Matemáticamente, esto es la relación de la masa de agua contenida en la muestra de alimento (adsorbente) y la masa total de muestra de alimento que contiene humedad (adsorbato), expresada como un porcentaje[116]. Sin embargo, el contenido de humedad se utiliza como la variable que representa el eje vertical de las isoterms de adsorción de vapor y es a menudo expresado como la relación de la masa de agua (adsorbato) dividido por la masa de materia seca (adsorbente). Estos dos métodos diferentes para determinar el contenido de humedad en una muestra de alimento se conocen como "base húmeda"(b.h.) y "base seca"(b.s.), respectivamente [117].

#### Base seca

La ecuación 2.2 se utilizó para determinar la concentración de humedad en base seca. Esta relación de masa de agua y materia seca fue usada para calcular el porcentaje de humedad presente en la muestra.

También se puede utilizar la ecuación 2.3 para calcular el contenido de humedad en base seca. Esta ecuación incluye la relación

de la masa de agua dividida entre la diferencia de la masa total del producto y la masa de agua. La ecuación 2.4 se utiliza para el mismo propósito pero toma como punto de partida el contenido de humedad en base húmeda.

$$X_{w,b.s.} = \frac{m_{agua}}{m_{materia\ seca}} \quad (2.2)$$

$$X_{w,b.s.} = \frac{m_{agua}}{m_{materia\ seca} - m_{agua}} \quad (2.3)$$

$$X_{w,b.s.} = \frac{1}{\frac{1}{X_{w,b.h.}} - 1} \quad (2.4)$$

La cantidad  $X_{w,b.s.}$ , es el contenido de humedad en base seca, y las unidades correspondientes se representan como g H<sub>2</sub>O/g de materia seca.

### Base húmeda

Por otro lado la ecuación 2.5 determina el contenido de humedad del producto en una base húmeda, para este caso se mantiene una relación entre la masa de agua y la masa total del producto. Así mismo, con las ecuaciones 2.6 y 2.7, se obtienen resultados similares, tomando en cuenta las condiciones iniciales de la masa de agua y la masa total del producto. Así, se puede obtener el contenido de humedad en base húmeda, respectivamente. Tal y como se observa en las ecuaciones mencionadas.

$$X_{w,b.h.} = \frac{m_{agua}}{m_{masa\ total}} \quad (2.5)$$

$$X_{w,b.h.} = \frac{m_{agua}}{m_{materia\ seca} + m_{agua}} \quad (2.6)$$

$$X_{w,b.h.} = \frac{1}{\frac{1}{X_{w,b.s.}} + 1} \quad (2.7)$$

En estas ecuaciones  $X_{w,b.h.}$ , es el contenido de humedad en base húmeda, y las unidades correspondientes se representan como g H<sub>2</sub>O/ g de materia húmeda.

### 2.4.3. Cinética de secado

La cinética de secado se basa en el cambio de la cantidad de humedad promedio con el tiempo. La cinética de secado muestra la cantidad de humedad evaporada, el tiempo y el consumo de energía. Sin embargo, el cambio de la humedad depende de la transferencia de calor y masa entre la superficie del cuerpo, el medio ambiente y el interior del material a secar. El secado solar es un proceso generalmente descrito por tres esquemas: la curva de secado, la curva de velocidad de secado y la curva de la temperatura.

Estas curvas son obtenidas bajo condiciones de laboratorio donde se mide el cambio de masa y temperatura con el tiempo a base de muestreo. El proceso de secado es obtenido con estado estable teniendo  $T_g$ ,  $U_g$  y  $Y$  como constantes. Usando aire caliente como agente de secado. La letra  $Y$  es el contenido de humedad absoluta de masa en el aire. Esto quiere decir el peso de masa de vapor de agua por peso de masa de aire seco como lo describe la ecuación 2.8.

$$Y = \frac{m_A}{m_B} = \frac{\text{Kg de vapor de agua}}{\text{Kg de aire seco}} \quad (2.8)$$

#### Curva de secado

Este tipo de curva muestra el contenido de humedad a través del tiempo en el proceso de secado como lo ilustra la figura 2.12. En el periodo inicial de secado, el cambio de humedad en el material está ilustrado en la curva A-B. Al terminar este primer periodo el secado toma una forma lineal del tipo  $X = f(t)$ , en este periodo la velocidad de secado es una recta constante (B-C). El secado se mantiene igual por un periodo de tiempo hasta que llega a un punto crítico (punto C) donde la línea recta tiende a curvarse y a formar una asíntota con el contenido de humedad  $X_{eq}$  donde es el valor mínimo de humedad en el proceso de secado, esto quiere decir que el punto (E) jamás es tocado. La recta (B-C) es llamado el periodo de velocidad de secado constante, y al siguiente periodo de secado se conoce como el periodo de caída de velocidad del secado.

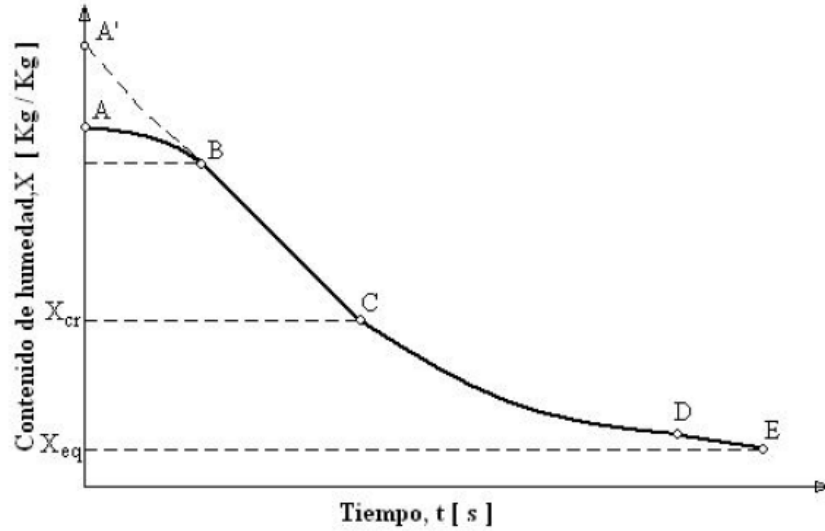


Figura 2.12: Curva de secado

### Curva de velocidade de secado

Este tipo de curva indica com que velocidade se seca o material como lo describe la figura 2.13. Este diagrama es muy útil para diferentes propósitos. Este diagrama tiene la función,  $W_D = f(X)$ , donde muestra la cantidad de humedad removida desde el material secado por unidad de tiempo por unidad de superficie secada.

Entonces la velocidad de secado se define como la cantidad de agua que se elimina por unidad de tiempo, y es quien indica la rapidez con la que se seca el producto. Este proceso se describe por las ecuaciones 2.9 y 2.10.

$$W_D = -\frac{m dx}{A dt} \quad (2.9)$$

o como:

$$N = \frac{dx}{dt} \quad (2.10)$$

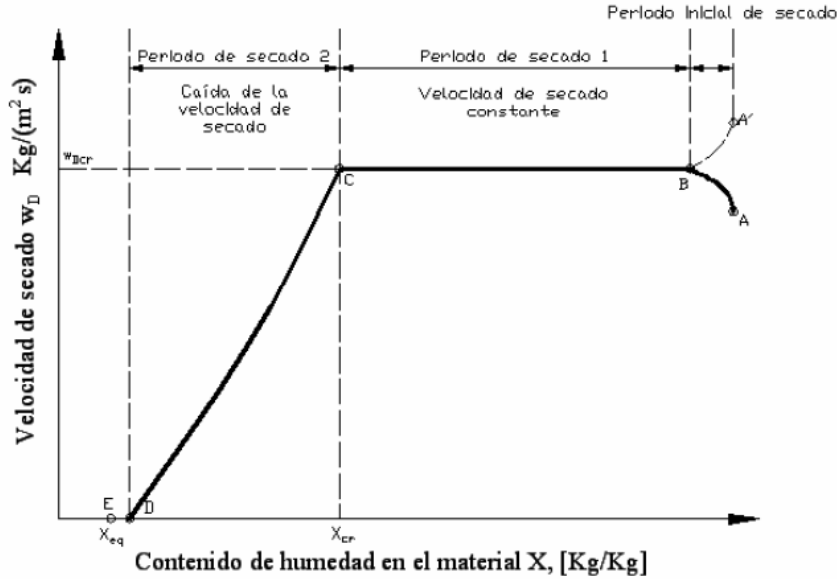


Figura 2.13: Curva de velocidad de secado

En esta gráfica también pueden verse los periodos de velocidad constante y caída en la velocidad de secado. La explicación de la forma de la curva de secado está conectada con el fenómeno de transferencia de masa y calor. Antes del secado la superficie del material está cubierta con una capa delgada de líquido la cual puede ser tratada como humedad desatada, libre o capilar. La evaporación empieza con el contacto con el aire. Considerando la resistencia de la transferencia de masa, tenemos las condiciones externas y la capa circulante de gas; limitando la velocidad de secado. Así la velocidad de evaporación puede expresarse como el coeficiente de transferencia de masa y un gradiente de humedad del aire como se expresa en la ecuación 2.11.

$$w_D = K_g(Y_s - Y) \quad (2.11)$$

Donde  $Y_s$  y  $Y$  son la humedad del ambiente circulante. El coeficiente de transferencia de masa  $K_g$  para una velocidad de gas constante en relación con el material, permanecerá constante. La humedad  $Y_s$  corresponde a las condiciones de saturación en la temperatura de la capa de líquido ( $T_s$ ). Como la evaporación

de la humedad requiere de la misma cantidad de calor latente de evaporación, la superficie del líquido después de algún tiempo alcanzará una temperatura de equilibrio (Periodo inicial de secado), así la cantidad de calor proveída hacía la superficie desde el aire circulante será igual al calor necesario para el cambio de fase. La humedad  $Y_s$  permanece constante. Como resultado de los parámetros constantes del proceso, la humedad del aire  $Y$  no cambia.

La velocidad de evaporación entre los puntos B y C será constante e igual a  $W_{Dcr}$ . Este valor es igual a la velocidad de evaporación en una superficie libre. Sin embargo se ha demostrado que  $W_{Dcr}$  depende del tipo de material secado y usualmente es menor que el 30 % de los valores obtenidos en el proceso de la evaporación de líquidos en una superficie libre.

Como es conocido en el periodo inicial de secado, el cuerpo a secar y su superficie están cubiertas con una capa de líquido, teniendo una temperatura menos a la temperatura de equilibrio  $T_s$  y como resultado, la velocidad de secado en el rango entre los puntos A y B se incrementa hasta que la temperatura de la superficie alcanza el valor correspondiente a la línea B - C. Es más raro cuando el secador es alimentado con material húmedo a una temperatura  $T > T_s$ . Entonces el periodo inicial de secado está representado por la línea punteada  $\dot{A}$ - B. Usualmente el periodo de secado inicial es muy corto y en la práctica puede ser despreciado. Cuando  $X < X_{cr}$  la cantidad de humedad que alcanza la superficie del cuerpo a secar empieza a caer gradualmente. Como resultado, la presión de vapor arriba de la superficie del material también empieza a decrecer de acuerdo a la ecuación 2.11 la velocidad de secado decrece. Entonces nosotros encontramos el periodo de caída de la velocidad de secado (curva C-D) en este periodo la velocidad de secado es controlado por el transporte de la humedad del material (condiciones internas) la cuales dependen del gradiente de la concentración de humedad.

### **Curva de temperatura**

La curva de temperatura del producto se obtiene mediante el trazado de los datos de temperatura de secado del producto

contra el contenido de humedad en el tiempo.

### Tiempo de secado

El tiempo de secado depende del material a secar; esto define las características de la curva de secado. El tiempo de secado debe determinarse por separado para el primer y segundo período de secado.

La ecuación 2.9, que define la velocidad de secado, se puede reorganizar para obtener el tiempo de secado, a partir de la ecuación 2.12.

$$\int_0^t dt = -\frac{m_s}{A} \int_{X_i}^{X_f} \frac{dX}{W_D} \quad (2.12)$$

La cantidad de agua eliminada del producto puede ser calculada usando la ecuación 2.13 de la siguiente manera [118], [119].

$$W_r = \frac{X_i - X_f}{1 - X_i} \quad (2.13)$$

$X_i$  y  $X_f$  de las ecuaciones anteriores, son el contenido de humedad inicial y final del producto en base húmeda desde el tiempo cero hasta el tiempo  $t$ , respectivamente.

Por otro lado, la energía útil necesaria para secar una cierta cantidad (en peso seco) de un producto se puede obtener usando la ecuación 2.14.

$$UE = \left(\frac{1 - X_f}{1 - X_i}\right)s(T_d - T_a) + \left(\frac{X_i - X_f}{1 - X_i}\right)h_{fg} \quad (2.14)$$

En la ecuación 2.14 el primer término representa la energía útil necesaria para el calentamiento sensible del producto desde la temperatura ambiente ( $T_a$ ) a la temperatura de secado ( $T_d$ ). El segundo término representa la energía útil requerido para la evaporación de la humedad del producto,  $h_{fg}$  representa la entalpía de evaporación de agua a la temperatura de secado y  $s$  es el calor específico producto húmedo. Puede estimarse utilizando la fórmula de Siebel's obtenida de ASHARE handbook and product dictionary application [118].



#### **2.4.4. Secado solar de alimentos**

Después de cosechar productos agrícolas, tales como mangos, el producto tiende generalmente que ser pre tratado para el mercado. Durante el tratamiento previo, se puede utilizar diversos tratamientos químicos para retener la madurez y evitar su deterioro durante el proceso de exportación. Dada la considerable cantidad de la cosecha, no es posible mantener las condiciones óptimas para la exportación de productos como o marcan las normas de calidad. El aumento de la temperatura y la humedad, así como el agua en estos productos, facilita la descomposición.

Productos deshidratados se pueden almacenar por un tiempo mayor al ser producto sin tratamiento para su conservación y de esta manera permiten ser aprovechadas para el procesamiento después de la cosecha. Por lo tanto, el secado solar ha sido considerado como el proceso de preservación más eficaz para la mayoría de los cultivos tropicales [120]. La extracción de la humedad necesaria para mantener la fruta es un proceso que se puede utilizar para proporcionar hidratos de carbono, que pueden ser utilizados para otros fines. Un ejemplo es la conversión de los azúcares, por la vía bioquímica de la fermentación alcohólica a etanol [121].

---

## Capítulo 3

### Secado de mango (*Mangifera indica L.*) mediante la energía solar como pretratamiento para la producción de bioetanol

---

#### 3.1. Abstract

The drying kinetics of mango were examined as a first step of pretreatment for biofuels production. This method exploits the potential of the carbohydrate present in the raw material, where the concentration for fermentation was adjusted to 20 g/L of reducing sugars. Dehydration was carried out by natural convection using a solar dryer. The solar dryer employed was made of transparent acrylic, and it had an internal volume of 0.125 m<sup>3</sup>. The dehydration achieved 95.6% moisture removal in 28 h and reached maximum temperatures of 52 °C and 56 °C, corresponding to first and second phases, respectively. The minimum temperature reached was 21 °C. The rate of drying was evaluated during the first stage, between 0 to 4 hours, with radiation maxima of 991 and 1014 W/m<sup>2</sup> for that day. At the peak of radiation the drying rate was 0.060 g H<sub>2</sub>O/ g dry mass/ min.

Keywords: Mango; Solar dehydration; Dry basis; Wet basis; Natural convection

#### 3.2. Resumen

En esta investigación se estudió la cinética del secado del mango como primer etapa del pretratamiento para la produc-

ción de biocombustible. Con esta metodología que tiene como objetivo explotar el potencial de los carbohidratos presentes en la materia prima. Principalmente carbohidratos que constituyen los azúcares simples, donde se ajustaron a la concentración de 20 g/L de azúcares reductores para el desarrollo de la fermentación alcohólica. La deshidratación fue realizada mediante el uso de secadores solares mediante la convección natural del aire. Los secadores solares que están contruidos de acrílico transparente de 0.3 mm de espesor, un volumen interno de 0.125 m<sup>3</sup> fueron orientados al sur. Mediante la deshidratación solar fue removido el 95.6 % de humedad del producto en 28 horas, con una temperatura máxima de 52 °C y 56 °C correspondientes a la primera y segunda etapa respectivamente. Así mismo la temperatura mínima registrada durante el periodo sin radiación fue de 21 °C. Por lo tanto se obtuvo la velocidad máxima de secado durante la primera etapa correspondiente a las primeras 4 horas y fue de 0.60 g H<sub>2</sub>O/ g materia seca/ min. Los valores de radiación máximas registradas para cada etapa fueron de 991 y 1014 W/m<sup>2</sup> como se muestran en los gráficos obtenidos durante el desarrollo de esta investigación.

Palabras clave: Mango (*Mangifera indica L.*); Deshidratación solar; Base seca; Convección natural.

### **3.3. Introducción**

#### **3.3.1. Mango (*Mangifera indica L.*)**

El mango (*Mangifera indica L.*) es una de las frutas tropicales más populares y abundantes en el sureste de Asia, específicamente en la región del Indo-Birmanica. Se ha reportado que el mango se ha cultivado en la India durante más de 54 siglos y se cultiva actualmente en 85 países [12], [13]. La producción total mundial en 2010 fue de 26,147, 900.00 toneladas. Los países de Asia y de Oriente producen alrededor del 80 % de la producción total mundial. Los principales países productores de mango son India, China, México y Pakistán. La superficie plantada de mango en México en 2012 fue de 186.964 hectáreas, con una producción de 1,6 millones de toneladas por año con un rendimiento prome-

dio de 9 toneladas por hectárea [5]. El mango contiene una alta concentración de azúcar (16 a 18 % p/v). La sacarosa, glucosa, y fructosa son los principales azúcares encontrados en el mango maduro, con pequeñas cantidades de celulosa, hemicelulosa y pectina [12].

### **3.3.2. Secado solar**

El secado se puede definir como el proceso de eliminar la humedad de un producto con respecto al tiempo, y puede ser realizado en dos etapas.

En la primera etapa, la humedad en el interior del producto se lleva a la superficie, y el vapor de agua se elimina mediante un flujo constante de aire seco. La segunda etapa implica una velocidad de secado lenta y en esta etapa el proceso de secado está relacionado con las propiedades del material a secar [110]. El secado, un proceso básico en la preservación de los cultivos y algunos alimentos, se puede realizar utilizando la radiación solar como la fuente principal de energía. La cantidad de energía requerida para secar un producto depende de las características de los materiales a secar, así como la tecnología empleada para el tratamiento [111].

Existen dos métodos para eliminar la humedad: la evaporación y la vaporización.

La evaporación podría ser definido como, cuando la presión de vapor de la humedad en la superficie sólida es igual a la presión atmosférica. Esto se hace mediante el aumento de la temperatura en la humedad hasta el punto de ebullición y se forma en una fase gas insaturado. Se han reportado experimentos con la evaporación de agua caliente en un recipiente. El cual calienta el agua a una temperatura determinada y luego se deja enfriar; el enfriamiento causa un gradiente de temperatura inestable [112]. En los sistemas naturales, tales como lagos y océanos, la evaporación del agua puede ocurrir debido a la absorción de la radiación del sol. El componente IR de la radiación es absorbida dentro de una capa delgada en la parte superior. En estas situaciones también puede que no haya ninguna convección en el agua.

En la vaporización, el secado se lleva a cabo por convección, es decir, haciendo pasar aire caliente sobre el producto. En este

caso, la presión de vapor saturado de la humedad en el sólido es menor que la presión atmosférica. Los factores que afectan la velocidad de secado incluyen la temperatura del aire, velocidad del aire, tipo de producto, espesor del producto, el contenido de humedad del producto, método de secado, la temperatura, la humedad difusividad y la estructura del sistema de secado. La tasa de la temperatura del aire de secado y el flujo es importante en aplicaciones de secado de acuerdo con los reportes de la literatura [113], [114].

Después de cosechar productos agrícolas, tales como mangos, el producto tiende generalmente que ser pre tratado para el mercado. Durante el tratamiento previo, se puede utilizar diversos tratamientos químicos para retener la madurez y evitar su deterioro durante el proceso de exportación. Dada la considerable cantidad de la cosecha, no es posible mantener las condiciones óptimas para la exportación de productos como o marcan las normas de calidad. El aumento de la temperatura y la humedad, así como el agua en estos productos, facilita la descomposición. Productos deshidratados se pueden almacenar por un tiempo mayor al ser producto sin tratamiento para su conservación y de esta manera permiten ser aprovechadas para el procesamiento después de la cosecha. Por lo tanto, el secado solar ha sido considerado como el proceso de preservación más eficaz para la mayoría de los cultivos tropicales [120]. La extracción de la humedad necesaria para mantener la fruta es un proceso que se puede utilizar para proporcionar hidratos de carbono, que pueden ser utilizados para otros fines. Un ejemplo es la conversión de los azúcares, por la vía bioquímica de la fermentación alcohólica a etanol [121].

La biomasa es una fuente de energía renovable, que en las últimas décadas ha estudiadas por el interés en producción de biocombustibles. El uso de la biomasa como fuente de energía no sólo es muy competitivo en precio y calidad ambiental principalmente con respecto a los combustibles fósiles. Si no también al ser utilizando para biocombustibles puede reducir drásticamente las emisiones de  $\text{CO}_2$ , principal componente de los gases de efecto invernadero. Por tal motivo el mango es una materia prima potencial para la producción de bioetanol, debido a que, es un fruto alto rendimiento durante su cultivo. El objetivo de esta

investigación fue tratar previamente la materia prima para conservar los carbohidratos presentes, y posteriormente almacenar la materia prima para su procesamiento en etapas siguientes. Ya que son la principal fuente de carbono de los microorganismos durante su metabolización en la fermentación alcohólica.

## 3.4. Experimental

### 3.4.1. Materiales y métodos

#### Materia prima

El mango ataulfo (*Mangifera indica L.*) fue seleccionado como materia prima, el cual fue obtenido de los desechos del mercado en la ciudad de Temixco Morelos, México. Para la preparación de las muestras a deshidratar, los mangos fueron cortados con un rebanador Kitchen Aid marca Brand (USA), de espesor 3/16 in (0.47 cm). Esta materia prima fue deshidratada haciendo uso de secadores solares y posteriormente las muestras fueron molidas con una licuadora tipo industrial.

#### Análisis de azúcares

Para determinar y cuantificar los azúcares reductores fue usada la técnica de Miller utilizando reactivo DNS (ácido 3,5-dinitrosalicílico). Para la curva de calibración se utilizó fructosa como solución patrón (estándar) a una concentración de 1 g/L. Fue utilizado un espectrofotómetro Spectronic 20 Genesys (USA), el cual se ajustó a una longitud de onda de 540 nm [122].

#### Secado solar

Para la deshidratación del mango fueron empleados equipos de medición del laboratorio de secado y los secadores solares, los cuales fueron diseñados y construidos en el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), ubicado en la ciudad de Temixco Morelos, México. Durante el proceso experimental los secadores fueron colocados en serie y orientados al sur con una inclinación de 18° 50.36' latitud norte con el objetivo de captar la mayor

cantidad de radiación durante el día. Cada secador tiene un área de  $0.48 \text{ m}^2$ . El material de construcción de estos equipos es de acrílico transparente de espesor 3 mm.

Los valores de radiación solar durante el tiempo de secado se obtuvieron a través de la base de datos del Instituto. Quien recaba información continua de meteorológica y datos solarimétricos. La ubicación geográfica es:  $18^{\circ} 50,36'$  latitud norte,  $99^{\circ}14.07'$  longitud oeste.

