

# Tecnologías para la bioenergía en México

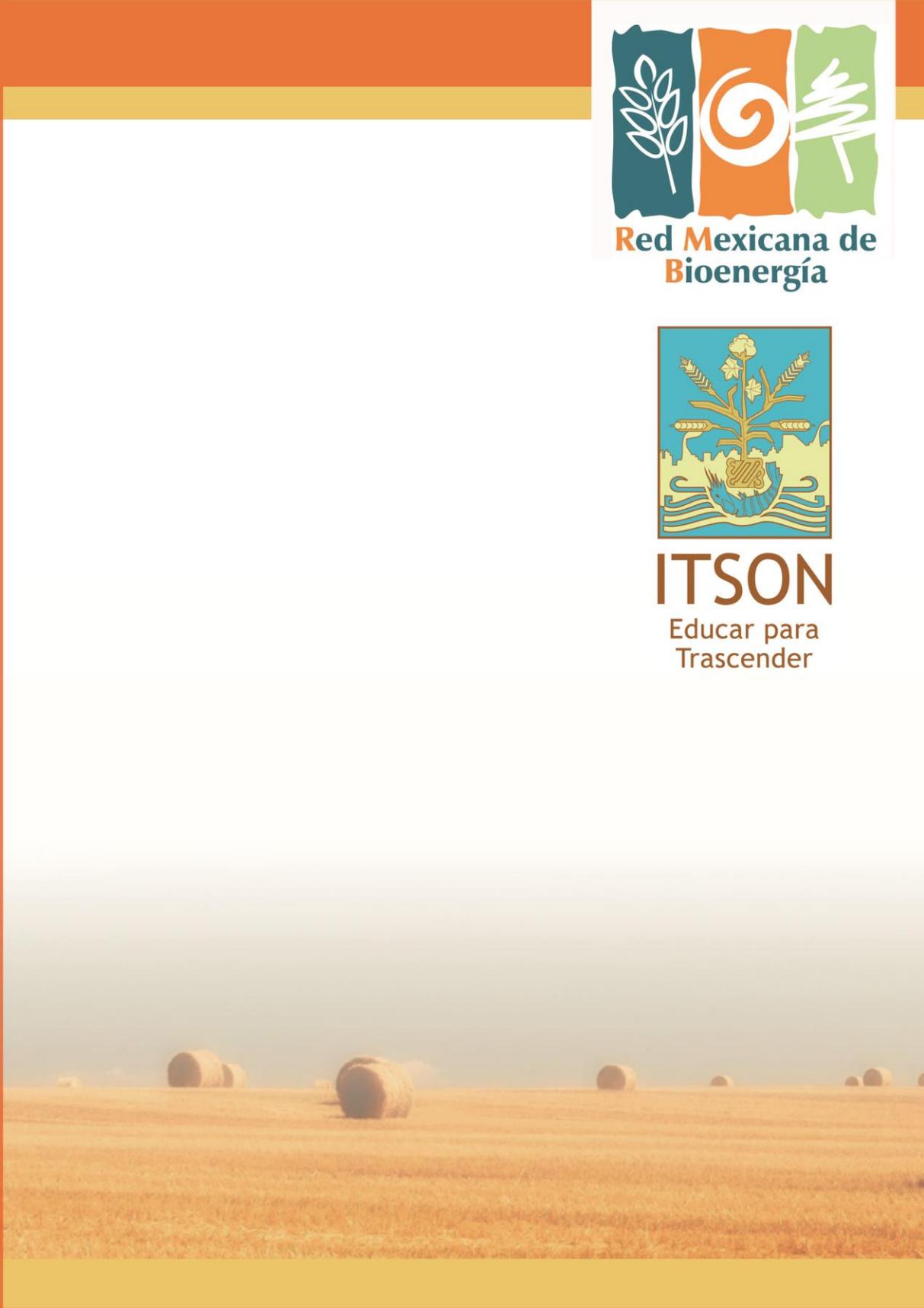


Red Mexicana de  
Bioenergía



**ITSON**

Educar para  
Trascender



**Compiladores**

Dr. Iram Mondaca Fernández  
Dra. Georgina Sandoval Fabián  
Ing. Julián Vega Gregg

[www.rembio.org.mx](http://www.rembio.org.mx)

[www.itson.mx](http://www.itson.mx)



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA**  
Educar para Trascender

*Tecnologías para la bioenergía en México* contiene los trabajos presentados en la IX Reunión Nacional de Bioenergía celebrada en Santiago de Querétaro, Qro. México.

**COMPILADORES:**

**Dr. Iram Mondaca Fernández**  
**Dra. Georgina Sandoval Fabián**  
**Ing. Julián Vega Gregg**

**COLABORADORES**

Ing. Enrique Riegelhaupt  
Dr. Omar Maserá Cerutti  
Ing. César Villavicencio Córdova  
M.E. María Dolores Duarte Lobo  
Lic. Angélica Avellaneda Cruz  
Lic. Ana Laura Martínez Villalba  
Ing. Héctor Arvayo Enríquez

**COMITÉ CIENTÍFICO**

Dr. Óscar Aguilar — CIATEJ  
Dra. Lorena Amaya — CIATEJ  
M.C. Melchor Arellano — CIATEJ  
Dr. José de Jesús Balderas Cortés — ITSON  
Dr. Luis Felipe Barahona — CICY  
Dr. Luis Alberto Cira Chávez — ITSON  
Dra. Ma. Isabel Estrada Alvarado — ITSON  
Dr. Pablo Gortares Moroyoqui — ITSON  
Dra. Sanghamitra Khandual — CIATEJ  
Dr. Alberto López — CIATEJ  
Dr. Juan Carlos Mateos — CIATEJ  
Dr. Luis Ángel Medina — UNISON  
Dr. Iram Mondaca Fernández — ITSON  
M.C. Francisco Enrique Montañó Salas — ITSON  
M.C. Catalina Mungarro Ibarra — ITSON  
M.I. Ismael Murillo Verduzco — ITSON  
Dra. Dolores Reyes Duarte — UAM Cuajimalpa  
M.I. Nidia Josefina Ríos Vázquez — ITSON  
Dra. Georgina Sandoval — CIATEJ  
M.C. Lorena Tineo García — ITSON  
Dra. Idania Valdez\_ — Univ. de Guanajuato

2013. Instituto Tecnológico de Sonora.  
5 de Febrero 818 Sur, Colonia Centro.  
Ciudad Obregón, Sonora, México. C.P. 85000

Se prohíbe la reproducción total o parcial de la presente obra, así como su comunicación pública, divulgación o transmisión, mediante cualquier sistema o método, electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de Recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito del Instituto Tecnológico de Sonora.

ISBN: **978-607-609-059-6** (Edición electrónica)

Primera edición 2013  
Impreso en México

## DIRECTORIOS

---

### Directorio REMBIO

Dr. Iram Mondaca Fernández  
**Presidente de REMBIO 2011-2013**  
**Profesor-Investigador de ITSON**

Dra. Georgina Sandoval Fabián  
**Secretario General**

Ing. Julián Vega Gregg  
**Tesorero**

Ing. Enrique Riegelhaupt  
**Coordinador de proyectos**

Dr. Omar Massera Cerutti  
**Representante del Consejo Ampliado de**  
**REMBIO**

Lic. Angélica Avellaneda Cruz  
**Responsable de Difusión**

Lic. Ana Laura Martínez Villalba  
**Responsable de Administración**

Ing. Héctor Arvayo Enríquez  
**Encargado de Diseño y Difusión de**  
**Documentos**

---

### Directorio ITSON

Dr. Isidro Roberto Cruz Medina  
**Rector**

Dr. Jesús Héctor Hernández López  
**Vicerrector Académico**

Dr. Jaime Garatuza Payán  
**Director de Recursos Naturales**

M.I. Anacleto Félix Fuentes  
**Jefe del Departamento de**  
**Biología y Ciencias**  
**Alimentarias**

## ÍNDICE

	Página
<b>PRÓLOGO</b>	8
<b>ÁREA TEMÁTICA: BIOETANOL, BIODIESEL Y BIOGÁS</b>	9
Artículo I. <b>Comparación del perfil de asimilación de carbohidratos por levaduras silvestres para la producción de etanol</b> Estrada Martínez R. J., Pacheco López N. A., Sánchez Contreras M. A. y Rodríguez Buenfil I. M.	10
Artículo II. <b>Escenarios de producción de etanol de primera generación en México</b> Becerra L. A.	15
Artículo III. <b>Evaluación de cepas fermentativas para la producción de bioetanol a partir de bagazo de caña</b> Sandoval Nuñez D., Gschaedler Mathis A., Arellano Plaza M. y Amaya Delgado L.	24
Artículo IV. <b>Hidrólisis enzimática de harina pretratada de limón persa (<i>Citrus latifolia</i>)</b> López Domínguez C., Rodríguez Buenfil I., Pacheco López N. y Sánchez Contreras A.	29
Artículo V. <b>Producción de bioetanol en siete variedades de caña de azúcar (<i>Saccharum spp</i>) COLPOSCTMEX</b> Valdez Balero A. y López Vázquez P.	34
Artículo VI. <b>Tratamiento de material lignocelulósico con ozono para la producción de azúcares fermentables para la obtención de bioetanol</b> Albarrán Rivas M.G., López López A. y León Becerril E. <sup>1</sup>	44
Artículo VII. <b>Variedades de sorgo dulce para la producción de bioetanol en Durango</b> Jiménez O. R., Salazar S. L.M., Rosales S.R., Carmona G.M. y Saldaña L.J.	51
Artículo VIII. <b>Desalación de agua de pozos como política de producción de cultivos con potencial bioenergético</b> Dévora G.E., Astorga S., Valdez L.C., Ramos U.D. y Carrazco F.G.	56
Artículo IX. <b>Caracterización morfológica de 18 accesiones de <i>Jatropha curcas</i> L. no tóxicas de Veracruz, México</b> Ávila Reséndiz C., Pérez Vázquez A., López Romero G., Hernández Zaragoza A.D., García Pérez E., Lara Bautista J. y Valdés Rodríguez O.A.	63
Artículo X. <b>Efecto de la temperatura en la reacción de transesterificación de aceite de higuera catalizada con hidrotalcitas</b> Salinas H.P., Morales A.F., Cortés R. J.A., Hernández V.J., Hernández L. F.J. y Tzompantzi M. F.J.	69

Artículo XI. <b>Evaluación del aceite de pistache amargo (<i>Simarouba glauca</i>) como una fuente potencial para la producción de biodiesel</b> Salinas H.P. y Morales A. F.	73
Artículo XII. <b>Síntesis y caracterización de hidróxidos dobles laminares (HDL) para la producción de biodiesel del aceite de pistache amargo (<i>Simarouba glauca</i>)</b> Morales A.F., Salinas H.P., Hernández V.J., Flores R. J.A. y Tzompantzi M. F.J.	77
Artículo XIII. <b>Potencial ambiental de consorcios fotosintéticos dulceacuícolas acumuladores de ácidos grasos</b> Vargas Zúñiga, M.M., Almanza Estrada M.V., González Castañeda J., Valdez Vázquez I. y Ruíz Aguilar G.M.L.	81
Artículo XIV. <b>Estimación de la producción de biogás con las aguas residuales de nixtamalización generadas en la zona metropolitana de Mérida</b> Ortiz Rodríguez N.M. y De los Ríos Ibarra E.	82
Artículo XV. <b>Estudio de co-digestión de residuos agroindustriales para la generación y uso de biogás</b> Plascencia C. E. y González L.V.	93
Artículo XVI. <b>Comparación fisicoquímica y microbiana de dos distintos tipos de lodos de alimentación para un proceso de digestión anaerobia</b> Vásquez M.A., Montes C.M.E., Santiago R.V. y Méndez R.M.	98
<b>ÁREA TEMÁTICA: RESIDUOS SÓLIDOS Y COGENERACIÓN</b>	104
Artículo XVII. <b>Caracterización de aguas residuales del proceso de la deslignificación para su aprovechamiento mediante hongos lignocelulósicos dentro del esquema de biorefinería</b> Serafín Muñoz A.H., López Alvarado H., Mejía López A., Álvarez Vargas A., Cano Canchola C. y Coreño Alonso O.	105
Artículo XVIII. <b>Elaboración de <i>pellets</i> a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite</b> Rincón S., González Y., Camargo G., Dévora G.E. y Astorga S.	110
<b>RESÚMENES</b>	117
<b>Efecto de la concentración de ácido sobre la producción de azúcares e inhibidores en el tratamiento termoquímico</b> Toribio Cuaya H., Pedraza Segura L., Vásquez Medrano R. y Martínez Jiménez A.	118
<b>Producción de biomasa y azúcares en sorgos dulces aptos para producir bioetanol</b> Aguilar U.M.G., Montes G.N., Ramírez R.E., Vargas V.E., Hernández M.O.L. y Uribe G.S.	119
<b>Obtención de azúcares a partir de paja de trigo (<i>Triticum spp.</i>) cultivado en el Valle del Yaqui, Sonora, para la producción de bioetanol</b> Ávila García J.C., Mondaca Fernández I., Meza Montenegro M., Balderas Cortés J.J., Rodríguez Ramírez R. y Villavicencio Córdova C.	121

<b>Obtención de cepas mutantes para la obtención de biocombustibles bajo el esquema de biorrefinería sustentable</b>	122
De Pavía Zepeda A., Álvarez Vargas A., Coreño Alonso O., Cano Canchola C. y Serafín Muñoz A.H.	
<b>Optimización de la producción de xilanasas extracelulares por <i>Fusarium solani</i> con olote de maíz como fuente de carbono</b>	124
Alvarez Navarrete M., López Gómez R., Salgado Garciglia R. y Martínez Pacheco M.M.	
<b>Análisis del ciclo de vida de la producción de biodiesel con aceite de cocina usado vs. aceite de <i>Jatropha curcas</i></b>	125
Morales F. y Fuentes A.	
<b>Búsqueda de levaduras con aplicaciones potenciales para la producción de biodiesel</b>	126
Niehus X., Ruiz Ruiz P. y Sandoval G.	
<b>Estudio comparativo para la obtención de biodiesel empleando un proceso de transesterificación ácida y básica y utilizando un proceso acoplado de bioetanol-biodiesel</b>	127
Peña Calva A., Villavicencio B. y Elizalde L.A.	
<b><i>Jatropha curcas</i> (L) mexicanas y el peligro de la reintroducción. Caracterización con marcadores moleculares específicos</b>	128
Toledo García I., Servín Garcidueñas L., Ormeño Orrillo E., Rosas Ramírez F., Cruz Gómez J., Islas Samperio J., Pérez Morales G. y Martínez Romero E.	
<b>Micropropagación de <i>Jatropha curcas</i> L.</b>	129
Cano Sosa J., Navarrete Yabur A.E., Góngora Canul C.C. y López Puc G.	
<b>Producción de biodiesel catalizada por la lipasa lip2 de <i>Yarrowia lipolytica</i> inmovilizada en diversos nanosportes</b>	130
Rivera I., Carbajal G. y Sandoval G.	
<b>Identificación y caracterización de enzimas bacterianas responsables de la degradación de la pared celular de microalgas</b>	131
Hernández Guzmán G., García Rodríguez G.A.	
<b>Desarrollo de un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria procesadora de pescado: comparación y acoplamiento de procesos de oxidación avanzada con un proceso de digestión anaerobia</b>	132
Picos A. R., Rodríguez A. y Mora Tovar L.	
<b>Dióxido de carbono e hidrógeno a partir de guayacol</b>	133
Rodríguez N.E., Castro A.J., Saucedo J. y Rutíaga J.G.	
<b>Generación de biogás a partir de la codigestión de la pulpa de café con excretas ovinas y su aprovechamiento en un beneficio del café</b>	134
Pedreguera F.J., Montes M.E., Vásquez A. y Chabat S.I.	
<b>Producción de gas de síntesis mediante reformado del glicerol</b>	135
Mendoza Chávez E. A., Saucedo Luna J., Jaime Castro Montoya A., Campos García J., Chávez Parga C. y Ponce Ortega J.	

<b>Utilización de residuos de la incineración de desechos sólidos en el tratamiento del biogás</b>	136
Leal Castillor J.A., Germain P., Benbelkacem H. y Serafín Muñoz A.H.	
<b>Producción de biogás en un contenedor biodigestor móvil para su uso en zonas marginadas</b>	138
Schlegel M., Rössel Kipping D., Ortiz Laurel H. y Kanswohl N.	
<b>Biochar: una propuesta integrada de manejo de residuos, reducción de emisiones y sustentabilidad de la agricultura en México</b>	140
González Esquivel C., Larsen J., Masera O., Ibarrola R., Evar B., Riegelhaupt R., Gutiérrez J.P., Shackley S., Bennet M., Weber B., Etchevers J., Ariza R. y Zagal A.	
<b>Diseño de una plataforma para el aprovechamiento de la FORSU bajo el concepto de biorrefinería sustentable</b>	141
Serafín Muñoz A.H., Ceseña Quiñonez J. I., Guerrero Aguilar A., Rodríguez Castrejón U.E., Álvarez Vargas A., Coreño Alonso O., Mendoza Puga L.E., Ramos Arroyo Y.R. y Cano Canchola C.	
<b>Simulación de una planta de producción de briquetas a partir de lirio acuático</b>	143
Zamudio Jaramillo M.A. y Álvarez Navarrete M.	
<b>Impactos socio-ambientales en el consumo de leña por el uso sostenido de estufas eficientes Patsari en las comunidades de Michoacán</b>	144
Miranda Gamboa M.A. y Masera O.	
<b>El modelo Wisdom como herramienta para la gestión sustentable de los recursos maderables con propósitos dendroenergéticos</b>	145
Serrano M., Martínez R., García C. y Masera O.	
<b>Modelación espacial de la productividad de biomasa leñosa de encino en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán</b>	146
Ramírez Mejía D. y Ghilardi A.	
<b>Potencial de <i>Quercus laurina</i> para producir de carbón vegetal en Ixtlán de Juárez, Oaxaca</b>	147
López López A.; Rodríguez Ortiz G. y Hernández Santiago E.	
<b>Adopción de estufas ONIL en el Municipio de San Juan Guchicovi, Oaxaca</b>	148
Arcos Canseco M. C. y Santos Benítez A. R.	
<b>Índices de calidad energética para biocombustibles sólidos forestales</b>	150
Correa F.	
<b>Potencial sustentable de reducción de emisiones de GEI y costos de mitigación de opciones de bioenergía</b>	151
García C.A., Riegelhaupt E., Ghilardi A., Masera O., Islas J. y Manzini F.	
<b>ÍNDICE DE AUTORES</b>	152

## *PRÓLOGO*

En estos momentos, México está pasando por una etapa de transición, donde la energía constituye un importante componente de la vida nacional, con repercusiones sociales, ecológicas, económicas y políticas. Particularmente la bioenergía es un componente con potencial para ser explotado de manera sustentable en nuestro país. La Red Mexicana de Bioenergía es una asociación donde confluyen el sector académico, iniciativa privada, dependencias gubernamentales, entre otros, agrupando investigadores, educadores, promotores sociales, asociaciones filiales y estudiantes, para la difusión y la promoción del uso sustentable de la bioenergía en México.

La Red Mexicana de Bioenergía publica esta obra con trabajos presentados en la IX Reunión Nacional de Bioenergía, realizada en la Ciudad de Querétaro, los días 29, 30 y 31 de Octubre de 2013. Los trabajos corresponden a las áreas de Bioetanol, Biodiesel y Biogás, Residuos Sólidos y Cogeneración y Leña y Carbón Vegetal.

Esperamos con esta obra contribuir a la difusión de la bioenergía en nuestro país, así como a establecer las bases para la creación de redes de cooperación entre los distintos sectores involucrados en el uso sustentable de la bioenergía.

*Dr. Iram Mondaca Fernández*

Presidente de REMBIO 2011-2013

# *BIOETANOL, BIODIESEL Y BIOGÁS*

## Artículo I

# COMPARACIÓN DEL PERFIL DE ASIMILACIÓN DE CARBOHIDRATOS POR LEVADURAS SILVESTRES PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL

Estrada Martínez R. J., Pacheco López N. A., Sánchez Contreras M. A. y Rodríguez Buenfil, I. M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unidad Sureste, Centro de Investigación y de Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. C 30 # 151, interior CANACINTRA, Col. García Ginerés. CP. 97070. Fax/tel: (999) 9202671  
Email: irodriguez@ciatej.net.mx

**Resumen.** Se evaluaron los perfiles de asimilación de carbohidratos de dos cepas silvestres de *Candida glabrata* (LR2 y LR5.1). Las fuentes de carbono probadas fueron hexosas (glucosa, fructosa, sacarosa y galactosa) y pentosas (xilosa y arabinosa) de forma individual y en mezcla. Ambas cepas presentan la capacidad de asimilar la mezcla de carbohidratos probada con un porcentaje total de consumo del 70%. La producción de etanol máxima obtenida por la cepa LR2 después de 8 días de fermentación fue de 21.24 g/L y 22.56 g/L después de 7 días para la cepa LR5.1. En la asimilación individual de carbohidratos se indica que sólo las hexosas (glucosa, fructosa y sacarosa) fueron asimiladas con una producción máxima de alcohol de 5.92 g/L para la cepa LR2 y de 5.51 g/L para la cepa LR5.1, en glucosa como única fuente de carbono.

**Abstract.** Carbohydrate assimilation profiles of two wild strains of *Candida glabrata* (LR2 and LR5.1) were evaluated. Carbon sources as hexoses (glucose, fructose, sucrose and galactose) and pentoses (xylose and arabinose) individually and in mixture were tested. Both strains presented the ability to assimilate the carbohydrate mixture tested with a total consumption percentage around 70%. Maximal ethanol production obtained by LR2 strain after 8 fermentations days was 21.24 g/L and 22.56 g/L reached after 7 days obtained by LR5.1 strain. Individual carbohydrate assimilation indicated than only hexoses (glucose, fructose and sucrose) were assimilated with maximal alcohol production of 5.92 g/L by LR2 and 5.51 g/L by LR5.1 strain, both were obtained with glucose as a sole carbon source.

**Palabras Clave:** *Candida glabrata*, perfil de asimilación, hexosas, pentosas, etanol

## Introducción

Los residuos lignocelulósicos son uno de los recursos renovables más abundantes y de bajo costo que pueden ser utilizados para la producción de etanol y energía. Por lo que es necesario que los microorganismos utilizados en la fermentación asimilen con alta eficiencia las hexosas y pentosas presentes en los hidrolizados lignocelulósicos [1]. La levadura *Saccharomyces cerevisiae* utilizada a nivel industrial, no puede

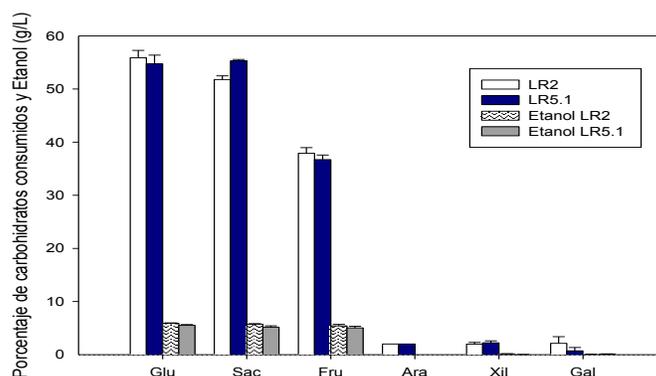
asimilar pentosas como fuente de carbono. Se ha reportado que levaduras como la *Scheffersomyces (Pichia) stipitis*, *Pachysolen tannophilus* y *Candida guilliermondii* que asimilan xilosa, presentan una baja tolerancia a inhibidores, necesitan un suministro controlado de oxígeno para la producción de etanol y son muy sensibles a este metabolito [2]. En base a esto, el trabajo tiene como objetivo obtener el perfil de asimilación de carbohidratos como única fuente de carbono de dos cepas silvestres en medio sintético.

### Material y Métodos

Se utilizaron dos cepas silvestres (LR2 y LR5.1) aisladas de líquido ruminal, las cuales fueron identificadas como *Candida glabrata* con diferentes distancias filogenéticas. Para determinar el perfil individual de asimilación se empleó un medio mínimo de sales con la siguiente composición:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (12.7 g/L),  $\text{NH}_4\text{PO}_3$  (2.4 g/L),  $\text{MgSO}_4$  (0.75 g/L), KCl (2.3 g/L)  $\text{CaCl}_2$  (0.25 g/L) y como única fuente de carbono los azúcares glucosa, fructosa, galactosa, arabinosa, xilosa (70.5 g/L c/u), sacarosa (66.5 g/L), a fin de contener en el medio 28.2 g de carbono [3]. Para la determinación de azúcares reductores libres se utilizó el método del ácido dinitrosalicílico (DNS) de Miller, (1959) y de alcohol fue por Dicromato de Potasio de Bohringer, (1964). Las fermentaciones en mezcla de azúcares (100 g/L) en un medio sintético base nitrógeno fue monitoreado por HPLC [4]. Los perfiles de asimilación de forma individual y en mezcla se llevaron a cabo a las condiciones de 45° C y 0 rpm para la cepa LR2 y 40° C y 0 rpm para la cepa LR5.1, a pH inicial de 4.5.

### Resultados

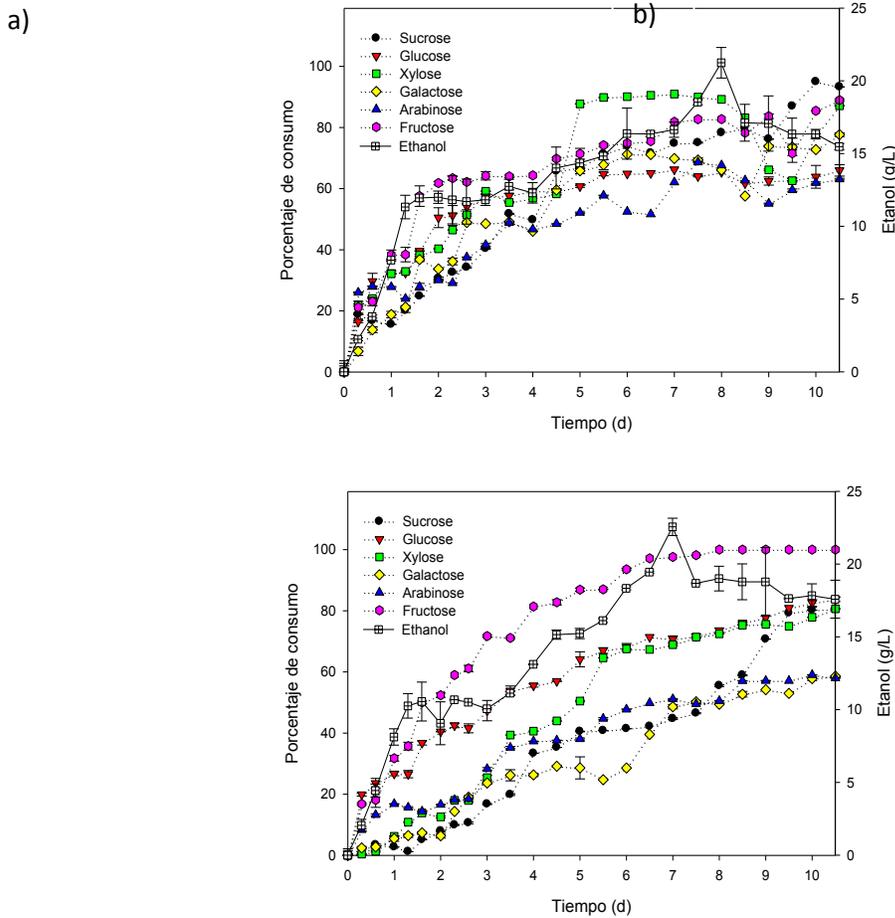
El análisis del perfil de asimilación de carbohidratos de forma individual se presenta en la figura 1. La cepa LR2 tuvo un porcentaje de consumo en glucosa del 55.88%, en sacarosa del 51.78% y en fructosa del 37.89%, el resto de los carbohidratos alcanzaron un porcentaje de consumo del alrededor del 2%.



**Fig. 1.** Perfil de asimilación de carbohidratos de forma individual y producción de etanol de las cepas LR2 y LR5.1.

La cepa LR5.1 tuvo un porcentaje de consumo en sacarosa del 55.27%, en glucosa del 54.73% y en fructosa del 36.69%, el resto de los carbohidratos alcanzaron un

porcentaje de consumo del alrededor del 1-2%. La mayor producción de etanol se obtuvo en glucosa donde la cepa LR2 produjo 5.92 g/L y la cepa LR5.1, 5.51 g/L, sin mucha diferencia en la producción de etanol en sacarosa y fructosa. Con el resto de los carbohidratos no se detectó producción etanol. En la fermentación de mezcla de carbohidratos (Fig. 2), para cepa LR2 se observó que la mayor producción de alcohol fue a los 8 días con una concentración de 21.24 g/L de etanol, a este tiempo se tenía un consumo del 71.09% del total de los azúcares.



**Fig. 2.** Porcentaje de consumo de azúcares en mezcla y producción de etanol para la cepa a) LR2 y b) LR5.1

La cepa LR5.1 obtuvo la mayor producción de alcohol a los 7 días con una concentración de 22.56 g/L de etanol, a este tiempo se tenía un consumo del 71.04% del total de los azúcares. A diferencia de la cepa LR2, la cepa LR5.1 consume principalmente fructosa (100%), glucosa (83.78%), xilosa (80.65%), sacarosa (80.45%), galactosa (58.58%) y en menor proporción arabinosa (57.98%), el mayor consumo de glucosa y fructosa pudo haber ayudado en la obtención de un pequeño aumento en la concentración de etanol.