Las características particulares de estos dispositivos incluyen el material de construcción de acrílico transparente, un volumen interno de  $0.125 \text{ m}^3$  y cuentan con un Sistema de extracción del aire húmedo con capacidad de  $2 \pm 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ . Los secadores utilizados durante el proceso de deshidratación del mango se muestran en la figura 3.1. Estos secadores quedaron orientados al sur e inclinados de acuerdo con la latitud del lugar.



Figura 3.1: Secadores solares deshidratando Mango

La remoción de humedad se realizó a través del proceso natural de convección de aire. En consecuencia, el espesor de la oblea del rebanado del mango afectó a la aceleración o el retraso del proceso de secado. Un espesor más pequeño disminuyó el tiempo de secado.

### Proceso de convección natural

Un fluido que se mueve de un punto a otro, además de transporte de momentum y masa, también lleva energía. Convección de calor depende en gran medida de las características del mecanismo de flujo, es decir, la distribución de velocidades y el régimen de flujo (laminar o turbulento). La ecuación 3.1 corresponde a la ley de Fourier para calcular el flujo de calor [115],

$$q = -k_f \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) y = 0 \quad (3.1)$$

Donde  $k_f$ , es la conductividad térmica del fluido. La transferencia de calor por convección depende de la densidad, la viscosidad, la velocidad del fluido, la conductividad térmica y el calor específico del fluido [115].

### Cinética de secado

La cinética de secado se basa en el cambio de la cantidad de humedad promedio con el tiempo. La cinética de secado muestra la cantidad de humedad evaporada, el tiempo y el consumo de energía. Sin embargo, el cambio de la humedad depende de la transferencia de calor y masa entre la superficie del cuerpo, el medio ambiente y el interior del material a secar. El secado solar es un proceso generalmente descrito por tres esquemas: la curva de secado, la curva de velocidad de secado y la curva de la temperatura.

### Contenido de humedad

El contenido de humedad de un alimento se expresa generalmente como porcentaje de humedad. Matemáticamente, esto es la relación de la masa de agua contenida en la muestra de alimento (adsorbente) y la masa total de muestra de alimento que contiene humedad (adsorbato), expresada como un porcentaje [116]. Sin embargo, el contenido de humedad se utiliza como la variable que representa el eje vertical de las isothermas de adsorción de vapor y es a menudo expresado como la relación de la masa de agua (adsorbato) dividido por la masa de materia seca (adsorbente). Estos dos métodos diferentes para determinar el



contenido de humedad en una muestra de alimento se conocen como "base húmeda"(b.h.) y "base seca"(b.s.), respectivamente [117].

### Base seca

La ecuación 3.2 se utilizó para determinar la concentración de humedad en base seca. Esta relación de masa de agua y materia seca fue usada para calcular el porcentaje de humedad presente en la muestra.

También se puede utilizar la ecuación 3.3 para calcular el contenido de humedad en base seca. Esta ecuación incluye la relación de la masa de agua dividida entre la diferencia de la masa total del producto y la masa de agua. La ecuación 3.4 se utiliza para el mismo propósito pero toma como punto de partida el contenido de humedad en base húmeda.

$$X_{w,b.s.} = \frac{m_{agua}}{m_{materia\ seca}} \quad (3.2)$$

$$X_{w,b.s.} = \frac{m_{agua}}{m_{materia\ seca} - m_{agua}} \quad (3.3)$$

$$X_{w,b.s.} = \frac{1}{\frac{1}{X_{w,b.h.}} - 1} \quad (3.4)$$

La cantidad  $X_{W,b.s.}$ , es el contenido de humedad en base seca, y las unidades correspondientes se representan como g H<sub>2</sub>O/g de materia seca.

### Base húmeda

Por otro lado la ecuación 3.5 determina el contenido de humedad del producto en una base húmeda, para este caso se mantiene una relación entre la masa de agua y la masa total del producto. Así mismo, con las ecuaciones 3.6 y 3.7, se obtienen resultados similares, tomando en cuenta las condiciones iniciales de la masa de agua y la masa total del producto. Así, se puede obtener el contenido de humedad en base húmeda, respectivamente. Tal y como se observa en las ecuaciones mencionadas.

$$X_{w,b.h.} = \frac{m_{agua}}{m_{masa\ total}} \quad (3.5)$$

$$X_{w,b.h.} = \frac{m_{agua}}{m_{materia\ seca} + m_{agua}} \quad (3.6)$$

$$X_{w,b.h.} = \frac{1}{\frac{1}{X_{w,b.s.}} + 1} \quad (3.7)$$

En estas ecuaciones  $X_{W,b.h.}$ , es el contenido de humedad en base húmeda, y las unidades correspondientes se representan como g H<sub>2</sub>O/ g de materia húmeda.

### **Cálculo del porcentaje de contenido de agua y humedad inicial**

Para conocer el contenido inicial de humedad en las muestras del mango, se utilizó una termo balanza (MB4S moisture measurement, OHAUS, Spain) en las condiciones establecidas por la norma NMX-F-083-1986 (temperatura/tiempo: 105 °C / A30). Así como también, se llevó a cabo la medición de la evaporación en la humedad por medio de la diferencia de peso de una muestra conocida, utilizando una balanza analítica modelo OHAUS ScoutPro Brand.

### **Velocidad de secado**

La velocidad de secado es la cantidad de agua que se elimina por unidad de tiempo, y es quien indica la rapidez con la que se seca el producto. Este proceso se describe por las ecuaciones 3.8 y 3.9.

$$\int dt = -\frac{m_s}{A} \int \frac{dx}{W_D} \quad (3.8)$$

$$W_D = -\frac{m dx}{A dt} \quad (3.9)$$

### Curva de temperatura

La curva de temperatura del producto se obtiene mediante el trazado de los datos de temperatura de secado del producto contra el contenido de humedad en el tiempo.

### Tiempo de secado

El tiempo de secado depende del material a secar; esto define las características de la curva de secado. El tiempo de secado debe determinarse por separado para el primer y segundo período de secado.

La ecuación 3.9, que define la velocidad de secado, se puede reorganizar para obtener el tiempo de secado, como se observa en la ecuación 3.10.

$$\int_0^t dt = -\frac{m_s}{A} \int_{X_i}^{X_f} \frac{dX}{W_D} \quad (3.10)$$

La cantidad de agua eliminada del producto puede ser calculada usando la ecuación 3.11 de la siguiente manera [118],[119]:

$$W_r = \frac{X_i - X_f}{1 - X_i} \quad (3.11)$$

Aquí  $X_i$  y  $X_f$  son el contenido de humedad inicial y final del producto en base húmeda desde tiempo cero hasta el tiempo  $t$ , respectivamente.

La energía útil necesaria para secar una cierta cantidad (en peso seco) de un producto se puede obtener usando la ecuación 3.12.

$$UE = \left(\frac{1 - X_f}{1 - X_i}\right)s(T_d - T_a) + \left(\frac{X_i - X_f}{1 - X_i}\right)h_{fg} \quad (3.12)$$

En la ecuación 3.12 el primer término representa la energía útil necesaria para el calentamiento sensible del producto desde la temperatura ambiente ( $T_a$ ) a la temperatura de secado ( $T_d$ ). El segundo término representa la energía útil requerido para la evaporación de la humedad del producto,  $h_{fg}$  representa la entalpía de evaporación de agua a la temperatura de secado y  $s$  es el calor específico producto húmedo. Puede estimarse utilizando la fórmula de Siebel's obtenida de ASHARE handbook and product dictionary application [118].

### 3.5. Resultados y discusiones

La temperatura promedio durante el proceso de secado fue 45 °C, mientras tanto las temperaturas máximas que se obtuvieron fueron de 52 °C y 56 °C, correspondiente a la primera y segunda etapa, respectivamente. Por lo tanto, los picos de radiación para estas temperaturas alcanzaron 991 y 1014 W/m<sup>2</sup> cada etapa. Este estudio mostró que la velocidad de secado depende de la concentración de la radiación captada por el área del colector o secador. Los resultados obtenidos durante el seguimiento de secado de mango se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Datos de secado de mango.

Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Radiación solar- G W/m <sup>2</sup>	Peso promedio de Las muestras (g)	g H <sub>2</sub> O promedio en Las muestras	Humedad b.s. (g H <sub>2</sub> O/ g m.s.)	dX/dT (g H <sub>2</sub> O/ g m.s min. )
10:45	35	874	16.1	12.866	3.978	0.010
11:00	37	895	15.6	12.366	3.823	0.010
11:15	39	931	15.1	11.866	3.668	0.019
11:30	42	941	14.2	10.966	3.390	0.008
11:45	44	960	13.8	10.566	3.267	0.010
12:45	50	991	11.8	8.566	2.648	0.060
13:45	52	1014	8.9	5.666	1.752	0.005
14:45	52	729	7	3.766	1.164	0.010
15:45	55	590.1	5	1.766	0.546	0.003
16:45	54	353.7	4.4	1.166	0.360	0.001
17:45	48	151.7	4.3	1.066	0.329	0.001
08:40	21	383.3	4.2	0.966	0.299	0.001
09:40	31	605.1	4.1	0.866	0.268	0.001
10:40	42.5	610.4	4	0.766	0.237	0.00
11:40	50	984	3.9	0.666	0.206	0.001
12:40	56	991	3.8	0.566	0.175	0
13:40	56	920	3.8	0.566	0.175	0

En esta investigación, se analizaron cuatro muestras para discernir la cinética de secado. La cantidad de humedad inicial fue 79.9% calculado en base húmeda. A partir de la humedad inicial se obtuvieron los datos en base seca. El peso promedio de las muestras iniciales fue de 17.4 g. Se calculó el contenido de materia seca en las muestras, las cuales fueron 3.5 g m.s. (gramos de materia seca). El objetivo de obtener el dato de materia seca fue para calcular la cantidad máxima de humedad que se remueve durante el proceso de secado.

Los valores de temperatura, radiación, velocidad de secado y humedad retirada se observan en los gráficos y tabla de datos.

En la figura 3.2 se muestran gráficamente los datos de radiación y humedad respecto al tiempo de secado. Se observa que durante la primera etapa de secado se logra retirar la mayor cantidad de humedad.

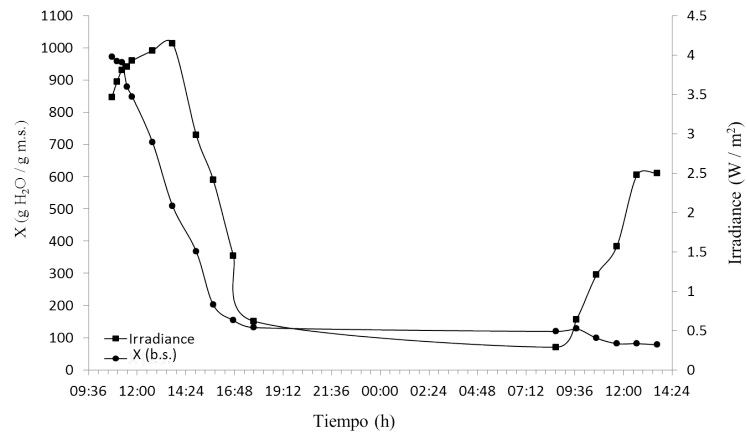


Figura 3.2: Curva de secado del mango y radiación solar

Durante las primeras horas de secado la velocidad se mantuvo constante, ya que los valores de radiación eran bajo, horas posteriores se observa un aumento en la velocidad de secado, debido a que la radiación solar aumenta, la temperatura también lo hace dentro de la cámara de secado. Por lo tanto, la pérdida de humedad aumenta considerablemente a medida que mayor es la radiación solar, lo será la temperatura interna de la cámara de secado.

La primera etapa de secado corresponde a las primeras 7 horas, donde se logra remover el 86.4 % de humedad. Las últimas 5 horas de radiación y temperatura corresponden a la segunda etapa de secado, como se muestra en la figura 3.2, con lo cual se logra remover el 95.6 % de humedad. Los resultados expresados se muestran en base seca.

Parámetros de secado, tales como, tiempo de secado y pér-

didada de humedad son esenciales para el análisis y determinar la cinética de secado. La velocidad de secado es uno de los parámetros más importantes del proceso, ya que determina el tiempo necesario para deshidratar un producto. De esta manera, la velocidad de secado se puede escribir como una función en gramos de agua eliminada sobre gramo de materia seca por minuto ( $dX/dt$  (g H<sub>2</sub>O/g m.s. min.)) contra gramos de agua eliminada sobre gramos de materia seca ( $X$  (g H<sub>2</sub>O/g m.s.)); estos datos pueden ser calculados en cada momento del proceso de secado. Así, la curva de secado de mango o velocidad máxima de secado, fue 0.06 g H<sub>2</sub>O/g m.s. min. Este valor se logró durante la primera etapa de secado.

En la figura 3.3 se muestra la curva de velocidad de secado, que, no es más que la relación de la velocidad de secado contra el contenido de humedad, donde la pérdida de humedad del producto es función de la temperatura y tiempo del proceso de secado.

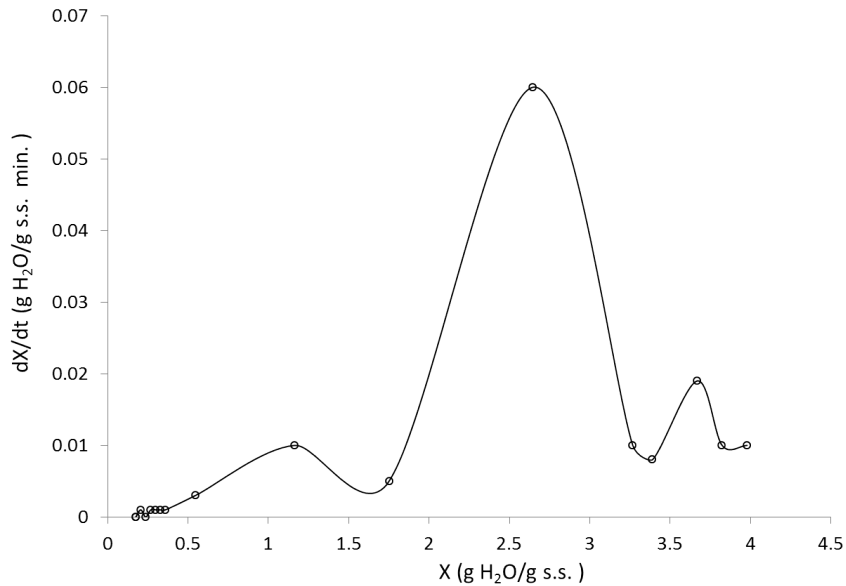


Figura 3.3: Curva de velocidad de secado

La temperatura durante el proceso de secado es otro de los principales factores de secado. Por lo tanto, una temperatura

constante reduce el tiempo de secado. Así, la temperatura de secado solar no es estable, ya que depende directamente de la radiación disponible en el sitio de secado.

Debido a que la temperatura de secado solar no es estable se considera un proceso transitorio. La figura 3.4 muestra gráficamente la temperatura de secado para mango. Donde la temperatura máxima fue de 56 °C y la mínima 21 °C.

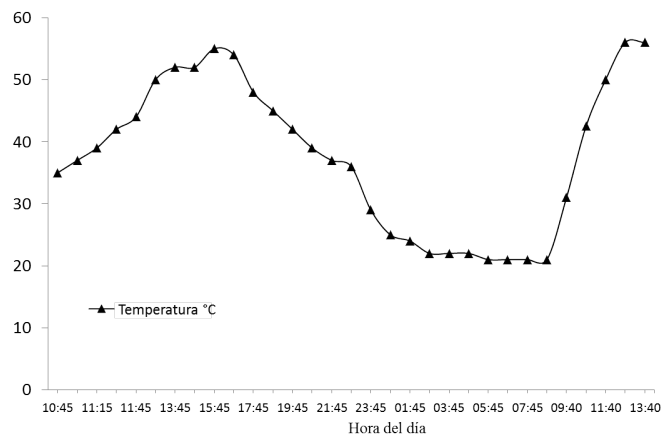


Figura 3.4: Temperatura en el interior del secador

Uno de los principales objetivos de esta investigación es la conservación y mantener disponibles los carbohidratos en el mango para procesos posteriores. Por lo tanto, se estableció la metodología para la conservación de los azúcares disponibles en esta materia prima. Mediante un análisis colorimétrico se llevó a cabo la cuantificación de los azúcares reductores totales. Estos azúcares que son metabolizados por la acción de los microorganismos durante el proceso de la fermentación alcohólica para la producción de bioetanol para su uso como biocombustible.

A través de la técnica de Miller conocido como DNS se realizó el análisis de azúcares reductores. En la figura 3.5 se muestra la curva de calibración de fructosa para el análisis de muestras, donde se obtuvo un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.99, aceptable que adopta valores altos, casi lineal, de acuerdo con el método empleado (mínimos cuadrados).

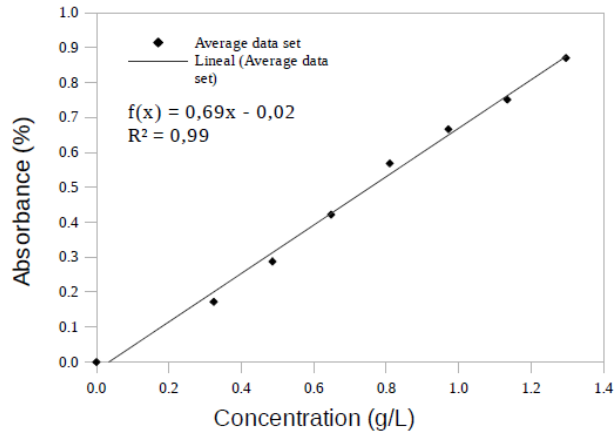


Figura 3.5: Curva de calibración de fructuosa

En el análisis de los resultados muestran la concentración total de azúcares reductores en g/L, cuantificados por la coloración en el proceso de reacción con el reactivo DNS. Aquí, los datos de absorbancia de las muestras se muestran a fin de encontrar la concentración de azúcares reductores y, por lo tanto, determinar el potencial explotable de esta materia prima. El cálculo se realizó utilizando la ecuación obtenida a partir de la curva de calibración de la fructuosa. La concentración de azúcares reductores promedio que se obtuvo fue de 20.1 g/L.

### 3.6. Conclusiones

Con el uso de secadores solares, se logró remover el 95.6 % de humedad del mango. El tiempo final de secado fue, de 28 h, bajo una radiación promedio de 758.6 W/m<sup>2</sup>.

La concentración de azúcares reductores totales fue de 20 g/L, que utiliza sólo 10 g de materia seca de mango con 100 mL de agua destilada.

La energía solar puede quitar la humedad necesaria para conservar los carbohidratos presentes en el mango y su posterior uso en la producción de biocombustibles a través de la vía metabólica de los microorganismos.



### **3.7. Agradecimientos**

Se externan los agradecimientos por el apoyo de CONACYT bajo el proyecto 224765 y al laboratorio de secado del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM).

#### **Este capítulo se publicó en la revista BioResources**

Santis-Espinosa L. Fernando, Bianca Yadira Pérez-Sariñana, Carlos A. Guerrero Fajardo, Sergio Saldaña Trinidad, Erick C. Lopez vidaña, Sebastian Pathiyamattom Joseph. "Kinetic analysis of drying mango by solar energy (*Mangifera indica* L.) as a pretreatment for bioethanol production". *BioRes.* (2015). 10(3), 6044-6054. ISSN: 1930-2126.

---

## Capítulo 4

### Análisis de secado solar del plátano (*Musa paradisiaca* L.) como pretratamiento para la producción de bioetanol.

---

#### 4.1. Abstract

In recent years the use of solar energy has become a primary source of energy to meet certain energy demands and replace conventional sources. The production of biofuels on the other hand, has not been the exception in the progress of alternatives to mitigate the use of non-renewable resources. In this study is carried out drying kinetics and characterization of agro-industrial waste banana fruit (*Musa paradisiaca* L.). Minor components of the fruit matures, it is matter lignocellulosic, according to bromatologic analysis. Solar drying for the conservation of carbohydrates present in banana was developed, through the analysis of the kinetics of sedated, the drying curve, the speed of drying curve and temperature curve was obtained. The amount of initial moisture in the samples showed a value of 76.92 % calculated on a wet basis (w.b.). This initial data were obtained on dry basis (d.b.) values. The 94.15 % moisture was removed by an average of 13 hours 20 minutes in two stages. The radiation and temperature average were  $758.6 \text{ W/m}^2$  and  $46.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectively. Radiation peaks 991 and  $1014 \text{ W/m}^2$ , and maximum temperatures of 52 and  $56.5 \text{ }^\circ\text{C}$  for each stage were recorded. Maximum speed in the curve was drying rate of  $0.0319 \text{ g H}_2\text{O/g d.s. min}$ . The drying process was a system known as "batch." and analysis to determine the concentration of carbohydrates was through

the technique of Miller, 29.9 g/L of total reducing sugars are obtained 10 g of dry solid diluted in 100 mL of distilled water.

**Keywords:** Banana (*Musa paradisiaca L.*); drying solar; dry basis; natural convection; reducing sugars.

## 4.2. Resumen

En los últimos años el uso de la energía solar se ha convertido en una fuente primaria de energía para satisfacer ciertas demandas energéticas y remplazar las fuentes convencionales. La producción de biocombustibles por su parte no ha sido la excepción en el avance de alternativas para mitigar el uso de recursos no renovables.

En este trabajo se lleva a cabo la cinética de secado y caracterización de los residuos agroindustriales de la fruta del plátano (*Musa paradisiaca L.*). Los componentes minoritarios de esta fruta madura, es materia lignocelulósica, de acuerdo con el análisis bromatológico.

El secado solar para la conservación de carbohidratos presentes en el plátano fue desarrollado, mediante el análisis de la cinética de secado, se obtuvo la curva de secado, la curva de velocidad de secado y la curva de temperatura. La cantidad de humedad inicial en las muestras mostró un valor de 76.92 % calculado en base húmeda (b.h.). De este dato inicial se obtuvieron los valores en base seca (b.s.).

El 94.15 % de humedad fue removido en un promedio de 13 horas 20 minutos comprendido en dos etapas. La radiación y temperatura promedio fueron de  $758.6 \text{ W/m}^2$  y  $46.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. Se registraron picos de radiación de 991 y  $1014 \text{ W/m}^2$ , y temperaturas máximas de 52 y  $56.5 \text{ }^\circ\text{C}$  correspondientes a cada etapa. La velocidad máxima en la curva de velocidad de secado fue, de  $0.0319 \text{ g H}_2\text{O/g s.s. min}$ . El proceso de secado fue un sistema conocido como "batch", y el análisis para determinar la concentración de carbohidratos fue mediante la técnica de Miller, se obtienen 29.9 g/L de azúcares reductores totales en 10 g de sólido seco diluidos en 100 mL de agua destilada.

**Palabras clave:** Plátano (*Musa paradisiaca L.*); secado solar;

base seca; convección natural; azúcares reductores.

### 4.3. **Introducción**

La continua búsqueda de fuentes de energía alternativa debido a la escasez percibida de combustible fósiles, los efectos negativos al medio ambiente que se han atribuido por el uso del mismo [123]. Se han integrado y buscado alternativas viables para producción de nuevas fuentes energéticas para mitigar los efectos negativos que tanto se han reportado de las fuentes fósiles de energía. La biomasa es una fuente altamente investigada en las últimas décadas como fuente primaria de bioenergía, se ha estimado que contribuye del orden de 10 a 14% del suministro de energía del mundo [3]. La producción de bioetanol ha representado otra fuente energética y económica para los principales países productores como Estados Unidos, Brasil y La Unión Europea que durante 2014 produjeron 14,300, 6,190 y 1,445 millones de galones, respectivamente [8]. Por lo tanto, la producción de bioetanol es considerado biodegradable, por provenir de la biomasa o residuos agroindustriales derivados de las cadenas de procesamiento o transformación conocidos como desechos o residuos celulósicos y lignocelulósicos con potenciales para la obtención de azúcares fermentables. Es conocido como un biocombustible oxigenado y libre de azufre, que no contribuye al aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> [102],[103].

#### 4.3.1. **El plátano o banano (*Musa paradisiaca L.*)**

El plátano (*Musa paradisiaca L.*), conocido como banano tiene su origen en Asia meridional, desde el año 650, la especie llegó a las Canarias en el siglo XV y se introdujo al continente americano en 1516. Su cultivo comercial se inició a finales del siglo XIX y principios del XX. El plátano es considerado el principal cultivo de las regiones húmedas y cálidas del suroeste asiático [74]. Los plátanos son la fruta más popular del mundo y uno de los alimentos básicos más importantes del mundo, junto con el arroz, el trigo y el maíz. La producción mundial de plátano en el 2013 fue de 105,956,705.00 toneladas. Alrededor de dos tercios de los plátanos se exportan desde América Latina,

con aproximadamente la misma cantidad destinada a Europa o Estados Unidos [82]. La India, Filipina y China son los tres más grandes productores de plátano con cerca de 27.9 y 9 millones de toneladas. México se sitúa en el décimo lugar con 2.6 millones de toneladas [5].

Los plátanos contienen una gran cantidad de carbohidratos y materia lignocelulósica, tales como: celulosa, hemicelulosa y lignina. Se ha indicado que este fruto contiene entre 50 y 60 % de almidón [75], [76], y se ha reportado que cambian dramáticamente durante la maduración, es decir la cantidad de almidón se reduce durante esa etapa [77]. La fruta de banano y su biomasa residual asociado son pues materiales amiláceos y lignocelulósicos; por lo tanto, para la producción de bioetanol tienen que ser hidrolizados para ser convertido en azúcares simples (glucosa), para ser fermentado [124].

Reporte indican que los frutos maduros que son desechados en el sistema de producción y se acumulan una gran cantidad debido a las altas demandas de calidad de los mercados, contienen un alto contenido de azúcares, que pueden ser fácilmente procesadas a bioetanol y pueden aportar en la producción de biocombustibles [125], [126], [127].

#### **4.3.2. Secado solar**

El secado está definido como un proceso de eliminación de la humedad debido a la simultánea transferencia de calor y masa, es decir, como el proceso de eliminar la humedad de un producto con respecto al tiempo. Es un método clásico en la conservación de alimentos, que dentro de sus ventajas son la de pérdida de peso lo que lo hace más ligero para el transporte y reduce los espacio de almacenamiento [128].

El proceso de secado se lleva a cabo en dos etapas. La primera etapa ocurre en el interior y la superficie del producto de secado a velocidad constante de secado, el vapor de agua se elimina mediante un flujo constante de aire seco y es similar a la vaporización de agua en el ambiente. La segunda etapa se lleva a cabo con la disminución en la velocidad de secado (caída de la velocidad). En esta etapa el proceso de secado está relacionado con las propiedades del material que se seca [129], [110].

Se conocen dos métodos para eliminar la humedad: la evaporación y la vaporización.

La evaporación que podría ser definido como, cuando la presión de vapor de la humedad en la superficie sólida es igual a la presión atmosférica. Esto se hace mediante el aumento de la temperatura en la humedad hasta el punto de ebullición y se forma en una fase gas insaturado. Se han reportado experimentos con la evaporación de agua caliente en un recipiente. El cual calienta el agua a una temperatura determinada y luego se deja enfriar; el enfriamiento causa un gradiente de temperatura inestable [112].

Para el caso de la vaporización, el secado se lleva a cabo por convección, es decir, haciendo pasar aire caliente sobre el producto. En este caso, la presión de vapor saturado de la humedad en el sólido es menor que la presión atmosférica. Los factores que afectan la velocidad de secado incluyen la temperatura del aire, velocidad del aire, tipo de producto, espesor del producto, el contenido de humedad del producto, método de secado, la temperatura, la humedad, difusividad y la estructura del sistema de secado. La tasa de la temperatura del aire de secado y el flujo es importante en aplicaciones de secado de acuerdo a un reporte por [113], [114].

Durante la deshidratación solar de productos se emplean de diversas formas de secado como son;

- Secado al sol o secados naturales: El material a secar se coloca directamente bajo condiciones climáticas hostiles como la radiación solar, la temperatura del aire ambiente, la humedad relativa y la velocidad del viento para conseguir el secado.
- Secadores solares directos: En estos secadores, el material a secar se coloca en un recinto del equipo o en cubiertas transparentes. El calor se genera por absorción de la radiación solar en el producto dentro del equipo, así como las superficies internas de la cámara de secado. El calor evapora la humedad de producto y promueve la circulación natural del aire de secado.
- Secadores solares indirectos: Para estos secadores, primero

se calienta el aire en un calentador solar de aire y luego se envía hacia la cámara de secado.

- Secadores solares tipo mixto: La acción combinada de la radiación solar incidente directamente sobre el material a secar y el aire pre-calentado en el calentador solar de aire, así se genera la energía necesaria para el proceso de secado [130].

La actividad enzimática es una reacción natural en los alimentos particularmente con aquellos de alto contenidos de humedad, los frutos son uno de los problemas para conservar y almacenar [120]. Sin embargo, estos productos pueden tener otra lógica de procesamiento, mediante la deshidratación solar. El cual permitirá almacenar los productos para su posterior comercialización, ya sea para el consumo humano o para otros fines. En el caso del presente estudio contempla el proceso de deshidratación como pretratamiento de residuos de plátano y su posterior procesamiento en la obtención de bioetanol, mediante la conversión de los azúcares, por la vía bioquímica de la fermentación alcohólica [121].

## **4.4. Experimental**

### **4.4.1. Materiales y métodos**

#### **Materia prima**

El plátano (*Musa paradisiaca* L.), fue la materia prima empleada en este trabajo. Se obtuvo a partir de residuos agrícolas de plantaciones del estado de Chiapas, México. Las muestras que se prepararon para ser deshidratadas, fueron rebanadas utilizando un cortador Kitchen Aid marca Brand (USA), con un espesor 3/16 in (0.47 cm). Las obleas obtenidas de la materia prima fueron colocadas en bandejas de los secadores para su deshidratación. Las bandejas fueron forradas con papel enserado alimenticio de la marca Reynolds, esto para evitar que las obleas se adhieran en la charolas por la concentración de azúcares. Finalizando el proceso de secado las muestras deshidratadas fueron pulverizadas con una licuadora tipo industrial, seguido del

tamizado a través de un tamiz de 0.25 mm. Los experimentos en la presente investigación incluían mínimo de tres repeticiones en la toma de muestras y se presentan los valores medios.

### **Análisis bromatológico**

El plátano deshidratado fue molido y se tomó una muestra del polvo resultante, que fue sometido a un análisis de composición utilizando protocolos estándar de bromatología [131], [132], [133].

Las condiciones de trabajo para este análisis fueron las siguientes:

Condiciones ambientales: Humedad relativa entre 40-65 %, temperatura ambiente: 16-20.5 °C.

Humedad: Peso constante de crisoles y secado de las muestras en estufa 100 °C/4 h.

Cenizas: Peso constante de crisoles en estufa 100 °C/4 h. e incineración en mufla a 550 °C /6 h.

FDN. Digestión con detergente neutro en parrilla de calentamiento y filtración en crisol gooch.

FDA. Digestión en parrilla de calentamiento con detergente ácido y filtración en crisol gooch.

Lignina. Oxidación con permanganato de potasio.

Celulosa. Incineración a 550 °C/3 h.

El valor de hemicelulosa se obtiene por diferencia del % FDN menos % FDA.

### **Análisis de azúcares**

Para cuantificar los azúcares reductores presentes en las muestras, fue empleada la técnica de Miller, 1959. Donde el reactivo utilizado, es conocido como DNS (ácido 3,5-dinitrosalicílico). Para la curva de calibración se utilizó fructosa como solución patrón (estándar) a una concentración de 1 g/L. Así mismo, se utilizó un espectrofotómetro marca Spectronic 20 Genesys (USA), el cual se ajustó a una longitud de onda de 540 nm para el análisis de las muestras [122].



## **Deshidratación solar**

Las obleas del plátano fueron deshidratadas con el uso secadores solares y equipos de medición del laboratorio de secado. Estos secadores fueron diseñados y construidos en el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), ubicado en la ciudad de Temixco Morelos, México. Durante el proceso experimental los secadores fueron colocados en serie y orientados al sur con una inclinación de  $18^{\circ} 50.36'$  latitud norte, correspondiente al lugar con el objetivo de captar la mayor cantidad de radiación durante el día.

Los valores de radiación solar durante el tiempo de secado se obtuvieron a través de la base de datos de radiación del mismo Instituto. Esta institución recaba información continua de meteorológica y datos solarimétricos. Su ubicación geográfica es:  $18^{\circ} 50,36'$  latitud norte,  $99^{\circ}14.07'$  longitud oeste.

Dentro de las características particulares de los secadores incluyen el material de construcción de acrílico transparente de espesor 3 mm, área de  $0.48 \text{ m}^2$ , volumen interno de  $0.125 \text{ m}^3$  y cuentan con un sistema de extracción del aire húmedo con capacidad de  $2 \pm 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ .

La pérdida o eliminación de humedad se llevó a cabo mediante el proceso natural de convección de aire. El espesor de la oblea del rebanado del plátano mostro efecto favorable durante el proceso de secado, ya que esta característica en cuanto al tamaño de espesor del producto permite el retraso o la aceleración del secado, es decir, un espesor más pequeño disminuye el tiempo de secado.

## **Proceso de convección natural**

En convección natural el flujo resulta solamente de la diferencia de temperaturas del fluido en la presencia de una fuerza gravitacional. La densidad de un fluido disminuye con el incremento de temperatura. En un campo gravitacional, dichas diferencias en densidad causadas por las diferencias en temperaturas originan fuerzas de flotación. Por lo tanto, en convección natural las fuerzas de flotación generan el movimiento del fluido. Sin una fuerza gravitacional la convección natural no es posible. En convección natural una velocidad característica no es fácil-

mente disponible. Por lo cual se conoce que, un fluido que se mueve de un punto a otro, además de transporte de momentum y masa, también lleva energía. La convección de calor depende en gran medida de las características del mecanismo de flujo, es decir, la distribución de velocidades y el régimen de flujo (laminar o turbulento). La ecuación 4.1 corresponde a la ley de Fourier para calcular el flujo de calor [115].

$$q = -k_f \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) y = 0 \quad (4.1)$$

Donde  $k_f$ , es la conductividad térmica del fluido.

La transferencia de calor por convección depende de la densidad, la viscosidad, la velocidad del fluido, la conductividad térmica y el calor específico del fluido.

### Contenido de humedad

Todos los alimentos, contienen agua en mayor o menor proporción. El porcentaje del contenido en agua varía entre un 60 y 95 % en los alimentos naturales. En los tejidos vegetales y animales, puede decirse que existe en dos formas generales: "agua libre" y "agua ligada". El agua libre o absorbida, que es la forma predominante, se libera con gran facilidad. El agua ligada se halla combinada o absorbida. Se encuentra en los alimentos como agua de cristalización (en los hidratos) o ligada a las proteínas y a las moléculas de sacáridos y absorbida sobre la superficie de las partículas coloidales.

Por lo tanto el contenido de humedad de un alimento o producto se expresa generalmente como porcentaje de humedad. Matemáticamente, esto es la relación de la masa de agua contenida en la muestra de alimento (adsorbente) y la masa total de muestra de alimento que contiene humedad (adsorbato), expresada como un porcentaje [116]. Sin embargo, el contenido de humedad se utiliza como la variable que representa el eje vertical de las isoterms de adsorción de vapor y es a menudo expresado como la relación de la masa de agua (adsorbato) dividido por la masa de materia seca (adsorbente). Estos dos métodos diferentes para determinar el contenido de humedad en una muestra de alimento se conocen como "base húmeda" (b.h.) y "base seca" (b.s.), respectivamente [117].

### Base seca

El Contenido de humedad en base seca, es la cantidad de agua referida al sólido seco descrita por la ecuación 4.2, la cual fue utilizada para determinar la concentración de humedad en base seca. Esta ecuación refiere a la relación de masa de agua y materia seca que arroja el porcentaje de humedad presente en la muestra. Para el mismo fin puede ser empleada la ecuación 4.3, tomando punto de partida el contenido de humedad en base húmeda.

$$X_{w,b.s.} = \frac{m_{agua}}{m_{materia\ seca}} \quad (4.2)$$

$$X_{w,b.s.} = \frac{1}{\frac{1}{X_{w,b.h.}} - 1} \quad (4.3)$$

La cantidad  $X_{w,b.s.}$ , es el contenido de humedad en base seca, y las unidades correspondientes se representan como g H<sub>2</sub>O/g de sólido seco.

### Base húmeda

El Contenido de humedad en base húmeda, es la cantidad de agua que contiene el sólido referido al sólido húmedo (sólido seco más agua). La ecuación 4.4 fue utilizada para determina el contenido de humedad del producto en una base húmeda, para este caso se mantiene una relación entre la masa de agua y la masa total del producto. Para el mismo propósito se puede emplear la ecuación 4.5, tomando en cuenta las condiciones iniciales de la masa de agua y la masa total del producto.

$$X_{w,b.h.} = \frac{m_{agua}}{m_{masa\ total}} \quad (4.4)$$

$$X_{w,b.h.} = \frac{1}{\frac{1}{X_{w,b.s.}} + 1} \quad (4.5)$$

En estas ecuaciones  $X_{w,b.h.}$ , es el contenido de humedad en base húmeda, y las unidades correspondientes se representan como g H<sub>2</sub>O/ g de sólido seco.

### Cálculo del contenido de humedad inicial

Para determinar el contenido inicial de humedad de las muestras del plátano, se utilizó una termo balanza (MB4S moisture measurement, OHAUS, Spain), bajo las condiciones establecidas por la norma NMX-F-083-1986 (temperatura/tiempo: 105 °C/A30). Así mismo, se realizó la medición de la evaporación del agua contenida en las muestras, por medio de la diferencia de peso del monitoreo de las muestras conocidas, fue empleada una balanza analítica modelo OHAUS ScoutPro Brand.

### Cinética de secado

La cinética de secado se conoce como el cambio de la cantidad de humedad promedio con el tiempo. La cinética de secado muestra tanto la cantidad de humedad evaporada, como el tiempo requerido y el consumo de energía durante el proceso de secado. Sin embargo, el cambio de la humedad depende de la transferencia de calor y masa entre la superficie del cuerpo, el medio ambiente y el interior del material a secar. Por lo tanto, el secado solar es un proceso generalmente descrito por tres esquemas: la curva de secado, la curva de velocidad de secado y la curva de la temperatura.

#### ■ Velocidad de secado

La velocidad de secado se conoce como la cantidad de agua que se elimina por unidad de tiempo, y es quien indica la rapidez con la que se seca el producto. Este proceso se describe por las ecuaciones 4.6 y 4.7.

$$\int dt = -\frac{m_s}{A} \int \frac{dx}{W_D} \quad (4.6)$$

$$W_D = -\frac{m dx}{A dt} \quad (4.7)$$

#### ■ Curva de temperatura

La curva de temperatura del producto se obtiene mediante el trazado de los datos de temperatura de secado del producto contra el contenido de humedad en el tiempo.

- Tiempo de secado

El tiempo de secado depende del material a secar; esto define las características de la curva de secado. El tiempo de secado debe determinarse por separado para el primer y segundo período de secado.

La ecuación 4.7, que define la velocidad de secado, se puede reorganizar para obtener el tiempo de secado como lo muestra la ecuación 4.8.

$$\int_0^t dt = -\frac{m_s}{A} \int_{X_i}^{X_f} \frac{dX}{W_D} \quad (4.8)$$

Por otro lado, la cantidad de agua eliminada del producto puede ser calculada usando la ecuación 4.9 de la siguiente manera [118],[119]:

$$W_r = \frac{X_i - X_f}{1 - X_i} \quad (4.9)$$

En las ecuaciones anteriores  $X_i$  y  $X_f$  son el contenido de humedad inicial y final del producto en base húmeda desde tiempo cero hasta el tiempo  $t$ , respectivamente.

## 4.5. Resultados y discusiones

Para el desarrollo de este trabajo fueron utilizados secadores solares, los cuales se describieron en la sección anterior. Estos secadores empleados en el proceso de deshidratación de plátano se muestran en la figura 4.1.



Figura 4.1: Secadores solares y deshidratación del plátano.

De las obleas deshidratadas del plátano, que fueron pulverizadas, se tomaron muestras de 100 g para determinar su composición por medio de un análisis de bromatología. Estos estudios revelan que los componentes lignocelulósicos se encuentran en bajas concentraciones, así como se reportan por otros autores (tabla 2.5 y 26). Las variaciones de algunos valores se deben principalmente al estado de madures del fruto durante su análisis.. Los resultados del análisis proximal se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Análisis de bromatología de La fruta de plátano

Propiedades (g/100 g)	Plátano
Humedad	7.3449
Cenizas	4.3799
Hemicelulosa	9.5381
Celulosa	2.480
Lignina	2.680
g/100 g es equivalente al porcentaje (%)	

Durante el proceso de secado, se monitorearon variables como: temperatura de secado, radiación solar, tiempo de secado, pérdida de humedad y velocidad de secado. Estos parámetros son esenciales para el análisis y determinar la cinética de secado del producto.

La tabla 4.2, sintetiza los datos obtenidos durante la primera y segunda etapa de secado respectivamente.

Para el análisis en la cinética del proceso de secado en esta

Tabla 4.2: Datos cinéticos de secado del plátano.

Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Radiación solar- G W/m <sup>2</sup>	Peso promedio de Las muestras (g )	g H <sub>2</sub> O promedio en Las muestras	Humedad (X) b.s. (g H <sub>2</sub> O/ g s.s.)	dX/dT ( g H <sub>2</sub> O/ g s.s min. )
10:45	39.0	847	6.95	5.34594	3.332756	0.024956
11:00	42.0	895	6.75	5.18056	2.958419	0.026783
11:15	44.0	931	6.50	4.93056	2.571669	0.024845
11:30	46.0	941	6.38	4.80556	2.399845	0.023278
11:45	47.0	960	6.25	4.68056	2.253118	0.023916
12:45	54.5	991	5.25	3.68056	1.389309	0.031909
13:05	52.0	1014	4.30	2.73056	0.910679	0.002596
14:55	55.0	729	3.43	1.85556	0.612171	0.003349
16:00	55.0	590.1	2.63	1.05556	0.411231	0.001542
17:00	54.0	353.7	2.18	0.60556	0.318682	0.000469
18:04	48.0	151.7	2.03	0.45556	0.290521	0.000690
08:20	21.0	383.3	1.80	0.23056	0.249151	0.000070
09:20	31.0	605.1	1.78	0.20556	0.244940	0.000424
10:40	42.5	610.4	1.63	0.05556	0.219513	0.000203
12:00	50.0	984	1.53	-0.04444	0.203265	0.000146
12:43	56.0	991	1.49	-0.08194	0.197421	0.000037
13:46	56.5	920	1.48	-0.09444	0.195219	-0.000247

investigación, se monitorearon cuatro muestras durante la experimentación. La cantidad de humedad inicial en las muestras fue determinada y mostraron un valor de 76.92 % calculado en base húmeda (b.h.). Partiendo de la humedad inicial conocida, se obtuvieron los valores correspondientes a cada muestra en base seca (b.s.) como se mostró en la tabla 4.2.

Durante el cálculo del peso inicial total promedio de las muestras se obtuvo 6.95 g en la primer medición, así mismo fue calculado el contenido de sólido seco (s.s.) en cada muestra. El valor promedio inicial de sólido seco fue de 1.6 g, la diferencia entre el peso inicial total y el peso del sólido seco, corresponden a gramos de agua. El principal objetivo de conocer el peso del sólido seco, fue para calcular la cantidad máxima de humedad teórica que puede ser removida durante el proceso de secado.

Como es conocido, durante el proceso de secado solar de productos, la fuente de energía es la radiación solar incidente en el área de los diferentes secadores solares. Así, los valores y el comportamiento de la irradiación y la pérdida de humedad respecto al periodo de secado se muestran gráficamente en la figura 4.2.

En esta figura se observan los picos máximos de radiación que corresponden a 991 y 1014 W/m<sup>2</sup> para la primera y segunda

etapa, respectivamente. Así mismo se observa que durante la primera etapa de secado se logra remover la mayor cantidad de humedad comparada con la etapa dos. El tiempo total promedio del proceso de secado fue de 13 horas 20 minutos, tomando como referencia el tiempo de radiación. Este fue un proceso conocido como "batch." "discontinuo".

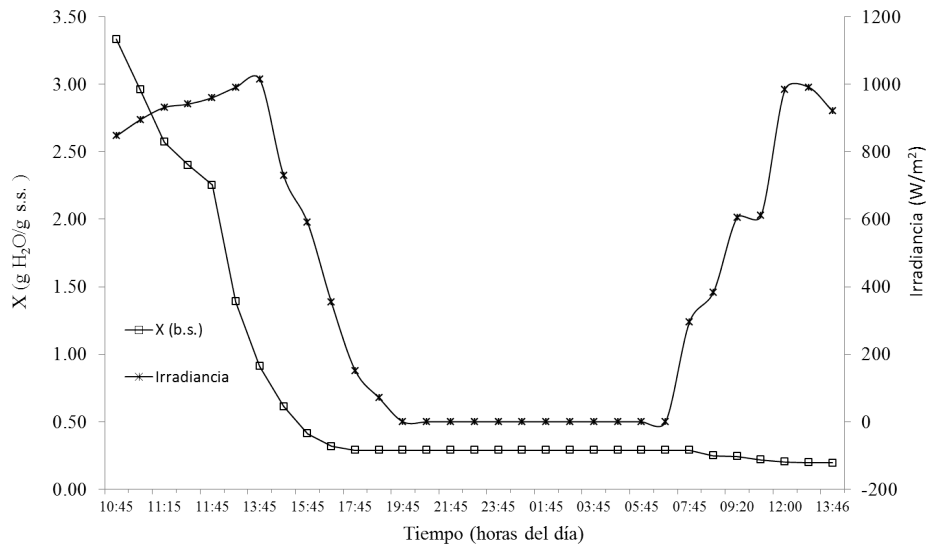


Figura 4.2: Curva de secado del plátano y irradiancia

En la primera etapa de secado se logra remover el 91.2 % de humedad y en la segunda etapa como se mostró en la figura 4.2, se logra remover el total de 94.15 % de humedad. Los resultados expresados se muestran en base seca.