## Discusión

Se ha informado de la capacidad de producción de etanol por una cepa de *Candida glabrata* con características similares a las de *Saccharomyces cerevisiae* mostrando un incremento en la concentración de etanol bajo condiciones de oxígeno limitado [5]. También se informó del consumo paralelo de arabinosa y xilosa en una mezcla que contiene glucosa, sin embargo, se ha obtenido con una cepa de *S. cerevisiae* modificada [6]. Como se puede observar en los resultados obtenidos la cepas *Candida glabrata* (LR2 y LR5.1) tuvieron la capacidad de asimilar xilosa y arabinosa simultáneamente similar a lo reportado y producir alcohol a partir de la mezcla que contenía otras hexosas, no es el caso en el perfil de asimilación individual donde no se observó consumo de pentosas, esto pudo ser debido a que la presencia de glucosa estimula de expresión de enzimas importantes en la asimilación de pentosas [7].

## Conclusiones

En la fermentación de mezcla de carbohidratos, la cepa LR2 tuvo un mejor consumo de las pentosas: xilosa (87.10%) y arabinosa (63.09%) en comparación a la LR5.1 donde son consumidas en menor porcentaje, xilosa (80.65%) y arabinosa (57.98%). En el caso del consumo de las hexosas la cepa LR2 consume principalmente sacarosa (93.27%) y Fructosa (88.96%) y la cepa LR5.1, fructosa (100%) y Glucosa (83.78%). En el perfil de asimilación individual ambas cepas no presentaron diferencia al consumir solo glucosa, fructosa y sacarosa. Ambas cepas produjeron alcohol a partir de estos carbohidratos.

## Agradecimientos

Se agradece a CONACyT por el proyecto financiado FOMIX 2011-C09-169165.

## Bibliografía

1. Hickert, L., Cunha-Pereira, F., De Souza-Cruz, P., Rosa, C. y Záchia, M. (2013). Ethanogenic fermentation of co-cultures of *Candida shehatae* HM 52.2 and *Saccharomyces cerevisiae* ICV D254 in synthetic medium and rice hull hydrolysate. *Biores. Technol.* 131: 508-514.
2. Matsushika, A., Inoue, H., Murakami, K., Takimura, O. y Sawayama, S. (2009). Bioethanol production performance of five recombinant strains of laboratory and industrial xylose-fermenting *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioresour. Technol.* 100, 2392-2398.
3. Wilkins, M., Widmer, W., Camero, R. y Grohmann, K. (2005). Effect of seasonal variation on enzymatic hydrolysis of Valencia orange peel waste. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 118: 419-422.
4. Singh, H., Vadlani, P., Brijwani, K., Bhargav, V. y Tumadu, R. (2010). Enhanced ethanol production via fermentation of rice Straw with hydrolysate-adapted *Candida tropicalis* ATCC 13803. *Biores. Technol.* 45: 1299-1306.
5. Watanabe, I., Nakamura, T. y Shima, J. (2008). A strategy to prevent the occurrence of *Lactobacillus* strains using lactate-tolerant yeast *Candida glabrata* in bioetanol production. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 35: 1117-1122.
6. Bettiga, M., Bengtsson, O., Hahn-Hägerdal, B. y Gorwa-Grauslund, M. F. (2009). Arabinose and xylose fermentation by recombinant *Saccharomyces cerevisiae* expressing a fungal pentose utilization pathway. *Microbial Cell Factories.* 8(40):1-12.

7. Govindaswamy, S. y Vane, L. M. (2007). Kinetics of growth and ethanol production on different carbon substrates using genetically engineered xylose-fermenting yeast. *Bioresour. Technol.* 98, 677-685.

## Artículo II

# ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL DE PRIMERA GENERACIÓN EN MÉXICO

Becerra L. A.

Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad Autónoma de Sinaloa, Blvd. Universitarios y Av. De las Américas, Unidad 3, C.U., Culiacán, Sin., Méx. C.P. 80010. Tel/fax (667) 7161128; e-mail: [becerra@uas.edu.mx](mailto:becerra@uas.edu.mx)

### Resumen

Este artículo construyó tres escenarios de producción de etanol de primera generación en México. Utilizando como insumo la caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha azucarera y maíz, se determinó la rentabilidad económica de la cadena productiva del etanol. Se estimaron costos unitarios y volúmenes de producción para cada insumo y escenario. Se concluyó que existe viabilidad económica para producir etanol de primera generación en México. Se comprobó que el insumo con mayor viabilidad en el corto plazo es la caña de azúcar, vía melazas, avanzando posteriormente a producirlo vía jugo directo. También se concluyó que el sorgo dulce es un insumo viable en el mediano plazo, en función de la validación del cultivo y los apoyos agrícolas. Se descartó la remolacha azucarera y el maíz como insumos para producir etanol.

**Palabras claves:** *etanol, rentabilidad de etanol, costos de etanol, escenarios de etanol.*

### Abstract

This article built three ethanol production scenarios first generation in Mexico. Using as input the sugar cane, sweet sorghum, sugar beet and maize, we investigated the economic profitability of the ethanol production chain. Unit costs and production volumes for each scenario were estimated. It was concluded that economic viability is to produce first-generation ethanol Mexico. It was found that more input in the short-term viability is sugar cane, molasses route, moving later to produce via direct juice. It was also concluded that sweet sorghum is a viable input medium term, depending on the validation of the crop and farm subsidies. Sugar beet and corn, as inputs to produce ethanol, were discarded.

**Keywords:** *ethanol profitability of ethanol, ethanol cost, ethanol scenarios*

### Introducción

La oferta de energía primaria mundial continúa altamente concentrada en la energía fósil. El 32.2% proviene del petróleo, 27.3% del carbón, 21.6% del gas natural, 5.6% nuclear y 0.3% de otras fuentes (residuos no renovables, turba y calor químico). Sólo el 13% de la energía primaria mundial proviene de fuentes renovables. De ésta, el 9.8% proviene de biocombustibles y residuos, 2.3% es hidráulica y 0.9% procede de otras fuentes (geotérmica, eólica, solar y mareomotriz).

No obstante la baja participación de la energía renovable, en los últimos 20 años ha venido aumentando. Las tasas de crecimiento promedio anual para el período 1990-2010 son: solar fotovoltaica 44.3%, eólica 25.1%, biogás 14.6%, biocombustibles

líquidos 11.2%, solar térmica 10.2%, geotérmica 3.3%, hidráulica 2.4%, y biocombustibles sólidos/carbón vegetal 1.3% [1].

En perspectiva, la producción de biocombustibles líquidos a nivel mundial, específicamente etanol, tiene amplias posibilidades de crecimiento. Las leyes que se han aprobado en distintas regiones del mundo obligan a utilizarlo como oxigenantes en las gasolinas. Según la OECD-FAO (2012) [2], la producción de etanol anual es de 98 mil millones de litros (promedio 2009-2011) y será de 180 mil millones para el año 2021, participando Estados Unidos con 45% y Brasil con 28%, que continuarán siendo los dos principales países productores de este biocombustible. De acuerdo a las proyecciones, en la próxima década los países que registrarán una mayor tasa de crecimiento en la producción de etanol son Tailandia (8.51%), Colombia (8.32%), Sudáfrica (7.99%) y Brasil (7.58%); en tanto los países que observarán las menores tasas de crecimiento son Australia (0.74%), China (0.80%) y México (0.98%). En cuanto al comercio exterior de etanol, los países más deficitarios serán Estados Unidos, Europa y Canadá; mientras los más superavitarios serán Brasil, Sudáfrica y Tailandia.

En México la producción de etanol es de 200 millones de litros (promedio 2009-2011) y se elabora a partir de la caña de azúcar. A pesar de existir la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos [3], así como diversos programas gubernamentales relacionados con el tema, el etanol producido en México es sólo para consumo humano, industrial y farmacéutico, no para uso combustible. Por lo tanto, la mezcla de etanol con gasolina aún no está disponible para su venta al público. De hecho, México registra un déficit en su comercio exterior de 137 millones de litros de alcohol (promedio 2009-2011) y se estima que éste aumente a 170 millones para el año 2021 [2].

El presente trabajo es un ejercicio empírico que a partir de cuatro insumos y tres escenarios determina la viabilidad económica de producir etanol de primera generación en México. Los insumos utilizados son caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha azucarera y maíz. El objetivo es estimar las tasas de rentabilidad económica en la cadena productiva del etanol. La hipótesis es que existe rentabilidad económica en los cuatro insumos y los tres escenarios, tanto en la fase agrícola como industrial. Se hace un análisis comparativo entre insumos y se concluye con la determinación del insumo más viable a corto y mediano plazo.

### **Materiales y métodos**

Para llevar a cabo este trabajo se utilizó la herramienta *Advanced Tool for Agro-economical and Techno-economical Evaluation of Bioenergy Mexico (TAB Plus)*, software que permite evaluar la rentabilidad agrícola e industrial de la producción de biocombustibles a partir de diferentes tipos de biomasa. Con esta herramienta se pueden realizar cálculos asequibles a diferentes tipos de comunidades académicas, empresariales y gubernamentales, siendo capaz de estimar costos y volúmenes de producción de etanol, biodiesel, biogás y cogeneración [4].

La metodología que utiliza el software se divide en dos fases. La primera, consiste en estimar los costos de producción de las materias primas que posteriormente se utiliza para determinar el precio de éstas en la puerta de la planta de biocombustibles; la segunda fase, realiza las conversiones industriales de la biomasa en biocombustible, determinando el costo de producción por litro. Esta fase, utiliza los resultados generados en la primera, como son el precio de la materia prima, y define una ruta tecnológica de acuerdo a las opciones disponibles para México [5].

La información agrícola para determinar los costos de producción de la materia prima se obtuvo de una profunda revisión bibliográfica, detallada por cultivo, ubicación, ciclo agrícola, régimen hídrico, productividad y agregando todos los componentes que suman y restan en la estructura de costos. Específicamente, se incluye apoyos y subsidios recibidos por el agricultor, como son el programa de apoyos al campo y el programa de apoyo a la adquisición de diésel. Los valores utilizados fueron 88.79 y 25 dólares por hectárea, respectivamente. También se incluyó la renta de la tierra, la depreciación de la maquinaria y los intereses financieros del crédito. Estos valores fueron de 510, 204 y 122 dólares por hectárea, respectivamente. Todos los cálculos están hechos en dólares americanos a un tipo de cambio de 12.25 pesos por dólar. Las estimaciones contemplan las conversiones obtenidas en procesos químicos estándares a nivel mundial, mismos que fueron comprobados en la planta piloto de biotecnología y agroindustrias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Para realizar las estimaciones de producción de etanol de caña de azúcar, se presentan tres posibilidades. A partir de la superficie sembrada total, se construyeron tres escenarios que suponen utilizar 15%, 30% y 50% de la superficie sembrada. En base a los rendimientos se buscó hacer coincidir el primer escenario con el excedente de azúcar en México. En este caso, el objetivo fue no generar un déficit de azúcar, ya que eso traería problemas de abasto y aumentos de precio, impactando negativamente en la población. Otra razón más, fue la meta gubernamental de producción de etanol de 810 millones de litros, mismo que se utilizaría para mezclarlo con la gasolina consumida en las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y Ciudad de México.<sup>1</sup> El segundo y tercer escenarios, se construyeron suponiendo que de la superficie sembrada, se destinara un mayor porcentaje a la producción de etanol, lo que inevitablemente provocaría un déficit de azúcar, si es que esta acción no se acompaña de un incremento en la superficie sembrada. El primer escenario implica dejar de producir 804 mil, el segundo 1.6 millones y el tercer 2.7 millones de toneladas de azúcar.

Para construir los escenarios de maíz, a partir de la superficie sembrada total de este grano, se supuso un porcentaje creciente. En el caso de remolacha azucarera y sorgo dulce, los escenarios se definieron en la misma cuantía que el maíz, para hacerlos coincidir y facilitar su comparación (ver tabla 1).

---

<sup>1</sup> El Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico

La evaluación se realizó suponiendo que no existen diferencias regionales en productividad y costos en México, por lo que los resultados podrían entenderse como promedio nacional. Para contar con mayor precisión y certeza en las estimaciones, se requiere hacer estudios regionales que tomen en cuenta información local, así como evaluar el resto de condiciones específicas que influyen en los determinantes de costos, sobre todo en el primer eslabón de la cadena productiva del etanol.

**Tabla 1:** Escenarios para la producción de etanol de primera generación en México (hectáreas)

Escenario	Caña de azúcar		Maíz		Remolacha azucarera	Sorgo dulce
	Superficie a utilizar	% de superficie actual	Superficie a utilizar	% de superficie actual	Superficie a sembrar	Superficie a sembrar
1	107,914	15%	110,000	1.4%	110,000	110,000
2	215,827	30%	220,000	2.8%	220,000	220,000
3	359,712	50%	360,000	4.6%	360,000	360,000

Fuente: elaboración propia.

### Resultados

Los resultados indican la existencia de una tasa de rentabilidad agrícola de 26.2% para la caña de azúcar, 39.1% para el maíz, 13.1% para la remolacha azucarera y 6.9% para el sorgo dulce. Dado que la estructura de costos utilizada para la estimación incluye apoyos, siendo el maíz un cultivo fuertemente subsidiado, su tasa de rentabilidad podría estar sobreestimando. En el caso de remolacha azucarera y sorgo dulce, dada la escasez de información confiable, sus tasas podrían tener cierto grado de imprecisión. Pero también, por ser cultivos nuevos en México y no recibir apoyos ni subsidios, sus tasas podrían estar subestimadas.

En la fase de producción de etanol, cuando se utiliza la caña de azúcar como insumo se obtienen 819, 1,637 y 2,729 millones de litros para los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente. Con el maíz se obtienen 440, 880 y 1,440 millones de litros, progresivamente en cada uno de los escenarios. La remolacha azucarera permite obtener 438, 875 y 1,432 millones de litros, en cada uno de los escenarios. En base al sorgo dulce se obtienen 605, 1,210 y 1,980 millones de litros en cada escenario sucesivamente (ver tabla 2).

**Tabla 2.** Producción de etanol en México, por insumo y escenario (Miles de litros)

Escenario	Caña de azúcar	Maíz	Remolacha azucarera	Sorgo dulce
1	818,681.0	440,119.8	437,580	605,000
2	1,637,354.4	880,239.6	875,160	1,210,000
3	2,728,926.5	1,440,392.1	1,432,080	1,980,000

Fuente: estimaciones propias.

Los costos unitarios de la producción de etanol indican que el maíz es el proceso más caro, le sigue hacia abajo el sorgo dulce, caña de azúcar y remolacha azucarera; los costos unitarios estimados son 54, 53, 51 y 49 centavos de dólar por litros, respectivamente (ver tabla 3). La variación de costos se debe a las distintas tecnologías utilizadas en cada uno de los insumos y a los diferentes parámetros de conversión. Aunque la diferencia es pequeña, es significativa dado los altos volúmenes de producción por planta y año. Las variaciones entre escenario se debe a las economías de escala existentes, que a medida que aumenta el volumen de producción disminuye su costo unitario.

**Tabla 3.** Costos de producción de etanol en México, por insumo y escenario (USD/L)

Escenario	Caña de azúcar	Maíz	Remolacha azucarera	Sorgo dulce
1	0.5094	0.5447	0.4934	0.5285
2	0.5087	0.5434	0.4920	0.5276
3	0.5084	0.5429	0.4915	0.5272

Fuente: estimaciones propias.

En cuanto a la rentabilidad en la fase industrial, la mayor tasa se obtiene cuando se produce etanol a partir de remolacha azucarera (62%), le sigue caña de azúcar (57%), sorgo dulce (51%) y maíz (47%) (ver tabla 4). Estas tasas aumentan conforme se escalan escenarios, debido a que los costos van disminuyendo a medida que aumenta la producción. Hay que señalar que son tasas de rentabilidad muy atractivas, y que además, no incluyen apoyos y subsidios que potencialmente puede recibir el industrial de esta nueva actividad económica en México, lo cual aseguraría un retorno más rápido de la inversión.

**Tabla 4.** Rentabilidad de la producción de etanol en México, por insumo y escenario (%)

Escenario	Caña de azúcar	Maíz	Remolacha azucarera	Sorgo dulce
1	57.0	46.9	62.2	51.4
2	57.3	47.2	62.6	51.6
3	57.4	47.4	62.8	51.7

Fuente: estimaciones propias.

Un factor muy importante en la cadena del etanol es la producción del insumo principal. Éste se deberá producir en un contexto de máxima certidumbre y mínimo costo posible, dado que su participación en la estructura de costos del proceso industrial tiene un gran peso relativo. Los resultados de este ejercicio empírico muestran que el insumo remolacha azucarera tiene un peso de al menos el 80% en la estructura de costos del etanol. La caña de azúcar tiene un peso de 69%, el maíz de 67% y el sorgo dulce de 43%.

### Discusión

El etanol de primera generación se produce a partir de biomasa con altas concentraciones de azúcares y almidones, utilizando conversiones bioquímicas con tecnologías maduras que están en su fase comercial. Los materiales ricos en azúcares comúnmente utilizados son caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera; en tanto los ricos en almidones son maíz, trigo y sorgo grano [7]. En el presente análisis se utilizaron cuatro insumos: caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha azucarera y maíz. Hay que señalar, que en el caso del sorgo dulce, la experiencia tecnológica es menor ya que la variedad de sorgo dulce más utilizada para producir etanol (*Sorghum bicolor* L. Moench) está en proceso de validación agrícola en varias regiones México [8, 9 y 10].

De los insumos estudiados, la caña de azúcar y maíz son cultivos históricamente producidos en México, por lo que su práctica agrícola es generalmente conocida y los diversos paquetes tecnológicos ampliamente dominados. En cambio, la remolacha azucarera y el sorgo dulce son cultivos que no se siembran en el país, por lo que no existe experiencia agrícola sobre ellos y su práctica implicaría vencer la resistencia natural del agricultor. También, los dos primeros cultivos son básicos en la dieta alimentaria del mexicano y los dos segundos no tendrían ese problema, y menos aún el sorgo dulce, ya que su consumo humano es marginal. Por ejemplo, al destinarse parte de la producción de caña de azúcar a la generación de etanol, por el método directo, existe el problema que se dejaría de producir azúcar; pero al hacerlo a partir de melazas, lo único que se haría es sustituir alimento animal por generación de alcohol. México no está aprovechando su generación de melazas, de hecho, sólo utiliza el 3.6% de las mismas para producir alcohol no carburante y el resto de melaza la exporta principalmente a Estados Unidos. Si se aprovechara industrialmente el 100% de las melazas, México podría producir 400 millones de litros de etanol por año

[11]. Producir este volumen de etanol no requiere dejar de producir azúcar, únicamente implicaría re direccionar las melazas del consumo animal a la producción de etanol.

A juzgar por los resultados, la caña de azúcar es el insumo que mayor volumen de etanol produce en los tres escenarios, seguido del sorgo dulce, maíz y remolacha azucarera. Con el objetivo de cruzar oferta y demanda, a partir del consumo de gasolina en México (47,324 millones de litros por año) y sus requerimientos legales de oxigenación, se estimó la demanda potencial de etanol. Utilizando la posible oferta producida con caña de azúcar y la demanda potencial, se calculó que la producción del escenario 1 cubriría el 30% de la demanda potencial de etanol para oxigenación de gasolina, la producción del escenario 2 cubriría el 61% y la producción del escenario 3 cubriría el 100%.

**Tabla 5.** Indicadores de la producción de etanol de primera generación en México

Insumo	Rentabilidad agrícola (%)	Rentabilidad industrial (%)	Costos (Centavos USD/litro)	Participación en costos totales (%)	Producción de etanol (Millones de litros/año)
Sorgo dulce	6.9	51	53	43	605 (110,000)
Caña de azúcar	26.2	57	51	69	818.7 (108,000)
Maíz	39.1	47	54	67	440 (110,000)
Remolacha azucarera	13.1	62	49	80	438 (110,000)

Notas: los datos corresponden a estimaciones para el primer escenario; los valores en paréntesis son superficie a utilizar/sembrar en hectáreas. La rentabilidad agrícola incluye apoyos y subsidios.

Fuente: elaboración propia

Al hacer el análisis conjunto a lo largo de la cadena productiva (ver tabla 5), podemos apreciar que los cuatro insumos son rentables para producir etanol, aunque la debilidad económica mayor está en la fase agrícola, ya que las tasas de rentabilidad obtenidas en los cuatro casos son menores, que en la fase industrial. Esto implica que sería la fase primaria de la cadena productiva, la que requeriría mayores subsidios para asegurar la viabilidad de toda la actividad económica del etanol. En el caso del maíz, a pesar de obtener la tasa de rentabilidad agrícola más alta, es el insumo menos viable en términos de rentabilidad industrial y costos unitarios (54 centavos de dólar por litro). Además, existe un impedimento legal para producir etanol a partir de este grano, en tanto México no registre un superávit nacional<sup>2</sup>. Por lo anterior, el maíz se descarta como un insumo viable para producir etanol en el corto plazo. Por el contrario, la remolacha azucarera, no obstante de tener el menor costo unitario de producción, tiene una tasa de rentabilidad agrícola muy baja. Asimismo, tiene en contra el hecho de ser un cultivo inexistente en México y su gran peso relativo (80%) en la estructura de costos industriales totales, lo que la hace sumamente riesgoso. Entonces, la remolacha azucarera también se descarta como insumo para producir

<sup>2</sup> Artículo 11, fracción VIII, Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos [3].

etanol en el corto plazo. En el caso del sorgo dulce, aunque observa tasas de rentabilidad agrícola muy bajas (7%), tiene una rentabilidad industrial alta (51%), unos costos unitarios muy similares al de la caña de azúcar y una baja participación relativa en la estructura de costos industriales totales (43%). Dado lo anterior, si bien es un cultivo nuevo en México, el sorgo dulce tiene un alto potencial para producir etanol en el mediano plazo, además de no competir con la alimentación humana, ni contar con restricciones legales. Por último, la caña de azúcar arroja una moderada rentabilidad agrícola (26%), una alta rentabilidad industrial (57%) y unos costos unitarios dentro del promedio (51 centavos de dólar por litro). Tiene en contra que al producir etanol por el método de jugo directo, se dejaría de producir azúcar; pero si se produce etanol utilizando melazas, ese efecto negativo se elimina. Por todo lo anterior, se concluye que en el corto plazo, el insumo más viable para producir etanol en México es la caña de azúcar, vía melazas. Posteriormente, en función del déficit/superávit de azúcar o del incremento de la superficie sembrada de caña, se podría producir etanol vía jugo directo. Para el mediano plazo, con muy buenas expectativas, queda el sorgo dulce, en función de la validación del cultivo y de los posibles apoyos agrícolas.

### Conclusiones

El estudio encontró que la producción de etanol de primera generación en México, en términos económicos, es viable. Utilizando cuatro insumos agrícolas y tres escenarios, se estimaron tasas de rentabilidad en la fase agrícola e industrial en cada caso, mismas que son positivas. En ese sentido, se comprueba la hipótesis del presente trabajo.

El análisis conjunto indica, que la debilidad mayor de la cadena productiva del etanol está en la fase agrícola, por lo que sería este eslabón el que demandaría mayores apoyos en caso de promover su producción en México. Se concluye que la mayor viabilidad económica del etanol en el corto plazo está en la caña de azúcar, vía melazas, posteriormente se podría avanzar a producirlo vía jugo directo, en función del superávit/déficit de azúcar o del incremento de la superficie sembrada de caña. El sorgo dulce, no obstante de ser un cultivo nuevo en México, registra un alto potencial en el mediano plazo, dependiendo de la validación nacional del cultivo y de los posibles apoyos agrícolas; además, no compite con la alimentación humana ni cuenta con restricciones legales para utilizarlo como insumo. Se descarta la remolacha azucarera por ser un cultivo inexistente en México, observar bajas tasas de rentabilidad agrícola y tener una participación relativa muy alta en los costos industriales totales, lo que la convierte en un insumo de alto riesgo. El maíz también queda descartado como insumo para producir etanol por existir un impedimento legal para utilizarlo, dado el déficit nacional de este grano.

Finalmente, es plausible que la producción de etanol de primera generación se detone a nivel regional. Estudios específicos que tomen en cuenta las condiciones locales de insumos deberán realizarse. Dado que los costos de producción del etanol están fuertemente determinados por la materia prima principal, los factores de localización y transporte, son muy relevantes. Así, existe una oportunidad de desarrollo para

aquellas regiones que consideren tener el potencial primario de la cadena productiva del etanol en México.

### Bibliografía

1. IEA Statistics (2012). Renewables Information. France, pp. 497. ISBN: 978-92-64-17388-0
2. OECD-FAO (2012). OECD-FAO Agricultural Outlook 2012-2021. *OECD Publishing and FAO*. Pp. 286.
3. SAGARPA (2008). Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, Diario Oficial de la Federación, 01 de febrero, México.
4. Rincón, L.E.; Becerra, L.A.; Cardona, C.A. y Quintero, J.A. (2011). Advanced Tool for Agro-economical and Techno-economical Evaluation of Bioenergy México (TAB Plus). *Software de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales*.
5. FAO (2012). A Compilation of Tools and Methodologies to Assess the Sustainability of Modern Bioenergy (BEFSCI), environment and natural resources management. *WP 51*, Roma, Italia, pp. 118.
6. Simpson, E.A. (2010). Adquisición de bienes consistentes en etanol anhidro para oxigenar gasolinas en la Zona Metropolitana de Guadalajara, bajo la modalidad de contrato abierto sujeto a ajustes de precios, para los años 2011-2015. *Testimonio público de la licitación nacional mixta fuera de la cobertura del TLC*. Testigo Social PF009, pp. 139.
7. REMBIO (Red Mexicana de Bioenergía, A.C.) (2011). La bioenergía en México, situación actual y perspectivas. *Cuaderno temático No. 4*. México, pp. 42.
8. Alvarado, J.I.; Ávila, E.; Camarillo, M. y Ochoa, X.M. (2010). Sorgo dulce: avances de investigación de cultivos bioenergéticos en el Valle de Mexicali. *Desplegable No. 22*. Mexicali, B. C. Méx. INIFAP.
9. Armenta, A.; Ochoa, X.M.; Rodríguez, R. y Zamarripa, A. (2010). Sorgo dulce: una opción rentable y competitiva para biocombustibles en el Valle del Yaqui. *Centro de Investigación Regional del Noroeste-Campo Experimental Norman E. Borlaug*. Cd. Obregón, Son. Mex. INIFAP, pp. 32.
10. Montes, N.; Salinas, J.; González, A.; Loredo, R. y Díaz, G. (2010). Guía técnica de producción de sorgo dulce [*Sorghum bicolor (L.) Moench*] en Tamaulipas. *Folleto técnico No. 49*, Río Bravo, Tamaulipas, México. INIFAP, pp. 46.  
[http://dx.doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2012-en](http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2012-en)
11. García, C.A. (2011). Etanol de primera generación, estudio de la sustentabilidad de su producción considerando el ciclo de vida y análisis económico-ambiental de su introducción en el sector transporte mexicano. *Tesis de doctorado en Ingeniería (energía y medio ambiente)*. Instituto de Energías Renovables, UNAM. Temixco, Morelos, México, PP. 168.

### Artículo III

## EVALUACIÓN DE CEPAS FERMENTATIVAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA

Sandoval Nuñez D., Gschaedler Mathis A., Arellano Plaza M. y Amaya Delgado L.

Normalistas 800.Colinas de la Normal, Guadalajara Jalisco. [lamaya@ciatej.mx](mailto:lamaya@ciatej.mx)  
Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C.

**Resumen.** Se evaluó la capacidad fermentativa de diferentes cepas de levaduras para la producción de bioetanol a partir de hidrolizados de bagazo de caña (BC), para la obtención de azúcares fermentables, se utilizaron diferentes métodos de hidrólisis para el BC. Para la selección de cepas se evaluó la producción de etanol, empleando medios complejos, utilizando glucosa, glucosa-xilosa y xilosa como única fuente de carbono, de los cuales se observó que disminuye la producción de etanol en aproximadamente 50% al utilizar como fuente de carbono pentosas y en mezcla de hexosas y pentosas. Las mismas cepas fueron evaluadas en la fermentación del hidrolizado de BC, las condiciones de fermentación fueron a 30°C y 100rpm, obteniéndose una concentración de azúcares fermentables de 40 g/L y 10g/L de etanol al utilizar la cepa de *K. marxianus* SLP1.

**Abstract.** The fermentative capacity of different yeast strains was evaluated in order to produce bioethanol from sugarcane bagasse hydrolysates (SB). Fermentable sugars were obtained using different methodologies for SB hydrolysis. The yeast strains were selected according to their capacity of ethanol production in glucose, glucose/xylose and xylose as unique carbon source. A decrease of 50% in ethanol production was observed when pentose or hexoses-pentoses were used. In a second experiment the yeasts were tested using SB hydrolysates as carbon source (40 g/L of fermentable sugars) at 30°C and 100 rpm. The highest production of ethanol (10 g/L) was reached using the *K. marxianus* SLP1 yeast strain.

**Palabras Clave:** Bioetanol, Residuos Lignocelulósicos, bagazo de caña.

### Introducción

El bioetanol es considerado en la actualidad uno de los principales biocombustibles, ya que ofrece grandes ventajas, por estar libre de sulfuros: disminución del consumo de combustibles fósiles y reducción de la contaminación ambiental provocada por este tipo de carburantes [1].