En periodo inicial de secado, durante las horas iniciales de la primera etapa que correspondieron a 6 horas 15 minutos en promedio, la pérdida de humedad incrementa paulatinamente, debido a los valores bajos de radiación y temperaturas bajas, la velocidad de secado en este periodo se mantiene constante. Sin embargo, en las horas posteriores la pérdida de humedad aumenta considerablemente, así también la velocidad de secado, derivado del aumento de la temperatura dentro de la cámara de secado. Por lo tanto, la pérdida de humedad en este periodo



aumentó considerablemente, ya que a medida que mayor es la radiación solar, lo será la temperatura interna de la cámara de secado. Entonces la pérdida de humedad del producto se encuentra en función de la temperatura interior de la cámara de secado y tiempo del proceso.

Por otro lado, la curva de velocidad de secado es uno de los parámetros importantes del proceso, ya que determina el tiempo necesario para deshidratar un producto, la cual se puede representar gráficamente como una función de, gramos de agua eliminada sobre gramo de sólido seco por minuto ( $dX/dT$  (g  $H_2O$ /g s.s. min.)) contra gramos de agua eliminada sobre gramos de sólido seco ( $X$  (g  $H_2O$ /g s.s.)); estos datos se calcularon para cada análisis de muestras durante el proceso de secado. De esta manera, la velocidad máxima en la curva de velocidad de secado fue, de 0.0319 g  $H_2O$ /g s.s. min. Este valor se logró obtener durante la primera etapa de secado.

La figura 4.3, muestra la curva de velocidad de secado, es decir, la interpretación gráfica de la relación entre la velocidad de secado y el contenido de humedad.

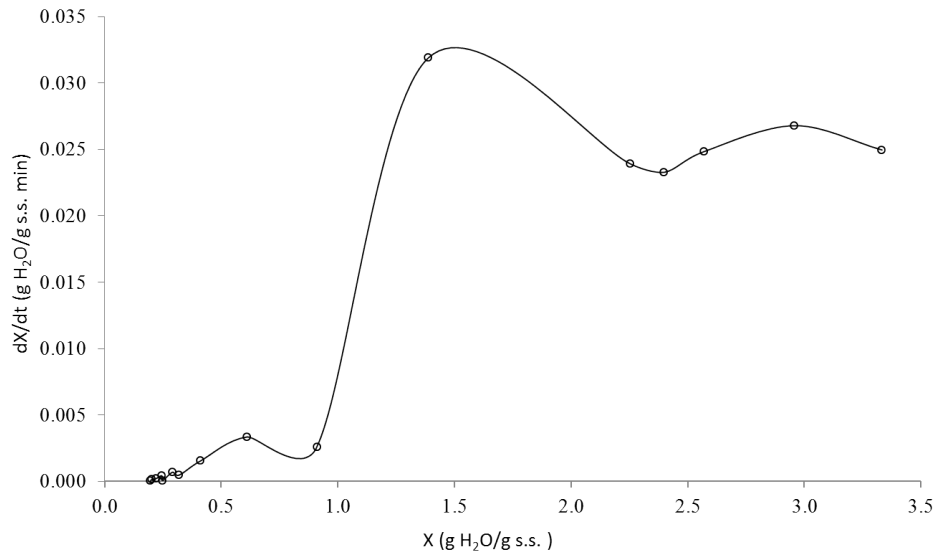


Figura 4.3: Curva de velocidad de secado del plátano

De la misma manera que los demás parámetro durante la cinética de secado, la temperatura de secado es otro de los principales factores para el análisis del proceso. Por lo tanto, una temperatura constante reduce el tiempo de secado. Sin embargo bajo la práctica, la temperatura de secado solar no es estable, debido a que depende directamente de la radiación disponible en el sitio de secado.

Entonces, sí, la temperatura de secado solar no es estable, se considera un proceso transitorio. La figura 4.4, muestra gráficamente la temperatura en el interior de la cámara de secado y la radiación solar durante el periodo de secado. Se observa que la temperatura máxima fue de  $56.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la mínima de  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La temperatura promedio de secado fue de  $46.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

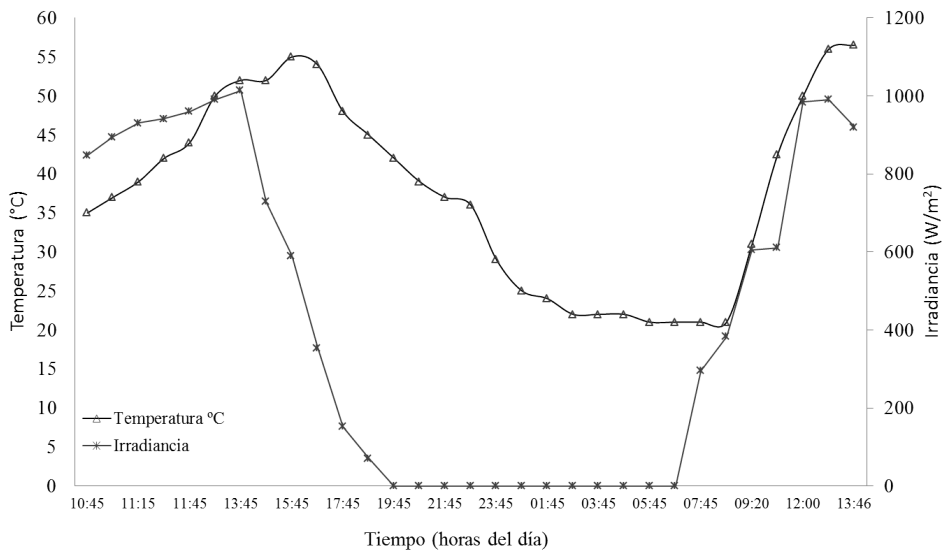


Figura 4.4: Temperatura en el interior del secador y radiación solar

La conservación de los carbohidratos presente en la fruta del plátano para su aprovechamiento posterior en la producción de bioetanol mediante la fermentación alcohólica, ha sido, uno de los propósitos principales de esta investigación. Y por medio del secado solar, se ha establecido una metodología apropiada de conservación de los azúcares en esta materia prima.

Mediante un análisis colorimétrico desarrollado por Miller, 1959., con el uso de reactivo conocido como DNS, se llevó a cabo para la cuantificación de los azúcares reductores totales. Estos azúcares que son metabolizados por la acción de los microorganismos durante la conversión bioquímica y la producción de bioetanol para su uso como biocombustible. Las muestras de sólidos secos pulverizados y su análisis de azúcares reductores se muestran en la figura 4.5



Figura 4.5: Muestra de sólido seco de plátano y análisis DNS

En la figura 4.6 se muestra la curva de calibración de fructosa para el análisis de muestras y determinar la concentración de azúcares reductores totales presentes. El coeficiente  $R^2$  fue de 0.997, lo que indica que el ajuste es casi lineal y suficiente.

En el análisis final de los resultados muestran la concentración total de azúcares reductores en g/L, cuantificados por la coloración en el proceso de reacción con el reactivo DNS y los azúcares. Aquí, los datos de absorbancia de las muestras se fueron calculados con la ecuación resultante de la curva de calibración de la fructuosa, a fin de encontrar la concentración de azúcares reductores, y, por lo tanto, determinar el potencial disponible en esta materia prima.

La concentración de azúcares reductores promedio que se obtuvo fue de 29.9 g/L, de 10 g de sólido seco pulverizados que fueron diluidos en 100 mL de agua destilada.

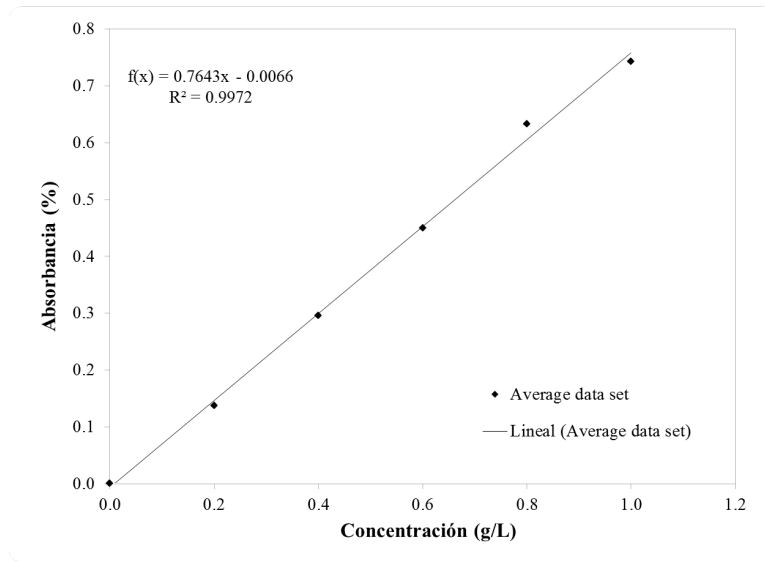


Figura 4.6: Curva de calibración de fructosa

## 4.6. Conclusiones

Las muestras analizadas del plátano contienen bajas concentraciones de materia lignocelulosa.

El menor espesor de las obleas del plátano favorece a velocidad el proceso de secado.

Se logró remover el 94.15 % de humedad del plátano.

Las obleas de plátano permanecieron durante 28 h en promedio en la cámara de secado.

La radiación y temperatura promedio durante el proceso de secado fueron de  $758.6 \text{ W/m}^2$  y  $46.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente.

La velocidad de secado está asociada a la concentración de la radiación captada por el área del secador y a la temperatura estable de secado.

La concentración de azúcares reductores totales en las muestras fue de 29.9 g/L, de 10 g de sólido seco diluido en 100 mL de agua destilada.

La energía solar aprovechada mediante equipos que permiten remover humedad, son una de las mejores alternativas para la conservación de productos alimenticios o para otros fines y favorece al balance de energía en el proceso de transformación y

al entorno ambiental, al no depender de energía proveniente de los hidrocarburos.

#### **4.7. Agradecimientos**

Se externan los agradecimiento por el apoyo de CONACYT, al laboratorio de hidrógeno y al laboratorio de secado del Instituto de Energías Renovables de La Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM).

**Este capítulo se encuentra en proceso de publicación**

---

## Capítulo 5

---

### Evaluación de los desechos agroindustriales para la producción de bioetanol: caso de estudio mango (*Mangifera indica* L.)

---

#### 5.1. Abstract

This study was carried out to evaluate the fermentation performance and behavior of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* Y2034 in mango pulp and peel (*Mangifera indica* L.). In this paper we studied the fermentation of mango (pulp and peel) a fruit rich in Mexico with high sugar content. The process for producing ethanol comprised the following steps: substrate preparation, preparation of the YPD medium, growth of the yeast *S. cerevisiae* Y2034, alcohol fermentation and distillation. In this study we utilized the raw materials amounting 75 percent pulp and 25 percent peels and seeds. The maximum growth of yeast was observed in the treatment of pulp and peel with 150 g/L of initial reducing sugar, obtaining  $2.6 \times 10^8$  cfu/mL. All the experiments were carried out in triplicate.

**Keywords:** *S. cerevisiae* Y2034; Mango (*Mangifera indica* L.); fermentación; bioetanol.

#### 5.2. Resumen

Este estudio se llevó a cabo para evaluar el desempeño de la fermentación alcohólica y el comportamiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* NRRL Y2034 en pulpa de mango

y la cáscara (*Mangifera indica* L.). En este artículo se estudió la fermentación de mango (pulpa y cáscara) una fruta abundante en México con alto contenido de azúcares. El proceso para producir etanol comprende las siguientes etapas: preparación del sustrato, preparación del medio YPD (Yeast extract, peptone and dextrose), el crecimiento de la levadura *S. cerevisiae* NRRL Y2034, la fermentación y destilación de alcohol. En este estudio se utilizaron las materias primas que contienen una cantidad de 75 por ciento de pulpa y 25 por ciento en cáscaras y semilla. El crecimiento máximo de levadura se observó en el tratamiento que contenía pulpa y cáscara con 150 g/L de azúcar reductor inicial, obteniendo  $2.6 \times 10^8$  cfu/mL. Todos los experimentos se llevaron a cabo por triplicado.

**Palabras clave:** *S. cerevisiae* Y2034; Mango (*Mangifera indica* L.); fermentación; bioetanol.

### 5.3. Introducción

Actualmente el bioetanol es uno de los biocombustibles más estudiados a nivel mundial, debido a que puede ser una alternativa sustentable para el reemplazar parte de las demandas de los combustibles fósiles [99]. Particularmente para el caso de México, ha sido impulsada la producción en respuesta al agotamiento y a los altos costos de los combustibles fósiles a nivel nacional e internacional.

La caña de azúcar ha sido uno de las principales materias primas para la producción de bioetanol. Brasil y USA son los dos principales productores de bioetanol usando caña de azúcar y maíz como materias primas respectivamente. La industria de la caña de azúcar que genera una gran cantidad de materia lignocelulósica (bagazo de caña) durante la producción de azúcar y etanol. Por un lado el bagazo de la caña de azúcar es empleado como combustible durante la generación de energía que requiere la misma industria, mientras los demás desechos de la caña son quemados durante la cosecha del cultivo que permite mejoras durante su crecimiento [134]. Sin embargo, existen varias materias primas y desechos agrícolas con altos contenidos de azúcares fermentables que pueden ser evaluados para la producción de bioetanol.

El mango (*Mangifera indica L.*) podría ser utilizado para estos propósitos, debido a que es una de las frutas tropicales más populares y abundantes en el sureste de Asia, y a que a menudo se presenta exceso de oferta después de cada cosecha [135]. Esta fruta se cultiva principalmente en 85 países. Los países de Asia y de Oriente producen alrededor del 80 por ciento de la producción mundial total. Hay un gran número de variedades, las cuales difieren entre sí con respecto a tamaño, el color de la piel, pulpa, el sabor y el aroma de la fruta, entre otras características [13]. México es el quinto productor de mango en todo el mundo. Los principales productores son India, China, Tailandia, Pakistán y México, seguido por Indonesia. En conjunto, estas seis naciones generan tres de cada cuatro toneladas de la fruta producida en todo el mundo. El área de cultivo de mango en México asciende a 186, 505 hectáreas. México tiene una producción de 1.481 millones de toneladas, según los datos reportados por SIAP en 2012 [5]. Por otro lado, según el último informe de la SAGARPA, existe un historial de pérdidas con valor de 230 mil toneladas por año. El mango contiene una alta concentración de azúcar (16-18 % w/v) y ácidos con propiedades organolépticas, y también contiene antioxidantes. La sacarosa, glucosa y fructosa son los principales azúcares en mango maduro, con pequeñas cantidades de celulosa, hemicelulosa y pectina [12], [13].

## 5.4. Materiales y métodos

### 5.4.1. Materia prima

La materia prima (Mango Ataulfo (*Mangifera indica L.*)), que se empleó para este trabajo se deshidrató mediante el secado solar y se le realizó un molienda, de tal forma que la materia molida de encuentre de un tamaño homogéneo para su mejor disolución. Después del pretratamiento de secado, se realizó un proceso de hidrólisis térmica (THP) en condiciones de 130 °C y 15 psi durante 20 min. Después del pretratamiento, se centrifugó a 5000 rpm y 28 °C durante 10 minutos (Centrifuge 5804R, 15 amp version) para aclarar el sustrato. El sustrato se ajustó a la concentración de azúcares reductores totales de 100, 150 y 200



g/L, respectivamente, de acuerdo con el diseño experimental propuesto.

#### **5.4.2. Microorganismo y preparación del inóculo**

La levadura *Saccharomyces cerevisiae* NRRL Y2034 fue proporcionada por el cepario de la Universidad Politécnica de Chiapas. Las levaduras se mantuvieron en medio de cultivo estéril sólido YPD, que consiste de extracto de levadura, peptona, glucosa y agar en concentraciones de 10, 20, 20 y 18 g/L, respectivamente. Fueron almacenadas a 4 °C. Para la preparación del inóculo, se añadieron células a cada tubo Falcón de 150 mL, el cual contenía 100 mL de medio líquido YPD estéril (121°, 20 min, 15 psi.), que consiste en glucosa, peptona y extracto de levadura a concentraciones de 20, 20 y 10 g/L, respectivamente. Los tubos se incubaron en un agitador rotatorio a 30 °C y 150 rpm durante 24 h. El protocolo de preparación fue de acuerdo con la literatura [136],[137].

#### **5.4.3. Fermentación**

La fermentación fue realizada en frascos Erlenmeyer de 150 mL con 100 mL de medio, durante 24 h. La agitación se mantuvo a 150 rpm en una cámara de agitación Lusmstell modelo iro 70 con temperatura controlada, el pH inicial fue de 4.5 y temperatura de 30 °C. Los frascos fueron inoculados con  $1 \times 10^6$  UFC/mL de levaduras *S. cerevisiae* NRRL Y2034. Cada frasco que contenía medio de fermentación hidrolizado se le adiciono 5 g/L de extracto de levadura, 5 g/L de peptona, 5 g/L de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 0.2 g/L de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  y 0.4 g/L de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Todos los experimentos fueron realizados por triplicado. Se tomaron muestras a las 0, 6, 12, 18 y 24 horas de fermentación, donde cada muestras se le analizaron crecimiento de la levadura y consumo de azúcares reductores totales[136],[138].

#### **5.4.4. Diseño experimental**

La estrategia experimental para la fermentación alcohólica del mango se realizó utilizando el software, design-expert 8.0.7.1 (versión 8.0.3, stat-ease, inc., Minneapolis, EE.UU.). El cual se

basado en la metodología de superficies de respuesta (MSR) basado en el diseño compuesto central (DCC)  $2^2$  factorial.

#### **5.4.5. Métodos analíticos y cálculos**

Los sólidos solubles totales ( $^{\circ}$ Brix) y pH fueron medidos en los puntos de tiempo indicado. Mediante el uso de un refractómetro digital de bolsillo (SPER CIENTÍFICO, Mod. 300053) y un medidor de pH (OAKTON), respectivamente [139]. Las muestras tomadas del medio de fermentación fueron suspendidas mediante diluciones apropiadas. La viabilidad celular fue determinada por tinción con azul de metilo mediante la técnica de conteo directo, haciendo uso de una cámara de Neubauer [140]. Para conocer la concentración de azúcar se determinó con el método DNS o ácido 3,5 dinitrosalicílico [122]. Cada muestra se analizó por triplicado.

### **5.5. Resultados y discusión**

#### **5.5.1. Estrategia experimental de la fermentación alcohólica**

Para la fermentación alcohólica del mango los azúcares reductores y la concentración de células fueron tomadas como variables de entrada. Por lo tanto, basado en el diseño experimental propuesto se obtuvo el comportamiento de los azúcares reductores y la densidad celular, como se muestra en la tabla 5.1.

Se observa que los tratamientos que iniciaron con 150 g/L de azúcares reductores los cuales contenían pulpa y cáscara del mango fueron los que mostraron mayor crecimiento de células y los azúcares se redujeron hasta un 89 %. Los tratamientos con pulpa de mango son denotados por la letra A, mientras que los tratamientos con pulpa y cáscaras del mango se denotan por la letra B.

Tabla 5.1: Diseño experimental para la fermentación alcohólica del mango.

Ensayos	Variables de entrada			Variables de salida		
	N <sub>0</sub> .	Azúcares reductores (g/L) Inicial	Concentración Inicial	de células (UFC/mL) A	B	Consumo de azúcares (g/L) A
1	100	1.00E+06	3.00E+07	5.00E+07	32.99	15.33
2	100	1.00E+06	3.50E+07	5.00E+07	32.1	14.4
3	100	1.00E+06	3.50E+07	6.50E+07	33.8	15.2
4	150	1.00E+06	8.70E+07	2.50E+08	47.11	17.94
5	150	1.00E+06	7.50E+07	2.55E+08	46.8	17.5
6	150	1.00E+06	9.50E+07	2.60E+08	47.33	16.70
7	200	1.00E+06	1.00E+08	8.00E+07	80.1	47.25
8	200	1.00E+06	9.00E+07	9.00E+07	80.1	46.5
9	200	1.00E+06	1.05E+08	9.50E+07	80.01	46.85

### 5.5.2. Fermentación con pulpa de mango

Durante el proceso de fermentación alcohólica, se obtuvieron los datos cinéticos de los azúcares y levaduras. El comportamiento observado para cada tratamiento se muestra en la figura 5.1.

Los resultados en estos tratamientos mostraron que las densidades celulares más altas se obtienen en concentraciones de 200 g/L de azúcares reductores iniciales, sin embargo la metabolización de los azúcares a esas concentraciones no se recomienda, debido a que los azúcares no son metabolizados completamente. Por lo tanto se genera una considerable pérdida de alrededor del 40 % del total de los azúcares reductores iniciales, que pueden aprovecharse en mejores condiciones.

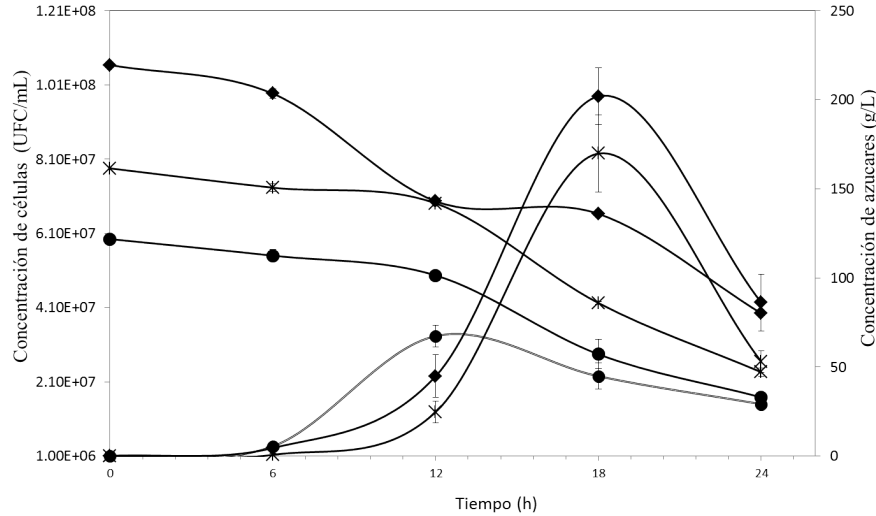


Figura 5.1: Cinética de crecimiento de la levadura *S. cerevisiae* Y2034 y reducción de azúcares durante la fermentación alcohólica de la pulpa del mango para tres diferentes concentraciones de azúcares reductores iniciales (◆ 200 g/L, \* 150 g/L, ● 100 g/L).

La Figura 5.2 muestra el comportamiento de los sólidos solubles totales (SST), temperatura y pH. Se observa que la unidad de ° Brix en cada tratamiento disminuye por más del 50 % de los valores iniciales. Sin embargo, como se demuestra en la figura 5.1 el tratamiento con 200 g/L de azúcar inicial tenía la más alta densidad de células. Sin embargo, el mejor tratamiento se da con 150 g/L de azúcares iniciales, debido a que a esta concentración el azúcar se reduce hasta el 70 % y la densidad celular está muy cerca del tratamiento de mayor densidad. La temperatura se mantuvo estable a 30 ° C y el pH en el rango reportado para el desarrollo óptimo de esta levadura (4.5-5).