En México se generan grandes cantidades de desechos agrícolas, uno de los principales desechos es el bagazo de caña, del cual se disponen aproximadamente

(13 millones de ton/año) para generar bioetanol a partir de este. Actualmente, el acoplamiento de tratamientos químicos, enzimáticos y de fermentación ha permitido desarrollar tecnologías para convertir en etanol, una amplia variedad de residuos agroindustriales. Entre éstos se encuentran el bagazo de caña, la cascarilla de arroz, el rastrojo, los desechos de madererías, maderas suaves y duras, etc., los cuales son transformados mediante procesos de hidrólisis químicos y enzimáticos, en azúcares y posteriormente en etanol mediante procesos de fermentación [2]. Por lo cual se contribuirá al desarrollo de combustibles de gran interés biotecnológico, por otra parte se determinará un método de hidrólisis que proporcione mayores rendimientos en la sacarificación del bagazo de caña (BC). Se evaluarán diferentes cepas de levaduras capaces de producir etanol en medios complejos y a partir de hexosas y pentosas generadas durante el proceso de hidrólisis del BC. Al establecer el mejor método de hidrólisis para el BC, se determinará el método de hidrólisis que genere mayor rendimiento en el proceso de sacarificación para la generación de bioetanol a partir de este tipo de residuos, además, la selección de cepas de levaduras capaces de producir etanol a partir de los diferentes azúcares generados durante el proceso de hidrólisis permitirá conocer la viabilidad de cepas de levaduras de géneros distintos para la producción de bioetanol a partir de diferentes residuos lignocelulósicos. Sin embargo es necesario conocer y determinar los factores que influyen en el proceso de fermentación como pueden ser los tipos de inhibidores de crecimiento celular, concentración de ciertos minerales, entre otros [3].

### Material y Métodos

Este trabajo se realizó en el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. A.C., dentro del proyecto “Estudio de prefactibilidad para la producción de bioetanol a partir de bagazo de caña del Estado de Campeche” En un periodo de seis meses.

La evaluación de la hidrólisis del BC se llevó a cabo empleando métodos de hidrólisis química, enzimática y químico-enzimática, se empleó una relación sólido: líquido de 1:10. En la hidrólisis química se empleó  $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$  y HCl a concentraciones de 0.5, 1, 1.5 y 2% (v/v). Para la hidrólisis enzimática se emplearon diferentes extractos enzimáticos comerciales, de manera individual o en combinaciones (coctel enzimático), a partir de los cuales se seleccionó el que presentó mayor capacidad hidrolítica sobre el BC. Para llevar a cabo la hidrólisis ácido-enzimática, primeramente se trató el BC con el ácido  $H_2SO_4$  al 2%, a una temperatura de 121°C durante 15 min, posteriormente se adicionó el coctel enzimático CT2-HT2. Para la selección de las cepas con capacidad de producir mayores rendimientos de etanol a partir de las hexosas y pentosas, se realizaron fermentaciones de 48 h con *Candida boidinii* (DTI), tres *Saccharomyces cerevisiae* (ERD, AR5 y MC4) y dos *Kluyveromyces marxianus* (OFF1 y SLP1), empleando glucosa (YPD), mezcla glucosa y xilosa (YPDX) 1:1 y xilosa (YPX) como única fuente de carbono.

Para los tres medios se utilizó una concentración de azúcares de 20 g/L. Para estas mismas cepas se determinó la producción de etanol en hidrolizados de BC, se

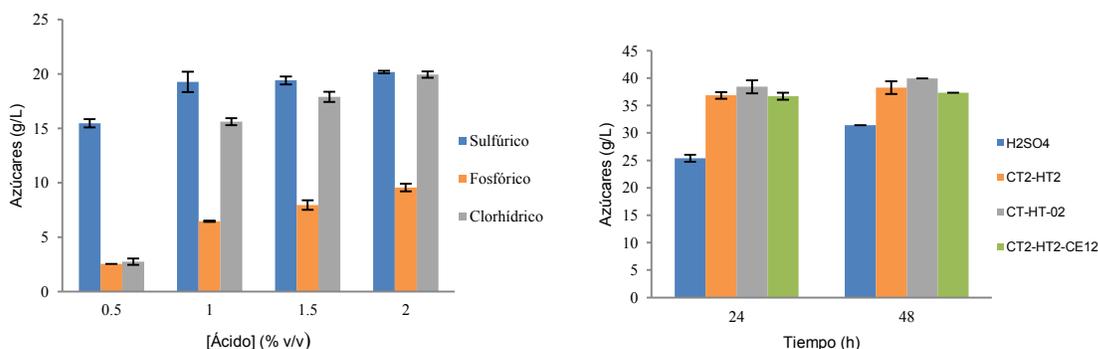
fermentó durante 72 h, la cuantificación de etanol se determinó mediante cromatografía de gases.

## Resultados

Se evaluó la hidrólisis ácida del BC, los resultados se presentan en la figura 1, donde se pueden observar las concentraciones de azúcares reductores obtenidas para cada condición experimental. La mayor concentración obtenida fue de aproximadamente 20 g/L, al emplear el  $H_2SO_4$  al 2%. Para el caso de la hidrólisis enzimática, se efectuó un diseño de experimentos, empleando un análisis de varianza multifactorial, se utilizaron diez extractos enzimáticos y se varió la concentración en 0.5, 1 y 1.5 % (p/v) para cada coctel, a partir del cual se determinó que los cocteles enzimáticos que estadísticamente tienen mayor efecto en la generación de azúcares son CT2+HT2, CE02+ CT2+HT2 y CE12 +CT2+HT2. Con base en estos resultados se decidió emplear un método ácido-enzimático para la hidrólisis de BC, del cual se muestran las concentraciones de azúcares en la figura 2, al emplear  $H_2SO_4$  al 2% y los cocteles CT2+HT2, CE02+ CT2+HT2 y CE12 +CT2+HT2.

(1)

(2)



**Figura 1.** Hidrólisis ácida del BC, empleando  $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$  y HCl. **Figura 2.** Hidrólisis ácido-enzimática del BC.

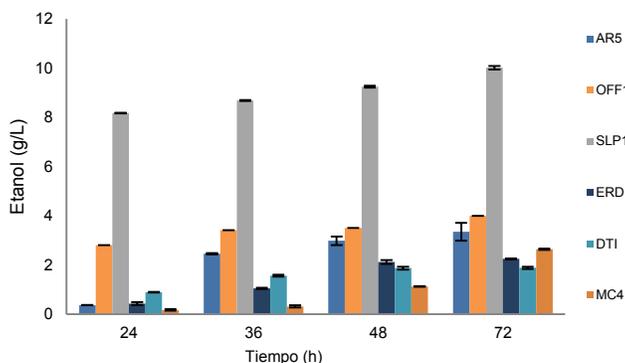
Las concentraciones de etanol obtenidas en las fermentaciones realizadas en medios complejos se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Concentración de etanol (g/L) en medios complejos

Medio	AR5	OFF1	SLP1	ERD	DTI	MC4
YPD	9.73±0.025	9.19±0.038	6.84±0.044	7.8±0.026	8.31±0.17	6.8±0.205
YPX	2.6±0.13	4.5±0.19	5.2±0.059	2.5±0.49	1.8±0.02	1.98±0.13
YPD <sub>X</sub>	3.25±0.17	2.19±0.19	3.7±0.09	3.25±0.016	3.85±0.025	3.75±0.029

Para la fermentación del hidrolizado de BC, se empleó el método ácido-enzimático, empleando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 2% y el coctel CT2+HT2, del cual mediante HPLC se determinó que contiene aproximadamente de 40 g/L de azúcares reductores, de los cuales aproximadamente se tiene 50% de glucosa, 49% de xilosa y 1% de arabinosa. Las concentraciones de etanol generadas a partir de las diferentes cepas se presentan en la figura 3.

(3)



**Figura 3.** Fermentación de hidrolizados de BC.

## Discusión

Empleando el método de hidrólisis ácido-enzimático, se obtuvo una mayor concentración de azúcares reductores aproximadamente de 40 g/L. Hernández y cols. [4], realizaron la hidrólisis del BC, empleando HCl al 1.2%(v/v), para una relación ácido: bagazo 15:1, la cual se llevó a cabo durante 4 horas a 121°C. Para esta hidrólisis se obtuvo una concentración de azúcares de 35 g/L y una concentración de etanol de 12.5g/L. Con base a los resultados reportados por Ferrer y cols. [5], en este trabajo se obtuvo una buena conversión de AR durante la hidrólisis ácida y ácido-enzimática, las relaciones empleadas sólido: líquido fueron menores al igual que el tiempo de exposición del BC a altas temperaturas. Se obtuvo una concentración de etanol similar a la reportada por Hernández y cols. [4]. Se observó una disminución en la generación de etanol por parte de todas las cepas al emplear medios de cultivo

teniendo xilosa (YPDX y YPX), lo cual indica que la concentración de pentosas presentes en el medio influye de manera significativa en la producción de etanol.

### Conclusiones

Se obtuvo un mayor grado de sacarificación del BC, empleando métodos de hidrólisis ácido-enzimáticos. Al emplear la cepa SLP1 se obtuvo una mayor concentración de etanol para los hidrolizados de BC, lo cual indica que esta cepa no-*Sacharomyces* tiene una mejor capacidad para producir etanol en comparación con las cepas tradicionales del género *Saccharomyces*, las cuales son empleadas comúnmente en la fermentación de residuos lignocelulósicos.

### Bibliografía

1. Goldemberg, J. 2007. Ethanol for a sustainable energy future. *Science*. vol 315: 808–810.
2. S.Brethau. Wyman C.E. 2010. “Review: Continuous hydrolysis and fermentation for cellulosic ethanol production”. *Bioresource Technology*. Vol (101): 62-74.
3. Palmqvist E. Hahn-Hagerdal B. 1999. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates: Inhibition and detoxification. *Bioresource. Technology*. vol (74): 25-33.
4. Hernández M. Villa J.S. Veloz K.N. Rivera R.A. González M.A. Plascencia S.R. Trejo Estrada. 2009. Comparative hydrolysis and fermentation of sugarcane and agave bagasse. *Bioresource. Technology*. vol (100):1238-1245.
5. Ferrer. J. Páez. R.G. Arenas de Moreno L. Chandler C. Mármol Z. Sandoval L. 2002. Kinetics of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse pith. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. vol (19): 23-33.

## Artículo IV

# HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA DE HARINA PRETRATADA DE LIMÓN PERSA (*Citrus latifolia*)

López Domínguez C., Rodríguez Buenfil I., Pacheco López N. y Sánchez Contreras A.

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. Unidad Sureste.  
Calle 30 No. 151 por 7 y 7<sup>a</sup>, Interior CANACINTRA. Col. García Ginerés, Mérida, Yucatán, México. CP.  
97070. Tel: (999) 9202671. [msanchez@ciatej.net.mx](mailto:msanchez@ciatej.net.mx)

**Abstract.** En el presente trabajo, se realizó una hidrólisis enzimática de harina de desechos de limón persa (*Citrus latifolia*) pre tratada, a la cual se le extrajeron previamente polifenoles y pectina. Con el objetivo de determinar la concentración y el perfil de azúcares liberados durante la hidrólisis, se probaron cuatro diferentes enzimas comerciales mediante un diseño experimental 3x4 donde se evaluó el tipo de enzima y su concentración expresada como g de proteína añadida/Kg de harina tratada. En la mejor condición, se produjeron glucosa, xilosa, galactosa y arabinosa, alcanzando respectivamente 196, 18, 20 y 19 g/Kg de harina.

In this paper, an enzymatic hydrolysis of pretreated persian lemon (*Citrus latifolia*) waste flour previously subjected an extraction of polyphenols and pectin, was performed. In order to determine the concentration and the released sugar profile during the hydrolysis, four different commercial enzymes were tested. The type of enzyme and its concentration expressed as g of protein/Kg of flour treated was evaluated with a 3x4 experimental design. Concentration of glucose, xylose, galactose and arabinose, 96,18,|20 and 19 g/Kg of flour respectively, were obtained at the best condition.

**Palabras Clave:** Hidrólisis enzimática, limón, azúcares

## Introducción

La conversión de la materia celulósica a azúcares fermentables, requiere del uso de enzimas hidrolíticas, que actúen de manera sinérgica sobre el sustrato. Son tres principalmente: endo- $\beta$ -glucanasa, exo- $\beta$ -glucanasa y  $\beta$ -glucosidasa [1]. Se sabe que los residuos cítricos son una adecuada materia prima para la obtención de bioetanol y otros co-productos, debido a su alto contenido de azúcares solubles y polisacáridos insolubles como celulosa y hemicelulosa con un mínimo nivel de lignina [2]. A nivel industrial se generan residuos equivalentes al 57% del peso de los frutos procesados [3]. En el estado de Yucatán, se buscan estrategias para su aprovechamiento mediante la conversión de estos polisacáridos en azúcares fermentables para la producción de bioetanol. Aunque suele ser un método costoso, el uso de enzimas comerciales es comúnmente empleado para llevar a cabo la hidrólisis de gran diversidad de residuos [4]. Boluda y López emplean diferentes concentraciones de

enzima (mg de proteína/g sólido) para hidrolizar cáscaras de limón pre tratada por explosión a vapor, obteniendo un perfil de azúcares compuesto por: 23.64%, 1.69%, 4.23% y 3.49% p/p en materia seca de glucosa, xilosa, galactosa y arabinosa, respectivamente [3]. El objetivo de este trabajo fue determinar la concentración y perfil de azúcares liberados durante la hidrólisis de limón persa (*Citrus latifolia*) previamente tratado para la recuperación de polifenoles y pectina, empleando cuatro diferentes sistemas enzimáticos comerciales.

### Material y Métodos

El presente estudio se llevó a cabo en el laboratorio de la Unidad Sureste del CIATEJ, como parte de un proyecto en el que se busca el aprovechamiento integral de los residuos cítricos, generados en la planta procesadora de la Unión de Ejidos de Citricultores del Sur del Estado de Yucatán A.C. Para éste estudio se analizaron los residuos generados durante la temporada de producción citrícola 2011-2012, se empleó una harina de cáscara de limón persa (*Citrus latifolia*), a la cual previamente se le extrajeron polifenoles y pectina; además se caracterizó proximalmente. Se planteó un diseño experimental 3x4 en donde se evaluaron dos factores con diferentes niveles cada uno y una variable de respuesta (concentración de azúcares liberados expresados como g glucosa/Kg de harina). El primer factor analizado fue el tipo de enzima empleado: Celluclast 1.5L (celulasas), Novozyme 188 ( $\beta$ -glucosidasa), Viscozyme L (celulasas y  $\beta$ -glucosidasa) y Pectinex Ultra SPL (pectinasa), adquiridas de Sigma-Aldrich. El segundo factor fue la concentración de estas enzimas, las cuales fueron: 1(2.25), 2 (11.27) y 3 (33.80) g de proteína/Kg de harina. A las muestras de harina se adicionó buffer acetato (0.1M), relación 1:20 p/v, pH 4.8, esterilizando a 121 °C y 1 atm, durante 15 minutos. La hidrólisis se siguió por 48 h a 50°C, midiendo los azúcares liberados, mediante un analizador bioquímico (YSI modelo 2900D) y HPLC (Thermo Scientific Finnigan Surveyor), siguiendo la metodología reportada por Singh y cols. [4]. Se determinó el contenido de azúcares totales empleando el método fenol-sulfúrico.

### Resultados y Discusión

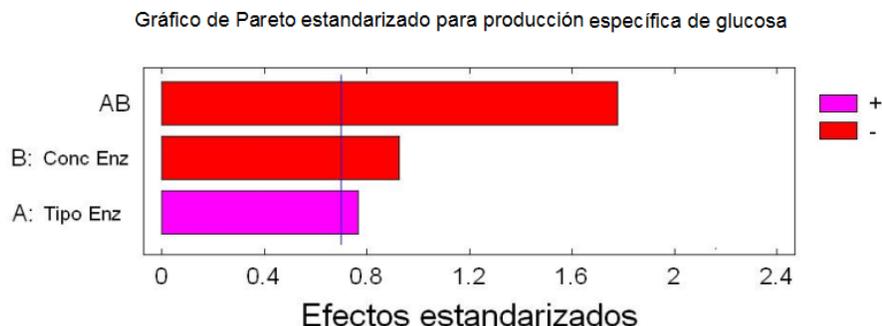
Los resultados de la caracterización proximal de la materia prima a hidrolizar se resumen en la tabla 1. El contenido de azúcares totales determinado (79.92%) confirma que los residuos de limón son un sustrato adecuado para la producción de bioetanol. Al adicionar las enzimas se observa un incremento inmediato en el contenido de glucosa en función del tiempo, siendo evidente que la concentración de enzima está relacionada. Para realizar la comparación considerando este efecto, se decidió determinar la producción específica de glucosa por Kg de harina tratada (figura 2A). La producción específica de glucosa, es mayor cuando se emplea Celluclast en su concentración más baja.

**Tabla 1.** Caracterización fisicoquímica de harina de limón persa (*Citrus latifolia*) gastada de polifenoles y pectina

Determinación	Concentración (%)
Humedad	6.16
Cenizas	8.61
Proteína	5.11
Fibra cruda	31.12
Azúcares totales	79.92

Norma Mexicana NMX-FF-043-SCFI-2003, **NOM-086-SSA1-1994**, **NOM-117-SSA1-1994**

Mediante el análisis de varianza (ANOVA,  $p \leq 0.05$ ) se verificó el efecto de cada factor, en la figura 1 se presenta la gráfica de Pareto donde se aprecia que el tipo de enzima, la concentración y su interacción tienen efecto significativo sobre la producción específica de glucosa. Así mismo, se presenta la gráfica de interacción (figura 2B), donde se puede apreciar que la acción de Celluclast a la menor concentración incrementa la producción específica de glucosa, mientras que entre Novozyme y Viscozyme no se encuentran diferencias, siendo el resultado de Pectinex el de menor producción específica. Adicionalmente, en la tabla 2 se muestra el perfil de azúcares determinado por HPLC, en general mayoritariamente se obtiene glucosa y xilosa, mientras galactosa, arabinosa y celobiosa se encontraron en menor proporción.

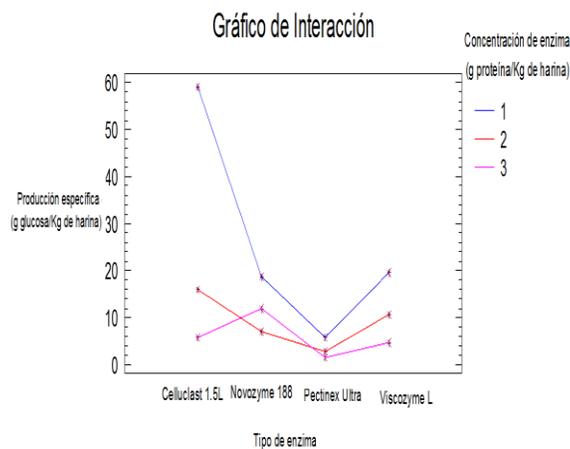
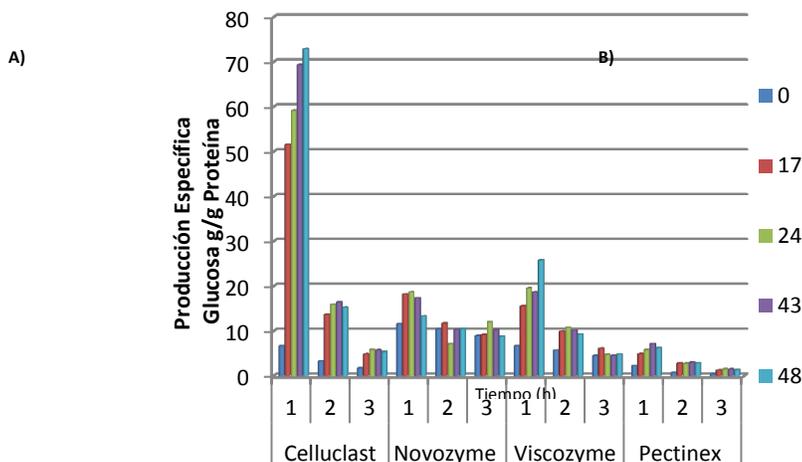


**Figura 1.** Gráfico de Pareto para producción específica de glucosa

**Tabla 2.** Perfil de azúcares obtenido a las 24 horas de hidrólisis de la harina de limón pre tratada con *Celluclast* (g /Kg de harina)

Concentración de <i>Celluclast</i>	Celobiosa	Glucosa	Xilosa	Galactosa	Arabinosa	AT
1	0±0	142.94±7.1	14±5.47	19.67±5.7	19.67±14.7	196.2
2	0±0	185.14±4.9	20.68±0.3	20.55±1.6	21.18±1.95	247.5
3	20.59±1.2	196.33±2.5	18.45±0.9	20.82±0	19.73±4.05	271.9

AT (azúcares totales) 1=2.25, 2=11.27, 3=33.80 (g proteína/Kg de harina)



**Figura 2.** A) Producción específica de glucosa por Kg de harina y B) gráfica de Interacción.

## Conclusiones

La hidrólisis enzimática realizada a la harina de limón nos proporcionó información de la composición de azúcares en éste residuo. Sin embargo, aún no se logra una eficiencia hidrolítica superior al 50% p/p, lo que representaría teóricamente, para los volúmenes de estudio una producción alcohólica inferior a 10 g/L. Por lo que es necesario, probar otros sistemas hidrolíticos que puedan aumentar la eficiencia de hidrólisis para este residuo.

## Agradecimientos

Fomix Yuc-2011-C09-0169165”

## Bibliografía

1. Nobuyuki, R, Serpa, V y Lima, V. (2011). Enzymatic hydrolysis of pretreated sugar cane bagasse using *Penicillium funiculosum* and *Trichoderma harzianum* cellulases. *Proc Biochem.* 46:1196-1201.
2. Seong, I, Hoon, J y Gon, S. (2013). Bioethanol production from mandarin (*Citrus unshiu*) peel waste using popping pretreatment. *App Energy.* 102:204-210.
3. Boluda, M y López, A. (2013). Production of bioetanol by fermentation of lemon (*Citrus lemon L.*) peel waste pretreated with steam explosion. *Ind Crops and Prod.* 41:188-197.
4. Singh, H, Vadlani, P y Brijwani, K. (2010). Enhanced ethanol production via fermentation of rice straw with hydrolysate-adaptated *Candida tropicalis* ATCC 13803. *Biores Technol.* 45:1299-1306.

## Artículo V

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

Valdez Balero A.<sup>1</sup>, López Vázquez P.

<sup>1</sup>Profesor Investigador del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. [apoloniouvb@colpos.mx](mailto:apoloniouvb@colpos.mx)

### Resumen

El jugo de caña de azúcar es el líquido obtenido de la molienda de los tallos que se utiliza en las industrias productoras de alcohol como materia prima. El bioetanol es alcohol de origen vegetal producto de la fermentación. Con el objetivo de evaluar la producción de guarapo y bioetanol en siete nuevas variedades de caña de azúcar COLPOSCTMEX, mediante la incorporación de tres niveles de fermento (*Saccharomyces cerevisiae*). Se evaluó por variedad, la producción de guarapo, tiempo de fermentación, °Bx final del jugo fermentado, también se determinó el grado y el rendimiento de alcohol. Se extrajo jugo a 20 tallos, la variedad COLPOSCTMEX 05-223 con 48.0 litros y la variedad COLPOSCTMEX 05-204 con 40.12 litros fueron las de alto contenido de jugo. La cantidad de fermento utilizado fue de 20 mg para inducir con seis días de fermentación. En el análisis estadístico se obtuvo diferencias significativas entre las siete variedades, en rendimiento de tallos por hectárea, jugo y cantidad de alcohol por ha. Así mismo, se observó que no existieron diferencias significativas entre las tres cantidades de fermento utilizadas, así como, en grados Brix final, % de alcohol y grados de alcohol por variedad. Sin embargo, la variedad COLPOSCTMEX 05-204 fue la que produjo la mayor cantidad de alcohol con 26% de efectividad con 90.75 grados de alcohol.

**Palabras claves:** jugo; *Saccharomyces cerevisiae*; fermentación.

### Abstract

The sugar cane juice is the liquid obtained from the milling of the stalk, used in industries producing alcohol as raw material. Bioethanol is plant derived alcohol fermentation product. In order to evaluate the production of bioethanol guarapo and seven new sugar cane varieties COLPOSCTMEX, by incorporating three levels of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*). Was evaluated by variety, producing cane juice fermentation time, final ° Brix fermented juice, also determined the extent and performance of alcohol. Juice was extracted 20 stalk, variety COLPOSCTMEX 05-223 with 48.0 liters and variety COLPOSCTMEX 05-204 with 40.12 liters were high juice content. The amount of yeast used was 20 mg to induce six days of fermentation. In the statistical analysis were significant differences among the seven varieties, stems per hectare yield, juice and amount of alcohol per ha. Furthermore, we observed no significant differences between the three quantities of yeast used and, in the final brix% alcohol and degrees of alcohol per variety. However, the range was 05-204 COLPOSCTMEX which produced the greatest amount of alcohol with 26% effectiveness with 90.75 percent alcohol.

**Key words:** juice, *Saccharomyces cerevisiae*; fermentation.

## Introducción

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

En México, la caña de azúcar se cultiva en 734,818.74 ha, las cuales producen 50'421,619.53 t, con rendimiento promedio nacional de 71.63 t ha<sup>-1</sup>. En el Estado de Tabasco se cultivan 31,340.00 ha, con rendimiento promedio de 61.15 t ha<sup>-1</sup>.

Entre los cultivos bioenergéticos más usados para la producción de etanol, está la biomasa de la caña de azúcar, materia prima utilizada en países tropicales como Brasil e India, mediante la fermentación del jugo [1]. La caña de azúcar es un recurso natural renovable, porque es fuente de azúcar, biocombustible, fibra, fertilizante orgánico y muchos otros productos y subproductos con sustentabilidad ecológica. Los combustibles son de vital importancia para el desarrollo de las actividades productivas de cualquier país, es por ello que utilizar fuentes alternativas y renovables a los combustibles fósiles tradicionales ayuda a diversificar las opciones disponibles dentro de la economía, por ejemplo con la incorporación del bioetanol.

Actualmente el biocombustible más importante es el etanol, producto 100% renovable obtenido a partir de cultivos bioenergéticos. El etanol carburante es utilizado para oxigenar la gasolina, permitiendo una mejor oxidación de los hidrocarburos y reduciendo las emisiones de monóxido de carbono, compuestos aromáticos y compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera [2].

La producción de bioetanol con fines carburantes es uno de los procesos más utilizados en el mundo. Las razones por las cuales se ha convertido en el compuesto oxigenado de mayor demanda se encuentran en sus propiedades físico-químicas, por ser proveniente de materia prima biológica renovable, promete sostenibilidad ambiental y económica en el proceso [3].

En México no hay variedades de caña de azúcar recomendadas para la producción de bioetanol, para dar respuesta a esta interrogante se propuso la siguiente alternativa que permita obtener la producción de guarapo y bioetanol en siete variedades de caña de azúcar COLPOSCTMEX.

## Material y métodos

El estudio se realizó, en el campo experimental del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, ubicado en el Km 21 de la carretera Cárdenas-Coatzacoalcos y en el laboratorio de cultivo de tejidos Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados, Periférico Carlos A. Molina S/N carretera Cárdenas-Huimanguillo Km 3.5 H. Cárdenas, Tabasco, el clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am), sus coordenadas son 17°59'10.20"N y 93°35'36.69" a 10 msnm.

### Material vegetal

Se utilizaron siete variedades de caña de azúcar, que fueron seleccionadas en el programa de mejoramiento genético que en el Campus Tabasco, en la actualidad, éstas variedades se están promoviendo para su cultivo comercial y han alcanzado la categoría de prometedoras: **COLPOSCTMEX 05-003**, **COLPOSCTMEX 05-051**, **COLPOSCTMEX 05.204**, **COLPOSCTMEX 05-214**, **COLPOSCTMEX 05-223**, **COLPOSCTMEX 05-224** y **MEX 02-16**. Son variedades de maduración temprana a media, con sacarosa promedio entre 14.32 – 16.77 % en el mes de enero y febrero dependiendo de las variedades, regular pureza en jugos de 89%; se debe cosechar en los meses de enero a abril, su corteza es media, con contenido medio de fibra.

### Estado de la caña

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

### Extracción de jugo.

El jugo o guarapo se obtuvo a través de la molienda de los tallos caña en el ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa ubicado en el municipio de Cárdenas, Tabasco. En el área de molinos se extrajo el jugo a los tallos de cada variedad a través de la presión mecánica ejercida por un conjunto de masas o rodillos. De este proceso se obtienen dos productos: jugo y bagazo. Para la filtración del jugo se utilizó un tamiz (Medidas: mm .177, Mics 177, N. 80, Pulgs .0070), con la finalidad de retirar las impurezas que se encuentren en el jugo de la caña de azúcar.

### Grados Brix inicial

Para evaluar el porcentaje de sólidos solubles presentes en el jugo de la caña de cada una de las variedades evaluadas, se empleó un refractómetro, ( $^{\circ}\text{Bx}$  0~33 %), con un gotero se colocaron de dos a tres gotas de jugo en el refractómetro y se procede a tomar las lecturas, el gotero se debe lavar al cambiar variedad.

### Fermentación

Una vez tomado el  $^{\circ}\text{Bx}$  inicial, se ajusta el pH del jugo de cada una de las siete variedades, se procedió a la pasteurización a 85 °C durante 15 minutos, con el objetivo de eliminar microorganismos no deseados en el proceso de fermentación, se disminuyó la temperatura de 85 °C a 30 °C para posteriormente adicionar el fermento. Para ajustar la cantidad de levadura a utilizar durante el proceso de fermentación se evaluaron tres concentraciones de fermento 15, 20, 25 mg/L de jugo. Para llevar a cabo esta investigación se utilizó *Saccharomyces cerevisiae* (levadura casera), que tiene la capacidad de hidrolizar la sacarosa de la caña de azúcar y convertirla en glucosa, fructosa y dos hexosas fácilmente asimilables; además puede desarrollarse en condiciones anaeróbicas [4]. El proceso de fermentación fue de seis días. Después, el jugo fermentado se envía a destilación para continuar con la separación.

### **Grados Brix final después de la fermentación**

Para evaluar el porcentaje de sólidos solubles finales presentes en el jugo de la caña, se empleó un refractómetro ( $^{\circ}\text{Bx}$  0~33%), se colocan dos a tres gotas en el prisma del refractómetro y se procede a tomar las lecturas una vez concluida la fermentación.

### **Destilación y bidestilación**

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

Para destilar alcohol se utilizó temperatura entre 150 a 170  $^{\circ}\text{C}$ , para separar de líquidos con puntos de ebullición inferiores a 150 $^{\circ}\text{C}$  de impurezas no volátiles, o bien para separar mezclas de dos componentes que hiervan con una diferencia de puntos de ebullición de al menos 60-80 $^{\circ}\text{C}$ . Mezclas de sustancias cuyos puntos de ebullición difieren de 30-60 $^{\circ}\text{C}$  se pueden separar por destilaciones sencillas repetidas, recogiendo durante la primera destilación fracciones enriquecidas en uno de los componentes, las cuales se vuelven a destilar. Para que la ebullición sea homogénea y no se produzcan proyecciones es necesario que el jugo este en agitación. El jugo que se desea destilar se coloca en un matraz de 2000 ml a la mitad de su capacidad y se calienta en la placa calefactora. Cuando se alcanza la temperatura de ebullición del líquido comienza la producción de vapor, la mayor parte de este pasa al refrigerante donde se condensa debido a la corriente de agua fría que asciende por la camisa del destilado (vapor condensado) escurre al matraz colector a través de la alargadera.

Para determinar los grados alcohol obtenidos en el proceso del destilado se midió mediante un alcoholímetro, que es un densímetro cuya escala expresa directamente el contenido de alcohol. El alcohol obtenido por destilación se procedió a su bidestilación con el objetivo de eliminar el agua, obteniendo así, alcohol con calidad.

### **Rendimiento de alcohol**

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

### **Análisis estadístico**

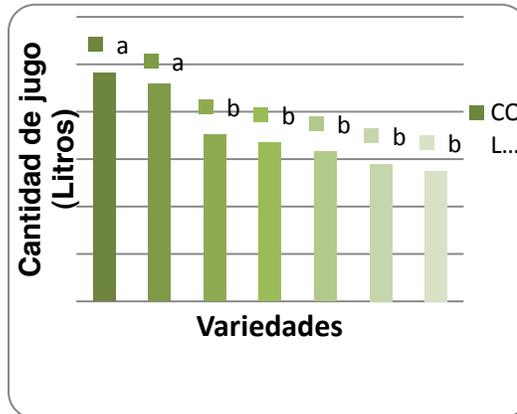
Para el análisis de la información se utilizó el paquete estadístico InfoStat para la comparación de medias utilizando la prueba de Tukey ( $=0.05$ ).

### **Resultados y discusión**

#### **Extracción de jugo**

La cantidad de jugo producida por cada una de las variedades se muestra en la Figura 1. Como resultado del análisis estadístico se obtuvieron diferencias significativas entre variedades, las cuales se integraron en dos grupos. En el grupo uno integrado por las variedades COLPOSCTMEX 05-223 con 48 litros y COLPOSCTMEX 05-204 con 40.12 litros, el segundo grupo está integrado por cinco variedades COLPOSCTMEX 05-051 con 35.13 litros, COLPOSCTMEX 05-003 con 33.4 litros, Mex 02-16 con 31.57,

COLPOSCTMEX 05-214 con 28.95 litros y COLPOSCTMEX 05-224 con 27.5 litros de jugo. Según Chen (1991) [5], el tallo de caña de azúcar (libre de basura) está compuesto aproximadamente de 75% de agua y el resto consiste en fibras y sólidos solubles.



**Figura 1.** Cantidad de jugo extraído de los tallos de caña de azúcar

Larrahondo (1995) [6], señaló que la caña está constituida principalmente por jugo, que se compone de azúcares simples como la sacarosa y que son solubles en agua expresados en porcentaje. Así como, azúcares reductores y otros componentes. La relación entre el contenido de sacarosa presente en el jugo y el grado Brix se denomina pureza del Jugo.

### **Brix al inicio.**

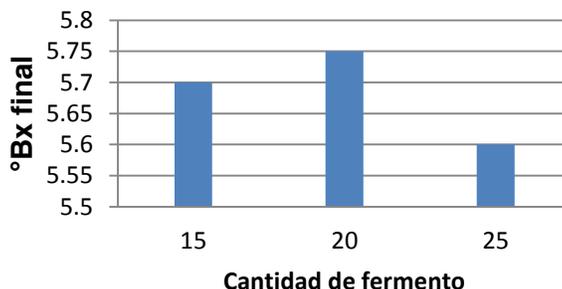
En la tabla 1 se observan los grados Brix al momento de la extracción del jugo. Como resultado del análisis estadístico se observaron diferencias significativas entre las variedades en estudio con relación a los grados Brix. Observando que la variedad COLPOSCTMEX 05-003 fue la que presentó la concentración más alta de grados Brix con 17. La variedad Mex 02-16 con 16 °Bx, COLPOSCTMEX 05-051 con un 15 °Bx, COLPOSCTMEX 05-214 con 14°Bx, COLPOSCTMEX 05-204 con 13°Bx, COLPOSCTMEX 05-223 con 13°Bx y COLPOSCTMEX 05-224 con 12°Bx . Esto no significa que a mayor cantidad de sólidos solubles que posea una variedad, mayor será la cantidad de azúcares que serán transformados en alcohol.

**Tabla 1.** Grados Brix al inicio de la fermentación.

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

### Fermentación

Para determinar el inóculo para inducir la fermentación se observó que no existieron diferencias significativas entre las tres cantidades utilizadas (Figura 2). Por lo que, la cantidad de fermento utilizado en la investigación fue de 20 mg.L<sup>-1</sup> para inducir la fermentación. Las levaduras se han utilizado con excelentes resultados en diferentes procedimientos, obteniendo productos de calidad [7]. El producto final depende de la naturaleza específica de la levadura que se desarrolla durante el proceso de adaptación o de la fermentación del jugo.



**Figura 2.** Efecto de tres niveles de inóculo para inducir la fermentación.

Según estudios que realizaron Fleet y Heard (1993) [8], para llevar a cabo una fermentación exitosa recomiendan la utilización de levaduras comerciales, específicas del área, adaptadas a las condiciones climáticas de la zona como materia prima, acopladas a las condiciones del jugo con alto o bajo contenido en azúcares, así como; el grado alcohol, temperatura de fermentación, etc. [9]. La levadura comercial se debe acoplar al jugo por fermentar, así como; hacer que la levadura crezca dentro de un medio líquido bajo condiciones controladas.

La temperatura fue otro factor que se tomó en cuenta en el proceso de fermentación. La temperatura a la cual se trabajo fue de 28 °C (temperatura considerada óptima), ya que tiene influencia tanto en el desarrollo de los microorganismos como en el producto

final [10]. Esta temperatura influye 1) en el crecimiento de las levaduras, 2) en la importancia de unas determinadas especies respecto a otras, y 3) en las reacciones bioquímicas del metabolismo de las levaduras [8].

En el proceso de evaluación de las condiciones de pH, °Bx y temperatura, el aumento en la velocidad de fermentación se debe a la disminución de la fase de latencia al haber un incremento en la temperatura [11]. Así como aumenta la velocidad de consumo de azúcares por la temperatura, el tiempo de fermentación también es menor al tener una menor concentración de azúcares (grados Brix). Según un estudio que realizó Nagel y Herrick (1989) [10] los procesos de fermentación evaluados a temperaturas bajas, presentan ventajas al tener un mayor control del proceso, pero pueden presentar paradas de fermentación. Las paradas de fermentación tienen lugar cuando existe un consumo más lento del azúcar del mosto que está fermentado. Esta caída en el consumo de azúcares indica que existen condiciones fisiológicas o ambientales adversas. Según algunos autores esta baja en el consumo de azúcares se debe a muchos factores: Altas concentraciones de etanol, temperaturas extremas, residuos de pesticidas, deficiencia de algún tipo de nutriente, toxicidad de ácidos grasos, falta de agitación, falta de oxigenación y altas concentraciones de SO<sub>2</sub>, etc. [12], [13], [11]. La combinación de algunos de estos factores, provocan una mayor inhibición del crecimiento y por tanto, de la fermentación [13]. El tiempo de fermentación tuvo una duración de 6 días en todas las variedades, en este tiempo es cuando se da la máxima capacidad fermentativa y la fase más activa de la fermentación. Según Robinson (2006) [14], la fermentación es la función catalizadora que convierte el jugo de caña de azúcar en alcohol. Robinson (2003) [15], menciona que durante la fermentación, la levadura interactúa con los azúcares del jugo para transformarlos en etanol, comúnmente conocido como alcohol etílico.

### **Grados Brix final después de la fermentación.**

El comportamiento de los grados Brix fue diferente entre las variedades evaluadas al final de la fermentación. El análisis estadístico indicó que los grados Brix final presentó diferencias significativas, el grado Brix tuvo un descenso inversamente proporcional a los seis días del inicio de la fermentación en todas las variedades. En la figura 3, se observa que el grado Brix más alto correspondió a cuatro variedades COLPOSCTMEX 05-204 con un pH de (5.95), COLPOSCTMEX 05-003 con pH de (5.94), MEX 02-16 con pH de (5.93) y COLPOSCTMEX 05-051 con pH de (5.8). Es importante señalar que este residuo producto de la fermentación son las vinazas, Perdigon *et al.*, 2013 [16], mencionan que tanto el grado Brix y el pH inicial se modifican por la fermentación.

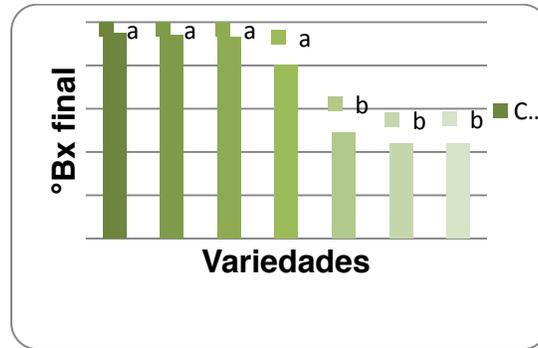


Figura 3. Grados Brix al final de la fermentación.

### Destilación y bidestillación

Los resultados indicaron que al destilar 1000 ml de jugo de caña de cada variedad, se encontró que el contenido de alcohol en la destilación fue de COLPOSCTMEX 05-051 de 59.28, COLPOSCTMEX 05-223 59.27, COLPOSCTMEX 05-204 59.11, COLPOSCTMEX 05-003 59.03, MEX 02-16 58.84, COLPOSCTMEX 05-224 58.65 y COLPOSCTMEX 05-214 58.61 grados de alcohol por variedad (Figura 4).

En la bidestillación se encontró que en los grados de alcohol se incrementaron, producto de la eliminación de agua. Así mismo, se observó que no existieron diferencias significativas entre las variedades evaluadas.

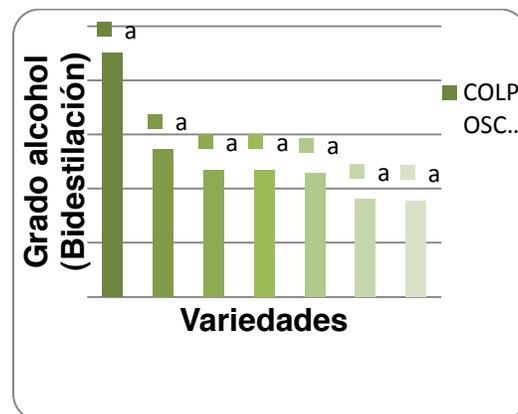


Figura 4. Contenido de grado alcohol en la bidestillación de siete variedades.

### Análisis en el rendimiento de alcohol por variedad.

La variedad COLPOSCTMEX 05-204 es la que produce mayor porcentaje de alcohol (26%) con 90.75 grados. La variedad COLPOSCTMEX 05-223 produce 24% de alcohol con 89.67 grados de calidad, es importante contar con variedades de caña de azúcar para que sean recomendadas para la producción de bioenergéticos. Para producir bioetanol el contenido de jugo o guarapo de un tallo es una característica que se deben de considerar para seleccionar una variedad de caña de azúcar. Así como, la

pureza del alcohol. Generalmente la producción de alcohol se hace a partir de melaza, subproducto de la producción de azúcar (tabla 2).

**Tabla 2.** Tabla de rendimiento de alcohol por variedad.

<i>Variedad</i>	<i>Cantidad de jugo (litros)</i>	<i>°Brix</i>	<i>Bidestilación (ml)</i>	<i>cantidad de alcohol (ml)</i>	<i>% de alcohol x variedad</i>	<i>Grado alcohol</i>
<i>COLPOSCTMEX 05-223</i>	<i>48.2</i>	<i>13</i>	<i>240</i>	<i>11.568</i>	<i>24</i>	<i>89.67</i>
<b><i>COLPOSCTMEX 05-204</i></b>	<b><i>45.89</i></b>	<b><i>13</i></b>	<b><i>260</i></b>	<b><i>11.9314</i></b>	<b><i>26</i></b>	<b><i>90.75</i></b>
<i>COLPOSCTMEX 05-051</i>	<i>35.13</i>	<i>15</i>	<i>237</i>	<i>8.3258</i>	<i>23.7</i>	<i>89.67</i>
<i>COLPOSCTMEX 05-003</i>	<i>33.4</i>	<i>17</i>	<i>239</i>	<i>7.9826</i>	<i>23.9</i>	<i>89.86</i>
<i>Mex 02-16</i>	<i>31.57</i>	<i>16</i>	<i>244</i>	<i>7.703</i>	<i>24.4</i>	<i>89.64</i>
<i>COLPOSCTMEX 05-214</i>	<i>28.95</i>	<i>14</i>	<i>240</i>	<i>6.948</i>	<i>24</i>	<i>89.67</i>
<i>COLPOSCTMEX 05-224</i>	<i>27.5</i>	<i>12</i>	<i>255</i>	<i>7.0125</i>	<i>25.5</i>	<i>89.4</i>

### Conclusiones

- La cantidad de levadura a utilizar por litro fue de 20 mg.
- Se debe bidestilar la solución una vez fermentada para incrementar el grado de alcohol, o la pureza del mismo.
- La variedad COLPOSCTMEX 05-223 fue la que generó la mayor cantidad de jugo.
- La variedad **COLPOSCTMEX 05-204** es la que generó la mayor cantidad de alcohol.

### Recomendaciones

Se recomienda el cultivo comercial de las variedades COLPOSCTMEX 05-204 y COLPOSCTMEX 05-223 para la producción de bioetanol.

### Agradecimientos

A las Líneas Prioritarias de Investigación del Colegio de Postgraduados: LPI-5 Biotecnología Microbiana, Vegetal y Animal, así como a LPI-3 Energía Alterna y Biomateriales.

## Bibliografía

1. Wheals AE, Basso LC, Alves DMG, Amorim HV 1999. Fuel ethanol after 25 years. *TIBTECH*, vol. 17, no. 12, pp. 482-487.
2. Casanova J. 2002. Red temática: Utilización de Combustibles Alternativos en Motores Térmicos. Módulo 1. Universidad Nacional de Colombia: Medellín.
3. Usayán A, Gil I, Aguilar J, Rodríguez R. 2006. Producción de alcohol carburante por destilación extractiva: simulación de un proceso con glicerol. *Revista ingeniería e investigación* 26, 45-50.
4. Sánchez J, Cardona C. 2005. Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas. *Interciencia* 30 (11).
5. Chen J. 1991. Manual del Azúcar de caña. Editorial Limusa, México, p 492.
6. Larrahondo, J. E., 1995. Calidad de la caña de azúcar. In: Cassalet, C.; Torres, J.; Isaacs, C. (Eds). *El cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia*: 337-354.
7. Torija M. 2002. Ecología de las levaduras. Selección y adaptación a fermentaciones vínicas. Trabajo de grado para la obtención del título doctorado en bioquímica. Universitat Rovira I Virgili. Departamento de bioquímica y biotecnología. Facultad de Enología. Taragona, España. Extraída el 23 de Noviembre de 2008. [http://www.tesisenxarxa.net/TESIS\\_URV/AVAILABLE/TDX-0621102](http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_URV/AVAILABLE/TDX-0621102).
8. Fleet G. Heard G. 1993. Yeast growth during fermentation. In: *Wine Microbiology and Biotechnology*. Harwood Academic Publishers, 23, 37- 54.
9. Martini A. Martini AV. 1999. Grape must fermentation past and present. In: *Yeast technology*. Springer Overflag, Belin, 34, 105-123.
10. Nagel C. y Herrick I. 1989. Efectos de la temperatura en la concentración intracelular de los azúcares y ácidos orgánicos. *Am. J. Enol. Vitec.* 40, 81-84.
11. Ribéreau GJ; Peynaud E. Ribéreau P. y Sundraud P. 1975. Science and technology of the wine. 2, 78-81.
12. Bisson L. 1999. Stuck and sluggish fermentations. *Am. Enol.* 50,107- 119.
13. Watson K. 1987. Temperature relations: Yeast and environmental. Academic Press Limited. 50, 41-32.
14. Robinson J. 2006. "The Oxford Companion to Wine" Third Edition pg 267-269 Oxford University Press 2006 [ISBN 0198609906](#).
15. Robinson J. 2003. Robinson's Wine Course Third Edition pg 74-84 Abbeville Press 2003 [ISBN 0789208830](#).
16. Perdigon M. SM; De la Cruz S. R; Obregón L. S y Curbelo, T. I. 2013. La vinaza de jugos de caña energética y su aplicación en suelos cañeros. <http://www.eumed.net/cursecom/ecolat/cu>. ISSN 1696-8532.

## Artículo VI

# TRATAMIENTO DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO CON OZONO PARA LA PRODUCCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL

Albarrán Rivas M.G.<sup>1</sup>, López López A. y León Becerril E.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. Av. Normalistas 800, Colinas de la Normal, 44270. Guadalajara, Jalisco, 33-3345 5200x1610,

\*[eleon@ciatej.mx](mailto:eleon@ciatej.mx)

### Abstract

Sugarcane bagasse was chosen as lignocellulosic material for its composition of 34.33 % cellulose; 29.61 %, hemicellulose and 10.46 % (w/w) lignin. A process of ozonation was carried out in a batch system, for three particle sizes of sugarcane bagasse, 0.30, 0.54 and 0.70 mm and for three dosage of ozone 2, 6 and 10 mg O<sub>3</sub>/g bagasse, at room temperature and at pH= 5.5. Ozonation significantly improved the hydrolysis of sugarcane bagasse. Ozonation increased cellulose conversion i.e. from 34 to 27.71 %(w/w); and from 30.19 to 15.29 %(w/w) both for ozone dose of 10 mg/g and a particle size of 0.7 mm and 0.3 mm respectively. The same phenomenon is observed for hemicellulose, from 29.61 to 16.49 %(w/w); and for 27.49 to 13.06 %(w/w) both for ozone dose of 10 mg/g and a particle size of 0.7 mm and 0.3 mm respectively. Lignin is converted from 10.46 to 4.97 %(w/w); and from 10.95 to 4.27 %(w/w) both for ozone dose of 10 mg/g and a particle size of 0.7 mm and 0.3 mm respectively. Ozone provokes the release of reducing sugars such as glucose and xylose, which are used for bioethanol production.

**Palabras Clave:** Material lignocelulósico, ozono, azúcares, hidrólisis.

## Introducción

En años recientes, se han producido biocombustibles a partir de materiales lignocelulósicos [1, 2]; este tipo de material está compuesto principalmente de tres polímeros: celulosa (20-55 % p/p), hemicelulosa (16-85 % p/p) y lignina (15-40 % p/p); la composición depende de la naturaleza del material, y es esta composición la que causa una estructura compleja y rígida, provocando que el material sea recalcitrante [2]. En particular, la celulosa es un polímero compuesto de moléculas de glucosa unidas por enlaces  $\beta$ -1-4 glucosídicos que favorecen los puentes de hidrógeno y provocan que la molécula sea cristalina; estas estructuras forman microfibrillas que se unen formando multicapas embebidas en una matriz de hemicelulosa y lignina. La hemicelulosa cubre una amplia variedad de heteropolisacáridos (xilosa, D-galactosa, L-galactosa, D-manosa, L-ramnosa, L-fructuosa y ácidos urónicos) que formando enlaces cruzados con la lignina. Finalmente, la lignina se representa por un polímero complejo tridimensional, compuesto de unidades de fenilpropanoides; la lignina actúa como una barrera protectora de la celulosa y hemicelulosa, por lo que se considera un compuesto recalcitrante [1,2]. Debido a la recalcitrancia, el material lignocelulósico no puede ser utilizado directamente en la producción de biocombustibles y es necesario aplicar un tratamiento [1-4]; que permita modificar la estructura lignocelulósica, solubilizar o hidrolizar sus diferentes componentes y mejorar la biodegradabilidad del material para su uso subsecuente en la producción de biocombustibles [5].

Tratamientos físicos, biológicos y químicos se han aplicado al material lignocelulósico; la ozonación aparece como una alternativa de tratamiento químico al material lignocelulósico. El ozono remueve la lignina y una pequeña parte de la hemicelulosa es degradada, reduciendo la cristalinidad de la celulosa y permitiendo que se liberen azúcares fermentables como la xilosa y la glucosa que son usados para la producción de biocombustibles, en este caso, de etanol. El ozono molecular es uno de los oxidantes más potentes que puede reaccionar de manera selectiva con algunos compuestos orgánicos, ha sido utilizado en el tratamiento de diversos materiales lignocelulósicos como madera de pino, ciprés, aserrín de álamo [3,4] y residuos agroindustriales como paja de trigo y bagazo de caña [3,4,5,6] obteniendo rendimientos en la hidrólisis enzimática posterior al tratamiento arriba del 70%. Entre otras ventajas de aplicar ozono al material lignocelulósico es que no se producen residuos tóxicos y el proceso se realiza a temperatura y presión del ambiente.

En este trabajo, un proceso de ozonación fue usado en el tratamiento de bagazo de caña de azúcar como material lignocelulósico para la producción de azúcares fermentables (xilosa y glucosa) para su uso potencial en la generación de biocombustibles. El ozono fue aplicado al bagazo de caña de azúcar analizando el efecto del tamaño de partícula y la dosis de ozono aplicada. La composición del material (lignina, hemicelulosa y celulosa) antes y después del tratamiento fue determinada para verificar la degradación del material. Para determinar la eficiencia del proceso, los azúcares totales y reductores se determinaron antes y después del tratamiento.

## Material y Métodos

### Material lignocelulósico

El bagazo de caña de azúcar fue seleccionado como material lignocelulósico, éste fue recolectado de un ingenio productor de azúcar de Nayarit, México. El bagazo fue secado en una estufa a temperatura constante de 60°C por 24 horas, luego fue triturado y tamizado con mallas de número 24, 30 y 50, para obtener tamaños de partícula promedio de 0.70, 0.54, 0.30 mm, respectivamente. El material fue almacenado en bolsas de plástico selladas a temperatura ambiente hasta que fue utilizado.

### Pretratamiento con ozono

El tratamiento del bagazo con ozono se realizó en un reactor por lotes, el cual consistió en un matraz Erlenmeyer de 500 ml donde el bagazo se puso en contacto con agua saturada de ozono; cada experimento se realizó por duplicado. Para todos los experimentos la relación de bagazo con el agua saturada de ozono fue de 1% (p/v), el sistema se operó a temperatura y presión ambiente y el pH de reacción fue de 5.5, para asegurar solo el mecanismo de reacción del ozono molecular. El matraz se cerraba herméticamente con un tapón de teflón para evitar reacciones secundarias, y se agitaba a 100 rpm. El tiempo de reacción fue fijado en diez minutos, previamente se realizaron pruebas de degradación de  $O_3$ , observando que a partir de los 10 minutos, la concentración de  $O_3$  era igual o cercana a cero. El dispositivo experimental se muestra en la figura 1.

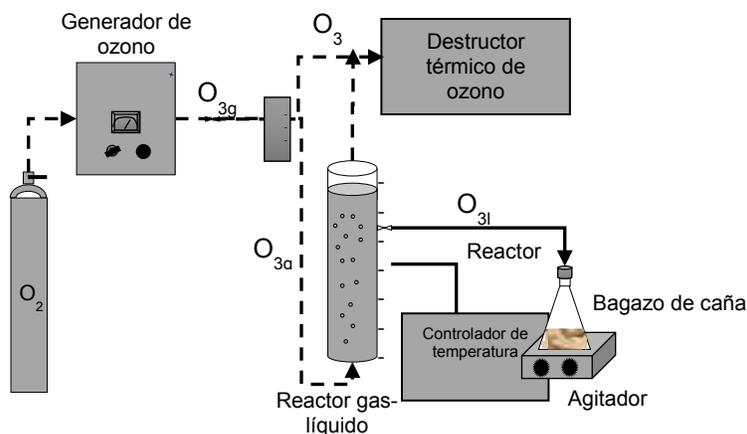


Figura 1. Dispositivo experimental.

La saturación del agua con ozono se realizó haciendo pasar una corriente de oxígeno a través de un generador de ozono Pacific Ozone Technology Model G11-G24; el ozono fue generado a un flujo volumétrico de 60 l/h. El ozono en fase gas fue alimentado a una columna de 2 litros que contenía agua Milli-Q a una temperatura controlada de 20°C. La concentración promedio de saturación del agua con ozono fue de 10 mg/l, y fue determinada por el método índigo [7].

### *Métodos analíticos*

Las fracciones de hemicelulosa, celulosa y lignina fueron determinadas con el contenido en fibra del bagazo como fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA) y la lignina detergente ácida (LDA) siguiendo la metodología de VanSoest [8].

Los parámetros fisicoquímicos como Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), se realizaron siguiendo los Métodos Estándares de APHA [9].

Los azúcares totales fueron determinados con el método fenol-sulfúrico [10]; y los azúcares reductores por el método de espectrofotometría DNS [11]. En ambos casos, se pesaron 0.5 g de la muestra, para la extracción se utilizaron 50 ml de metanol al 80%, dada la naturaleza polar del material. La muestra se centrifugó a 4000 rpm durante 15 minutos, luego se filtró en un filtro de 0.45  $\mu\text{m}$  para eliminar las impurezas y posteriormente se pasó por un microfiltro de 0.25  $\mu\text{m}$ .

### *Diseño experimental*

Se analizaron dos variables, el tamaño de partícula (0.30, 0.54 y 0.70 mm) y la dosis de ozono aplicada (2, 6, 10 mg  $\text{O}_3$  /g material lignocelulósico) para conocer el efecto en el cambio de composición del material y la cantidad de azúcares generados por el tratamiento.

## **Resultados y discusión**

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos para la composición del bagazo de caña de azúcar para los tres tamaños de partícula al aplicarles las diferentes dosis de ozono. Los resultados muestran que la composición del bagazo cambia al aplicar ozono al material; la conversión de celulosa aumenta conforme la dosis de ozono se incrementa, y el efecto es más evidente con el tamaño de partícula. Se observa que la composición de celulosa va de 34 a 27.71 % (p/p); y de 30.19 a 15.29 % (p/p) para una dosis de ozono de 10 mg/g y un tamaño de partícula de 0.70 mm y 0.30 mm respectivamente. El mismo fenómeno se observa para la hemicelulosa que va de 29.61 a 16.49 % (p/p); y de 27.49 a 13.06 % (p/p) para una dosis de ozono de 10 mg/g y partículas de 0.70 mm y 0.30 mm respectivamente. Se infiere que la celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas a azúcares totales, y en particular a azúcares reductores conforme la dosis de ozono aumenta. El ozono provoca que los azúcares reductores se liberen, en especial, los azúcares de interés que son la glucosa y la xilosa. La lignina es degradada desde 10.46 a 4.97 % (p/p); y de 10.95 a 4.27 % (p/p) ambos para una dosis de ozono de 10 mg/g y tamaños de partícula de 0.70 mm y 0.30 mm respectivamente. Para altas dosis de ozono (> 6 mg/g), compuestos fenólicos son encontrados en el material, esto se atribuye a la degradación de la lignina, por su misma naturaleza compuesta de alcoholes. Resultados similares han sido encontrados para partículas de bagazo de trigo (3-5mm) que muestran una degradación principalmente de lignina cuantificada como LDA, reduciéndose al 55% de su composición inicial [5,6]. Lo resultados en cuanto a la transformación de la celulosa

difieren con lo reportado en la literatura, en que se menciona que la celulosa decrece en un porcentaje apenas mayor al 5% cuando se trabaja a pH bajos [4-6].

**Tabla 1.** Caracterización del bagazo de caña de azúcar antes y después del tratamiento con ozono

Parámetro	Sin tratamiento	Dosis de ozono (mg O <sub>3</sub> /g material lignocelulósico)		
		2	6	10
<b>Tamaño de partícula 0.70 mm</b>				
Celulosa (%w/w)	34.33	30.43	28.68	27.71
Hemicelulosa (%w/w)	29.61	20.53	19.26	16.49
Lignina (%w/w)	10.46	9.35	5.77	4.97
Azúcares totales (mg/l)	1.54	79.54	108.72	136.63
Azúcares reductores (mg/l)	0	5.17	5.26	7.99
Fenoles (mg/l)	0	0	0.18	1.56
<b>Tamaño de partícula 0.54 mm</b>				
Celulosa (%w/w)	30.55	18.19	16.08	15.99
Hemicelulosa (%w/w)	26.18	19.68	17.34	16.76
Lignina (%w/w)	11.26	9.56	5.35	4.71
Azúcares totales (mg/l)	1.56	106.08	160.06	172.72
Azúcares reductores (mg/l)	0	6.88	7.25	9.16
Fenoles (mg/l)	0	0	0.30	1.87
<b>Tamaño de partícula 0.30 mm</b>				
Celulosa (%w/w)	30.19	24.31	16.61	15.29
Hemicelulosa (%w/w)	27.49	14.57	13.59	13.06
Lignina (%w/w)	10.95	6.75	4.74	4.27
Azúcares totales (mg/l)	1.75	190.48	206.24	206.42
Azúcares reductores (mg/l)	0	4.55	6.76	10.78
Fenoles (mg/l)	0	0	0.62	2.86

El consumo de ozono es total para todos los experimentos realizados para las dosis de 2 y 6 mg/g; en cuanto a la dosis de 10 mg/g se obtiene una concentración residual de ozono de 1.50, 1.20 y 1.00 mg/l presentes en el medio líquido donde se llevó a cabo la reacción entre el ozono y el bagazo, para partículas de 0.70, 0.54 y 0.30 mm respectivamente.