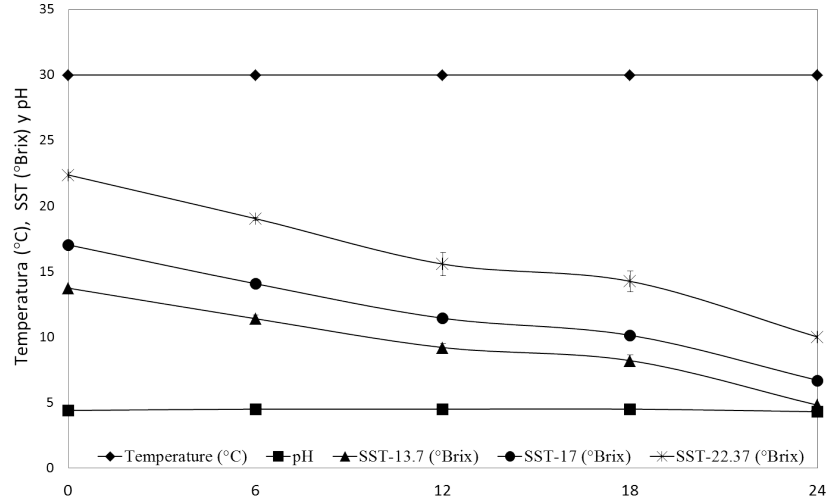


Figura 5.2: Cinética de tres diferentes concentraciones de SST °(Brix), temperatura y pH de la fermentación alcohólica de la pulpa del mango.

### 5.5.3. Fermentación con pulpa y cáscaras de mango

Durante el desarrollo experimental se propusieron los diferentes tratamientos, primero con los azúcares obtenidos directamente de pulpa de mango. Posteriormente los tratamientos utilizando el mango completo, tal y como se muestra en tabla 5.1. Es decir haciendo uso de residuos de celulosa obtenidos de las cáscaras. Para estas fermentaciones la materia prima se le realizó un pretratamiento para la obtener mayor cantidad de azúcares reductores.

Por otro lado, la figura 5.3 muestra los resultados obtenidos de la fermentación del mango completo con diferentes concentraciones de azúcares iniciales. En este gráfico, se puede observar que el mejor tratamiento es con la concentración inicial de 150 g/L, debido a que es posible obtener la mayor concentración de células y es en estas condiciones, donde se consumen la mayor cantidad de azúcares por la acción de las levaduras. Los azúca-

res que son metabolizados durante el proceso de fermentación es de aproximadamente del 90 % del valor inicial.

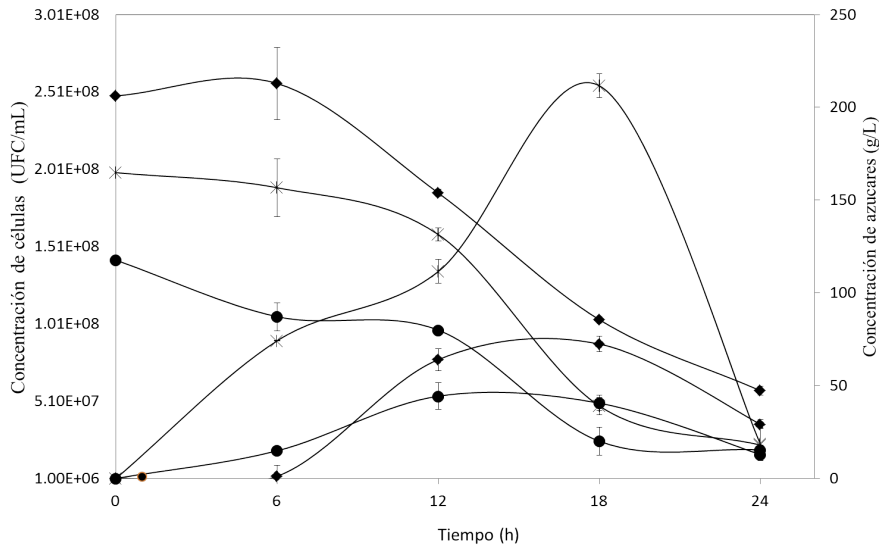


Figura 5.3: Cinética de crecimiento de la levadura *S. cerevisiae* Y2034 y reducción de azúcares durante la fermentación alcohólica del mango completo (pulpa y cascara) en tres concentraciones diferentes de azúcares reductores iniciales (◆ 200 g/L, \* 150 g/L, ● 100 g/L)

Por su parte, en la figura 5.4 se muestra el comportamiento de los sólidos solubles totales ( $^{\circ}$ Brix), temperatura y pH, donde se observa que los tratamientos con 200 y 100 g/L de azúcares reductores iniciales respectivamente, disminuyen su concentración de  $^{\circ}$ Brix inicial en más de 50 % respecto de sus valores iniciales. Sin embargo, como se demuestra en la figura 5.3 el tratamiento con 150 g/L mostró la mayor densidad de células. En estos tratamientos los azúcares fueron reducidos alrededor del 90 %. Durante el tiempo de fermentación la temperatura y pH se mantuvo estable a 30  $^{\circ}$ C y 4.5-5 respectivamente en los valores óptimos reportados.

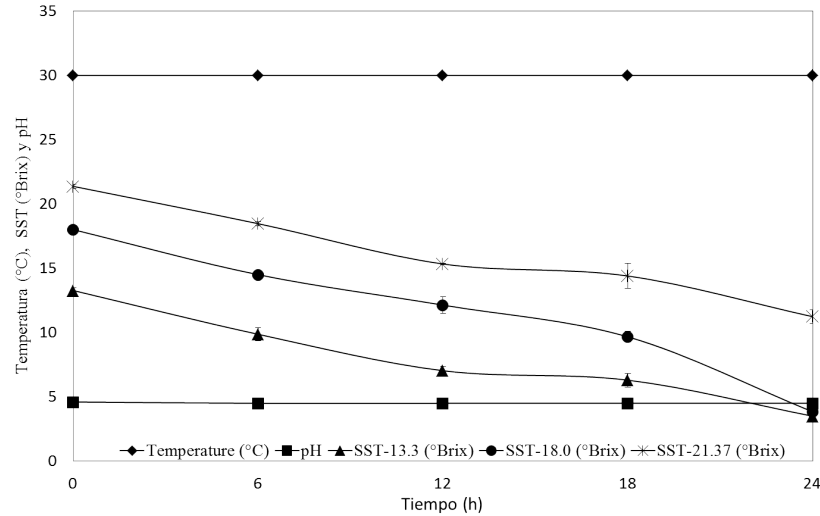


Figura 5.4: Cinética de tres diferentes concentraciones de SST °(Brix), temperatura y pH de la fermentación alcohólica del mango completo (pulpa y cascaras).

Para realizar el análisis de etanol se tomaron muestras del medio agotado, las cuales fueron analizadas por medio de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). Esta es una técnica que se utiliza para obtener un espectro infrarrojo de la dispersión de absorción, emisión, fotoconductividad o Raman de un sólido, líquido o gas.

De acuerdo al espectro de infrarrojo, se puede apreciar bandas de absorción alrededor de  $3400\text{ cm}^{-1}$  las cuales se encuentran asociadas a los modos vibracionales del grupo hidroxilo (O-H) característico de los alcoholes, a  $2900\text{ cm}^{-1}$  está la absorción de alcanos, cercano a  $2100\text{ cm}^{-1}$  se halla el grupo alquino ( $\text{C}\equiv\text{C}$ ), alrededor de  $\text{cm}^{-1}$  está la absorción de esteres y en  $1650\text{ cm}^{-1}$  se encuentra el grupo carbonilo, como se muestra en la tabla 5.2.

En la figura 5.5 se muestran los resultados del análisis, donde se observa la presencia de etanol en las diferentes concentraciones fermentables de azúcares iniciales, tomando como referencia un blanco de etanol de grado reactivo.

Tabla 5.2: Espectro infrarrojo de etanol y otros compuestos.

Grupo funcional	Longitud de onda ( $cm^{-1}$ )	Absorción
C=O	1670-1780	Carbonilo
C=O	1730-1750	Esteres
C≡C	2100-2260	Alquino
C=C	2850-2960	Alcano
O-H	3400-3640	Alcohol

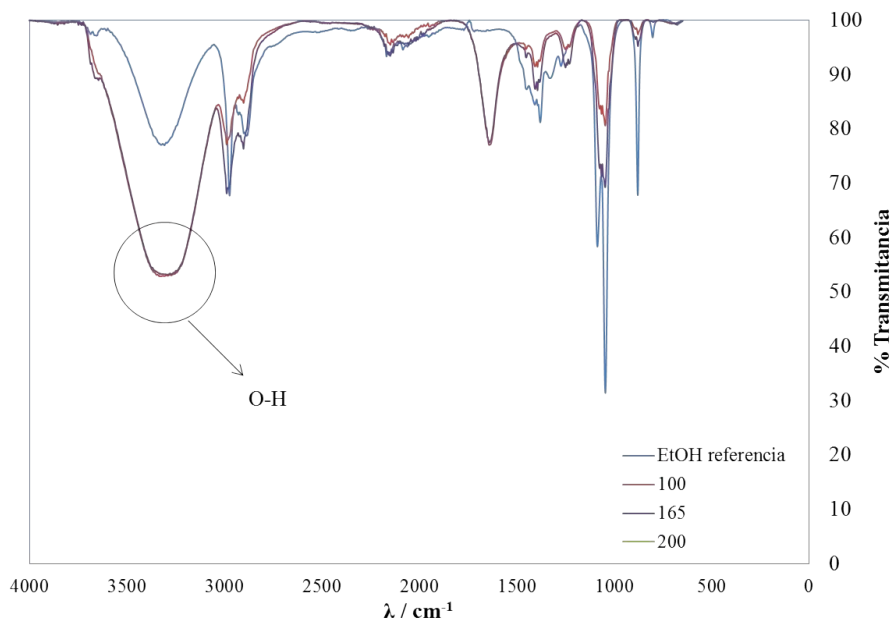


Figura 5.5: Espectro infrarrojo del análisis del bioetanol

## 5.6. Conclusiones

Basado en los resultados obtenidos en este estudio, la mejor concentración de azúcar para la fermentación del mango es de 150 g/L de azúcares reductores iniciales. Bajo estas condiciones el número de células y el consumo de azúcar muestran los mejores resultados comparado con los demás tratamientos experimentales.

La pulpa, cáscara y semilla del mango proporcionan los azú-



cares fermentables necesarios para la producción de bioetanol.

Los cambios observados en la cinética de la levadura están relacionados con la composición del medio, ya que la temperatura y el pH son estables.

Se ha establecido una metodología adecuada para la fermentación alcohólica de los residuos agrícolas de mango para la evaluación de la producción de bioetanol, mediante el análisis cinético de la biomasa.

Los análisis de FTIR mostraron presencia significativa de etanol, de acuerdo con los blancos previamente cuantificados.

### **Agradecimientos**

Se externa el agradecimiento a la ayuda técnica recibida del M.C. José Campos durante el análisis de espectrofotometría, de la Dra. Patricia Altuzar con la técnica de medición FTIR y al M.C. Gildardo Casarubias en la ayuda técnica en general.

### **Este capítulo se publicó en la revista Energy Procedia**

Santis Espinosa L. Fernando, Pérez-Sariñana Bianca Y., Saldaña-Trinidad Sergio, D. Eapen, P. J. Sebastian(2014).Evaluation of agro-industrial wastes to produce bioethanol: case study - mango (*Mangifera indica* L.). Energy Procedia ELSEVIER, 57:860–866. DOI:10.1016/j.egypro.2014.10.077

---

## Capítulo 6

Evaluación de la producción de bioetanol a partir de desechos agroindustriales de plátano (*Musa paradisiaca L.*) y mango (*Mangifera indica L.*)

---

### 6.1. Abstract

The production of bioethanol has been one of the alternative biofuel production in recent decades mainly corn and sugar cane. In this work substrates of agro-industrial waste of banana and mango are evaluated. Through the analysis of food science it was determined that the lignocellulosic materials are found in small amounts in these substrates. On the other hand results in the analysis of DNS show amounts of sugars and increase this value when the substrates are pre-treated with acid, sterilization and pasteurization, likewise HPLC analyses indicate that the main sugars are fructose and glucose. Fermentations of the substrates studied show the production of bioethanol is greater when the substrates are sterilised and begin with values pH 5, temperature 30 °C y sugar of 100 and 80 g/l for the banana and mango, respectively. Under these conditions are achieved values of performance of 64.2 and 68.7 % for banana and mango substrates, respectively. Batch fermentations were carried out during 48 hours.

**Keywords:** Mango (*Mangifera indica L.*), Banana (*Musa paradisiaca L.*); Fermentation; *S. cerevisiae* ATCC 26603; bioethanol.

## 6.2. Resumen

La producción de bioetanol ha sido una de las alternativas en la producción de biocombustibles en las últimas décadas principalmente del maíz y caña de azúcar. En este trabajo se evalúan los sustratos de los desechos agroindustriales del plátano y mango. Mediante los análisis de bromatología se determinó que los materiales lignocelulósicos se encuentran en cantidades pequeñas en estos sustratos. Por otra parte los resultados en los análisis de DNS muestran las cantidades de azúcares reductores y su incremento de este valor cuando los sustratos reciben pre-tratamientos ácido, esterilización y pasteurización, así mismo los análisis de HPLC indican que los principales azúcares son la fructosa y glucosa. Las fermentaciones de los sustratos estudiados muestran la producción de bioetanol es mayor cuando los sustratos son esterilizados e inician con valores de pH 5, temperatura 30 °C, azúcares de 100 y 80 g/L para el plátano y mango, respectivamente. Bajo estas condiciones se logran valores de rendimiento de 64.2 y 68.7 % para los sustratos del plátano y mango, respectivamente. Las fermentaciones discontinuas o batch se realizaron durante 48 horas.

**Palabras clave:** Mango (*Mangifera indica L.*), Plátano (*Musa paradisiaca L.*); fermentación; *S. cerevisiae* ATCC 26603; bioetanol.

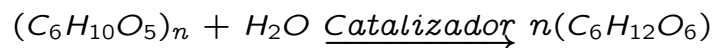
## 6.3. Introducción

La incertidumbre sobre la disponibilidad de los recursos del petróleo para satisfacer las necesidades de los combustibles, debido al incremento de población, disminución de producción, altos costos, aunado a la preocupación por el cambio climático global ha conducido a buscar vías alternas, renovables y sustentables de producción de combustibles, como es el caso de los biocombustibles que pueden sustituir los combustibles del petróleo [141], [142]. Los biocombustibles se obtienen de la biomasa mediante procesos termoquímicos como la pirolisis, la gasificación, licuefacción y extracción con fluidos supercríticos o bioquímica. La conversión bioquímica de la biomasa se completa a

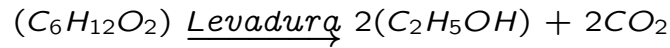
través de la fermentación alcohólica para producir combustibles líquidos. Un proceso de producción de biocombustibles basado en los residuos podría ampliar en gran medida el potencial de la industria de bioetanol que ayude a la mejor en la seguridad y estabilidad energética en este sector. Se estima que la producción de bioetanol a partir de materias primas lignocelulósicas residuales podría aportar hasta un 50 % de la demanda de combustible de [143]. La abundante disponibilidad de residuos agrícolas y la naturaleza renovable de estos sustratos, la producción de etanol a partir de dichos sustratos parece tener un gran potencial comercial [144].

El rendimiento potencial de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos varía significativamente entre las materias primas, debido al rango de variación en los componentes lignocelulósicos. Los residuos agrícolas se caracterizan por el contenido de celulosa entre 35 % y 40 %, el contenido de lignina entre 15 % y 20 % y el contenido de hemicelulosa entre 26 % y 27 %, por lo tanto para la producción de etanol es relativamente baja [145]. El uso de bioetanol ha estimado como un reemplazo parcial a la gasolina, por sus características importantes, como el número alto de octanaje, la capacidad de proporcionar oxígeno a combustible reduciendo las emisiones de CO, las cuales han sido bien documentadas [146].

Se conoce que la biomasa está formada por carbohidratos complejos, tales como lignina, hemicelulosa y celulosa. Con el fin de convertirlos en azúcar fermentables, es necesario para romper los enlaces en las cadenas del material lignocelulósico de la biomasa. Esto se hace mediante la hidrólisis utilizando enzimas o ácidos orgánico e inorgánicos de acuerdo con la siguiente reacción [147]:



La biomasa no sólo se compone lignina, hemicelulosa y celulosa; Por lo tanto, la eficiencia de la hidrólisis es menos de 100 %. Se conoce que las levaduras o bacterias se pueden utilizar en el proceso de fermentación. En condiciones anaeróbicas, donde la ruta metabólica de estos microorganismos convierten los azúcares en etanol, CO<sub>2</sub> y energía, a través de la siguiente reacción [147]:



Se ha reportado que el  $CO_2$  producido durante la fermentación no contribuye a los gases de efecto invernadero, ya que proviene de la biomasa y se recicla durante el crecimiento de los cultivos [148].

La *S. cerevisiae*, es la levadura generalmente utilizada en los procesos de fermentación, sin embargo, este microorganismo no es capaz de metabolizar la pentosa producido durante la hidrólisis, ya que solo procesan las hexosa. Las pentosa por su parte puede ser procesados por otros microorganismos, tales como las bacterias, *Candida shehatae* o *Pichia stipitis*. Por otro lado existen levaduras genéticamente modificadas que se han desarrollado a partir de *S. cerevisiae* y *Zymomonas mobilis*, que son capaces de metabolizar pentosa y hexosa [149].

La eficiencia máxima de reacción durante el proceso de fermentación es 51 %. Sin embargo, otros compuestos son producidos durante el proceso, tales como: aldehídos, alcoholes pesados, ácidos grasos, la biomasa residual, etc. Por lo tanto, sólo es posible alcanzar aproximadamente el 90 % de esta conversión teórica [150].

De la literatura se sabe que las condiciones de fermentación como la temperatura y pH tienen gran impacto en la producción de etanol [151], [152]. Se ha informado que las temperaturas óptimas de crecimiento de las levaduras (*S. cerevisiae*) son de 28 a 30 °C. A bajas temperaturas, el rendimiento de alcohol es mayor. Sin embargo los metabolitos secundarios de la fermentación aumentan a medida que la temperatura incrementa. Se reporta que la variación en los niveles de alcohol puede estar relacionada a la diferencia en sus óptimas condiciones físico-químicas [153]. Por otro lado, las fermentaciones que se llevan a cabo en medios excesivamente ácido la tasa de crecimiento de la levadura se vuelve lenta y se inhibe. Las concentraciones de alcohol se ven favorecidas a medida que aumenta de los niveles de inóculo. El glicerol es el subproducto más abundante de la fermentación después de etanol y dióxido de carbono.

### 6.3.1. El plátano o banano (*Musa paradisiaca* L.)

El plátano (*Musa paradisiaca* L.), también conocido como banano tiene su origen en Asia meridional. Es una fruta tropical que se encuentra entre los cultivos más importantes de alto consumo en países de África, Latinoamérica y el Caribe. Por lo cual, es una de las frutas más popular del mundo y alimentos básicos importante, junto con el arroz, el trigo y el maíz. La producción de plátano en 2013 fue de 105,956,705.00 toneladas [82].

La India, Filipinas y China son los tres más grandes productores de plátano con cerca de 27. 9, 9 y 9 millones de toneladas, respectivamente. México ocupó el décimo lugar con 2.1 millones de toneladas en el 2013 [82],[72],[5]. En México, el estado de Chiapas lidera el mayor volumen de producción de plátano, con 743,293.00 toneladas por año. Seguido por el estado de Tabasco con 541,986 toneladas por año [62].

Los plátanos o bananos existen en distintas variedades que varían en tamaño y peso (plátano macho con 200 g o más y bananito oscila entre 100 y 120 g). Su color de piel puede ser amarillo verdoso, amarillo, amarillo-rojizo o rojo. Los plátanos destacan por su contenido de hidratos de carbono, por lo que su valor calórico es elevado. Los nutrientes más representativos son el potasio, el magnesio, el ácido fólico y sustancias de acción astringente. Se ha reportado que contienen una gran cantidad de carbohidratos y materia lignocelulósico, tales como: celulosa, hemicelulosa y lignina.

Este fruto contiene entre 50 y 60 % de almidón [75],[76], y que cambian dramáticamente durante la maduración, es decir la cantidad de almidón se reduce durante esa etapa [77].

El contenido medio de almidón se reduce de 70 a 80 % en el período pre-climaterio (previo a la descomposición del almidón) a menos de 1 % al final de la transformación del almidón a azúcares, mientras que estos azúcares, principalmente sacarosa, se acumulan a más del 10 % de peso de la fruta fresca. Consecuentemente, el contenido de azúcar soluble total puede alcanzar el 16 % o más del peso fresco de la fruta (alrededor del 80 % del contenido de la fruta es agua), lo que indica una alta tasa de conversión [78].

### 6.3.2. El mango (*Mangifera indica L.*)

El mango (*Mangifera indica L.*) pertenece a la familia Anacardiáceas y se ha documentado que existen más de 1000 variedades en todo el mundo [60], se diferencian entre sí por la zona de cultivo, el color de la piel, la pulpa, la variedad del sabor, el aroma del fruto y el tamaño, entre otras características [13]. Esta fruta es originaria del sureste de Asia, específicamente de la región Indo- Birmánica [12].

La fruta de mango (*Mangifera indica L.*) ocupa la segunda posición como cultivos tropicales a nivel mundial, en cuanto a su producción, sólo por detrás de los plátanos. En la actualidad, se cultiva en una superficie aproximada de 3.7 millones de hectáreas en el mundo [61], cultivado principalmente en 85 países, en 2013 se registró una producción de 42.66 millones de toneladas [72].

Asia y los países orientales produjeron el 72 % de producción total del mundo, seguido con el 12.2 % en América, 10.5 % en África y con el 0.1 % en oceánica. Así, el 72 % de producción lo contempla Asia, China, India, Filipinas, Pakistán y Tailandia, el 12.2 % en América por México y Brasil, mientras que el 10.5 % en el continente africano [72]. México ocupa el primer lugar a nivel mundial como el mayor exportador de mango con cerca de 313 mil toneladas que equivale a 40.5 % de la exportación mundial [62]. La producción nacional de mango durante el ciclo de cosecha de 2013, se estimó en una superficie cosechada de 178,262.95 hectáreas con una producción de 1,603,809.53 toneladas [5].

Dependiendo de las variedades de mango, la cáscara compone aproximadamente el 7 al 24 % del peso total de una fruta [64], mientras que aproximadamente 20 % lo constituye la semilla, el resto es pulpa [60]. Se ha reportado que las cáscaras de mango presenta contenidos importantes de celulosa, hemicelulosa, lípidos, proteínas, enzimas y pectina [65],[66],[67].

La composición fisicoquímica de la pulpa de mango es principalmente: agua con 72.1 a 85.5 %, %, fibra cruda de 0.30 a 2.38 %, ceniza de 0.29 a 1.13 %, sólidos solubles totales con 14.2 a 14.5 %, Valor de pH de 4.0 a 4.4 %, acidez titulable (ácido cítrico) de 0.25 a 0.32 %, ácido ascórbico con 5.56 (mg/100 g), azúcares totales de 12.6 a 13.1 %, azúcares reductores de 1.9 a 2.5 %, azúcares no reductores de 10.5 a 10.7 y carotenoides

con 3.95 (mg/100 g) [69], [70], [71], [68].

## 6.4. Materiales y métodos

### 6.4.1. Sustratos

Los plátanos (*Musa paradisiaca* L.) amarillos maduros, se obtuvieron de residuos agrícolas de plantaciones del estado de Chiapas, México. Por otra parte el mango (*Mangifera indica* L.) variedad Ataulfo, maduro, fue obtenido de los desechos de las plantaciones agrícolas del estado de Chiapas, México. Ambos sustratos fueron deshidratados mediante el uso de secadores solares solar en el laboratorio de secado del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM). Fue removido el 94.15 % y 95.6 % de humedad, respectivamente. Los deshidratados fueron pulverizados a un polvo fino con una licuadora tipo industrial, seguido del tamizado a través de un tamiz de 0.25 mm.