El medio líquido donde la reacción se realizó fue caracterizado con los parámetros de azúcares totales y reductores, DQO y DBO, los resultados se muestran en la tabla 2. Una pequeña fracción de los azúcares que se generaron durante la reacción se solubilizaron en el líquido, confirmando que la mayor cantidad de ellos permaneció en

el bagazo. Al reaccionar el ozono con la lignina se forman compuestos fenólicos, y una fracción importante de éstos se encuentra solubilizada en el líquido, mientras que una pequeña cantidad permanece en el bagazo. La concentración de DQO y DBO presentes en el medio líquido son representativos de los compuestos fenólicos y de los azúcares.

**Tabla 2.** Caracterización del medio líquido

Parámetro	Dosis de ozono (mg O <sub>3</sub> /g material lignocelulósico)		
	2	6	10
<b>Tamaño de partícula 0.70 mm</b>			
Azúcares totales (mg/l)	1.25	1.76	1.99
Azúcares reductores (mg/l)	0	0	0
Fenoles (mg/l)	1.74	2.14	2.99
DQO (mg/l)	85.00	87.00	137.00
DBO (mg/l)	39.46	38.46	40.00
<b>Tamaño de partícula 0.54 mm</b>			
Azúcares totales (mg/l)	1.32	1.87	2.15
Azúcares reductores (mg/l)	0.00	0.00	0.00
Fenoles (mg/l)	2.01	2.99	3.40
DQO (mg/l)	110.00	120.00	206.00
DBO (mg/l)	47.00	52.47	53.45
<b>Tamaño de partícula 0.30 mm</b>			
Azúcares totales (mg/l)	1.50	2.21	2.66
Azúcares reductores (mg/l)	0	0	0
Fenoles (mg/l)	2.28	3.13	3.99
DQO (mg/l)	94	109	138
DBO (mg/l)	45	61.19	71.74

### Conclusiones

El tratamiento de material lignocelulósico con ozono permite mejorar el proceso de hidrólisis del bagazo de caña de azúcar. Previo tratamiento con ozono, el material

puede ser usado para la producción de biocombustibles. La composición del bagazo de caña de azúcar cambia, logrando la conversión de celulosa y hemicelulosa en azúcares reductores y en lo que respecta a la lignina, al degradarse, genera compuestos fenólicos. Los azúcares de interés para la obtención de biocombustibles permanecen en el bagazo de caña de azúcar, solo una pequeña fracción se solubiliza en el medio líquido donde se realiza la reacción, lo contrario sucede con los compuestos fenólicos que se solubilizan principalmente en el líquido.

### Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento a través del proyecto CB133791 de CONACYT-SEP Ciencia Básica, MGAR agradece la beca de estudios de posgrado de CONACYT.

### Bibliografía

- [1]Sun, Y., Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review, *Bioresource Technology* 83: 1-11.
- [2]Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., Stroeve, P. (2009). Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production, *Ind. Eng. Chem. Res.* 48: 3713-3729.
- [3]Vidal, P. F., Molinier, J. (1988). Ozonolysis of Lignin - Improvement of in vitro Digestibility of Poplar Sawdust, *Biomass* 16: 1-17.
- [4]Neely, W. C. (1984). Factors Affecting The Pretreatment of Biomass With Gaseous Ozone, *Biotechnology and bioengineering* XXVI: 59-65.
- [5]Garcia-Cubero, M. A., Gonzalez-Benito, G., Indacochea, I., Coca, M., Bolado, S. (2009). Effect of ozonolysis pretreatment on enzymatic digestibility of wheat and rye straw, *Bioresource Tech* 100: 1608-1613.
- [6]Garcia-Cubero, M. T., Palacin, L. G., Gonzalez-Benito, G., Bolado, S., Lucas, S., Coca, M. (2012). An analysis of lignin removal in a fixed bed reactor by reaction of cereal straws with ozone, *Bioresource Tech* 107: 229-234.
- [7]Hoigné, J., Bader, H. (1983). Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water-I. Non-dissociating organic compounds, *Water Res.* 17: 173-183.
- [8]VanSoest, P. J., Robertson, J. B., Lewis, B. A. (1991) Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition, *Journal of Dairy Science* 10: 3583-3597.
- [9]Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., Eaton, A. D. (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington DC, USA, APHA-AWWA-WEF.
- [10] Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances, *Anal. Chem.* 28: 350-356.
- [11] Miller, G. L. (1959). Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar, *Anal. Chem.* 31: 426-428.

## Artículo VII

# VARIETADES DE SORGO DULCE PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN DURANGO

Jiménez O. R.<sup>\*1</sup>, Salazar S. L.M.<sup>1</sup>, Rosales S.R.<sup>1</sup>, Carmona G.M.<sup>2</sup> y Saldaña L.J.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, INIFAP-Durango. km 4.5 Carretera Durango-El Mezquital. Durango, Dgo., México. C. P. 34170. Tel. 618-826 04 26

[\\*jimenez.rafael@inifap.gob.mx](mailto:*jimenez.rafael@inifap.gob.mx)

<sup>2</sup>Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario 3. km 7 carretera Durango - La Ferrería, Durango, Dgo. México C. P. 34160.

### Resumen

El objetivo fue validar tres variedades de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] seleccionadas para la producción de bioetanol en Durango. La siembra se efectuó en junio de 2013 en dos sitios de Durango (INIFAP y CBTa 3). Se evaluaron las variedades de sorgo dulce TOM 3, Lico y Mercedes. Se fertilizó con la dosis 110-46-00 (INIFAP-Dgo) y 90-80-40 (CBTa 3), en ambos casos para nitrógeno, fósforo y potasio (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O). Se registró el número de días a floración y corte, además, se evaluó la producción de biomasa y cantidad de grados Brix en el jugo (°Bx). El análisis de varianza se obtuvo con un diseño en bloques completos al azar, combinado entre localidades. La prueba de medias se realizó con base en la diferencia significativa honesta (Tukey;  $\alpha=0.05$ ). La variedad más precoz a floración (78-85 días) y corte (97-102 días) fue Mercedes, mientras que TOM 3 fue la más tardía. Se detectaron diferencias altamente significativas entre localidades y especies para la producción de biomasa. El uso de una dosis alta de fertilización incrementó la cantidad de biomasa obtenida en INIFAP-Dgo. (181.2 t h<sup>-1</sup>), comparado con CBTa 3 (94.7 t h<sup>-1</sup>). La variedad que registró la mayor producción de biomasa fue Lico con 198 t ha<sup>-1</sup> en INIFAP-Dgo y 105 t ha<sup>-1</sup> en CBTa 3. Los grados Brix en todas las variedades resultaron estadísticamente iguales y fluctuaron entre 11.9 y 16.6 °Bx. Se identificaron variedades de sorgo dulce que pueden usarse en la producción de bioetanol y forraje verde en Durango.

**Palabras Clave:** *Sorghum bicolor*, biocombustible, agroindustria, forraje.

### Abstract

The aim of this study was to validate three sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] cultivars selected for bioethanol production at Durango, México. Sowing was carried out in 2013 at INIFAP-Durango Experiment Station (June 4<sup>th</sup>) and CBTa 3 (June 8<sup>th</sup>). Three sweet sorghum cultivars known as TOM 3, Lico and Mercedes were evaluated at two environments in Durango, municipality. Crop was fertilized using the dose 110-46-00 (INIFAP-Durango) and 90-80-40 (CBTa 3), in both cases for nitrogen, phosphorus and potassium (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O). Data were obtained for the number of

days to flowering and harvest, biomass production and the level of degrees Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ). Analysis of variance was obtained using a randomized complete block design combined over locations. Mean test was performed based on Tukey's honest significant difference ( $\alpha=0.05$ ). The earliest variety to flowering (78-85 days after planting) and date of forage cutting (97-102 days after planting) was Mercedes, while TOM 3 was considered as a late maturing cultivar. Highly significant differences were detected among locations and cultivars for biomass production. Higher fertilizer application rate favored increments in biomass production at INIFAP-Dgo. ( $181.2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), compared to CBTa 3 ( $94.7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Cultivar showing the highest biomass production was Lico with  $198 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  at INIFAP-Durango and  $105 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  in CBTa 3. The degrees Brix in all varieties were statistically equal and ranged between 11.9 and  $16.6 \text{ }^{\circ}\text{Bx}$  among locations and cultivars. High yielding sweet sorghum cultivars were identified to produce bioethanol and green fodder in Durango, México.

**Keywords:** *Sorghum bicolor*, biofuels, industrial processing, green fodder.

## Introducción

El etanol es el biocombustible más importante en la actualidad y los cultivos más utilizados mundialmente como materia prima para su producción son el maíz y caña de azúcar (1). La factibilidad económica de la elaboración y uso de los biocombustibles depende principalmente de la disponibilidad de materias primas de bajo costo. El maíz es un cultivo tradicional en México, donde es considerado como alimento indispensable para el consumo humano y su uso en la producción de biocombustibles está restringido (2). La caña de azúcar tiene como uso fundamental la elaboración de endulzantes para alimentación humana. Lo anterior, hace necesaria la identificación de especies vegetales de alternativa que puedan utilizarse como materia prima en la producción de etanol.

En Durango, se introdujeron diferentes variedades de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] y en sus poblaciones se ha practicado selección con base en el contenido de azúcares (3). En 2012, se sembraron en Durango alrededor de 33 mil hectáreas con sorgo forrajero (4), las cuales fueron utilizadas principalmente en la producción de forraje para ganado bovino. El sorgo dulce puede usarse como forraje y para la producción de biocombustibles debido a su adaptación en zonas semiáridas, contenido alto de azúcares y elevada productividad de etanol (3700 a 5600 L/ha/año). También, muestra un requerimiento bajo de fertilizante y agua en comparación con otros cultivos como el maíz (5; 6; 7). El objetivo fue identificar variedades de sorgo dulce con posibilidades para su uso en la elaboración de bioetanol en Durango.

## Material y Métodos

En 2013 se sembraron las variedades de sorgo dulce Mercedes, TOM 3 y Lico en dos ambientes del municipio de Durango, Dgo. La siembra se realizó el 4 de junio de 2013, en las instalaciones del INIFAP-Durango y el 8 de junio en Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario Núm. 3 (CBTa 3). Se aplicó riego de pre-siembra y un riego de auxilio para mantener el cultivo sin estrés de humedad. La siembra se realizó en

franjas apareadas con 24 surcos de 50 m de longitud y 0.81 m de separación. En INIFAP-Durango se utilizó la dosis de fertilización 110-46-00 (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O) aplicada en dos partes: una en la siembra (64-46-00) y la segunda ración de nitrógeno (46-00-00) en la primera escarda. En el caso del CBTa 3 se fertilizó en la primera escarda con la dosis 90-80-40.

Se evaluó la producción de biomasa 102 y 107 días después de la siembra (DDS) y los grados Brix del jugo, con base en la madurez de cosecha para cada variedad. Para la evaluación de la cantidad de biomasa, se utilizaron cinco muestras de dos surcos de cinco metros (8.1 m<sup>2</sup>), las cuales fueron pesadas en campo con la ayuda de una báscula digital con precisión de 0.01 g. La determinación de los grados Brix del jugo (°Bx) se obtuvo con el refractómetro (ALLA France®). Para ello se cortó el sexto entrenudo (en sentido acrópeto), se eliminó la epidermis y se extrajo jugo para la evaluación del contenido de sacarosa en el refractómetro. El análisis de varianza de los datos se obtuvo en un diseño en bloques completos al azar con arreglo factorial (localidades y variedades). La prueba de medias se obtuvo con la diferencia significativa honesta de Tukey (DSH;  $\alpha = 0.05$ ).

### Resultados y Discusión

En el INIFAP Durango, la variedad Mercedes mostró mayor precocidad a floración (aparición de la espiga, ver tabla 1), con 78 días después de la siembra (DDS), mientras que la variedad más tardía fue TOM 3 con 107 DDS. El corte se realizó en grano masoso-lechoso y la variedad más precoz fue también Mercedes con 102 DDS. Se observaron diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) entre localidades y variedades para la producción de biomasa y grados Brix. La producción de biomasa fue mayor en INIFAP-Dgo. con 181.2 t·ha<sup>-1</sup>, en comparación con CBTa 3 (94.7 t·ha<sup>-1</sup>). Lo anterior, estuvo relacionado con la fertilización y el riego.

La variedad Lico mostró la mayor producción de biomasa en ambas localidades con 198.0 t·ha<sup>-1</sup> en el INIFAP-Dgo. y 104.7 t·ha<sup>-1</sup> en el CBTa 3. La variedad TOM 3 mostró una producción de biomasa significativamente inferior en el INIFAP-Dgo. (180.5 t·ha<sup>-1</sup>) y en el CBTa 3 (85.7 t·ha<sup>-1</sup>). Los resultados obtenidos mostraron que las variedades evaluadas registraron alta producción de biomasa, aunque en el INIFAP-Durango se observaron problemas de acame ocasionado por la alta densidad de siembra, la cual superó 160, 000 plantas por hectárea (8).

Se observó igualdad estadística para la cantidad de grados Brix entre localidades y variedades. En el INIFAP-Durango los valores fluctuaron entre 13.2 °Bx (Mercedes) hasta 16.6 °Bx (Lico). Por su parte en el CBTa 3 los valores fluctuaron entre 11.9 °Bx (Lico) y 12.9 °Bx (TOM 3). Los valores obtenidos en 2013 fueron similares a los registrados previamente en la variedad Lico (14 °Bx) (9); aunque superaron los valores obtenidos en otros estudios donde se evaluaron variedades de sorgo dulce en dos densidades de siembra y se obtuvieron valores entre 10.4 y 12.6 °Bx (8).

**Tabla 1.** Resultados obtenidos para variables evaluadas en tres variedades de sorgo dulce cultivadas en Durango. 2013.

Variedad	Días a* Floración	Días corte	a Biomasa (t ha <sup>1</sup> )	°Brix
INIFAP-Durango				
TOM 3	92	107	180.5 <sup>b</sup>	15.0
Lico	82	106	198.0 <sup>a</sup>	16.6
Mercedes	78	102	164.9 <sup>b</sup>	13.2
Promedio	79	105	181.2	14.9
CBTa 3				
TOM 3	99	104	85.7 <sup>b</sup>	12.9
Lico	99	104	104.7 <sup>a</sup>	11.9
Mercedes	85	97	93.6 <sup>ab</sup>	12.1
Promedio	94	102	94.7	12.3
**CV (%)	--	--	7.4	21.2

\*Aparición de la espiga; \*\* Coeficiente de variación; <sup>a-b</sup> Literales iguales en la misma columna representan diferencias significativas entre variedades.

## Conclusiones

Existen opciones tecnológicas en Durango para la producción de etanol, mediante el uso de variedades de sorgo dulce adaptadas localmente.

La variedad Lico sobresalió por su ciclo biológico intermedio, alta producción de biomasa y cantidad de grados Brix en el jugo.

La fertilización influyó en la producción de biomasa y cantidad de grados Brix en el jugo del sorgo dulce.

## Bibliografía

1. Lourenço N., L.; P. A. Arraes P.; D. Ellis. 2007. Biofuels in Brazil: An Overview. *Crop Sci.* 47: 2228–2237.
2. DOF (Diario Oficial de la Federación). 2008. Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. México. Publicado el 01 de febrero de 2008.
3. Rosales S., R.; C. A. Nava B.; M. D. Herrera L.; E. Delgado L.; F. O. Reveles S.; E. I. Cuéllar R.; E. Merlín B. 2008. Contenido de azúcares en una población de sorgo dulce cultivado en Cuencamé, Durango. Memoria de la XX Semana Internacional de Agronomía Facultad de Agricultura y Zootecnia (FAZ)-Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED). p. 118-120.
4. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2013. <http://www.siap.gob.mx/>. Consultado el 10 de octubre 2013.
5. Lipinsky, E. 1978. Fuels from biomass integration with food and material systems. *Science* 199: 644.

6. Lipinsky, E. S.; S. Kresovich. 1980. Sorghum as energy crop. *In*: A. Liebenau (ed.). Proceedings of the Bio-Energy. Congress and exposition. The Bio-Energy Council, Washington, D.C. p. 91-93.
7. Kresovich, S. 1981. Sweet sorghum. *In* T. A. Mc Clure and E. S. Lipinsky (eds.). Handbook of biosolar resources. CRC Press. Inc., Boca Raton, Fla. p. 147-155.
8. Jiménez O., R.; S. Domínguez D.; R. Rosales S.; C. A. Nava B.; O. G. Núñez M. 2011. Producción de forraje y jugo en sorgo dulce cultivado en dos densidades de siembra. Memoria de la XXIII Semana Internacional de la Agronomía FAZ-UJED. p. 820-825.
9. Rosales S., R.; M. A. Monreal O.; C. A. Nava B.; E. Merlín B. 2009. Producción de etanol con sorgo dulce y manzana en Durango, México. Memoria de la XXI Semana Internacional de la Agronomía. Gómez Palacio, Dgo. México. p. 621-625.

## Artículo VIII

# DESALACIÓN DE AGUA DE POZOS COMO POLÍTICA DE PRODUCCIÓN DE CULTIVOS CON POTENCIAL BIOENERGÉTICO

Dévora G.E.<sup>1</sup>, Astorga S.<sup>2</sup>, Valdez L.C.<sup>1</sup>, Ramos U.D.<sup>1</sup> y Carrazco F.G.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> [german.devora@itson.edu.mx](mailto:german.devora@itson.edu.mx) – [luis.valdez@itson.edu.mx](mailto:luis.valdez@itson.edu.mx) – [uzi\\_raza@hotmail.com](mailto:uzi_raza@hotmail.com)

Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, Cd Obregón, Sonora, México. Tel: +52 -410 90 00 Ext. 1716

<sup>2</sup> [sebas\\_astorga@hotmail.com](mailto:sebas_astorga@hotmail.com) – [francia.carrazco@hotmail.com](mailto:francia.carrazco@hotmail.com)

Estudiante de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Sonora, Cd Obregón, Sonora, México.

### Resumen

Los problemas de disponibilidad de los recursos hídricos abandonados en el Valle del Yaqui se deben principalmente a la alta concentración de sales en los pozos. La utilización de tecnologías de desalación permite revertir ese efecto. El pozo utilizado en este estudio tiene una concentración promedio de 9,900  $\mu\text{S}/\text{cm}$  causando daños en las propiedades del suelo y al desarrollo vegetativo del cultivo sorgo, cómo la germinación (panojas/ $\text{m}^2$ ), altura (m), grosor de tallo (cm) y rendimiento (Ton/Ha). Se habilitó una planta desaladora de 100  $\text{m}^3/\text{d}$  para acondicionar el agua del pozo, integrando cintas de riego para la optimización del agua proveniente de la planta. Esta agua producto utilizada fue de 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se utilizó equipo electrónico Watermak 200 para medir la retención de agua en el suelo en busca de la programación del riego. Los resultados del estudio muestran que el costo de producción de agua es de 6.05  $\$/\text{m}^3$ , muy similar a lo reportado por la International Desalination Association, que es de 6.70  $\$/\text{m}^3$ . Con el uso de esta agua desalinizada, se logró un incremento de producción de 1 Ton/Ha comparado al riego con agua salada, sin afectar las propiedades fisicoquímicas del suelo. Este costo hace pensar satisfactoriamente en una estrategia favorable para el uso del recurso hídrico en pozos abandonados en el Valle del Yaqui, en todo el Estado de Sonora y en estados de México con problemática semejante, que deseen utilizar granos para alimentación o biocombustibles.

**Palabras Clave:** Biocombustible, desalación, agricultura, agua

### Abstract

The availability issues of abandoned water resources in Valle del Yaqui are the result of high levels of salts in the wells. The application of desalination technology is one of the options to minimize this effect. In this research, a well with average concentration of 9,900  $\mu\text{S}/\text{cm}$  was used, noting that this property causes soil damage and affects vegetative development of sorghum, including germination (panicles/ $\text{m}^2$ ), height (m), stem thickness (cm) and performance (Ton/Ha). A desalination plant of 100  $\text{m}^3/\text{d}$  was enabled to improve the quality of the well's water, along with irrigation tapes to optimize the water consumption. The product water from the plant had a concentration of 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Watermark 200 was used to measure the soil moisture and schedule the

irrigation program. The results of the research show that the cost of water production was 6.05 \$/m<sup>3</sup>, very similar to the one reported by the International Desalination Association, which is 6.70 \$/m<sup>3</sup>. Using this technology, the performance of cultivation of sorghum increased 1 Ton/Ha compared to the irrigation with brackish water, with no effects on the physicochemical properties of the soil. The cost of production leads to the conclusion that this strategy is viable to manage the water resources in abandoned wells in Valle del Yaqui, the whole Sonora state and in other states of Mexico with a similar issue, and the purpose of using grains to human feeding and biofuels.

**Key Words:** *Biofuel, desalination, agriculture, water*

## Introducción

En México existe una escasez crónica y aguda de agua sobre todo en la parte norte del territorio nacional, donde la cantidad de la precipitación es mucho menor que la evapotranspiración potencial (Jürgen, 2000). En el Estado de Sonora, principalmente en la región suroeste, 450 pozos agrícolas han sido abandonados debido su alta salinidad, causada por intrusión salina por su cercanía a la costa. Esto obligó a buscar otras fuentes de abastecimiento de agua dulce, entre ellas la desalinización de agua por Ósmosis Inversa (ICGSA, 2007). Otro reto importante que tiene la desalación es la disminución de costos energéticos de producción, ya que a pesar de ser viable esta tecnología, el costo final de producir agua en estándar de calidad es aún elevado, y el uso de granos con fines de generación de energía mediante biocombustibles se vislumbra como una alternativa para bajar el costo de producción (Huang *et al.*, 2009). El sorgo, quinto cereal en importancia en el mundo tras el arroz, maíz, trigo y cebada, crece en terrenos secos, tolera bien el calor, un alto porcentaje de humedad o la salinidad del suelo (Dar, 2008). En México se encuentran ya cada vez más establecidas las condiciones legislativas, energéticas y de mercado que alienten la construcción de biorefinerías. El uso de sorgo como materia prima para la producción de alternativas a la gasolina resulta sin duda una de las áreas más promisorias en el campo y la industria nacional (Chuck, 2011). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo es rehabilitar un pozo agrícola salobre a través de la instalación una planta desaladora de Ósmosis Inversa, para cultivar plantas con propiedades bioenergéticas. Con el uso de desalación, los productores no se preocuparán por sembrar cultivos que soporten o toleren la concentración de sus pozos, ya que podrán establecer siembras de alto rendimiento y valor comercial (Dévora, 2007).

## Materiales y Métodos

El experimento consistió en la selección de un terreno agrícola con problemas de salinidad en su pozo de alimentación, que estuviera abandonado. Se habilitó una planta desaladora de Ósmosis Inversa de 100 m<sup>3</sup>/d con el cual se regó sorgo de la variedad Ámbar de ASGROW porque se procuró utilizar un material vegetal resistente a altas concentraciones de sal debido a la finalidad del proyecto de utilizar agua salada (9,900 µS/cm) y desalada (150 µS/cm). Ya seleccionado el cultivo, este se sembró el día 26 de abril del 2013, posteriormente se aplicó un riego pesado de alrededor de 8 horas para asegurar una germinación adecuada de la semilla. Por otra parte, se establecieron riegos de alrededor de 1.5 horas 3 veces por semana en el mes de abril

y mayo de 2013. Cuándo la demanda evaporativa fue más alta como sucedió en el mes de julio la frecuencia de los riegos aumentaron de 3 a 6 veces por semana con 2 horas promedio por riego.

Se instaló equipo de medición para el control del proceso, cómo sensores electrónicos (watermak 200) y tensiómetros manuales para monitorear la humedad del suelo y en base a ello se determinó el momento de riego y duración del mismo. Estos instrumentos se colocaron en el cultivo de sorgo 3 por tratamiento. La profundidad de instalación de sensores fue de 15 centímetros para sorgo. Se procedió a cosechar el sorgo el día 15 de Agosto de 2013 para determinar el rendimiento final por tratamiento evaluado. Las muestras en sorgo tuvieron un área de 16 m<sup>2</sup>, tomando 6 muestras para el tratamiento regado con agua del pozo y 6 muestras para el regado con agua de la planta. Al finalizar el muestreo se procedió a la medición de parámetros fisiológicos finales en sorgo, como fueron la altura final de la planta, el tamaño y peso de la panoja. La diferencia de días se debió a los impactos ocasionados por las lluvias presentadas.

## Resultados

### Operación de planta desaladora

El uso de la planta desaladora en este estudio, propició, como se ha mencionado anteriormente, el acondicionamiento de un cuerpo de agua salobre para su uso en riego de cultivos, caso específico del sorgo. En la tabla 1 se muestra la caracterización hecha al agua de alimentación proveniente del pozo, el agua producto de la desalinización y el agua rechazo o salmuera obtenida del proceso.

**Tabla 1.** Caracterización de las corrientes de agua en la planta desaladora

Muestra	pH	CE mg/L	ppm (mg/L)								RAS	PSI
			Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Cl <sup>-</sup>		
Alimentación	7.01	4,180.0	12.00	16.00	0.10	0.10	0.00	13.20	17.65	22.50	1.71	1.25
Producto	5.16	25.8	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.32	0.43	0.08	0.00	0.00
Rechazo	7.65	10,130.0	30.00	30.00	45.00	0.40	0.00	36.00	45.65	61.00	8.22	9.79

### Costos de producción de agua

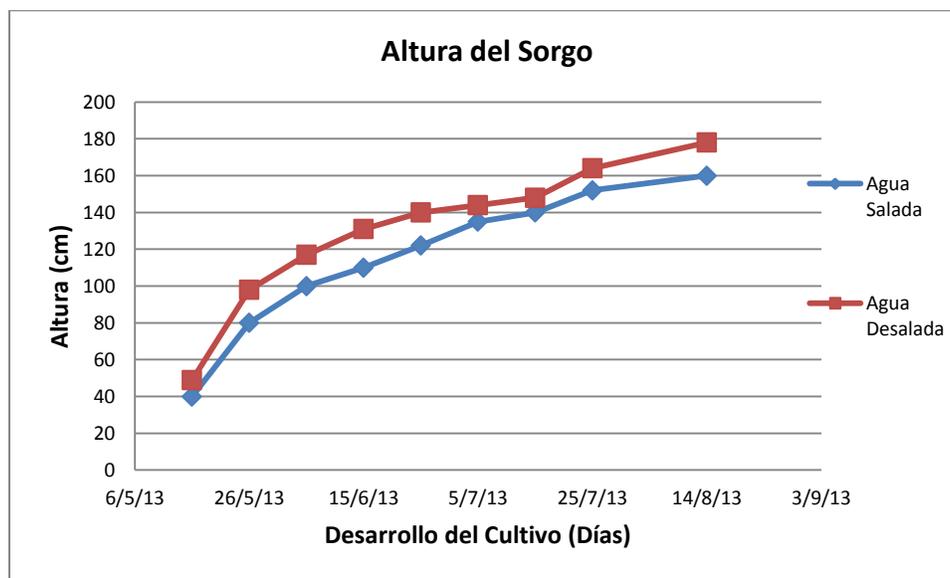
A lo largo del estudio se tomaron en cuenta todos los factores económicos que intervienen en el proceso de desalinización de agua, ya que se considera fundamental el análisis de costos de producción para determinar la viabilidad de esta tecnología en la situación presente. Los resultados de costos de producción de agua se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Costos de producción de agua con cambios proyectados

Concepto	Costo (\$/m <sup>3</sup> )
Costo energético	3.78
Importe unitario M.O.	1.73
Importe unitario Químicos	0.08
Importe del mantenimiento	0.57
Total	6.05

Análisis de cultivo

Dejando de lado el análisis técnico del agua, uno de los propósitos fundamentales del estudio era evaluar el comportamiento de la planta de sorgo al ser regada por agua salobre y por la obtenida mediante la planta. En la figura 1 se observa el comportamiento de la altura del cultivo en los dos módulos de experimentación, desde el mes de abril hasta el mes de septiembre, periodo en que se realizó la toma de mediciones.



**Figura 1.** Comportamiento de altura de sorgo en los dos experimentos

En la tabla 3 se muestra el comportamiento del cultivo de sorgo para cada experimento, en donde se puede observar que el rendimiento final fue mayor en el tratamiento regado con agua desalada proveniente de la planta con una concentración de 150  $\mu\text{S/cm}$ , alcanzando 8.8 ton/ha promedio comparado contra 7.9 ton/ha del tratamiento regado con agua directa del pozo con concentración de 9,900  $\mu\text{S/cm}$ . En un análisis realizado utilizando el paquete estadístico Statgraphics 5.0 se determina que no hay diferencias estadísticamente significativas entre cada tratamiento con un 95% de confianza.

**Tabla 3.** Comportamiento de parámetros en el cultivo de sorgo

Parámetro	Riego con agua desalada	Riego con agua salobre	$\alpha$ 95 %
Altura (m)	1.70	1.57	X
# panojas/m <sup>2</sup>	29.00	28.00	
Peso/panoja (g)	30.00	29.00	
Rendimiento (Ton/Ha)	8.80	7.90	

### Propiedades del Suelo

La aplicación de dos tipos de agua en el riego de sorgo tiene un efecto directo en las propiedades fisicoquímicas del mismo. Este efecto puede ser positivo o negativo dependiendo de la perspectiva que se observe (agua salada o desalada). En la tabla 4 se ejemplifican los valores medidos de las propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después de la realización del experimento.

**Tabla 4.** Propiedades fisicoquímicas del suelo antes y después del experimento

Muestra	pH Inicial	pH Final	CE Inicial $\mu$ S/cm	CE Final $\mu$ S/cm	(meq/L)				RAS Inicial	RAS Final	PSI Inicial	PSI Final
					Na <sup>+</sup> Inicial	Na <sup>+</sup> Final	Cl <sup>-</sup> Inicial	Cl <sup>-</sup> Final				
<i>Agua Desalada</i>												
1	7.22	7.08	4,060	3,780	4.50	4.00	16.56	15.20	1.27	1.21	0.63	0.61
2	7.48	7.48	2,340	2,040	7.80	6.90	3.00	2.60	3.18	1.80	3.32	1.80
3	7.14	7.25	2,040	2,010	4.40	30.00	9.00	133.00	3.65	3.96	0.90	3.96
4	7.25	7.28	2,830	2,370	3.90	8.20	12.50	17.00	1.71	1.25	0.30	1.25
<i>Agua Salada</i>												
5	7.05	7.35	2,590	11,690	2.30	30.00	12.50	30.00	0.68	2.09	0.00	1.79
6	7.43	7.47	3,180	12,190	4.60	30.00	16.00	103.00	1.25	4.05	0.58	5.25
7	7.48	7.23	2,340	13,900	1.80	13.20	18.00	101.00	0.58	4.01	0.00	4.10
8	7.23	7.48	2,730	12,040	7.80	31.40	13.50	122.00	2.18	3.75	1.92	4.45

### Discusión

En los resultados obtenidos, se observa que la eficiencia de remoción de cationes y aniones de la planta desaladora es muy cercana al 100%, y la eficiencia en remoción de concentración de sales es de 99.39%, lo que indica que el agua producto del sistema usada para riego es de una calidad totalmente superior a la del agua de pozo.

Es claro que tal eficiencia de remoción significa un costo de producción, también ejemplificado en tablas anteriores, que fue de 6.05 \$/m<sup>3</sup>, siendo menor al reportado por otros autores, que es de 6.70 \$/m<sup>3</sup>. Este costo representa un resultado significativo a

favor del estudio, ya que puede ser un punto de inflexión para comprobar la viabilidad de este proceso en agricultura, especialmente en el cultivo de sorgo.

En cuanto a los resultados directos del proceso de cultivo de sorgo, es perfectamente notable el mayor rendimiento y salud propiciado por el riego con agua desalinizada que con agua salada, obteniendo una altura mayor de 15 cm en promedio y 1 Ton/Ha más como rendimiento en la cosecha, causado por la alta calidad y baja concentración en sales con las que cuenta el agua, permitiendo un desarrollo fisiológico favorable del cultivo.

Se observa, en última instancia, el beneficio que tiene el uso de agua desalinizada en las propiedades del suelo que hacen posible la actividad agrícola, ya que de seguir usando agua con alto contenido en sales, la calidad y productividad de la tierra en uso se verá demeritada en cada ciclo agrícola.

### **Conclusiones**

Sin lugar a duda la optimización del recurso mediante sensores y equipo sofisticado de control permitirá que se utilice solo el agua necesaria durante el cultivo de granos favoreciendo el crecimiento económico y el acceso a los alimentos de los países en desarrollo. Por causa-efecto se incrementó la productividad agrícola y las inversiones públicas y privadas en el sector rural se ven viables en el corto plazo. La transferencia de tecnología es vital para proyectos innovadores que vengán a solucionar el desabasto de agua en México, sin duda el implementar tecnología de desalación y técnicas e instrumentación de monitoreo, permite mejorar la rentabilidad del cultivo, reducción de costos, utilización en el sector de biocombustibles y el aprovechamiento del recurso hídrico abandonado y sin uso benéfico a la sociedad.

### **Agradecimientos**

Se agradece a Fundación Produce Sonora, por el apoyo recibido para la ejecución del proyecto: Tecnología sobre desalación de agua en pozos con problemas de intrusión salina, para su reutilización en la agricultura; según convocatoria 26-2012-0030.

### **Bibliografía**

1. Jürgen, H. (2000). Técnicas innovativas de desalinización de aguas salobres y del mar. *Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente: Memorias Técnicas*. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias ambientales., AIDIS. México, D.F. 14-18 Agosto 2000. 1-11.
2. ICGSA (Ingenieros Civiles y Geólogos S.A.) (2007), Estudio geohidrológico para el Valle Aluvial del Rio Yaqui. Sonora, ICGSA-SARG.
3. Huang G., F Chen, D Wei, X. Zhang and G. Chen (2009), "Biodiesel production by Microalgal Biotechnology", *Science and Technology*, 87 (1), 38-46.
4. Dar, W. Innovations for a changing world. (2008). ICRISAT Annual Report. 16-19.
5. Chuck, C., *et al.* 14

6. (2011). Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* [online], 10 (3): 529-549. ISSN 1665-2738.
7. Dévora, G. E., González, R. (2007). Desalinización de agua de mar, una estrategia para detonar el desarrollo del Noroeste de México. *Los acuíferos Costeros: Retos y Soluciones*. 1, 1025-1034.

## Artículo IX

# CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE 18 ACCESIONES DE *Jatropha curcas* L. NO TÓXICAS DE VERACRUZ, MÉXICO

Ávila Reséndiz C.<sup>1</sup>, Pérez Vázquez A.<sup>1\*</sup>, López Romero G.<sup>1</sup>, Hernández Zaragoza A. D.<sup>1</sup>, García Pérez E.<sup>1</sup>, Lara Bautista J.<sup>1</sup> y Valdés Rodríguez O.A.

LPI3. <sup>1</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. km.88.5 Carretera Xalapa-Veracruz, Predio Tepetates, Veracruz, Ver., C.P.91700.MEXICO. E-mail: [parturo@colpos.mx](mailto:parturo@colpos.mx) [jose.bautista@colpos.mx](mailto:jose.bautista@colpos.mx)

### Abstract

*Jatropha curcas* L., es una planta normalmente tóxica y por tanto no comestible, esto por los altos contenidos de ésteres de forbol en su semilla. Sin embargo, es una opción como materia prima para la producción de biodiesel por altos contenidos de aceite. La caracterización morfológica y de contenido de aceite en *Jatropha* es una condición necesaria para identificar materiales prometedores en trabajos de mejoramiento genético. En Veracruz, México se inició la recolecta de material vegetal de piñón en el 2009 como parte de la Red de *Jatropha* spp. de SAGARPA-SINAREFI. Esto con el fin de estudiar, caracterizar y conservar en bancos de germoplasma. El objetivo fue caracterizar la diversidad genética de 18 accesiones comestibles (no tóxicas) recolectadas en diferentes localidades del Estado de Veracruz. Las 18 accesiones con 20 repeticiones se establecieron bajo un diseño completamente al azar en áreas experimentales del Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz (19° 16' 00" LN y 96° 16' 32" LO, a 18 msnm). Se midieron nueve características morfo-fenológicas (altura, número de ramas, diámetro del tallo, inicio de floración y fructificación, largo, ancho, grosor, peso y análisis químico de las semillas). Los datos se agruparon por variables y se compararon mediante la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). La mayor altura fue para la accesión 019 con 1.71 m, diámetro del tallo 057 4.20 cm, el mayor número de ramas (6) se encontró en las accesiones 057 y 062. El inicio de floración fue de 2.4 para el segundo mes y en fructificación fue de 3.61. Para la mayor longitud y peso de semillas correspondió a la accesión 034 (11.43 mm, 0.788 g) con un grosor y ancho de la semilla de 9.02 mm y 11.44 mm. El mayor porcentaje de aceite fue de 55%. Se concluye que la caracterización morfológica permitió determinar la variabilidad genética, encontrando diferencias morfo-fenológicas entre accesiones y composición química de las semillas.

**Palabras Clave:** *accesión, variabilidad, caracterización fenológica, composición química, J. curcas L.*

### Introducción

*Jatropha curcas* (piñón) es una planta que puede cultivarse tanto en regiones de baja (600 mm) y mediana precipitación (1200 mm), tolera condiciones adversas de suelo y clima entre ellas, la sequía. Ha sido considerada una planta toxica, pues sus semillas contienen alcaloides conocidos como esterés de forbol. Sin embargo, en México existen materiales no tóxicos cuyas semillas son consumidas después de tostar en la

preparación de platillos, particularmente en la región del Totonacapan (Makkar *et al.*, 1998; Martínez *et al.*, 2006).

La caracterización morfológica y el contenido de aceite y ésteres de forbol de materiales de *Jatropha curcas* L. es una condición necesaria para identificar materiales prometedores en trabajos de mejoramiento genético. En Veracruz, México se ha iniciado la recolecta de material vegetal de *J. curcas* L. como parte de la Red de *Jatropha* spp. de SAGARPA-SINAREFI a fin de estudiar, caracterizar y conservar en bancos de germoplasma. El objetivo de este estudio fue caracterizar la diversidad genética de 18 accesiones recolectadas en diferentes localidades del Estado de Veracruz.

### Material y métodos

El estudio se realizó en el Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz (19° 16' 00" LN y 96° 16' 32" LO, a 18 msnm) en el año 2010. Las 18 accesiones con 20 repeticiones se establecieron bajo un diseño completamente al azar. Se realizó una caracterización de nueve características morfo-fenológicas (altura, número de ramas, diámetro del tallo, inicio de floración y fructificación, largo, ancho, grosor, peso y análisis químico de las semillas). Con las medias obtenidas se elaboró un dendograma con el programa NTSYS versión 2.10q utilizando el método de UPGMA y Clustering obteniendo distancias de similitud y formando dos grupos de dispersión con tres componentes principales explicando el 73% de variación.

El material que se utilizó para la presente investigación fueron 18 accesiones. Estas corresponden a diversas localidades del Estado de Veracruz. En la tabla 1 se presentan estas accesiones y su ubicación en datos de coordenadas geográficas.

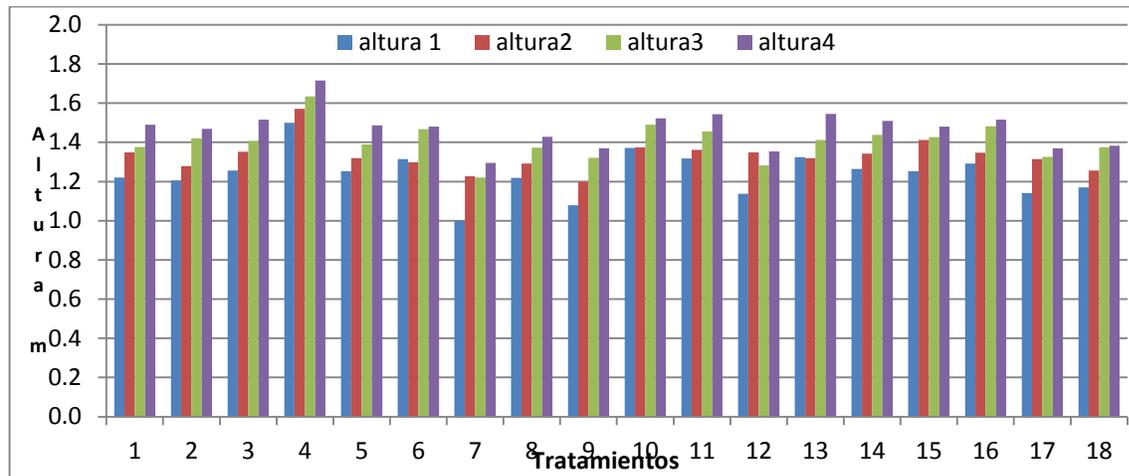
**Tabla 1.** Accesiones evaluadas del Estado de Veracruz

CLAVE	LOCALIDAD	LN	NO	MSNM
02	La Mancha, Actopan	19°11'18"	96°08' 06"	2
13	La Isla, Tihuatlan	20° 36' 32"	97° 30' 00"	85
18	Paso de san Lorenzo, Tamiahua	21° 12' 18"	97° 28' 35"	1
19	Raya Oscura, Tamiahua	21° 15' 51"	97° 30' 13"	7
26	Congregación El Tajín, Papantla	20° 26' 10"	97°22' 44"	109
30	El Embarcadero, Tecolutla	20° 28' 46"	97°0' 20"	9
34	Progreso, Martínez de la Torre	20° 10'38"	96°53' 38"	79
36	Colorado Chico, Misantla	20° 04' 34"	96° 56' 43"	48
38	Misantla, Misantla	19°56'08''	96°51'02''	294
42	4 Caminos, Paso del Macho	19° 21' 11"	96° 39' 53"	418
43	Atoyac, Atoyac	18° 55' 09"	96° 46' 27"	487
45	Rancho Trejo, Amatlán de los Reyes	18° 51' 36"	96° 52' 32"	670
55	Santa Rosa, Hueyapan de Ocampo	18° 08' 09"	95° 06' 57"	524
57	Km. 6 Autopista Acayucan – Cosamaloapan, Acayucan	17° 54' 55"	94° 57' 59"	68
60	Conejos, Puente Nacional	19° 18'35"	96°29'35"	145
61	Palmillas, Puente Nacional	19° 12' 31"	96° 45' 00"	628
62	Palmillas, Puente Nacional	19°12' 26"	96°45' 19"	641
65	Mata Oscura, Totutla	19°13' 5"	96° 51' 24"	952

## Resultados

### Altura de la planta

El análisis de varianza mostró diferencia significativa entre tratamientos. Se obtuvo un coeficiente de variación (C.V.) alto para el 1er, 2do y 3er mes con 25.23%, 23.70% y 21.30%, mientras que en el 4to mes el C.V. fue bajo, siendo de 19.64%. La altura de la planta en los cuatro muestreos fue diferentes, pero con una mayor altura la accesión 019 de 1.716 m (figura 1).



**Figura 2.** Altura de la planta (m) de *J. curcas* L. de 18 accesiones en cuatro muestreos

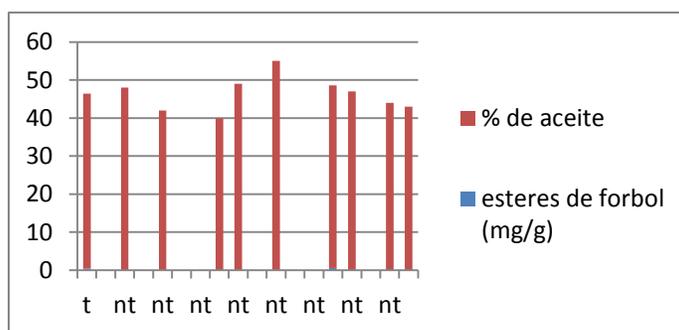
La comparación de medias (Tukey  $\leq 0.05$ ) indica que todos los tratamientos no fueron estadísticamente similares, ya que no se tuvo el mismo efecto sobre la variable altura de planta en los diferentes muestreos, tabla 2.

**Tabla 2.** Medias de 18 accesiones correspondientes a cuatro muestreos

Accesión	MUESTREO			
	1	2	3	4
1	1.221abc	1.348ab	1.376ab	1.490ab
2	1.207abc	1.279ab	1.420ab	1.468ab
3	1.257abc	1.352ab	1.407ab	1.516ab
4	1.500a	1.572 <sup>a</sup>	1.634a	1.716 <sup>a</sup>
5	1.254abc	1.320ab	1.389ab	1.486ab
6	1.314abc	1.299ab	1.468ab	1.480ab
7	1.000c	1.227ab	1.221b	1.295b
8	1.219abc	1.292ab	1.373ab	1.429
9	1.079bc	1.199b	1.321ab	1.370b
10	1.371ab	1.375ab	1.490ab	1.522ab
11	1.318abc	1.362ab	1.456ab	1.544ab
12	1.138bc	1.349ab	1.283b	1.354b
13	1.325abc	1.320ab	1.413ab	1.546ab
14	1.265abc	1.343ab	1.438ab	1.509ab
15	1.254abc	1.412ab	1.427ab	1.480ab
16	1.292abc	1.347ab	1.483ab	1.516ab
17	1.141abc	1.315ab	1.326ab	1.370b
18	1.170abc	1.257ab	1.375ab	1.384ab
D.S.M	0.3609	0.3671	0.3483	0.3358

### Análisis químico de las semillas

En el análisis químico de las semillas se encontró que de las 18 accesiones, solo dos presentaron toxicidad, siendo las accesión 13 (0.38mg/g) y la 57 (0.61mg/g) de ésteres de forbol. El mayor contenido de aceite (en porcentaje) fue en la accesión 43 con 55% de aceite (figura 2 y tabla 3).



**Figura 2.** Análisis químico de *J. curcas* L. en % de aceite, ésteres de forbol y toxicidad

**Tabla.** Contenido de aceite y ésteres de forbol en semillas de *J. curcas* L.

Tratamiento/Accesión	Toxicidad	Esteres de forbol (mg/g)	% de aceite
02	t	0.38	46
13	nt	NA	
18	nt		48
19	nt		
26	nt		42
30	nt		
34	nt		
36	nt		40
38	nt		49
42	nt		
43	nt		55
45	nt		
55	nt		
57	t	0.61	48
60	nt		47
61	nt		
62	nt		44
65	nt		43

**Tabla 4.** Matriz de correlación. Coeficiente de correlaciones de Pearson de las variables altura, diámetro del tallo, número de ramas, inicio de floración y fructificación.

	altura1	altura2	altura3	altura4	nr1	nr2	nr3	nr4	diam1	diam2	diam3	diam4	if1	if2	if3	if4	ifr2	ifr3	ifr4
altura1	1.000	0.802	0.951	0.952	<b>0.028</b>	0.206	0.078	<b>0.049</b>	0.705	0.680	0.692	0.704	0.181	0.313	0.102	0.225	0.423	0.422	-0.477
altura2		1.000	0.761	0.811	0.109	0.242	0.100	0.173	0.575	0.563	0.560	0.566	0.141	0.420	0.038	0.362	0.214	0.505	-0.266
altura3			1.000	0.932	<b>-0.003</b>	0.214	0.120	0.095	0.620	0.604	0.618	0.615	0.082	0.241	0.132	0.235	0.498	0.369	-0.544
altura4				1.000	0.071	0.155	<b>0.059</b>	<b>0.012</b>	0.688	0.672	0.682	0.689	0.125	0.343	<b>-0.068</b>	0.315	0.408	0.447	-0.522
nr1					1.000	0.832	0.743	0.726	0.491	0.530	0.521	0.510	0.516	0.450	-0.313	-0.363	0.243	0.290	0.041
nr2						1.000	0.919	0.893	0.436	0.473	0.458	0.449	0.311	0.227	-0.155	-0.331	0.287	0.139	-0.127
nr3							1.000	0.934	0.297	0.326	0.313	0.308	0.306	0.193	-0.276	-0.174	0.294	<b>0.039</b>	-0.183
nr4								1.000	0.304	0.335	0.309	0.297	0.387	0.251	-0.263	-0.231	0.304	0.081	<b>0.017</b>
diam1									1.000	0.995	0.996	0.996	0.558	0.399	-0.204	<b>-0.054</b>	0.281	0.403	-0.324
diam2										1.000	0.996	0.989	0.539	0.375	-0.206	-0.084	0.260	0.366	-0.342
diam3											1.000	0.994	0.537	0.382	-0.205	-0.083	0.270	0.372	-0.351
diam4												1.000	0.534	0.412	-0.220	<b>-0.032</b>	0.267	0.423	-0.318
if1													1.000	0.652	<b>-0.007</b>	-0.142	0.432	0.380	0.160
if2														1.000	<b>0.006</b>	0.255	0.395	0.732	0.116
if3															1.000	<b>-0.041</b>	0.163	0.150	<b>-0.046</b>
if4																1.000	<b>0.041</b>	0.366	-0.238
ifr2																	1.000	0.504	<b>-0.057</b>
ifr3																		1.000	0.153
ifr4																			1.000

Diámetro del tallo (Diam), Número de ramas (Nr), inicio de floración (If) e inicio de fructificación (Ifr)

## Conclusiones

Se concluye que la caracterización morfológica permitió determinar la variabilidad genética, encontrando diferencias morfo-fenológicas entre accesiones y composición química de las semillas.

## Agradecimiento

Se agradece a Fomix 095753 y a la LPI3 (Energía Alternativa y Biomateriales) por el apoyo financiero.

## Bibliografía

1. Makkar H.P.S., Becker K., Schmook B. 1998. Edible provenances of *J. curcas* from Quintana Roo state of México and effect of roasting on antinutrient and toxic factors in seeds. *Plant Food for Human Nutr.* 52: 31-36.
2. Martínez H.J., Siddhuraju P., Francis G., Dávila O.G., Becker K. 2006. Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico, *Food Chem.* 96 (No): 80-89.

## Artículo X

# EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE DE HIGUERILLA CATALIZADA CON HIDROTALCITAS

Salinas H.P.<sup>1</sup>, Morales A. F.<sup>1\*</sup>, Cortés R. J.A.<sup>1</sup>, Hernández V.J.<sup>1</sup>, Hernández L. F.J.<sup>1</sup>,  
Tzompantzi M. F.J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad del Istmo Campus Tehuantepec, Av. Universidad s/n, Barrio Santa Cruz Tagolaba 4<sup>a</sup> sección, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, C. P. 70760. \*e-mail: [salinashp@yahoo.com.mx](mailto:salinashp@yahoo.com.mx)

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de Química, Av. San Rafael Atlixco #186, Col. Vicentina, C. P. 09340, México, D. F. MEXICO

### Abstract

We studied the effect of temperature on the reaction of transesterification of castor oil (AH) with methanol, for the production of biodiesel using hidrotalcita type catalysts, ZnBaAl and ZnCaAl. The reaction was carried out in a Parr reactor for 5 hours, with 1.25 % of catalyst, molar ratio AH:methanol 1:50 for ZnBaAl and 1:18 for ZnCaAl in a temperature range of 65 - 180 °C. The characterization of the biodiesel was performed by GC-FID, results showed that methyl ricinoleate is the ester produced in higher proportion. Based on the peak intensity of the methyl ricinoleate was determined that the optimum reaction temperature is 160 °C for the catalyst of ZnBaAl and 120 °C for ZnCaAl. These results indicate that the AH can be employed for the production of biodiesel, through a transesterification process using hidrotalcita type catalysts.

### Resumen

Se estudió el efecto de la temperatura en la reacción de transesterificación del aceite de higuera (AH) con metanol, para la obtención de biodiesel empleando catalizadores tipo hidrotalcita, ZnBaAl y ZnCaAl. La reacción se llevó a cabo en un reactor Parr durante 5 horas, con 1.25 % de catalizador, relación molar AH:metanol 1:50 para ZnBaAl y 1:18 para ZnCaAl en un rango de temperatura de 65 – 180°C. La caracterización del biodiesel se realizó mediante CG-FID, los resultados mostraron que el ricinoleato de metilo es el éster producido en mayor proporción. En base a la intensidad del pico del ricinoleato de metilo se determinó que la temperatura óptima de reacción es de 160 °C para el catalizador de ZnBaAl y de 120 °C para ZnCaAl. Estos resultados indican que el AH puede ser empleado para la obtención de biodiesel, mediante un proceso de transesterificación usando catalizadores tipo hidrotalcita.

**Palabras Clave:** Hidrotalcita, biodiesel, transesterificación, aceite Higuera, catálisis heterogénea.

### Introducción

La producción de biodiesel como combustible para motores diesel se ha incrementado considerablemente en los últimos años y se espera que crezca cada vez más en el futuro próximo. El aumento del consumo de biodiesel requiere una optimización de los procesos que permitan altas capacidades de producción, operaciones simplificadas,

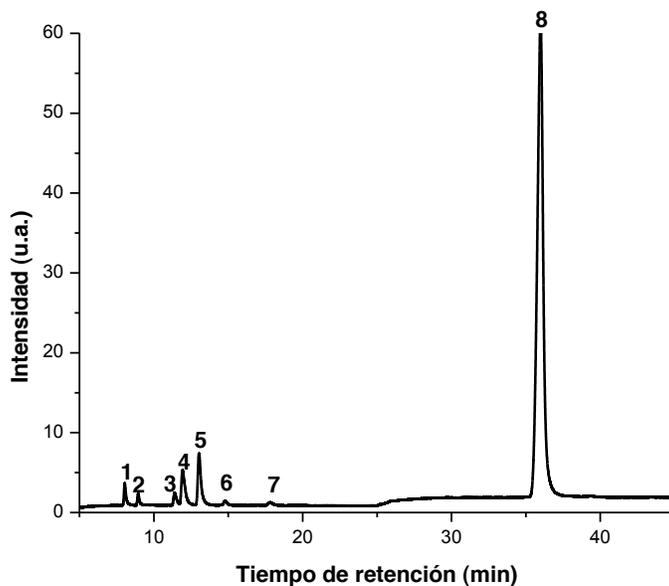
altos rendimientos, y el uso de materias primas más económicas, tales como el aceite de Higuierilla, la cual crece de forma silvestre en el Istmo de Tehuantepec, cuyo aceite no es comestible, por lo tanto no compite con la alimentación humana. Sin embargo, actualmente el proceso utilizado para la producción del biodiesel está basado en el uso de catalizadores alcalinos en la fase homogénea que requiere el uso de aceite altamente refinado como materia prima y la posterior purificación del biodiesel y de la glicerina que vuelve el proceso caro. Por lo tanto, el desarrollo de procesos para la producción de biodiesel a bajo costo requiere catalizadores heterogéneos selectivos y eficientes para la promoción de la reacción de transesterificación aún en presencia de ácidos grasos libres y agua, que permita fácilmente la separación del catalizador de la mezcla de reacción, así como la separación del biodiesel y la glicerina sin la necesidad de una purificación de estos productos. Los catalizadores heterogéneos básicos son los que más se han estudiado para la síntesis de biodiesel tales como: CaO [1] e hidrotalcita [2].

### Material y Métodos

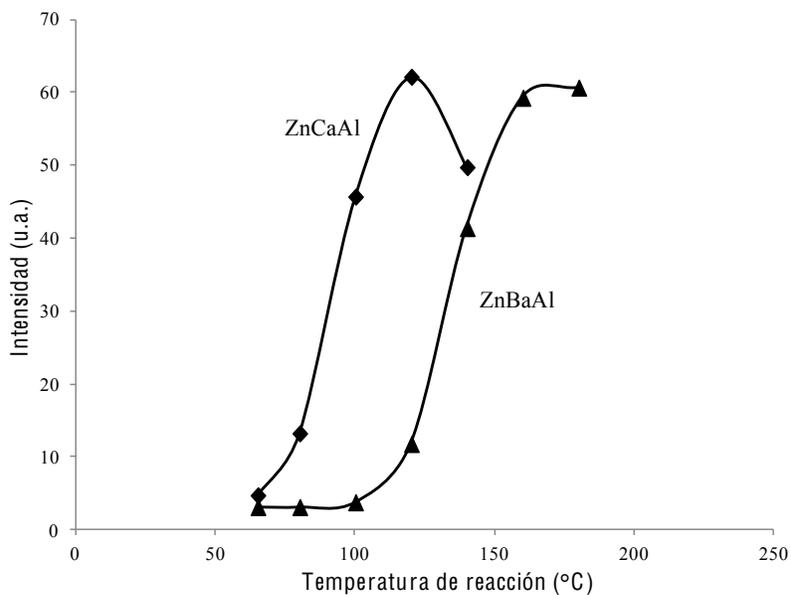
El trabajo experimental se realizó en el laboratorio de biomasa de la Universidad del Istmo. El biodiesel se obtuvo mediante la reacción de transesterificación heterogénea utilizando ZnBaAl y ZnCaAl como catalizadores. La reacción se llevó a cabo en un reactor Parr durante 5 horas, con 1.25 % de catalizador, la relación molar AH: metanol 1:50 para ZnBaAl y 1:12 para ZnCaAl para establecer la temperatura óptima de reacción se estudió el efecto de la temperatura en el intervalo de 65 a 180 °C. El biodiesel se analizó por cromatografía de gases (CG-FID), se utilizó un cromatógrafo de gases marca VARIAN modelo CP-3380. Se empleó una columna capilar marca PERKIN ELMER de 30 m de longitud y diámetro interno de 0.32 mm. Se utilizó He como gas de arrastre y palmitato, oleato, estearato y ricinoleato de metilo como estándares.

### Resultados

Para estudiar la influencia de la temperatura en el rendimiento del biodiesel. Se varió la temperatura de 65 a 180 °C. En la figura 1 se muestra un cromatograma característico de los ésteres metílicos formados, en todos los resultados cromatográficos se pudo observar que el pico de mayor intensidad, pico 8, corresponde al ricinoleato de metilo. A partir de los cromatogramas obtenidos a las diferentes temperaturas de reacción se graficó la intensidad del pico 8 en función de la temperatura, figura 2, donde se puede observar que la intensidad del pico se incrementa más rápidamente con el catalizador de ZnCaAl, alcanzando su máximo a 120 °C.



**Figura 1.** Cromatograma correspondiente a la transesterificación del AH con 1.25 % de catalizador (ZnCaAl), relación molar AH:Metanol 1:18 y 120 °C.



**Figura 2.** Intensidad del pico de ricinoleato de metilo en función de la temperatura.

### Discusión

En base al análisis cromatográfico se encontró que los tiempos de retención de los estándares inyectados coincidieron con los picos 1, 3, 4, 5 y 8, los cuales corresponden a palmitato, estearato, oleato, linoleato y ricinoleato de metilo, respectivamente. Lo cual está en buen acuerdo con los resultados reportados por Guerrero *et al.* [3], según estos investigadores los picos 6 y 7 corresponden al linoleniato y araquidiato de metilo, con respecto al pico 2 aun no se ha identificado. Los resultados de la transesterificación del AH, mostraron que el catalizador ZnCaAl es más efectivo alcanzando su máxima conversión a los 120 °C y una relación molar AH:Metanol de 1:18, mientras que para el catalizador ZnBaAl requiere una temperatura y relación molar AH:metanol mayores.