### 6.4.2. Microorganismo y condiciones de cultivo

La levadura *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 26603 fue proporcionada por el cepario del Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia (IBUN-UNAL). Las levaduras fueron crecidas en medio de cultivo estéril Agar YM, compuesto por extracto de malta, extracto de levadura, dextrosa, peptona y agar en concentraciones de 3, 3, 10, 5 y 20 % (P/V), respectivamente. La levadura fue crecida en cajas Petri y tubos inclinados, almacenadas a 4 °C por 5 días. Para la preparación del inóculo, se añadieron células en matraces de 250 mL con 100 mL de cultivo en caldo YM compuesto por 3 % de extracto de malta, 3 % de extracto de levadura, 10 % de dextrosa y 20 % peptona, esterilizados (121°, 20 min, 15 psi.). Los matraces se incubaron en un agitador rotatorio a 30 °C y 150 rpm durante 24 h para permitir el crecimiento de células en fase exponencial, se centrifugaron a 10,000 rpm durante 10 min y se resuspendieron en el medio de fermentación. El protocolo de preparación fue de acuerdo con la literatura [154],[155],[156].



### 6.4.3. Análisis proximal

Se analizó la composición de los sustratos utilizando protocolos estándar de bromatología [131], [132], [133].

El análisis fue realizado bajo las siguientes condiciones:

Condiciones ambientales: Humedad relativa entre 40-65 %, temperatura ambiente: 16-20.5°C.

Humedad: Peso constante de crisoles y secado de las muestras en estufa 100 °C/4 h.

Cenizas: Peso constante de crisoles en estufa 100°C/4 horas e incineración en mufla a 550 °C/6 h.

FDN. Digestión con detergente neutro en parrilla de calentamiento y filtración en crisol gooch.

FDA. Digestión en parrilla de calentamiento con detergente ácido y filtración en crisol gooch.

Lignina. Oxidación con permanganato de potasio.

Celulosa. Incineración a 550 °C/3 h.

Observaciones: El valor de hemicelulosa se obtiene por diferencia del % FDN menos % FDA.

### 6.4.4. Pretratamiento

Ambos sustratos (plátano y mango) fueron sometidos a tres diferentes tratamientos de hidrólisis, pasteurización, esterilización y ácida de una muestra conocida (10 g s.s./100 mL de agua destilada) en cada caso. La pasteurización se realizó bajo las siguientes condiciones: 65 °C, 30 min, seguido de 20 min a 0 °C. La esterilización se llevó a cabo en una autoclave, bajo las condiciones conocidas, 121 °C, 20 min, 15 psi. El pretratamiento ácido se realizó utilizando ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) grado reactivo al 4 % (v/v). Las condiciones fueron 60 °C, 20 min. Para clarificar el medio las muestras obtenidas de cada sustrato perteneciente a cada pretratamiento, respectivamente, fueron centrifugadas a 5500 rpm, 10 °C, 5 min y el sobrenadante fue almacenado a -20 °C para su análisis posterior.

### 6.4.5. Análisis de sustratos y productos

Los azúcares de los sustratos pretratados, se cuantificaron por HPLC (Agilent Technologies, EE.UU.) usando una columna

Aminex HPX-87C (300 x 7.8 mm). El horno de la columna y RID se mantuvieron a 80 y 65 °C, respectivamente. Se usó agua des-ionizada desgasificada como fase móvil con un flujo de 0.6 mL/min. Las muestras se diluyeron, se centrifugaron a 14,000 rpm por 10 minutos a 5 °C. El sobrenadante fue filtrado con el uso de filtros (GVS-Single Filter) de 0.45  $\eta$ m y almacenado a -20 °C. Los picos se detectaron por el detector RI (RID-10A) y cuantificados sobre la base de área y tiempo de retención de los estándares (sacarosa, glucosa, fructosa y xilosa). Las corridas fueron de 20 min. [157].

Por otra parte mediante la técnica de Miller, utilizado reactivo conocido como DNS (ácido 3,5-dinitrosalicílico) se cuantificó los azúcares reductores totales de los sustratos pretratados. Para la curva de calibración se utilizó fructosa como solución patrón (estándar) a una concentración de 1 g/L. Se utilizó un espectrofotómetro marca Spectronic 20 Genesys (USA), el cual se ajustó a una longitud de onda de 540  $\eta$ m para el análisis de las muestras [122].

El análisis de etanol se midió utilizando sistema HPLC (Agilent Technologies, EE.UU.) y la columna Aminex HPX-87C (300 x 7.8 mm). Para este caso, nuevamente se desgasificó 0.003 N de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) que se fue usado en la fase móvil, el flujo se mantuvo a 0,5 mL/min. Todas las demás condiciones de operación se mantuvieron en los mismos valores que fue mencionado en el caso del análisis de azúcar. Los picos se detectaron por el detector RI (RID-10A) y cuantificados sobre la base de área y tiempo de retención de los estándares de etanol. Las corridas fueron de 30 min. [157].

#### 6.4.6. Fermentación

Para desarrollar la fermentación del mango y plátano, fueron suspendidos los polvos de sólido seco en agua destilada a una concentración de sólido-agua de 10 g s.s./100 mL. El sistema fermentación tipo batch, se realizó de acuerdo con las condiciones del diseño experimental (tabla X). Para los experimentos se utilizaron en frascos serológicos de 150 mL estériles con 100 mL de medio que se ajustó con 0.2 % de extracto de levadura, 0.2 % de peptona, 0.1 % de  $MgSO_4$  y 1.5 % de  $(NH_4)_2SO_4$ , en condiciones de esterilidad. La concentración inicial de células se

ajustó a una densidad óptica (DO 600  $\eta\text{m}$ ) de 0.2. Los experimentos se realizaron con agitación constante a 200 rpm, 30 °C, durante 48 h. Las muestras de 1 mL fueron tomadas cada 6 y 12 h para el análisis de azúcares y alcohol, respectivamente. Las muestras se centrifugaron a 1,000 rpm, 5 °C, 10 min. El sobrenadante fue filtrado con el uso de filtros (GVS-Single Filter) de 0.45  $\eta\text{m}$  y almacenado a -20 °C para su posterior análisis.

Mediante el diseño experimental se conocieron datos de producción de bioetanol o PB, que corresponde a la cantidad de etanol producido por litro de medio de cultivo a las 48 h de fermentación,  $R_{P/S}$ , el rendimiento del proceso, es la cantidad de etanol producido por azúcar consumido y TP, la tasa de producción que se refiere a la cantidad de etanol producido por litro y por hora. Estos parámetros fueron obtenidos mediante las ecuaciones 6.1 y 6.2, respectivamente.

$$R_{P/S} = \frac{P_f - P_i}{S_f - S_i} \quad (6.1)$$

$$TP = \frac{PB}{t} \quad (6.2)$$

Dónde:  $R_{P/S}$ , es el rendimiento del proceso,  $P_f$ , es la concentración final de bioetanol (g/L),  $P_i$ , es la concentración inicial de bioetanol (g/L),  $S_f$ , es la concentración final de azúcares (g/L),  $S_i$ , es la concentración inicial de azúcares (g/L),  $TP$ , es la tasa de producción (g/L h),  $PB$ , es el bioetanol producido (g/L) y,  $t$ , es el tiempo (h).

#### 6.4.7. Diseño experimental

La estrategia experimental para realizar la fermentación alcohólica del mango y plátano, de acuerdo con los objetivos planteados, se realizó mediante el software Design-Expert 8.0.7.1 (Versión 8.0.3, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, EE.UU.). Este software se fundamenta con la Metodología de Superficies de Respuesta (RSM) basado en el diseño compuesto central (CCD)  $2_2$  factorial completo generó 27 ensayos, para evaluar el efecto del pH (factor X1); tratamientos ácidos, esterilizados y

pasteurizados (factor X2); azúcares (factor X3), ) como variables independientes de la fermentación. El propósito inicial de esta técnica es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta (tabla 6.3).

## 6.5. Resultados y discusiones

### 6.5.1. Análisis bromatológicos del plátano y mango

El análisis de la composición proximal del plátano, sugiere los carbohidratos simples y almidón son los principales constituyentes de este fruto. En la tabla 6.1 muestra las concentraciones de cenizas, hemicelulosa, celulosa y lignina en bajas concentraciones, otros estudios (tablas 2.9 y 2.10) reportan concentraciones similares a obtenidos. La variación se debe a las etapas de maduración de este fruto en la que son intervenidas para su análisis.

Tabla 6.1: Análisis de bromatología, composición del mango y plátano

Propiedades (g/100 g)	Plátano	Mango
Humedad	7.3449	8.2582
Cenizas	4.3799	2.43
Hemicelulosa	9.5381	3.6855
Celulosa	2.48	6.54
Lignina	2.68	8.02

g/100 g es equivalente al porcentaje (%)

### 6.5.2. Análisis de azúcares por DNS

El análisis de azúcares reductores realizado para las muestras, que constituían de 10 g del polvo de sólido seco, los cuales se diluyeron en 100 mL de agua destilada, muestran concentración altas de azúcares para ambos sustratos en g/L. Los tratamientos con ácido fueron los de mayor concentración de azúcares reductores, seguido por los tratamientos sometidos a esterilización. Por su parte los tratamientos pasteurizados son los de menor concentración. La tabla 6.2 sintetiza los resultados obtenidos.

Tabla 6.2: Análisis de azúcares reductores totales.

Tratamientos	Azúcares reductores (g/L)	
	Plátano	Mango
Ácido	55.45	46.56
Esterilizado	35.13	25.95
Pasteurizado	32.70	20.85

Los datos de absorbancia de los análisis fueron calculados con la ecuación resultante de la curva de calibración de la fructosa como se muestra en la figura 6.1. El coeficiente  $R^2$  fue de 0.997, lo que indica que el ajuste es casi lineal, debido a este valor se sabe que existe una dependencia funcional lineal entre las variables.

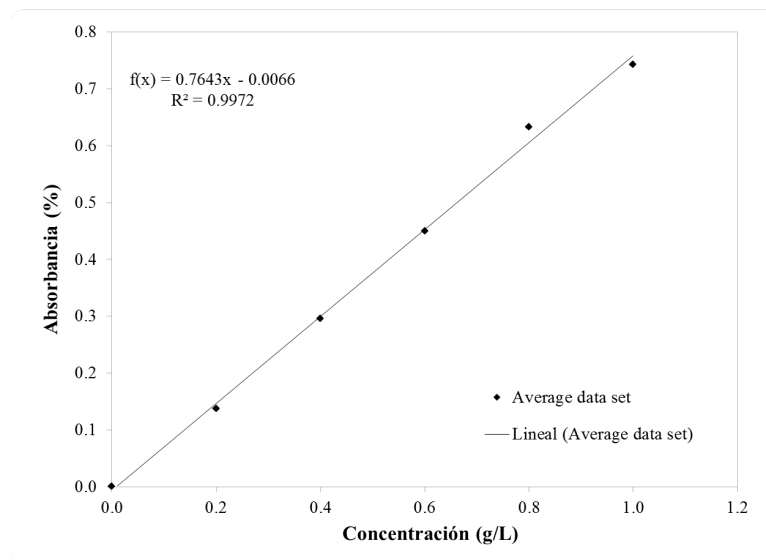


Figura 6.1: Curva de calibración de fructosa

### 6.5.3. Análisis de Carbohidratos por HPLC

Los resultados de los análisis de las muestras por HPLC, muestran que la fructosa, glucosa y sacarosa, son los principales Carbohidratos presentes en estos sustratos. En la tabla 6.3 se muestran los tiempos de retención de los estándares y la concentración resultante del área en los picos de los cromatogramas. Los

picos no cuantificados se relacionan a las pentosas (arabinosa, xilosa) y hexosas como manosa y galactosa que se encuentran en bajas concentraciones en estos sustratos reportados por otros autores.

Tabla 6.3: Análisis de carbohidratos del plátano y mango por HPLC.

Carbohidratos (g/L)	Plátano	Mango	Tiempo de retención (min)
Fructosa	16.55	14.615	12.794
Glucosa	15.01	6.914	9.610
Sacarosa	5.5	1.306	7.868
Total	37.05	22.835	

La figura 6.2 muestra el cromatograma y tiempos de retención de los patrones de los azúcares conocidos (fructosa, glucosa y sacarosa).

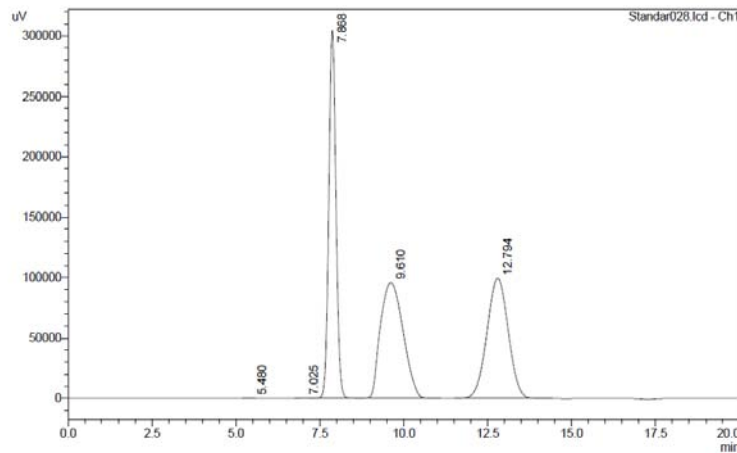


Figura 6.2: Cromatograma de los patrones de carbohidratos.

Por otro lado en las figuras 6.3 y 6.4 se observan los cromatogramas correspondientes al análisis del plátano y mango, respectivamente.

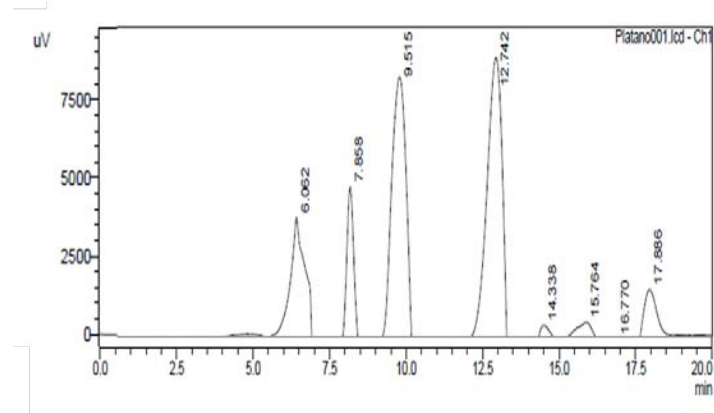


Figura 6.3: Cromatograma de la muestra de plátano.

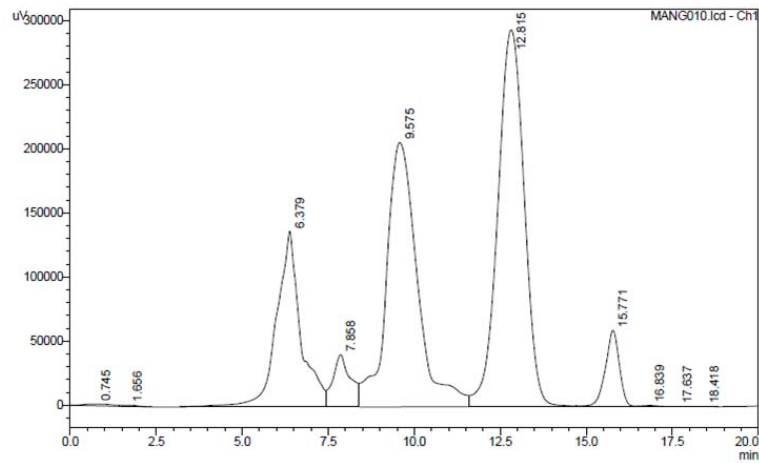


Figura 6.4: Cromatograma de la muestra de mango.

## 6.6. Fermentación del plátano y mango

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del diseño experimental de la fermentación alcohólica del plátano y mango, tales como *PB*, *R<sub>P/S</sub>* y *TP*, se muestran en la tabla 6.4 y 6.5, respectivamente. En estas tablas los tratamientos intervenidos con ácido, esterilizado y pasteurizado se denotan por las iniciales A, E y P, respectivamente.

Tabla 6.4: Diseño experimental y resumen de variables dependientes en la producción de bioetanol: caso de estudio plátano.

No. Ensayos	Factor 1 pH	Factor 2 Tratamientos	Factor 3 Azúcares (g/L)	Bioetanol (g/L)	$R_{p/s}$ (%)	$TP$ (g/L h)
1	4,5	A	125,95	55,18	43,8110	1,150
2	4,5	A	125,95	44,556	42,3986	1,113
3	4,5	A	125,95	53,401	33,7539	0,886
4	5,0	E	98,65	42,513	43,0948	0,886
5	5,0	E	98,65	38,533	39,0603	0,803
6	5,0	E	98,65	41,131	41,6939	0,857
7	5,5	P	61,05	32,343	52,9779	0,674
8	5,5	P	61,05	27,051	44,3096	0,564
9	5,5	P	61,05	29,562	48,4226	0,616
10	4,5	A	125,95	43,703	34,6987	0,910
11	4,5	E	98,65	62,651	63,5084	1,305
12	4,5	P	61,05	31,733	51,9787	0,661
13	5,0	A	125,95	47,469	37,6888	0,989
14	5,0	E	98,65	58,632	59,4344	1,222
15	5,0	P	61,05	21,137	34,6224	0,440
16	5,5	A	125,95	46,265	36,7328	0,964
17	5,5	E	98,65	60,923	61,7567	1,269
18	5,5	P	61,05	25,724	42,1360	0,536
19	4,5	A	125,95	39,351	31,2434	0,820
20	4,5	E	98,65	49,615	50,2940	1,034
21	4,5	P	61,05	34,111	55,8739	0,711
22	5,0	A	125,95	47,032	37,3418	0,980
23	5,0	E	98,65	64,261	65,1404	1,339
24	5,0	P	61,05	31,024	50,8174	0,646
25	5,5	A	125,95	43,269	34,3541	0,901
26	5,5	E	98,65	51,027	51,7253	1,063
27	5,5	P	61,05	29,201	47,8313	0,608

Los valores obtenidos de la fermentación discontinua para el caso del plátano, demuestran que los ensayos esterilizados con valores iniciales de pH 5, concentración de azúcares de 98.6 (g/L) en promedio y temperatura estable de 30 °C, tienen la mejor tasa de conversión de azúcares a bioetanol con 65.1 %, concentración de 64.2 g/L. En estos ensayos se logra concentrar más azúcares comparado cuando los sustratos no son pre-tratados. Sin embargo el pre-tratamiento ácido libera mayores contracciones de azúcares. No obstante fueron estos ensayos los de menor producción de bioetanol. Esto se relacionó en la variación del pH durante el proceso de fermentación, debido a que en medios ácidos las levaduras se inhiben y en consecuencia la producción de bioetanol disminuye. Los tiramientos pasteurizados por su parte muestran producción aceptable comparada con los azúcares iniciales y la tasa de producción de los de más ensayos. De acuerdo con los objetivos planteados en evaluar la producción de bioetanol a partir de estos sustratos, se realizó la réplica con las mismas condiciones de los ensayos que fue seleccionado



con mejor producción de bioetanol.

Por otra parte para el caso de la fermentación discontinua del sustrato de mango, de acuerdo con el diseño experimental (tabla 6.5), temperatura de 30 °C, variaciones de pH y azúcares iniciales. Se obtuvieron valores de 55.3 (g/L), 68.7 %y 1.1 (g/L h), correspondientes PB,  $R_{p/s}$  y TP, respectivamente. Estos valores se obtienen la concentración inicial de azúcares de 80.5 (g/L), correspondientes a los ensayos con pretratamiento de esterilización. De manera similar con los ensayos con plátano, los pretratamientos liberan mayor cantidad de azúcares principalmente por los pre-tratamientos ácidos, esterilización y pasteurización, respectivamente. Los ensayos que arrojaron mejores resultados de producción de bioetanol fueron repetidos para establecer y validar los valores arrojados.

Tabla 6.5: Diseño experimental y resumen de variables dependientes en la producción de bioetanol: caso de estudio mango.

No. Ensayos	Factor 1 pH	Factor 2 Tratamientos	Factor 3 Azúcares (g/L)	Bioetanol (g/L)	$R_{p/s}$ (%)	TP (g/L h)
1	4.5	A	105.099	35.18	33.4732	0.733
2	4.5	A	105.099	24.556	29.5931	0.648
3	4.5	A	105.099	31.102	50.6123	1.108
4	5,0	E	80.521	53.193	66.0610	1.108
5	5,0	E	80.521	49.203	61.1058	1.025
6	5,0	E	80.521	51.027	63.3710	1.063
7	5,5	P	67.145	40.833	60.8132	0.851
8	5,5	P	67.145	38.933	57.9835	0.811
9	5,5	P	67.145	40.01	59.5875	0.834
10	4.5	A	105.099	20.703	19.6986	0.431
11	4.5	E	80.521	52.516	65.2203	1.094
12	4.5	P	67.145	40.023	59.6068	0.834
13	5,0	A	105.099	14.849	14.1286	0.309
14	5,0	E	80.521	55.362	68.7547	1.153
15	5,0	P	67.145	41.137	61.2659	0.857
16	5,5	A	105.099	24.565	23.3732	0.512
17	5,5	E	80.521	43.193	53.6419	0.900
18	5,5	P	67.145	42.174	62.8103	0.879
19	4.5	A	105.099	21.359	20.3227	0.445
20	4.5	E	80.521	46.685	57.9787	0.973
21	4.5	P	67.145	39.111	58.2486	0.815
22	5,0	A	105.099	27.092	25.7776	0.564
23	5,0	E	80.521	54.961	68.2567	1.145
24	5,0	P	67.145	31.024	46.2045	0.646
25	5,5	A	105.099	23.952	22.7899	0.499
26	5,5	E	80.521	40.91	50.8066	0.852
27	5,5	P	67.145	38.562	57.4309	0.803

El rendimiento, tasa de producción y producción de bioetanol son parámetros que se utilizan para evaluar las fermentaciones. En este trabajo no se realizó la optimización, solo se evalúa la producción a partir de los desechos, las concentraciones obte-

nidas son similares a los reportados por otros autores [13]. Por otro lado se ha reportado que una alta producción de bioetanol y alto rendimiento no es viable, debido a altas concentraciones de sustrato, causa inhibición al microorganismo y por lo tanto la producción disminuye [12], [158].

La figura 6.5 muestra gráficamente el comportamiento cinético del proceso de fermentación. La variación de los valores de azúcares y concentración de bioetanol, donde la concentración del bioetanol aumenta a medida que los azúcares decrecen para los dos sustratos. Así mismo, se comparan la producción de bioetanol por el plátano y mango bajo las condiciones antes mencionadas. Los productos secundarios como es el glicerol no fue cuantificado. Sin embargo, no se descarta que exista baja concentración de este metabolito no deseado, ya que la mayoría de las fermentaciones donde se utiliza la levadura, *S. cerevisiae* se demuestra la formación de glicerol [159] [160].