### Conclusiones

Los resultados experimentales demuestran que el AH puede ser empleado para la obtención de biodiesel, mediante un proceso de transesterificación utilizando catalizadores tipo hidrotalcita ZnBaAl y ZnCaAl. El mayor rendimiento en biodiesel con 1.25 % de catalizador se obtuvo bajo las siguientes condiciones de reacción: Para ZnBaAl una relación molar aceite/metanol de 1:50, temperatura de 160 C y para el catalizador ZnCaAl una relación molar aceite/metanol de 1:18, temperatura de 120 C y, usando 1.25 % de catalizador. Podemos concluir que el catalizador ZnCaAl es más efectivo para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a PROMEP por el soporte financiero a través del proyecto Promep/103.5/12/4662 con Clave UNISTMO-CA-11.

### Bibliografía

1. YANG, Z. Q. y XIE, W. L. (2007) Synthesis of porous CaO microsphere and its application in catalyzing Transesterification reaction for biodiesel. *Fuel Process Technology*, 88 (6): 631–638.
2. Shumaker, J. L.(2007) Biodiesel synthesis using calcined layered double hydroxide catalysts. *Cat. Lett.* 115: 56–61.
3. Guerrero F. C. A.; Osorio L. I. D.; Sierra V. F. E.(2010), Evaluación del efecto de la temperatura en la producción de biodiesel con aceite de higuera *Ingeniería e Investigación*, vol. 30, núm. 2, pp. 52-61

Artículo XI

## EVALUACIÓN DEL ACEITE DE PISTACHE AMARGO (*Simauroba glauca*) COMO UNA FUENTE POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Salinas H.P. y Morales A. F

Universidad del Istmo Campus Tehuantepec, Av. Universidad s/n, Barrio Santa Cruz Tagolaba 4<sup>a</sup> sección, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, C. P. 70760. [salinashp@yahoo.com.mx](mailto:salinashp@yahoo.com.mx)

### Abstract

The step forward in the production of biodiesel requires the discovery of new raw materials, low-cost, abundant and locally available, which do not contaminate the environment and above all things that do not compete with the food base. In this study, the oil of bitter pistache (*Simarouba Glauca*) was evaluated as feedstock for biodiesel production, identified their chemical properties as a percentage of free fatty acids, iodine index, index of peroxide, index of saponification. It was determined the influence of the catalyst KOH in the transesterification reaction, found that the optimal percentage of catalyst is 1 % .The results of CG showed that the methyl esters formed in greater proportion are : palmitate and stearate, methyl oleate

### Resumen.

El avance en la producción de biodiesel requiere el hallazgo de nuevas materias primas, de bajo costo, abundante y de disposición local, que no contaminen el medio ambiente y por sobre todas las cosas que no compitan con la base alimenticia. En este estudio el aceite de pistache amargo (*Simarouba Glauca*) se evaluó como materia prima para la producción de biodiesel, se determinaron sus propiedades químicas tales como porcentaje de ácidos grasos libres, índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación. Se determinó la influencia del catalizador KOH en la reacción de transesterificación, encontrándose que el porcentaje óptimo de catalizador es 1%. Los resultados de CG mostraron que los ésteres metílicos formados en mayor proporción son: palmitato, estearato y oleato de metilo.

**Palabras Clave:** Pistache amargo, *Simauroba glauca*, ésteres metílicos, biodiesel, catálisis homogénea

### Introducción

La *Simarouba glauca* se conoce en el Istmo de Tehuantepec como negrito, olivo y pistache amargo, este último, debido a que su semilla es muy similar en forma y color a la de *Pistacia vera*, es un árbol que florece entre los meses de febrero a abril, fructificando desde febrero a mayo. En México de este árbol sólo se utiliza la madera como combustible (leña) y para artesanías, como árbol de sombra para las plantaciones de café. La semilla por su peculiar sabor amargo es un producto no comestible y no se le da ningún uso, sin embargo, es rica en aceite, contiene alrededor

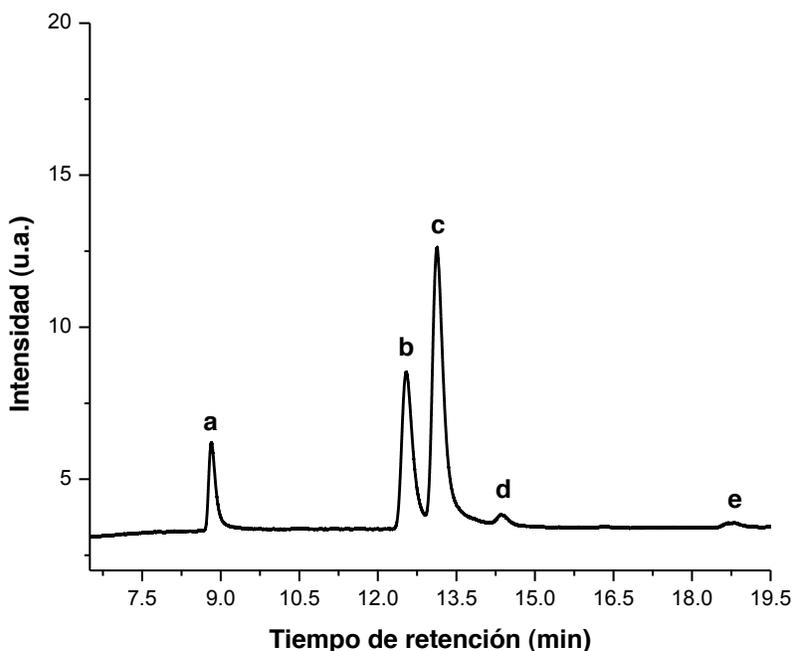
del 68 %, el cual puede ser transformado a biodiesel [1,2, 3]. El objetivo de este trabajo es evaluar el aceite de pistache amargo (APA) como posible fuente renovable para la producción de biodiesel, determinando el contenido de ácidos grasos libres, el porcentaje óptimo de catalizador y los ésteres metílicos formados.

### Material y Métodos

Este trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Biomasa de la Universidad del Istmo. Las semillas de pistache amargo se recolectaron en los propios jardines de la Unistmo, se limpiaron manualmente y el aceite se extrajo mediante el método Soxhlet utilizando hexano como solvente. La caracterización química del aceite se realizó de acuerdo a las normas de la AOSC: índice de saponificación, índice de yodo, ácidos grasos libres, índice de peróxido. La reacción de transesterificación se llevó a cabo a 65 °C, una hora de reacción, relación molar APA:Metanol 1:9, y porcentaje de catalizador (KOH) variable. El análisis cromatográfico del biodiesel se realizó en un cromatógrafo de gases Varian modelo CP-3380, equipado con una columna capilar marca PERKIN ELMER de 30 m de longitud y diámetro interno de 0.32 mm, el gas acarreador fue helio. Se utilizaron los estándares de los siguientes ésteres: palmitato, estearato y oleato de metilo.

### Resultados

La cantidad de aceite extraído de las semillas pistache amargo fue del 68 % en peso, el índice de saponificación fue de 174.9 mg de KOH/g de muestra, ácidos grasos libres 1.5932 % en peso como ácido oleico, el índice de yodo de 44.81 gramos de yodo/100 g de muestra, índice de Peróxido de 0.6 meq de oxígeno activo/kg de aceite. La identificación de la composición del biodiesel se realizó mediante CG, en la figura 1 se muestra el cromatograma de los ésteres metílicos obtenidos, donde se pueden observar tres picos mayoritarios (1, 2, 3), y dos de menor intensidad (4,5). Con base a estos resultados, se identifica el porcentaje de catalizador que permite obtener una mayor producción de biodiesel. El cromatograma donde los picos presentan una mayor intensidad fue el correspondiente a 1% de catalizador, por lo que dicho porcentaje es el óptimo para la reacción.



**Figura 1.** Cromatograma correspondiente al biodiesel de APA. Relación APA:metanol 1:9, temperatura de reacción de 65 °C, 1.0 % de catalizador KOH y tiempo de reacción 1 hora.

### Discusión

Existen propiedades químicas de los aceites vegetales que afectan directamente a la reacción de transesterificación, las cuales se analizan para evaluar la viabilidad del aceite como materia prima en la producción de biodiesel. Dentro de las características más relevantes está el Índice de acidez, debido a que si es mayor de 3% se favorece la saponificación del aceite. En el caso del APA se observa que el porcentaje de ácidos grasos libres es menor de 3, por lo tanto, la transesterificación es viable. En cuanto a la caracterización del biodiesel se encontró que los tiempos de retención de los estándares inyectados coincidieron con los picos 1, 2 y 3, los cuales corresponden a palmitato, estearato y oleato de metilo, respectivamente. Los picos de menor intensidad 4 y 5 aún no se han identificado. Estos resultados están de acuerdo con lo reportado en la literatura, donde se menciona que el aceite de *Simarouba glauca* está constituido principalmente por un 59.1 % de ácido oleico, 22.9 % de ácido esteárico, 11.8 % de ácido palmítico, 3.33 % de linoleico, y ácido araquídico 1.48 % [2]. De acuerdo a la composición del aceite, tentativamente podemos mencionar que el pico 4 se trata del linoleato de metilo y el pico 5 del araquidato de metilo.

### Conclusiones

El APA es un aceite de disposición local que presenta un porcentaje bajo de ácidos grasos libres (1.59%) que permite su transformación a ésteres metílicos con una

relación molar de APA:Metanol de 1:9, 1% de catalizador y una hora de reacción a 65 C, por lo que puede llegar a ser una fuente alternativa para la producción de combustible limpio y renovable.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a PROMEP por el soporte financiero a través del proyecto Promep/103.5/12/4662 con Clave UNISTMO-CA-11.

### **Bibliografía**

1. Aquino S. J., (2012). Evaluación de la transesterificación del aceite de pistache amargo en fase heterogénea, Tesis de Licenciatura, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec.
2. Devan P.K., Mahalakshmi N. V. (2009). A study of the performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine using methyl ester of paradise oil–eucalyptus oil blends. *Applied Energy Vol. 86, 675-680*.
3. Mishra S.R., Mohanty M.K., Das S.P. and Pattanaik A.K. (2012) Production of Biodiesel (Methyl Ester) from *Simarouba glauca* Oil *Research Journal of Chemical Sciences*, Vol. 2(5), 66-71

## Artículo XII

# SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE HIDRÓXIDOS DOBLES LAMINARES (HDL) PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DEL ACEITE DE PISTACHE AMARGO (*Simarouba glauca*)

Morales A.F.<sup>1</sup>, Salinas H.P.<sup>1</sup>, Hernández V.J., Flores R. J.A.<sup>1</sup> y Tzompantzi M. F.J.<sup>2</sup>.

1. Universidad del Istmo Campus Tehuantepec, Av. Universidad s/n, Barrio Santa Cruz Tagolaba 4ª sección, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, C. P. 70760. [fmanzures@yahoo.com.mx](mailto:fmanzures@yahoo.com.mx)
2. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de Química, Av. San Rafael Atlixco #186, Col. Vicentina, C. P. 09340, México, D. F. MEXICO.

### Abstract.

Materials were synthesized hidrotalcitas type (double Hydroxides slice: HDL) by the method of coprecipitation, using nitrates of  $Zn^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  and  $Al^{3+}$  as precursors of the metals and urea as precipitating agent. The solid obtained were washed several times with deionized water at 80 °C and subsequently were dried at 100 °C for 12 hours. Finally, the samples were calcined to 400 °C for 12 hours. The synthesized solids were characterized by X-ray diffraction (XRD). The transesterification of the oil catalytic "pistache bitter" (*Simarouba glauca*) was carried out in a system to reflux at 65 °C with different molar ratios of oil:methanol. There were qualitative studies of the reaction product by gas chromatography (GC), corroborating the conversion of the triglycerides in the oil of pistache bitter to methyl esters with the catalyst type hidrotalcita  $Zn^{2+} + Mg^{2+}/Al^{3+}$ , with a reaction time of 7 h and using a concentration of 1% by weight of the catalyst with regard to the mass of oil of pistache bitter. These results show that the type catalysts hidrotalcita are effective to carry out the reaction of transesterification of the oil "pistache bitter" (*Simarouba glauca*).

### Resumen

Se sintetizaron materiales tipo hidrotalcitas (Hidróxidos dobles laminares: HDL) por el método de coprecipitación, usando nitratos de  $Zn^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Al^{3+}$  como precursores de los metales y urea como agente precipitante. Los sólidos se calcinaron a 400 °C por 12 horas y se caracterizaron por difracción de rayos X (XRD). La transesterificación catalítica del aceite de "pistache amargo" (*Simarouba glauca*) se llevó a cabo en un sistema a reflujo a 65 °C con diferentes relaciones molares de aceite:metanol. El biodiesel obtenido se caracterizó por GC, corroborando la conversión de los triglicéridos presentes en el aceite de pistache amargo a ésteres metílicos con el catalizador  $Zn^{2+}+Mg^{2+}/Al^{3+}$ , con un tiempo de reacción de 7 h y 1% en peso del catalizador. Estos resultados muestran que los catalizadores tipo hidrotalcita son eficaces para llevar a cabo la reacción de transesterificación del aceite de "pistache amargo".

**Palabras Clave:** Pistache amargo, *Simarouba glauca*, hidrotalcitas, biodiesel, catálisis heterogénea

## Introducción

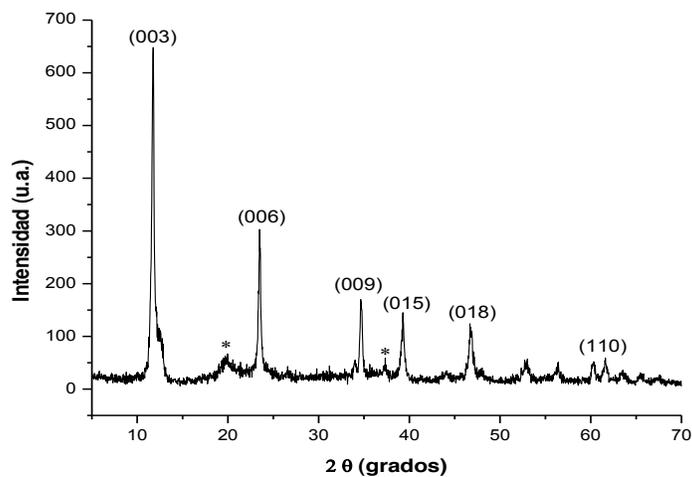
Los energéticos requeridos a nivel mundial provienen principalmente de combustibles fósiles. Estos combustibles no renovables se están agotando debido a la gran demanda energética en el mundo provocada por el crecimiento poblacional humano. Esto, aunado a los problemas ambientales, ha provocado esfuerzos encaminados al uso de combustibles renovables, tales como el biodiesel [1], el cual es un combustible renovable y se puede obtener de la transesterificación homogénea o heterogénea de los triglicéridos presentes en aceites vegetales, utilizando alcoholes de peso molecular bajo [2]. En la región del Istmo de Tehuantepec crece una variedad de la *Simarouba glauca* [3], la cual produce un fruto cuya almendra posee un peculiar sabor amargo que lo vuelve un producto no comestible y que se conoce como “pistache amargo”, su almendra está compuesta por alrededor del 68 % en peso de aceite, el cual se puede aprovechar para la producción de biodiesel. Para la transesterificación heterogénea, recientemente se han estudiado los catalizadores tipo hidrotalcita, debido a las propiedades básicas que estos materiales presentan y principalmente por la facilidad con la cual se puede recuperar el catalizador después de la reacción [4].

## Material y Métodos

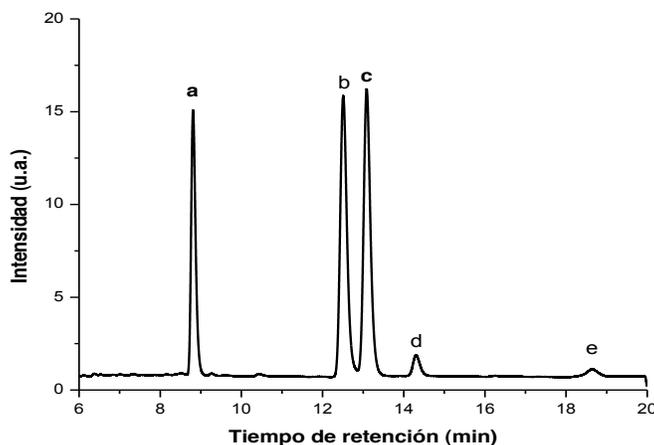
Los catalizadores tipo hidrotalcita se sintetizaron en la universidad del Istmo, empleando el método de hidrólisis de la urea con una relación molar 3:1 de  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ , y los nitratos de Zn, Sr, Mg y Al como precursores de los metales. Las muestras sintetizadas se secaron a 100 °C y se calcinaron a 400 °C. Para corroborar la formación del material tipo hidrotalcita, las muestras secadas a 100 °C se analizaron en el departamento de química, área de catálisis de la UAM-Iztapalapa con un difractómetro de rayos-X SIEMENS D-500. Las pruebas de actividad catalítica en la reacción de transesterificación del aceite de “pistache amargo”, se realizaron en la Universidad del Istmo, empleando un sistema a reflujo a 65 °C, masa de catalizador al 1 % en peso, tiempo de reacción de 5 horas y relación molar de aceite:metanol variable. El biodiesel obtenido se caracterizó por CG, empleando un cromatógrafo de gases marca VARIAN modelo CP-3380, equipado con un detector de ionización de flama (FID) y una columna capilar de 30 m de longitud y diámetro interno de 0.32 mm, la cual permite la separación de los FAME's. Se utilizó He como gas de arrastre.

## Resultados

En la figura 1, se muestra el difractograma obtenido del catalizador ZnMgAl, donde se puede observar que presenta picos intensos que corresponden a los planos característicos de materiales tipo hidrotalcita. A valores de  $2\theta$  de 20° y 37° presenta impurezas que probablemente corresponden a la zincite (\*, ZnO). Resultados similares se obtuvieron en la muestra ZnSrAl (resultados no mostrados). Para la síntesis de biodiesel a partir de aceite de “pistache amargo”, se empleó el catalizador de ZnMgAl, con relaciones molares de aceite:metanol de 1:6, 1:9, 1.12 y 1.15, encontrándose que con la relación de 1:12 la intensidad de los picos de los principales ésteres metílicos (biodiesel) fue máxima (fig. 2).



**Figura 1.** Difractograma obtenido del catalizador ZnMgAl secado a 100 °C.  
\*Cincite (ZnO)



**Figura 2.** Cromatograma del biodiesel obtenido con el catalizador ZnMgAl. Relación molar aceite: metanol: 1:12, % de catalizador: 1, temperatura de reacción: 65 °C y tiempo de reacción de 5 h.

## Discusión

Los catalizadores tipo hidrotalcita se pueden obtener por diferentes métodos de síntesis [4]. El método de hidrólisis de la urea empleado en este trabajo condujo a la formación de catalizadores tipo hidrotalcita, lo cual se corroboró con el difractograma de XRD obtenido (fig. 1), el cual coincide con el banco de datos de la JCPDS, ficha 22-0700 que corresponde a la hidrotalcita  $Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$ , y está en buen acuerdo con los resultados presentados por Aquino [4], para hidrotalcitas de  $Ba^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  preparadas por hidrólisis de la urea. El catalizador de ZnMgAl mostró actividad para la síntesis de biodiesel a partir de aceite de *Simarouba glauca*, encontrándose que con una relación molar de aceite:metanol de 1:12 se obtiene la mayor intensidad en los picos de los ésteres metílicos principales, concluyendo que dicha relación es la óptima para la producción de biodiesel. De acuerdo a la literatura, la composición % p/p del aceite de *Simarouba glauca* es: ácido palmítico: 11.8, ácido esteárico: 22.96, ácido oleico: 59.1, ácido linoleico: 3.33 y ácido araquídico: 1.48 [3]. Los estándares palmitato de metilo, estearato de metilo y oleato de metilo, se inyectaron al CG y sus tiempos de retención coincidieron con los principales picos observados en el cromatograma del producto de síntesis del biodiesel (fig. 2, a: palmitato de metilo, b: estearato de metilo, c: oleato de metilo), los picos d y e, no se han identificado, sin embargo, de acuerdo a la composición del aceite, probablemente se trata del: d: linoleato de metilo y e: araquidato de metilo.

## Conclusiones

Estos resultados muestran que los catalizadores tipo hidrotalcita preparados por hidrólisis de la urea, son eficaces para llevar a cabo la reacción de transesterificación del aceite de “pistache amargo” (*Simarouba Glauca*) con una relación molar de aceite:metanol de 1:12, y por otro lado esta materia prima puede llegar a ser una fuente alternativa para la producción de combustible limpio y renovable.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a PROMEP por el soporte financiero a través del proyecto Promep/103.5/12/4662 con Clave UNISTMO-CA-11.

## Bibliografía

1. Umer R. and Farooq A., (2008). Production of Biodiesel through Base-Catalyzed Transesterification of Safflower Oil Using an Optimized Protocol, *Energy & Fuels*, Vol. 22 (2), pp. 1306-1312.
2. Meher L.C., Vidya D. S., Naik S.N., (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification- a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10 (3), pp. 248-268.
3. Devan P.K., Mahalakshmi N. V. (2009). A study of the performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine using methyl ester of paradise oil–eucalyptus oil blends. *Applied Energy* Vol. 86, 675-680
4. Aquino S. J., (2012). Evaluación de la transesterificación del aceite de pistache amargo en fase heterogénea, Tesis de Licenciatura, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec.

## Artículo XIII

# POTENCIAL AMBIENTAL DE CONSORCIOS FOTOSINTÉTICOS DULCEACUÍCOLAS ACUMULADORES DE ÁCIDOS GRASOS

Vargas Zúñiga, M.M., Almanza Estrada M.V., González Castañeda J.<sup>1</sup>, Valdez Vázquez I. y Ruíz Aguilar G.M.L.

<sup>1</sup>[División Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Km. 9. Carr. Irapuato-León. Ex Hacienda El Copal s/n, C.P. 36500, Irapuato, Gto., México. Tel: 01(462)6241889, Fax.: (462) 62 4 24 84, jaquegc1@hotmail.com

### Resumen

Las microalgas y bacterias fotosintéticas son una fuente alternativa para la producción de ácidos grasos y su uso potencial en biocombustibles. Actualmente, el Laboratorio de Biotecnología Ambiental, cuenta con diez consorcios de microorganismos fotosintéticos acumuladores de ácidos grasos, aislados de cuerpos de agua dulce del Estado de Guanajuato. De acuerdo a las características fisicoquímicas de donde fueron aislados, se modificaron algunos parámetros fisicoquímicos como intensidad lumínica. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del pH y la aireación, en el crecimiento y acumulación de ácidos grasos, en consorcios fotosintéticos dulceacuícolas. Se establecieron tres pH's para el crecimiento de los consorcios dulceacuícolas, similares a los lugares de donde fueron aislados, 7.0, 8.0 y 8.63, con y sin aireación, con fotoperiodos de 12 horas luz e intensidad lumínica de 2000 Lux, en Medio de Dubos modificado. La absorbancia del crecimiento se leyó a 600 nm cada 48 horas durante diez días y se cuantificó el por ciento de ácidos grasos acumulados. RLD4 presentó la mayor absorbancia a pH 8.0 (2.417), RLD11, a pH de 8.63 (2.135) y RLD11 a pH 7.0 (1.950). Lo que indica que el consorcio con mayor adaptación es el RLD11, al crecer a pH's entre 7.0 y 8.63. La aireación favoreció el crecimiento de RLD11 (2.135 de absorbancia, con aireación y 0.150 sin aireación). RLD4, RLD11 y LA9, presentaron la mayor acumulación de ácidos grasos (30.3, 32.1 y 32.4%, respectivamente), los cuales corresponden a los géneros *Chlorella*, *Cosmarium* sp y *Tetrastrum* sp.

### Abstract

Algae and photosynthetic bacteria are an alternative source for the production of fatty acids and their potential use in biofuels. Currently, the laboratory of environmental biotechnology, has ten consortia of accumulators photosynthetic microorganisms of fatty acids, isolated from freshwater in the State of Guanajuato. According to the physico-chemical characteristics of where were isolated, modified some physicochemical parameters such as light intensity. This research aimed to evaluate the effect of pH and aeration, on growth and accumulation of fatty acids in photosynthetic consortia freshwater. Three pH's were established for the growth of consortia freshwater, similar to the places where it was isolated, 7.0, 8.0 and 8.63, with and without aeration, with photoperiod of 12 hours light and light intensity of 2000 lux,

in modified Dubos medium. The absorbance of the growth was read at 600 nm every 48 hours for ten days and was quantified the percent of accumulated fatty acids. RLD4 presented higher absorbance at pH 8.0 (2.417), RLD11, pH of 8.63 (2.135) and RLD11 at pH 7.0 (1.950). Indicating that the consortium with better adaptation is the RLD11, growing up to pH's between 7.0 and 8.63. Aeration favoured the growth of RLD11 (2.135 of absorbance with aeration and 0.150 without aeration). RLD4, RLD11 and LA9, presented the greatest accumulation of fatty acids (30.3, 32.1 and 32.4%, respectively), which correspond to the genus *Chlorella*, *Cosmarium* sp and *Tetrastrum* sp.

**Palabras Clave:** *microorganismos fotosintéticos, dulceacuícolas, ácidos grasos*

## Introducción

Actualmente existe un interés creciente en el cultivo de microalgas para la producción de biodiesel, ya que siendo microorganismos fotosintéticos acumuladores de ácidos grasos, sólo requieren energía solar, agua, bióxido de carbono y algunas sales para producir altos rendimientos de biomasa rica en lípidos [1, 2]. Estudios realizados reportan que las microalgas pueden contener hasta un 53% de lípidos ricos en ácidos en grasos insaturados. [3, 4]. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del pH y la aireación, en el crecimiento y acumulación de ácidos grasos, en microorganismos fotosintéticos dulceacuícolas, considerando que la modificación de pH y la aireación favorecen su crecimiento y acumulación de ácidos grasos. Se utilizaron diez consorcios fotosintéticos aislados de cuerpos de agua dulce del Estado de Guanajuato, los experimentos se realizaron a nivel laboratorio.

## Material y Métodos

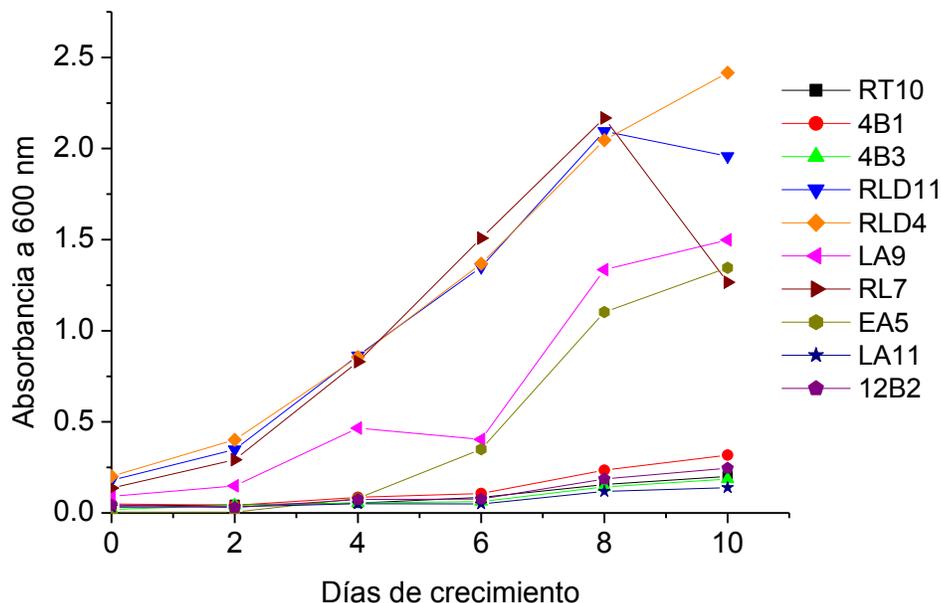
El trabajo experimental se realizó en el Laboratorio de Biotecnología Ambiental, de la División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato, durante el año 2013. Se utilizaron diez consorcios de microorganismos fotosintéticos dulceacuícolas nativos del Estado de Guanajuato. Inoculados en medio de Dubos modificado, a pH de 7.0, 8.0 y 8.63, con fotoperiodos de 12 h, a 2000 Lux, con y sin aireación, durante diez días, a 25°C. La cinética de crecimiento se realizó midiendo la absorbancia a 600 nm Los ácidos grasos fueron cuantificados por cromatografía de gases acoplado a espectrofotometría de masas después de diez días de incubación [4]. La identificación microscópica se realizó mediante la tinción del Rojo Oleoso.