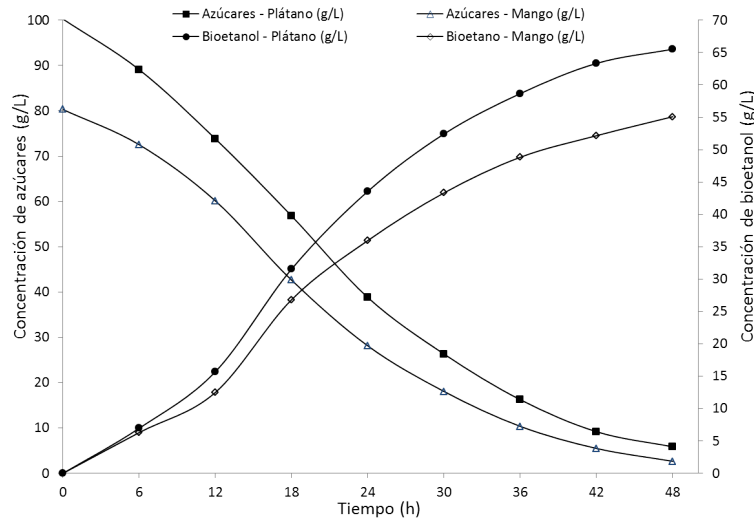


Figura 6.5: Producción de bioetanol y consumo de azúcares durante la fermentación discontinua de los sustratos del plátano y mango.

Los valores obtenidos en el proceso de la fermentación bajo estas condiciones son comparables con los reportados por otros autores con sustratos diferentes como se muestra en la tabla 6.6

Tabla 6.6: Rendimientos en la producción de bioetanol de diferentes sustratos y resultados en este estudio.

Sustrato	Rendimientos	Referencia
Pulpa de Plátano.	38 %	[40]
Manzana	79 .8 %	[39]
Tomate	72.4 %	[39]
Mango	82.8 %	[39]
Piña	75.8 %	[39]
Caña de azúcar	88 %	[43]
Plátano	64.2 %	Este estudio
Mango	68.7 %	Este estudio

## 6.7. Conclusiones

Los frutos de plátano y mango son residuos agroindustriales abundantes constituidos principalmente por fructosa, glucosa y pequeñas concentraciones de fructosa, bajas concentraciones de materia de celulosa, hemicelulosa y lignina.

Los pre-tratamientos en los sustratos mediante acciones acidas y térmicas favorecen a las concentraciones de azúcares iniciales en base un patrón de peso/volumen, comparados con los valores por DNS y HPLC.

La metodología de superficie de respuesta se empleó para desarrollar los diseños experimentales de las fermentaciones y producir bioetanol mediante la levadura *S. cerevisiae* ATCC 26603. No así, para optimizar el proceso.

Las mejores condiciones para la producción de bioetanol fueron encontradas con: pH de 5, temperatura de 3 °C, concentración inicial de azúcares en promedio de 100 y 80 g/L en condiciones de esterilización, tanto para el sustrato de plátano como del mango.

Para el caso del plátano los valores de rendimientos de producción de bioetanol fue de 64.2 %, concentración de 65.1 g/L y una tasa de producción de 1.3 g/Lh.

Para el caso del mango los valores de rendimientos de producción de bioetanol fue de 68.7 %, concentración de 55.3 g/L y una tasa de producción de 1.1 g/Lh.

Bajo esta metodología y con las condiciones dadas, los resul-

tados en producción de la bioetanol con los sustratos de plátano y mango, demuestran que son materias primas potencialmente aprovechables para la producción de bioetanol.

### **Agradecimientos**

Se externa el agradecimiento al Instituto de Biotecnología. Al Laboratorio de Tecnología de Enzimas y al Departamento de Química pertenecientes a la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. A la Dra. Ana Lucía por los análisis de HPLC. Al Mtro. Mauricio Bernal por su colaboración en proporcionar la levadura y la técnica de morfología. Al Dr. Gustavo Buitrago Hurtado por el asesoramiento durante la experimentación. Al Dr. Humberto Zamora y la Técnico Claudia Parra por su colaboración en los análisis de proximales Y en general al Dr. Carlos Alberto Guerrero Fajardo del Departamento de química por su aceptación en la pasantía y asesoramiento durante el desarrollo de este trabajo.

**Este capítulo se encuentra en proceso de publicación**



---

# Conclusiones

---

- En este trabajo de investigación se implementó una metodología para la producción de bioetanol a partir de los desechos agroindustriales del mango y plátano.
- El análisis proximal del plátano y mango indican que los azúcares simples son los de mayor proporción en las frutas, debido a que contienen bajas concentraciones de materia lignocelulosa.
- Con el uso de secadores solares, se logró remover el 95.6 % de humedad del mango y 94.15 % de humedad para el plátano. El tiempo de secado fue, de 28 h.
- El menor espesor de las obleas tanto del plátano como el mango, favorece a velocidad el proceso de secado.
- La velocidad de secado está asociada a la concentración de la radiación captada por el área del secador y a la temperatura estable de secado.
- La temperatura y radiación promedio de secado fueron de 46.6 °C y 758.6  $W/m^2$ , respectivamente.
- La concentración de azúcares reductores totales en el mango fue de 20 g/L, mientras que para el plátano fue de 29.9 g/L. Para ambos casos se utilizó 10 g de materia seca diluido en 100 mL de agua destilada.

- La energía solar aprovechada en los secadores solares permiten remover humedad de productos y son una de las mejores alternativas para la conservación de productos alimenticios o para otros fines, así como también favorecen al balance de energía en el proceso de transformación y al entorno ambiental, al no depender de energía proveniente de los hidrocarburos.
- Durante la fermentación del mango, la mejor concentración de azúcares iniciales para la fermentación alcohólica es de 150 g/L. Bajo estas condiciones el número de células y el consumo de azúcares muestran los mejores resultados.
- La pulpa, cáscara y semilla del mango proporcionan los azúcares fermentables necesarios para la producción de bioetanol.
- Los cambios observados en la cinética de la levadura están relacionados con la composición del medio, ya que la temperatura y el pH son estables.
- Se ha establecido una metodología adecuada para la fermentación alcohólica de los residuos agrícolas de mango para la evaluación de la producción de bioetanol, mediante el análisis cinético de la biomasa.
- Los análisis de FTIR mostraron presencia significativa de etanol, de acuerdo con los blancos previamente cuantificados.
- Los frutos de plátano y mango son residuos agroindustriales abundantes constituidos principalmente por fructosa, glucosa y pequeñas concentraciones de fructosa, bajas concentraciones de materia de celulosa, hemicelulosa y lignina.
- Los pre-tratamientos en los sustratos mediante acciones ácidas y térmicas favorecen a las concentraciones de azúcares iniciales en base un patrón de peso/volumen, comparados con los valores por DNS y HPLC.
- La metodología de superficie de respuesta se empleó para desarrollar los diseños experimentales de las fermentacio-

nes y producir bioetanol mediante la levadura *S. cerevisiae* ATCC 26603. No así, para optimizar el proceso.

- Las mejores condiciones para la producción de bioetanol fueron encontradas con: pH de 5, temperatura de 3 °C, concentración inicial de azúcares en promedio de 100 y 80 g/L en condiciones de esterilización, tanto para el sustrato de plátano como del mango.
- Para el caso del plátano los valores de rendimientos de producción de bioetanol fue de 64.2%, concentración de 65.1 g/L y una tasa de producción de 1.3 g/Lh.
- Para el caso del mango los valores de rendimientos de producción de bioetanol fue de 68.7 %, concentración de 55.3 g/L y una tasa de producción de 1.1 g/Lh.
- Bajo esta metodología y con las condiciones dadas, Los resultados en producción de la bioetanol con los sustratos de plátano y mango, demuestran que son materias primas potencialmente aprovechables para la producción de bioetanol.





---

# Anexos

---

## Producción científica

### Artículos

Santis-Espinosa L. Fernando, Blanca Yadira Perez-Sariñana, Carlos A. Guerrero-Fajardo, Sergio Saldaña-Trinidad, Erick C. López-Vidaña, and P.J. Sebastian. Drying Mango (*Mangifera indica* L.) with Solar Energy as a Pretreatment for Bioethanol Production. *BioResources* (2015). 10 (3), 6044-6054. ISSN: 1930-2126

Santis Espinosa L. Fernando, Pérez-Sariñana Bianca Y., Saldaña-Trinidad Sergio, D. Eapen, P.J. Sebastian. Evaluation of agro-industrial wastes to produce bioethanol: case study - mango (*Mangifera indica* L.). *International Journal Energy Procedia*. *Energy Procedia* Volume 57, 2014, Pages 860–866. ISSN: 1876-6102

Pérez-Sariñana, B. Y., Saldaña-Trinidad, S., Guerrero-Fajardo, C. A., Santis-Espinosa, L. F., and Pathiyamattom-Joseph, S. .<sup>A</sup> simple method to determine bioethanol production from coffee mucilage, verified by HPLC ". *BioRes* (2015). 10(2), 2691-2698. ISSN: 1930-2126

Pérez-Sariñana Bianca Yadira, Saldaña-Trinidad Sergio, S. E. Luis Fernando, P. J. Sebastian, D. Eapen. *Bioethanol Production*

from Coffee Mucilage. Energy Procedia Volume 57, 2014, Pages 950–956. ISSN: 1876-6102

### **Participación en congresos**

XXIV International Materials Research Congress - IMRC. Drying mango (*Mangifera Indica L.*) and platano with solar energy as a pretreatment for bioethanol production. Santis-Espinosa L. Fernando, Saldaña-Trinidad Sergio, Erick C. López-Vidaña, Carlos A. Guerrero Fajardo, Perez-Sariñana Bianca Yadira, P.J. Sebastian. Agosto 2015t, Cancún, Mexico.

5th International Conference on Algal Biomass, Biofuels and Bioproducts. ElsevierConferences. Kinetic analysis of drying mango (*Mangifera Indica L.*) by solar energy as a pretreatment for bioethanol production. Santis-Espinosa L. Fernando, Saldaña-Trinidad Sergio, Carlos A. Guerrero Fajardo, P.J. Sebastian. Junio 2015, San Diego, USA.

XXIII International Materials Research Congress - IMRC. Presented the contribution: Evaluation of agro-industriales wastes to produce bioethanol from platano. Santis-Espinosa L. Fernando, Saldaña-Trinidad Sergio, Perez-Sariñana Bianca Yadira, P.J. Sebastian. Agosto 2014, Cancún, Mexico.

International Solar Energy Society (ISES), World Solar Congress. Evaluation of agro-industrial wastes to produce bioethanol: case study - mango (*Mangifera indica L.*). Santis-Espinosa Luis Fernando, Saldaña-Trinidad Sergio, Perez-Sariñana Bianca Yadira, P.J. Sebastian. Noviembre 2103. Cancún, México.

XXII International Materials Research Congress - IMRC. Evaluation of agro-industriales wastes to produce bioethanol. Santis-Espinosa L. Fernando, Saldaña-Trinidad Sergio, Perez-Sariñana Bianca Yadira, P.J. Sebastian. Agosto 2013, Cancún, México.

VIII Congreso Estatal de Biotecnología. Evaluación del potencial de desechos agroindustriales para la producción de bioetanol a partir del mango. Santis-Espinosa L. Fernando, Saldaña-Trinidad Sergio, Perez-Sariñana Bianca Yadira, P.J. Sebastian

Mayo 2013, Chiapas, México.

2o. Simposio Internacional Sobre Energías Renovables Y Sustentabilidad (SIERS). Characterization of mango pulp for production of bioethanol. . Santis-Espinosa L. Fernando, Saldaña-Trinidad Sergio, Perez-Sariñana Bianca Yadira, P.J. Sebastian. Marzo 2013, Morelos, México.

XXI International Materials Research Congress - IMRC. Characterization of mango pulp for production of bioethanol. Santis-Espinosa Luis Fernando, Saldaña-Trinidad Sergio, Perez-Sariñana Bianca Yadira, P.J. Sebastian. Agosto 2012. Cancún, México.

### **Estancias de posgrado**

Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, 8 de septiembre al 8 de diciembre del 2014. Asesor: Dr. Carlos Alberto Guerrero Fajardo del departamento de Química, Facultad de Ciencias, Grupo: "Aprovechamiento Energético de Recursos Naturales (APRENA)". Co-asesor Dr. Gustavo Buitrago Hurtado del Instituto de Biotecnología (IBUN), Grupo: "Biotecnología Agrícola".

Al niño Miguel A. Vázquez Valtierra.

La Paz, Baja California Sur.

Miguel:

Tu mamá me entregó tu carta junto con la foto donde sales con tu perro. Aprovecho que tu mamá va de regreso a tu tierra para escribirte estas líneas apresuradas que, tal vez, no alcances a entender todavía. Sin embargo, estoy seguro que algún día, como en el que escribí lo que aquí te pongo, entenderás que es posible que existen hombres y mujeres como nosotros, sin rostro y sin nombre, que lo dejan todo. Hasta la vida misma, para que otros (niños como tú y que no son como tú) puedan levantarse cada mañana sin palabras que callar y sin máscaras para enfrentar al mundo. Cuando ese día llegue, nosotros, los sin rostro y sin nombre, podremos descansar, al fin, bajo tierra. . . bien muertos, eso sí, pero contentos.

Nuestra profesión: la esperanza.

Ya casi se muere el día, oscuro cuando se viste de noche y viene a nacer el otro día, primero con su negro velo y luego con el gris o el azul, según se le antoje al sol alumbrar o no, polvo y lodo en nuestro camino. Ya casi se muere el día en los brazos nocturnos de los grillos y entonces viene esa idea de escribirte para decirte algo que viene de eso de "profesionales de la violencia" que tanto nos han achacado.

Y resulta que sí, que somos profesionales. Pero nuestra profesión es la esperanza. Nosotros decidimos un buen día hacernos soldados para que un día no sean necesarios los soldados. Es decir, escogimos una profesión suicida porque es una profesión cuyo objetivo es desaparecer: soldados que son soldados para que un día ya nadie tenga que ser soldado. Claro ¿no? Y entonces resulta que estos soldados que quieren dejar de serlo, nosotros, tenemos algo que los libros y discursos llaman "patriotismo". Porque eso que llamamos patria no es una idea que vaga entre letras y libros, sino el gran cuerpo de carne y hueso, de dolor y sufrimiento, de pena, de esperanza en que todo cambie, al fin, un buen día. Y la patria que queremos habrá de nacer también de nuestros errores y tropiezos. De nuestros despojos y rotos cuerpos habrá de levantarse un mundo nuevo. ¿Lo veremos? ¿Importa si lo veremos? Creo yo que no importa tanto como el saber a ciencia cierta que nacerá y que en largo y doloroso parto de la historia algo y todo pusimos: vida, cuerpo y alma. Amor y dolor, que no sólo riman, sino que se hermanan y juntos marchan. Por esto somos soldados que quieren dejar de ser soldados. Pero resulta que, para que ya no sean necesarios los soldados, hay que hacerse soldado y recetar una cantidad discreta de plomo, plomo caliente escribiendo libertad y justicia para todos, no para uno o para unos cuantos, sino para todos, todos, los muertos de antes y de mañana, los vivos de hoy y de siempre, los de todos que llamamos pueblo y patria, los sin nada, los perdedores de siempre antes de mañana, los sin nombre, los sin rostro.

Y ser un soldado que quiere que ya no sean necesarios los soldados es muy simple, basta responder con firmeza al pedacito de esperanza que en cada uno de nosotros depositan los más, los que nada tienen, los que todo tendrán. Por ellos y por los que han ido quedando en el camino, por una u otra razón, injustas todas. Por ellos tratar de veras de cambiar y ser mejores cada día, cada tarde, cada noche de lluvia y grillos. Acumular odio y amor con paciencia. Cultivar el fiero árbol del odio al opresor con el amor que combate y libera. Cultivar el poderoso árbol del amor que es viento que limpia y sana, no el amor pequeño y egoísta, el grande sí, el que mejora y engrandece. Cultivar entre nosotros el árbol del odio y el amor, el árbol del deber. Y en este cultivo poner la vida toda, cuerpo y alma, aliento y esperanza. Crecer pues, crecer y crecerse paso a paso, escalón por escalón. Y en ese sube y baja de rojas estrellas no temer, no temer sino al rendirse, el sentarse en una silla a descansar mientras otros siguen, a tomar aliento mientras otros luchan, a dormir mientras otros velan.

Abandona, si lo tienes, el amor por la muerte y la fascinación por el martirio. El revolucionario ama la vida sin temer la muerte, y busca que la vida sea digna para todos, y si para esto debe pagar con su muerte lo hará sin dramas ni titubeos.

Recibe mi mejor abrazo y este tierno dolor que siempre será esperanza.

Salud Miguel.

Desde las montañas del sureste mexicano.  
S.C.I.M.

PD. Acá nosotros vivíamos peor que los perros. Tuvimos que escoger: vivir como animales o morir como hombres dignos. La dignidad, Miguel, es lo único que no se debe perder nunca... nunca.

(La Jornada, 5 de marzo de 1994)



---

## Referencias bibliográficas

---

- [1] International Energy Agency. World energy outlook. France, Paris, 2014.
- [2] International Energy Agency. World energy balances. France, Paris, 2014.
- [3] International Energy Agency. Key world energy statistics. France, Paris, 2014.
- [4] SENER. Prospectivas de energías renovables 2012-2026. México, DF, 2012.
- [5] SIAP. Servicio de información agroalimentaria y pesquera 2012, Agosto 2014. México, DF.
- [6] SENER. Balance nacional de energía 2013. México, DF, 2014.
- [7] Petróleos Mexicanos. Anuario estadístico de pemex, 2013. Base de Datos Institucional. PEMEX Corporativo., 2014.
- [8] Renewable Fuels Association. 2014 ethanol industry outlook. Washington, DC, 2014.
- [9] Krzysztof N. Waliszewski, Maria A. Aparicio, Luis A. Bello, and José A. Monroy. Changes of banana starch by chemical and physical modification. *Carbohydrate Polymers*, 52:237–242, 2003.



- [10] Lii C. Y., Chang S. M., and Young Y. L. Investigation of the physical and chemical properties of banana starches. *Journal of Food Science*, 47:1493–1497, 1982.
- [11] Pingyi Zhang, Roy L. Whistler, James N. BeMiller, and Bruce R. Hamaker. Banana starch: production, physicochemical properties and digestibility-a review. *Carbohydrate Polymers*, 59:443–458, 2005.
- [12] Reddy L.V.A. and Reddy O.V.S. Production and characterization of wine from mango fruits (*mangifera indica* L.). *World J. Microbiol.*, 21:1345–1350, 2005.
- [13] L.V.A. Reddy and O.V.S. Reddy. Effect of fermentation conditions on yeast growth and volatile composition of wine produced from mango (*mangifera indica* L.) fruit juice. *Food and bioproducts processing*, 89:487–491, 2011.
- [14] José Fernando Shlosser and Luis Márquez. ProAlcool. el programa de substitución enegética en brasil. Brasil, 1995.
- [15] FAO. Biofuels and the sustainability challenge: A global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks. 2013.
- [16] U.S. Census Bureau Dept. of Commerce. Foreign trade statistics based on jan-nov. 2013.
- [17] G. Najafi, B. Ghobadian, T. Tavakoli, and T. Yusaf. Potential of bioethanol production from agricultural wastes in iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:1418–1427, 2009.
- [18] Chun-Han Koand Ya-Nang Wang, Fang-Chih Chang, Jia-Jie Chen, Wen-Hua Chen, and Wen-Song Hwang. Potentials of lignocellulosic bioethanols produced from hardwood in taiwan. *Energy*, 44:329–334, 2012.
- [19] Ke-Ke Cheng, Bai-Yan Cai, Jian-An Zhang, Hong-Zhi Ling, Yu-Jie Zhou, Jing-Ping Ge, and Jing-Ming Xu. Sugarcane bagasse hemicellulose hydrolysate for ethanol production by acid recovery process. *Biochemical Engineering Journal*, 38:105–109, 2008.

- [20] Amanda Lavigne and Susan E. Powers. Evaluating fuel ethanol feedstocks from energy policy perspectives: A comparative energy assessment of corn and corn stover. *Energy Policy*, 35:5918–5930, 2007.
- [21] J.A. Quintero, M.I. Montoya, O.J. Sánchez, O.H. Giraldo, and C.A. Cardona. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: Comparative analysis for a colombian case. *Energy*, 33:385–399, 2008.
- [22] L. Veeranjanya Reddy and O. Vijaya Sarathi Reddy. Production of ethanol from mango (*mangifera indica* L.) fruit juice fermentation. *Research Journal of Microbiology*, 10(2):763–769, 2007.
- [23] Jagdish Gabhane, S.P.M. Prince William, Abhijit Gadhe, Ritika Rath, Atul Narayan Vaidya, and Satish Watel. Pretreatment of banana agricultural waste for bio-ethanol production: Individual and interactive effects of acid and alkali pretreatments with autoclaving, microwave heating and ultrasonication. *Waste Management*, 34:498–503, 2014.
- [24] H.I. Velásquez-Arredondo, A.A. Ruiz-Colorado, and S. De Oliveira junior. Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues: Energy analysis. *Energy*, 35:3081–3087, 2010.
- [25] Gaber Z. Breisha. Production of 16 % ethanol from 35 % sucrose. *biomass and bioenergy*, 34:1243–1249, 2010.
- [26] RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY. Renewables 2015 global status report. France, Paris, 2015.
- [27] Jaime A. Moragues y Alfredo T. Rapallini. Energías renovables.
- [28] Peter McKendry. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83:37–46, 2002.
- [29] IDEA. Evaluación del potencial de energía de la biomasa. estudio técnico per 2011-2020. Madrid, 2011.

- [30] L.V.A. Truong and N. Abatzoglou. A h<sub>2</sub>s reactive adsorption process for the purification of biogas prior to its use as a bioenergy vector. *Biomass and Bioenergy*, 29:142–151, 2005.
- [31] Xiaohui Lei, Norio Sugiura, Chuanping Feng, and Takaaki Maekawa. Pretreatment of anaerobic digestion effluent with ammonia stripping and biogas purification. *Journal of Hazardous Materials*, 145:391–397, 2007.
- [32] F. Osorio and J.C. Torres. Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. *Renewable Energy*, 34:2164–2171, 2009.
- [33] Susana Saval. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, presente y futuro. *BioTecnología*, 16(2):1–30, 2012.
- [34] Valdez-Vazquez I., Acevedo-Benitez J.A., and Hernandez-Santiago C. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 14:2147–2153, 2010.
- [35] Demirbas A. Competitive liquid biofuels from biomass. *Appl. Energy*, 88:16–28, 2011.
- [36] Kahn R.A., Kahn A.N., Ahmed M., Kahn, M.R., Shah M.S., Azam N., Sadullah F. and Dian F., Ullah S., and N. Kahn. Bioethanol sources in Pakistan: a renewable energy resource. *Afr. J. Biotechnol.*, 10:19850–19854, 2011.
- [37] Nigam P.S. and Singh A. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 37:52–68, 2011.
- [38] Luiz J. Visioli, Fabiane M. Stringhini, Paulo R.S. Salbego, Daniel P. Chielle, Gabrielly V. Ribeiro, Juliana M. Gasparotto, Bruno C. Aita, Rodrigo Klaic, Jéssica M. Moscon, and Marcio A. Mazutti. Use of agroindustrial residues for bioethanol production. *Bioenergy Research: Advances and Applications*, 3, 2014.

- [39] Patle S. and Lal B. Ethanol production from hydrolysed agricultural wastes using mixed culture of *Zygomonas mobilis* and *Candida tropicalis*. *BioTecnología*, 9:1839–1843, 2007.
- [40] Debajit Borah and Vimalendra Mishra. Production of bio fuel from fruit waste. *International Journal of Advanced Biotechnology Research.*, 1:71–74, 2011.
- [41] Gouvea B.M., Torres C., Franca A.S., Oliveira L.S., and Oliveira E.S. Feasibility of ethanol production from coffee husks. *Biotechnol. Lett.*, 31:1315–1319, 2009.
- [42] Ge L., Wang P., and Mou H. Study on saccharification techniques of seaweed wastes for the transformation of ethanol. *Renewable Energy*, 36:84–89, 2011.
- [43] Wu L., Li Y., Arakane M., Ike M., Wada M., Terajima Y., Ishikawa S., and Tokuyasu K. Efficient conversion of sugarcane stalks into ethanol employing low temperature alkali pretreatment method. *Bioresour. Technol.*, 102:11183–11188, 2011.
- [44] Y.S. Hong and H.H. Yoon. Ethanol production from food residues. *Biomass Bioenergy*, 35:3271–3275, 2011.
- [45] C. Moukamnerd, M. Kino-oka, M. Sugiyama, Y. Kaneko, C. Boonchird, S. Harashima, H. Noda, K. Ninomiya, S. Shioya, and Y. Katakura. Ethanol production from biomass by repetitive solid-state fed-batch fermentation with continuous recovery of ethanol. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 88:87–94, 2010.
- [46] M. Hashem and S.M.I. Darwish. Production of bioethanol and associated by-products from potato starch residue stream by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biomass Bioenergy*, 34:953–959, 2010.
- [47] Anubhuti Gupta and JayPrakashVerma. Sustainable bioethanol production from agro-residues: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:550–567, 2015.

- [48] Seonghun Kim and Chul Ho Kim. Bioethanol production using the sequential acid/alkali-pretreated empty palm fruit bunch fiber. *Renewable Energy*, 2013.
- [49] Buaban B., Inoue H., Yano S., Tanapongpipat S., Ruanglek V., Champreda V., Pichyangkura R., Rengpipat S., and Eurwilaichitr L. Bioethanol production from ball milled bagasse using an on-site produced fungal enzyme cocktail and xylose-fermenting pichia stipitis. *J. Biosci. Bioeng.*, 2010.
- [50] Dawson L. and Boopathy R. Use of post-harvest sugarcane residue for ethanol production. *Bioresour. Technol.*, 98:1695–1699, 2007.
- [51] Chen Y., Sharma-Shivappa R.R., and Chen C. Ensiling agricultural residues for bioethanol production. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 143:80–92, 2007.
- [52] Talebnia F., Karakashev D., and Angelidaki I. Production of bioethanol from wheat straw: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Bioresour. Technol.*, 101:4744–4753, 2010.
- [53] George N. and Yang Y., Wang Z., and Sharma-Shivappa R. and Tungate K. Suitability of canola residue for cellulosic ethanol production. *Energy Fuels*, 24:4454–4458, 2010.
- [54] Liu K., Lin X. and Yue J., Li X., Fang X., Zhu M., Lin J., Qu Y., and Xiao L. High concentration ethanol production from corncob residues by fed-batch strategy. *Bioresour. Technol.*, 101:4952–4958, 2010.
- [55] Santos J.R.A., Lucena M.S., Gusmao N.B., and Gouveia E.R. Optimization of ethanol production by *saccharomyces cerevisiae* ufpeda 1238 in simultaneous saccharification and fermentation of delignified sugarcane bagasse. *Ind. Crops Prod*, 36:584–588, 2012.
- [56] Hiroko K. Kitamoto, Mitsuo Horita, Yimin Cai, Yukiko Shinozaki, and Keiji Sakaki. Silage produces biofuel for local consumption. *Biotechnol. Biofuels*, 4:46, 2011.

- [57] Liu S., Ding Z.G., Zhang L., Gu Z., Wang X., Sun X., and Shi G. Ethanol production from lycoris radiata herbert (amaryllidaceae) residues as a new resource. *Biomass Bioenergy*, 37:237–242, 2012.
- [58] Mielenz J.R., Bardsley J.S., and Wyman C.E. Fermentation of soybean hulls to ethanol while preserving protein value. *Bioresour. Technol.*, 100:3532–3539, 2009.
- [59] Yoo C.G., Kuo M., and Kim T.H. Ethanol and furfural production from corn stover using a hybrid fractionation process with zinc chloride and simultaneous saccharification and fermentation (ssf). *Process Biochem.*, 47:319–326, 2012.
- [60] Solís-Fuentes J. A. and Durán de Bazúa M. C. *Mango (Mangifera indica L.) seed and its fats.*, chapter 88, page pp. 741–748. San Diego: Academic Press, 2011. Nuts and Seeds in health and disease prevention.
- [61] Muchiri D. R., Mahungu S. M., and S. N. Gituanja. Studies on mango (mangifera indica, L.) kernel fat of some kenyan varieties in meru. *Journal of the American Oil Chemist's Society*, 89, 2012.
- [62] Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA) Secretaría de Agricultura, Ganadería. México. 2014.
- [63] M.H.A. Jahurul, I.S.M. Zaidul, Kashif Ghafoor, Fahad Y. Al Juhaimi, Kar Lin Nyam, N.A.N. Norulaini, F. Saheena, and A.K. Mohd Omar. Mango (mangifera indica L.) by products and their valuable components: A review. *Food Chemistry*, 183:173–180, 2015.
- [64] Kim H., Kim H., Mosaddik A., Gyawali R., Ahn K.S., and Cho S.K. Induction of apoptosis by ethanolic extract of mango peel and comparative analysis of the chemical constituents of mango peel and flesh. *Food Chemistry*, 133:416–422, 2012.
- [65] Sogi D.S., Siddiq M., Greiby I., and Dolan K.D. Total phenolics, antioxidant activity, and functional properties of

- tommy atkins mango peel and kernel as affected by drying methods. *Food Chemistry*, 141:2649–2655, 2013.
- [66] Sonwai S., Kaphueakngam P., and Flood A. Blending of mango kernel fat and palm oil mid-fraction to obtain cocoa butter equivalent. *Journal of Food Science and Technology*, pages <http://dx.doi.org/10.1007/s13197-012-0808-7>., 2012.
- [67] Ajila C.M. and Rao U.J.S.P. Mango peel dietary fibre: Composition and associated bound phenolics. *Journal of Functional Foods*, page <http://dx.doi.org/10.1016/j.jff.2012.11.017>., 2013.
- [68] Occena Po LG. *Handbook of Fruits and Fruit Processing*. Ames, IA: Blackwell., chapter Banana, mango, and passion fruit. Springer, 2006.
- [69] Ragab M and El Nemr SE. Chemical composition and volatile constituents of canned mango juice. *Nahrung* 34, pages 591–599, 1990.
- [70] Singh NGI, Dhuique-Mayer C., and Lozano Y. Physicochemical changes during enzymatic liquefaction of mango pulp. *J Food Process Preserv*, 24:73–85, 2000.
- [71] Muhammad Siddiq, Saeed Akhtar, and Raafia Siddiq. *Tropical and Subtropical Fruits: Postharvest Physiology, Processing and Packaging*,, chapter Mango Processing, Products and Nutrition., pages 277–297. JohnWiley and Sons, Inc., 2012.
- [72] FAO Statistical Database Agriculture. Food and cultural organization, production yearbook food and agricultural organization of the united nations. Diciembre, 2015.
- [73] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y La Alimentación (FAO). Dirección de estadísticas. Septiembre 2012.
- [74] SECRETARÍA DE ECONOMÍA. Monografía del sector plátano en México: Situación actual y oportunidades de mercado. 2012.

- [75] Guilbot A. and C. Mercier. In: the polysaccharides. aspinall o. Academic Press. New York. USA, 2009.
- [76] Faisant N., A. Buléon, P. Colonna, C. Molis, S. Lartigue, J. P. Galmiche, and M. Champ. Digestion of raw banana starch in the small intestine of healthy humans: structural features of resistant starch. *Br. J. Nutr.*, 73:111–123, 1995.
- [77] H.W. von Loesecke. Bananas. (2nd ed) Interscience Publishers, New York, 1950.
- [78] B.R. Cordenunsi and F.M. Lajolo. Starch breakdown during banana ripening: Sucrose synthase and sucrose phosphate synthase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995.
- [79] Pingyi Zhang, Roy L. Whistler, James N. BeMiller, and Bruce R. Hamaker. Banana starch: production, physicochemical properties and digestibility - a review. *Carbohydrate Polymers*, 2005.
- [80] Maulin P Shah, G.V.Reddy, R.Banerjee, P.Ravindra Babu, , and I.L.Kothari. Microbial degradation of banana waste under solid state bioprocessing using two lignocellulolytic fungi (phylosticta spp. mps-001 and aspergillus spp. mps-002). In *Process Biochemistry*. 2004.
- [81] GRANDA R. Diana M., MEJÍA G. Amanda I., and JIMÉNEZ T. Gloria A. Utilization of plantain waste for the production of secondary metabolites by solid substrate fermentation using the fungus *lentiginos crinitus*. REVISTA DE LA FACULTAD DE QUÍMICA FARMACÉUTICA 2, Universidad de Antioquia, Medellín - Colombia., 2005. pp. 13-20.
- [82] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Second international banana conference: Reversing the race to the bottom. 2014.
- [83] Vijai Kumar Gupta and Maria G. Tuohy. *Biofuel Technologies: Recent Developments*. ISBN-987-3-642-34518-0. Berlin Heidelberg, 2013.



- [84] Jassinnee Milano, Hwai Chyuan Ong, H.H. Masjuki, W.T. Chong, Man Kee Lam, Ping Kwan Loh, and Viknes Vellayan. Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58:180–197, 2016.
- [85] Bucksch S. and Egeback K. The swedish program for investigations concerning biofuels. *Science of the Total Environment*, 235:293–303, 1999.
- [86] Ajanovic A. and Haas R. Economic challenges for the future relevance of biofuels in transport in eu countries. *Energy*, 35:3340–3348, 2010.
- [87] F. Alam, A. Date, R. Rasjidin, S. Mobin, H. Moria, and A. Baqui. Biofuel from algae-is it a viable alternative? *Procedia Eng*, 49:221–227, 2012.
- [88] P. Alvira, E. Tomás-Pejó, M. Ballesteros, and M.J. Negro. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101:4851–4861, 2010.
- [89] Sims R. E. H., Mabee W., Saddler J. N., and Taylor M. An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology*, 101:1570–1580, 2010.
- [90] G. Najafi, B. Ghobadian, and T.F. Yusaf. Algae as a sustainable energy source for biofuel production in iran: a case study. *Renew Sustain Energy Rev*, 15(8):3870–3876, 2011.
- [91] Singh J. and Gu S. Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:2596–2610, 2010.
- [92] A.A. Adenle, G.E. Haslam, and L. Lee. Global assessment of research and development for algae biofuel production and its potential role for sustainable development in developing countries. *Energy Policy*, 16:182–195, 2013.
- [93] L. Brennan and P. Owende. Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew Sustain Energy Rev*, 14(2):557–577, 2010.

- [94] Carlos A. Cardona and Oscar J. Sánchez. Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 98:2457–2007, 2007.
- [95] Mosier N., Wyman C.E., Dale B.D., Elander R.T., Lee Y.Y., Holtzapple M., and Ladisch C.M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol*, 96:673–686, 2005.
- [96] Diana Abril and Alejandro Abril. Ethanol from lignocellulosic biomass. *Cien. Inv. Agr.*, 36(2):177–190, 2009.
- [97] Zabed H., Faruq G., Sahu J.N., Azirun M.S., Hashim R., and Nasrulhaq Boyce A. Bioethanol production from fermentable sugar juice. *The Scientific World Journal*, Volume 2014:DOI: 10.1155/2014/957102, 2014.
- [98] Petroleo y Energía. Sociedad Nacional de Minería. Los biocombustibles. 2006.
- [99] Farrell AE, Plevin RJ, Turner BT, Jones AD, OHare M, and Kammen DM. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. 311:506–508, 2006.
- [100] Robert A. Meyers. Encyclopedia of sustainability science and technology. 2012.
- [101] M.K. Mann and P.L. Spath. Life cycle assessment of a biomass gasification combined-cycle system life cycle assessment. *National Renewable Energy Laboratory*, page p. 160, 1997.
- [102] Kadam K.L. Environmental benefits on a life cycle basis of using bagasse-derived ethanol as a gasoline oxygenate in india. *Energy Pol*, 30:371–384, 2002.
- [103] Wei-Dong Hsieha, Rong-Hong Chenb, Tsung-Lin Wub, and Ta-Hui Lina. Engine performance and pollutant emission of an si engine using ethanol-gasoline blended fuels. *Atmos Environ*, 36:403–410, 2002.
- [104] M. Kaltschmitt et al. Renewable energy systems. *Springer Science*, 2013. BusinessMedia, New York.

- [105] Béguin P and Aubert JP. The biological degradation of cellulose. *FEMS Microbiol. Rev*, 13:25–58, 1994.
- [106] Pérez J, Muñoz-Dorado A, De la Rubia T, and E Martínez. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *Int. Microbiol*, 5:53–63, 2002.
- [107] Aro N, Pakula T, and Penttila M. Transcriptional regulation of plant cell wall degradation by filamentous fungi. *FEMS Microbiol*, 29:719–739, 2005.
- [108] Fernando Sebastián Nogués, Daniel Garcia-Galindo, and Adeline Rezeau. *Energía de la Biomasa (volumen I)*. Impreso en España, 1ra. edición edition, 2010. ISBN 978-84-92774-91-3.
- [109] David L. Nelson and Michael M. Cox. *Principios de Bioquímica.*, chapter 2. ISBN-13 9788428214865. Lehninger, 5ª edición edition, 2009.
- [110] A.A. EL-Sebaili and S.M. Shalaby. Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:37–43, 2012.
- [111] G. Pirasteh, R. Saidur, S.M.A. Rahman, and N.A. Rahim. A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy*, 31:133–148, 2014.
- [112] Bowen I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 27:779–787, 1926.
- [113] Karim M. A. and Hawlader M. N. A. Development of solar air collectors for drying applications. *Energy Conversion and Manage*, 45:329–344, 2004. DOI: 10.1016/SO196-8904(03)00158-4.
- [114] S. Seyfi. Design, experimental investigation and analysis of a solar drying system. *Energy Conversion and Management*, 68:227–234, 2013. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.01.013.

- [115] Cengel Y. and Ghajar A. J. *Heat and Mass Transfer*, pages pp. 18–26. México, 4th ed. edition, 2011.
- [116] Ferreira A. G., Matias-Gonçalves L., and Brasil-Maia C. Solar drying of a solid waste from steel wire industry. *Applied Thermal Engineering*, 73(1):102–108, 2014. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.047.
- [117] Figura L.O. and Texeira A. A. Food physics, physical properties- measurement and applications. *Springer*, New York:DOI 10.1007/b107120., 2007.
- [118] ASHARE. Refrigerating and air-conditioning engineers. *.Ashare handbook and product dictionary: Application"*, American Society of Heating., New York, USA., 1974.
- [119] Al-Juamily K. E. J., Khalifa A. J. N., and Yassen T. A. Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in iraq. *Desalination.*, 209(1-3):163–170, 2007. DOI: 10.1016/j.desal.2007.04.026.
- [120] Ekechukwu O. V. and Norton B. Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. *Energy Conversion and Management*, 38(14):1483–500, 1997.
- [121] Yussoff S. Renewable energy from palm oil—innovation on effective utilization of waste. *J. Clean Prod.*, 14(1):87–93, 2006. DOI: 10.1016/j.clepro.2004.07.005.
- [122] Miller G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytic Chemistry*, 31:426–428, 1959.
- [123] Hossain A.B.M.S. and Fazliny A.R. Creation of alternative energy by bio-ethanol production from pineapple waste and the usage of its properties for engine. *Afr. J. Microbiol. Res.*, 4(9):813–819, 2010.
- [124] Carrasco J., Martínez M., Pérez J., and Molina A. La hidrólisis Ácida como tecnología para el fraccionamiento de la biomasa lignocelulósica (i y ii). *Ingeniería Química de España*, pp. 195–200:pp. 261–268, 1992.

- [125] Sophie Graefea, Dominique Dufoura, Andrés Giraldoa, Luis Armando Muñoza, Paola Moraa, Hortensia Solísc, Hernán Garcésd, and Alonso Gonzaleza. Energy and carbon footprints of ethanol production using banana and cooking banana discard: A case study from costa rica and ecuador. *Biomass and Bioenergy*, 35):2640–2649, 2011.
- [126] Jagdish Gabhane, S.P.M. Prince William, Abhijit Gadhe, Ritika Rath, Atul Narayan Vaidya, and Satish Wate. Pre-treatment of banana agricultural waste for bio-ethanol production: Individual and interactive effects of acid and alkali pretreatments with autoclaving, microwave heating and ultrasonication. *Waste Management*, 34):498–503, 2014.
- [127] H.I. Velásquez-Arredondoa, A.A. Ruiz-Coloradoa, and S. De Oliveira junior. Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues: Energy analysis. *Energy*, 35):3081–3087, 2010.
- [128] Erteken C and Yaldiz O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63):349–359, 2004.
- [129] Can A. Drying kinetics of pumpkin seeds. *International Journal of Energy Research*, 24:965–975, 2000.
- [130] Furlan G, Mancini NA, and Sayigh AAM. Non-conventional energy sources. *Miramare-Triest*, Italy, 1983.
- [131] Van Soest P. J. Nutritional ecology of the ruminant. 2a. edición. Technical report, Cornell Universidad de Pen., 1994.
- [132] *NMX-F-607-NOMRMEX-2002. Alimentos- Determinación de cenizas en alimentos.*
- [133] *NOM-116-SSA1-1994. Bienes y servicios. Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico. Método por arena o gasa.*
- [134] W. Alonso Pippo, Luengo C.A., Alonsoamador Morales Alberteris L., Garzone P., and Cornacchia G. Energy

- recovery from sugarcane-trash in the light of 2nd generation biofuels. part 1: Current situation and environmental aspects. *Waste Biomass Valor* 2, 2:1–16, 2011.
- [135] Pino J.A. and Queris O. Analysis of volatile compounds of mango wine. *Food Chemistry*, 125:1141–1146, 2011.
- [136] Wen Wang, Xinshu Zhuang, Zhenhong Yuan, Qiang Yu, Wei Qi, Qiong Wang, and Xuesong Tan. High consistency enzymatic saccharification of sweet sorghum bagasse pretreated with liquid hot water. *Bioresource Technology*, 108:252–257, 2012.
- [137] Shen F, Kumar L, Hu J, and Saddler JN. Evaluation of hemicellulose removal by xylanase and delignification on shf and ssf for bioethanol production with steampretreated substrates. *Bioresour Technol*, 102 (19):8945–51, 2011.
- [138] Gaber Z. Breisha. Production of 16 % ethanol from 35 % sucrose. *Biomass and bioenergy*, 34:1243–1249, 2010.
- [139] Xiao Li, Li Jie Chan, Bin Yu, Philip Curran, and Shao-Quan Liu. Fermentation of three varieties of mango juices with a mixture of *saccharomyces cerevisiae* and *williopsis saturnus* var. *mrakii*. *International Journal of Food Microbiology*, 158:28–35, 2012.
- [140] J.R. Postgate. *Viable counts and viability*. In *Methods in Microbiology*, volume Vol. 1. New York: Academic Press., 1967.
- [141] Mustafa Balat and Havva Balat. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Appl. Energy*, 86:2273–2282, 2009.
- [142] A. Demirbas. Competitive liquid biofuels from biomass. *Appl. Energy*, 8:17–28, 2011.
- [143] Mabee W. E. and Saddler J. N. Bioethanol from lignocellulosics: Status and perspectives in canada. *Bioresource Technology*, 101:4806–4813, 2010.

- [144] Harinder Singh Oberoi, Praveen V. Vadlani, Lavudi Saida, Sunil Bansal, and Joshua D. Hughes. Ethanol production from banana peels using statistically optimized simultaneous saccharification and fermentation process. *Waste Management*, 31:1576–1584, 2011.
- [145] D.J. Schell, C.J. Riley, N. Dowe, J. Farmer, K.N. Ibsen, M.F. Ruth, S.T. Toon, and R.E. Lumpkin. A bioethanol process development unit: initial operating experiences and results with a corn fibre feedstock. *Bioresource Technol.*, 91:179–188, 2003.
- [146] M. Galbe and G. Zacchi. A review of the production of ethanol from softwood. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 59:618–628, 2002.
- [147] *Ingeniería Química de España*, chapter La Hidrólisis Ácida como Tecnología para el Fraccionamiento de la Biomasa Lignocelulósica (I y II), pages 195–200, 261–268. España, 1992.
- [148] T. Botha and H. Blottnitz. A comparison of the environmental benefits of bagasse-derived electricity and fuel ethanol on a life-cycle basis. *Energy Po*, 34:2654–2661, 2006.
- [149] R. Wooley, M. Ruth, J. Sheehan, and K. Ibsen. Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis current and futuristic scenarios. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, 1999.
- [150] J. Correa and S. Levaza. Identificación de grupos de compuestos químicos inhibitorios en jarabe de la planta de banana para la producción de alcohol con *saccharomyces cerevisiae*. *Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia- sede Medellín, Medellín*, page 125, 2006.
- [151] Renolds A. and Cliff M., Girard B., and Kopp T.G. Influence of fermentation temperature on composition and sensory properties of semillon and shiraz wine. *American Journal of Enology and Viticulture*, 52:235–240, 2001.

- [152] Gerbaux V., Beatrice V., and Alain B. Influence of maceration temperature and enzymes on the content of volatile phenols in pinot noir wines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53:131–137, 2002.
- [153] Torija M.J., Rozes N., Poblet M., Guillamon J.M., and Mas A. Effects of fermentation temperature on the strain population of *saccharomyces cerevisiae*. *International Journal of Food Microbiology*, 80:47–53, 2003.
- [154] *Saccharomyces cerevisiae* (ATCC® 26603<sup>TM</sup>). ATCC is a registered trademark of the American Type Culture Collection. USA. 2013.
- [155] H. S. Shin, J. G. Zeikus, and M. K. Jain. Electrically enhanced ethanol fermentation by *clostridium thermocellum* and *saccharomyces cerevisiae*. *Appl Microbiol Biotechnol*, 58:476–481, 2002.
- [156] MOHAMED M. ABOUZIED and C. ADINARAYANA REDDY. Direct fermentation of potato starch to ethanol by cocultures of *aspergillus niger* and *saccharomyces cerevisiae*. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, 52(5):1055–1059, 1986.
- [157] Benny Palmqvist, Magnus Wiman, and Gunnar Lidén. Effect of mixing on enzymatic hydrolysis of steam-pretreated spruce: a quantitative analysis of conversion and power consumption. *Biotechnology for Biofuels*, 4:10, 2011. DOI: 10.1186/1754-6834-4-10.
- [158] F.W. Bai, W.A. Anderson, and M. Moo-Young. Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnology Advances*, 26:371–378, 2008.
- [159] Yannam Sudheer Kumar, Reddy Shetty Prakasam, and Obulam Vijaya Sarathi Reddy. Optimisation of fermentation conditions for mango (*mangifera indica* L.) wine production by employing response surface methodology. *International Journal of Food Science and Technology*, 44:2320–2327, 2009.



- [160] Remize F., Sablayrolles J.M., and Dequin S. Re-assessment of the influence of yeast strain and environmental factors on glycerol production in wine. *Journal of Applied Microbiology*, 88:89–105, 2000.