## Resultados

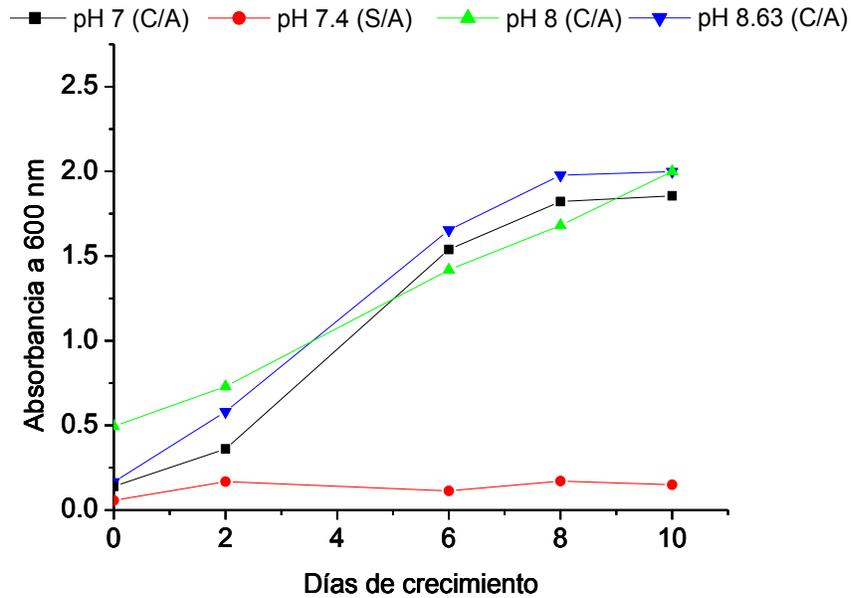
El consorcio RLD4 presentó la mayor absorbancia a pH 8.0 (2.417), RLD11, a pH de 8.63 (2.135) y RLD11 a pH 7.0 (1.950). Lo que indica que el consorcio con mayor adaptación es el RLD11, al crecer a pH's entre 7.0 y 8.63. La aireación favoreció el crecimiento de RLD11 (2.135 con aireación y 0.150 sin aireación). RLD4, RLD11 y LA9, presentaron la mayor acumulación de ácidos grasos (30.3, 32.1 y 32.4%, respectivamente), los cuales corresponden a los géneros *Chlorella*, *Cosmarium* sp y *Tetrastrum* sp.

### Discusión

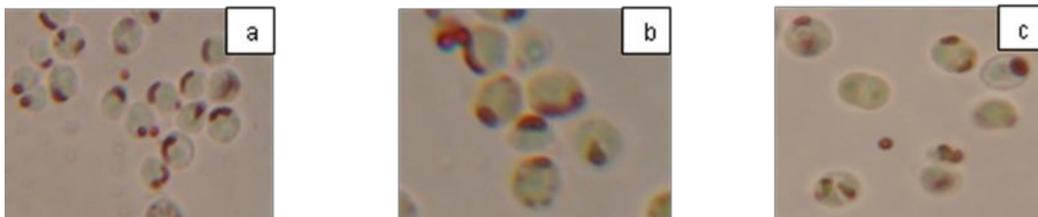
En la figura 1, se muestra las cinéticas de los diez consorcios a pH 8.0, observándose que la presencia de oxígeno modifica su metabolismo, alcanzando las mayores absorbancias RDL4, RLD11, RL7 y LA9 (1.931, 1.950, 1 RDL4, RLD11, LA9, EA5 y RL7 (2.410, 1.960, 1.500, 1.350 y 1.266, respectivamente), en contraste con LA11, 4B3, RT10, 12B2 y 4B1, cuyos valores fueron entre 0.140 y 0.31. En la figura 2, se observa el comportamiento de RLD11 por efecto del pH y la aireación, a pH 8.0 a los ocho días de incubación se muestra la mayor absorbancia (2.095) y posteriormente disminuye (1.958). Por el contrario en los pH's 7.0 y 8.63, a los diez días se observa todavía la fase exponencial (1.950 y 2.135, respectivamente). A pH 7.4 sin aireación, la máxima absorbancia se obtuvo a los ocho días de incubación (0.171). La figura 3, muestra el contenido de lípidos de los consorcios RLD11, RLD4 y LA9. En la tabla 1, LA9 y RLD11, mostraron las mayores concentraciones de ácidos grasos (32.4 y 32.1%, respectivamente), siendo los más abundantes los ácidos palmítico (C16:0) y linolénico (C18:3). Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que el pH y la aireación modifican el metabolismo de los consorcios, como pudo observarse en la cinética de crecimiento y acumulación de ácidos grasos, resultados similares han sido reportados por otros investigadores [1, 2 y 4].



**Figura 1.** Cinética de crecimientos de los consorcios fotosintéticos acumuladores de ácidos grasos expuestos a pH 8.0 con aireación y a 2000 Lux.



**Figura 2.** Cinética de crecimiento de RLD11 expuesto a 2000 Lux y pH's 7.4 sin aireación (S/A), 7.0, 8.0 y 8.3 con aireación (C/A).



**Figura 3.** Observación microscópica a 100X, de consorcios fotosintéticos acumuladores de lípidos a 2000 Lux y a diferentes pH's con aireación: a) RLD4 a pH 8.0, b) RLD11 y c) RL7 a pH 8.63

**Tabla 1.** Ácidos grasos acumulados en los consorcios fotosintéticos dulceacuícolas expuestos a intensidad lumínica de 2000 Lux con aireación, durante diez días\*.

Consortorio	Ácido Palmítico C16:0 (%)	Ácido Palmitoleico C16:1 (%)	Ácido Esteárico C18:0 (%)	Ácido Oleico C18:1 (%)	Ácido Linoleico C18:2 (%)	Ácido Linolénico C18:3 (%)	Ácidos Grasos Totales (%)
4B3	4.7	14.9	4.5	3.0	2.0	ND**	29.1
12B2	4.9	15.5	3.8	2.8	1.7	ND**	28.8
LA9	10.9	1.5	2.0	5.2	2.3	10.5	32.4
RLD4	8.0	3	1.5	1.5	3.5	12.8	30.3
RLD11	8.8	2.7	2.4	2.0	3.8	12.4	32.1

\*Promedio de duplicados

\*\*ND. No detectado

## Conclusiones

Los consorcios que presentaron la mayor absorbancia y acumulación de ácidos grasos fueron RLD4, RLD11 y LA9. La identificación microscópica de las microalgas con la mayor acumulación de lípidos corresponden a los géneros *Chlorella*, *Cosmarium sp* y *Tetrastrum sp*.

## Bibliografía

1. Xin M., Jianming Y., Xin X., Qingjuan N., Mo X. (2009). Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renewable Energy*. 33 (1):1-5.
2. Boffill-Rodríguez Y., García-Rodríguez A., Castellanos-Estupiñán J. (2012). Estimación cuantitativa preliminar de índices de producción de biomasa microalgal a partir de la reacción de fotosíntesis. *Tecnología Química*. 32 (1): 26-33.
3. Handler, R.M, Canter, C.E., Kalnes, T.N., Lupton, F.S., Kholiqov, O., Shonnard D.R. y Blowers, P. (2012). Evaluation of environmental impacts from microalgae cultivation in open-air raceway ponds: Analysis of the prior literature and investigation of wide variance in predicted impacts. *Algal Research*. 1:83–92
4. Yen, H.W., Hu, I.C., Chen, C.Y., Lee, D.J., Chang, J.S. (2013). Microalgae-based biorefinery –From biofuels to natural products. *Bioresource Technology* 135:166–174.

## Artículo XIV

# ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON LAS AGUAS RESIDUALES DE NIXTAMALIZACIÓN GENERADAS EN LA ZONA METROPOLITANA DE MÉRIDA

Ortiz Rodríguez N.M.<sup>1</sup> y De los Ríos Ibarra E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Energías Renovables, Sistemas Energéticos. Calle Privada Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, C.P. 62580. México. nmorr@ier.unam.mx

<sup>2</sup>Consultor Independiente

### Resumen

Mediante un censo y una encuesta por muestreo se cuantificó la producción de agua residual de nixtamal (denominada nejayote) generada en la zona metropolitana (ZM) de Mérida. En los cinco municipios que integran la ZM se estimó que se generan aproximadamente 226.5 m<sup>3</sup> al día, y que esta generación se concentra en ciertos sectores geográficos, para reducir los costos de transporte, se sugiere instalar no uno sino varios sitios de tratamiento y disposición final. La cantidad de metano producido con el caudal diario de nejayote generado en la ZM de Mérida es de aproximadamente 1600 m<sup>3</sup> Normales (considerando una remoción de 75% de la DQO). Estos datos relevantes constituyen información para incorporar en un análisis integral para la revalorización de los residuos, que contenga aspectos como el tipo de tecnología a utilizar, la capacidad financiera, la implementación de políticas energéticas y de un marco institucional para el manejo conjunto del residuo generado por los municipios de la ZM.

### Abstract

A census and sampling survey were done to estimate the daily volume of waste water produced by the nixtamal industry in the 5 municipalities of the Merida Yucatan Metropolitan Area. The estimated production is 226.5 cub meters a day, which when treated anaerobically could produce 1600 N cub meters of methane assuming a 75% reduction of COD. As the generation of this waste water is localized in certain districts, we suggest the construction of several waste water treatment plants, this strategy would allow the reduction of hauling costs and will discourage the illegal dumping of waste water. These data is the basis for an integral waste reduction analysis, which includes technology options, financial and institutional capacity in the context of an energy policy and considering the local institutional framework.

*Palabras Clave: Biogás, Nixtamal, Agua residual*

## Introducción

El maíz es un cereal que representa cerca de la mitad del volumen total de alimentos que se consumen cada año en México y es la materia prima de base para la tortilla, principal alimento de los mexicanos. La masa para las tortillas se elabora con nixtamal; maíz preparado por un proceso de origen prehispánico, que aún se practica de manera cotidiana en todo el país. La nixtamalización consiste en cocer el grano de maíz en medio alcalino (agua con hidróxido de calcio), después se enjuaga con agua limpia. La mezcla del agua de cocción y de lavado son un residuo del proceso que se llama: “Nejayote”, vocablo de origen nahuatl, que literalmente se traduce como agua de ceniza (nextli, ceniza, y ayotl, agua).

La mayoría de las industrias alimentarias, generan aguas de desecho consideradas contaminantes, aguas que normalmente contienen materia orgánica biodegradable, la que puede ser manejada por procesos biológicos y dispuestas de manera adecuada. Estos residuos pueden constituir una fuente de generación de energía renovable ya que si son tratados en forma anaeróbica, su descomposición produce biogás cuyo compuesto principal es el metano con potencial energético.

El nejayote es considerado un desecho altamente contaminante debido a su carga orgánica. Se han reportado [1] demandas químicas de oxígeno (DQO) del orden de 20,000 a 30,000 mg O<sub>2</sub>/L. Durán [2] reporta que la cantidad de CH<sub>4</sub> del biogás obtenido del tratamiento anaerobio del nejayote es 9.6-16.8 m<sup>3</sup> por tonelada de maíz nixtamalizado (considerando 5 m<sup>3</sup> de nejayote que se produce por una tonelada de maíz nixtamalizado, con una conversión de 80% de materia disuelta biodegradable en biogás).

En la Zona Metropolitana (ZM) de Mérida Yucatán, que comprende los municipios de Mérida, Kanasín, Umán, Conkal y Ucú, las aguas residuales generadas por la industria de la masa y la tortilla en la mayoría de los casos, se almacenan y periódicamente se bombean a una pipa para su posterior disposición final.

La ciudad de Mérida es el único municipio de la ZM que cuenta con un sistema para la disposición y tratamiento de las aguas residuales de nixtamal, del producto de vaciado de tanques sépticos, sanitarios portátiles y otros residuos semejantes. El manejo en forma conjunta de estas aguas residuales, crea un volumen importante de agua residual, que por su contenido de materia fecal, implica riesgos a la salud pública. Mientras que es posible tratar de forma independiente las aguas residuales de nixtamal, producir biogás y un efluente que puede ser dispuesto sin riesgos en el riego de áreas verdes.

El objetivo de este trabajo es estimar el potencial de producción de metano mediante la biodigestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de nixtamalización generadas en la ZM de Mérida, con la finalidad de ofrecer datos relevantes que

contribuyan a evaluar la factibilidad del uso de biogás como recurso energético en ZM de Mérida, como propuesta de un sistema alternativo para el manejo correcto de las aguas residuales del nixtamal.

### Metodología

La producción de metano proveniente del tratamiento de aguas residuales de la nixtamalización está en función del caudal generado ( $Q$ ), la carga orgánica ( $DQO$ ), un factor de remoción de la  $DQO$  ( $F_R$ ) y la capacidad máxima de la producción de metano ( $B_0$ ).

$$\text{Producción de } CH_4 = Q(DQO \times F_R)B_0 = \frac{m^3 \text{ de } CH_4}{\text{día}}$$

Debido a las limitaciones del tiempo, presupuesto, pero sobre todo a la dificultad de obtener la información, se utilizó una encuesta por muestreo para estimar el volumen total de agua residual de nixtamal generado diariamente en la ZM en los establecimientos productores de nixtamal.

Se construyó un marco de muestreo para cada uno de los municipios de la ZM, en su mayoría con datos del Censos Económicos 2009 del INEGI. Sin embargo no fue posible la construcción de un marco de muestreo que integre solamente a los establecimientos productores de nixtamal. Los marcos contenían a establecimientos clasificados con “actividad económica de elaboración de tortillas de maíz y molienda de nixtamal”. Dado a las características tan diferentes de los municipios que conforman la ZM, se consideró a cada uno de ellos como una población independiente para poder estimar con mayor precisión. Para los municipios de Conkal y Ucú que cuentan con menos de 10 establecimientos se sustituyó el estudio de encuesta por muestreo por un censo poblacional. Mientras que en los otros casos se implementó un estudio de encuesta por muestreo, para cada uno de los municipios.

El diseño de muestreo elegido para Kanasín y Umán fue el muestreo aleatorio simple, dado al tamaño poblacional. Mientras que para Mérida fue un muestreo aleatorio estratificado geográfico, para obtener el parámetro específico para ciertos sectores del municipio. La estratificación geográfica se realizó en cuatro estratos: nor-oriental (estrato I), nor-poniente (estrato II), sur-poniente (estrato III) y sur-oriental (estrato IV). Para cuantificar el volumen de aguas generadas durante la nixtamalización, de los establecimientos muestra, se usó la relación empírica de que por cada kilogramo de maíz procesado se generan seis litros de nejayote. Esto debido al tiempo, costo y lo impráctico que resulta la medición directa de la generación de las aguas en cada uno de los establecimientos muestra. Entonces para estimar la cantidad de maíz procesado en Kanasín y en Umán se utilizó un estimador de total sub poblacional para muestreo aleatorio simple. En el caso de Mérida se utilizó un estimador de un total sub poblacional con muestreo estratificado [3]. En todos los casos se utilizaron totales sub poblacionales en donde no se conoce el tamaño de la sub población, ya que los marcos de muestreo contienen establecimientos productores y no productores de

nixtamal de los cuales no se tiene el tamaño sub poblacional. Se utilizó un límite para el error de estimación con 95% de confianza.

Se determinó el tamaño de muestra para cada uno de los dos estimadores. Para el estimador con muestreo estratificado se utilizó asignación de Neyman [3]. El tamaño de muestra de los estimadores queda expresado en términos de la varianza y del límite de error de estimación. Los valores propuestos para determinar el tamaño de muestra se resumen en la Tabla 3, estos se determinaron de un estudio piloto.

**Tabla 3** Datos para determinar el tamaño de muestra.

Datos		Mérida						Total
		Kanasín	Umán	Estrato I	Estrato II	Estrato III	Estrato VI	
Límite de error de estimación (B).	Total poblacional (kg/día).	1100	700	850	450	1100	1200	3600
Valores para el cálculo de la varianza.	Desviación estándar (kg/día).	45	45	45	45	45	45	----

Se utilizó como método de medición la entrevista personal mediante un cuestionario a los encargados de los establecimientos. El cuestionario se estructuró para obtener información referente a las materias primas y a la cuantificación de las mismas para la producción de nixtamal.

Para determinar la carga orgánica expresada en DQO se utilizó el método de análisis para la determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas de acuerdo a la NMX-AA-030-SCFI-2001. Para determinar un factor apropiado de la remoción de la DQO, se eligió experimentar en un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA). Se optó por construir un reactor a partir de tubo de PVC hidráulico, de 20 pulgadas (500 mm) de diámetro y tres metros de largo, colocado en posición vertical, la parte superior de reactor se construyó de una pieza de madera contrachapada cubierta con fibra de vidrio impregnada de resina epoxi, con su respectiva salida de gas. La parte inferior se realizó con un colado de concreto en forma de cono y con una salida para los lodos. Se hicieron cinco mirillas en las que se colocó un vidrio para observar el movimiento de los líquidos y sólidos al interior del reactor a diferentes niveles. Se instalaron cinco tomas de muestreo a lo largo del reactor para facilitar la obtención de muestras para el seguimiento. La entrada del agua residual se realizó en la parte inferior y la salida por la parte superior a un determinado nivel. El volumen total del reactor fue de 589 litros, pero el líquido solo ocupaba el 90% del volumen total. Como inóculo se empleó lodo extraído del foso de absorción del molino en donde se observó la producción espontánea de biogás. Una vez que se estabilizó el pH de a un valor neutral de siete y que se completó el nivel líquido del reactor y la producción de biogás se detuvo. Se procedió al arranque del reactor de manera semi-continua. Las muestras de agua residual se tomaron de los lotes utilizados para alimentar al reactor, los lotes de agua residual fueron proporcionados por un establecimiento que procesa dos toneladas del maíz al día. Se

tomaron algunas muestras del biogás generado durante la operación del RAFA para determinar la concentración de metano producido, por medio de un analizador de gases.

Grady y colaboradores [4], reportan que un kilogramo de metano es equivalente a cuatro kilogramos de DQO disminuido, lo cual equivale a que (en condiciones estándar de presión y temperatura) se generarán  $0.35 \text{ m}^3$  de metano por cada kilogramo de DQO convertido. Este es un buen parámetro para utilizar como la capacidad máxima de producción de metano.

### Resultado

A continuación se presentan los resultados obtenidos del censo y de la encuesta por muestreo. En el municipio de Ucú, el censo arrojó que se procesan 300 kg de maíz al día, por lo que se estima que el volumen generado es de  $1.8 \text{ m}^3$  al día. En Conkal, el total de maíz procesado es de 190 kg al día, por lo tanto se tiene un estimado de  $1.15 \text{ m}^3$  de agua residual procedente de la nixtamalización. En la Tabla 4 se pueden observar el número total de establecimientos que integraron los marcos de muestreo de cada uno de los municipios donde se realizó encuesta; también se presentan los resultados de los tamaños de muestra, obtenidos para cada uno de los municipios. Se consideró aproximadamente un 50% más como margen de seguridad para obtener el tamaño de muestra final, ver Tabla 4.

**Tabla 4.** Tamaño de muestra para los parámetros de interés

Tamaño	Kanasín	Umán	Mérida				Total	Global
			Estrato I	Estrato II	Estrato III	Estrato IV		
Población	64	31	130	72	163	172	537	632
Muestra para estimar el total poblacional	19	11	33	18	41	43	135	165
Muestra final con el 50%	29	16	49	27	61	65	202	247

En la Tabla 5 se presentan los resultados de las estimaciones con sus respectivos límites de estimación. Los límites de estimación para el total poblacional son muy grandes respecto al estimador. Esto se debe sobre todo a la gran variabilidad de los datos, que es evidente al observar la desviación estándar de los mismos. El caudal estimado para los tres municipios es de  $226.5 \text{ m}^3/\text{día}$ .

Del análisis de las muestras tomada al agua residual, se obtuvo una DQO promedio de  $26,900 \text{ mg O}_2/\text{L}$ , con un rango de  $19,600\text{-}35,200 \text{ mg O}_2/\text{L}$ . De los experimentos realizados con el RAFA se obtuvo que factor de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno fue del 75%, con un tiempo de retención de seis días. La concentración de metano en el biogás fue de 58%.

Con estos datos es posible estimar la producción de metano (condiciones normales de temperatura y presión) a partir de las aguas residuales de la nixtamalización generadas en la zona metropolitana de Mérida.

$$\text{Producción de } CH_4 = 226.5 (26.9 \times 0.75) 0.35 = 1599.37 \frac{m^3 \text{ de } CH_4}{\text{día}}$$

Lo que equivale a una producción aproximada de biogás de 2460 m<sup>3</sup>/día.

Tabla 5. Estimación del caudal de las aguas de la nixtamalización

Estimación	Kanasín	Umán	Mérida				Total
			Estrato I	Estrato II	Estrato III	Estrato IV	
Cantidad total de maíz procesado (kg/día)	1280	1416	9730	2100	9882	13330	35042
Desviación estándar de las observaciones (kg maíz/día)	38	96	175	76	241	167	----
Límite para el error de estimación del total	841	1108	----	----	----	----	12656
Aguas residuales de la nixtamalización (m <sup>3</sup> /día).	7.7	8.5	58.4	12.6	59.3	80	210.3

### Discusión

Con base en el trabajo desarrollado se puede afirmar que el nejayote más que un residuo contaminante y difícil de tratar, es un recurso aprovechable para producir biogás. Y hace posible combinar el uso alimenticio del maíz con la producción de energía limpia. De acuerdo a estudios prospectivos para tratar los 226.5 m<sup>3</sup> al día de nejayote, sería necesario construir tres unidades de tratamiento con una capacidad para tratar 100 m<sup>3</sup> al día de agua residual cada una. Localizadas de forma estratégica, permitirá reducir el tiempo y distancia de transporte, con la consecuente reducción de costos y asegura que la mayoría del residuo sea tratado de manera adecuada. La producción estimada de biogás en cada unidad es de 1217 m<sup>3</sup> Normales al día y el contenido de metano en el biogás se estima será de 58 %.

### Conclusión

Se estima que en los cinco municipios de la ZM de Mérida se generan diariamente en total 226.5 m<sup>3</sup> de nejayote, por los establecimientos productores de nixtamal. Para tratar este caudal sería conveniente instalar al menos tres centros de acopio y tratamiento para el agua residual de nixtamal, utilizando para ello terrenos al interior de la ciudad Mérida o en su periferia inmediata. La cantidad de metano producido con el caudal diario de nejayote generado en la ZM de Mérida es de aproximadamente 1600 m<sup>3</sup> Normales (considerando una remoción de 75% de la DQO).

La distribución de la producción de nixtamal en la ZM de Mérida se concentra en algunos sectores, en consecuencia se genera mayor cantidad de aguas residuales de nixtamalización en la zona sur-oriente y sus alrededores. Mientras, que el único sitio de disposición final para este residuo, funcionando, se encuentra en el sector nor-poniente. La distancia que separa los sitios donde se genera y el sitio de tratamiento, ocasiona que una proporción de este residuo no sea tratado adecuadamente. Es por ello, que para implementar un sistema de manejo y disposición a nivel de la ZM de Mérida para este residuo son necesarios varios sitios de tratamiento y disposición final. Con varios sitios se limita la distancia de transporte y se aumenta su eficiencia. También es imprescindible crear una estructura administrativa capaz de coordinar esta actividad en los cinco municipios. Los resultados obtenidos en el presente estudio constituyen un paso en la identificación de fuentes potenciales de energía a partir del adecuado tratamiento de las aguas residuales agroindustriales con alto contenido en materia orgánica.

### **Agradecimientos**

Proyecto 2009-7-129692, Fondos Mixtos CONACYT-Gobierno del Estado de Yucatán

### **Bibliografía**

1. Pedroza-Islas R. y Duran, B. (1990). Aerobic treatment of maize-processing wastewater in a 50-liter rotating biological reactor. *Biological Wastes*, 32, 17-27.
2. Durán Bazúa, C. (1987). *Reaprovechamiento de efluentes de la industria del maíz / Recycling of corn processing wastes*, Informe final de proyecto / Final Project Report UNEP-Kenya FP/2104-82-01 (2280), BMFT-FRG: 02WA 146, CONACYT-México PCCBBNA-020395, Convenio UNAM-CONASUPO, ISBN 968-36-1644-5, Imp. Azteca SA de CV, México D.F.
3. Cochran, W. G. (1976). *Técnicas de Muestreo* (Sexta ed.). Editorial Continental, S. A. México.
4. Grady C.P., Daigger G.T., Lim H.C. (1999) *Biological wastewater treatment*, New York, Marcel Dekker.

## Artículo XV

# ESTUDIO DE CO- DIGESTIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA GENERACIÓN Y USO DE BIOGÁS

Plascencia C.E.<sup>1</sup> y González L.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica. Parque Tecnológico Querétaro s/n Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro, México. C.P.76703, [cplascencia@cideteq.mx](mailto:cplascencia@cideteq.mx)

### Abstract

An anaerobic co- digestion system was studied. Agro-wastes (AW) were selected raw materials were collected including: Swine Manure (SM), DairyManure (DM), Fruit and Vegetable Waste (FVW), Corn straw (CS), Milk Whey (MW), and Sewage Sludge (SS). After shredding to reduce size and homogenizing, the raw materials were stored at 4°C. Total Solids (TS), Total Volatile Solids (TVS), Ammonium (NH<sub>3</sub>), y DQO and pH were determined [1]. The test mixture ratios were (DM:1/ AW:1) and (DM:2 /AW:1). 1 L Laboratory-scale batch reactors (LBR) were used. Samples were incubated for 30 days at (35 ± 5) °C at pH 6.5-8. The LBR were manually mixed daily for 3–4 min. Biogas production was measured using a liquid displacement system. The criteria for judging the success of the co-digestion were: process stability, and biogas production rate. Getting the best results with mixtures 2 (DM:1/CS:0.5/SS:1), 4 (DM:1/CS:0.5/SS:1), 6 (DM: 2/MW: 1/SS: 1), y 7 (DM: 2/FVW: 1/SS: 1) with biogas yields of 75, 97, 67 y 38 L/ Kg TVS respectively.

**Palabras Clave:** *Co-digestión Anaerobia, biogás, residuos orgánicos agroindustriales*

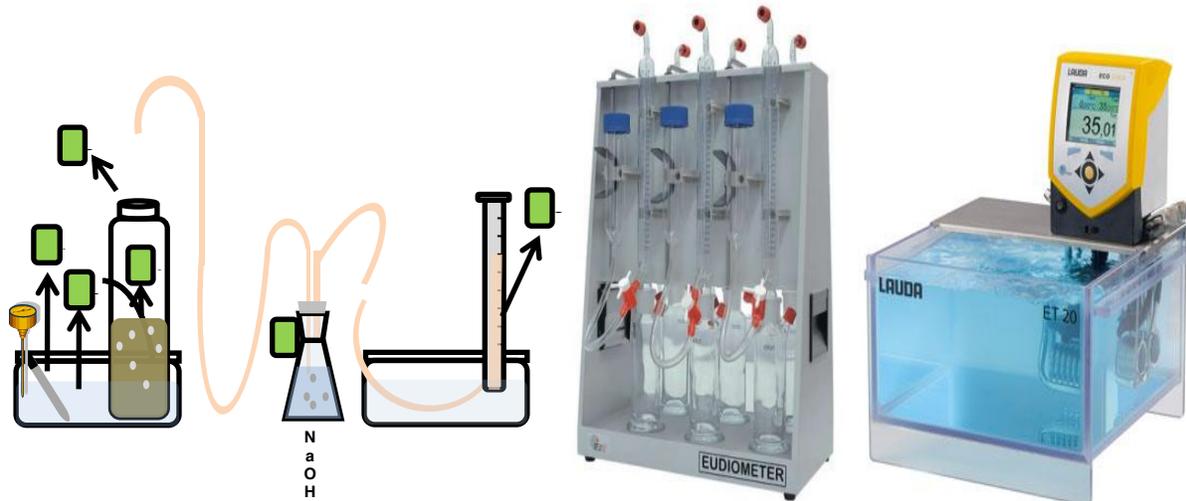
### Introducción

Altos costos de producción de los combustibles fósiles a derivado en su alza de precio, los problemas ambientales asociados y la necesidad creciente del sector industrial de una producción limpia y amigable con el ambiente, ha contribuido a la implementación de tecnologías nuevas para la obtención de combustibles renovables que originan importantes beneficios económicos, ambientales y energéticos. La biomasa es considerada como una valiosa energía alternativa a los combustibles fósiles, porque puede ser convertida en gran variedad de formas de energía. La biomasa como los residuos agroindustriales contienen gran cantidad de material biodegradable y pueden causar importantes daños ambientales si no se disponen adecuadamente (efecto invernadero, infiltración y escurrimiento de los lixiviados a los recursos de agua) [2]. Entre los métodos tecnológicos existentes para convertir residuos agroindustriales en bioenergía, la conversión biológica (digestión anaerobia) provee una efectiva solución no solo para producción de energía (biogás), sino también como recurso para recuperar y tratar desperdicios, pues reduce significativamente los costos de la disposición, e incluso se obtienen sub-productos con valor agregado (bioabono) [3]. De tal manera que la co-digestión anaerobia provee una solución a las problemáticas planteadas, generación de energía limpia de bajo costo y aprovechamiento de residuos. Por lo que en este proyecto se busca estudiar y proponer un sistema de co-

digestión anaerobia, aprovechando residuos orgánicos agroindustriales para la generación de biogás y su uso directo como combustible.

### Material y Métodos

Los residuos agroindustriales (RA) empleados para este estudio son residuos de frutas y vegetales (FV), pajas y rastrojos (PJ) y suero de leche (SL), los cuales se co-digirieron con excretas de vaca (EV). Como inóculo o fuente de microorganismos, se utilizaron lodos anaerobios (LA), obtenidos de una laguna anaerobia de un proceso de tratamiento de agua residual de la industria avícola, se conservaron a temperatura ambiente hasta el día de su uso. Las excretas de vaca (EV) y pajas y rastrojos (PJ) se colectaron en una granja local, residuos de frutas y vegetales (FV) en mercados locales. Todos los RA se trituraron, homogenizaron y fueron almacenados a 4 C hasta su uso. Se probaron varios porcentajes de mezclas, en relación 1: Excreta / 1: RA, y 2: Excreta / 1: RA, con y sin inóculo (LA). Se caracterizaron al inicio y al final de la digestión en parámetros de sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (SV), carga química orgánica (DQO). Las mezclas se evaluaron en condiciones mesofílicas (30+/- 5 C), durante 30 días y el pH fue ajustado a la neutralidad (pH 7) con carbonato de sodio. En la figura 1 se muestran los equipos experimentales para este estudio, los cuales trabajan con el mismo principio de desplazamiento de agua, ambos cuentan con digestor en donde se coloca la mezcla a probar, al producirse el biogás es burbujeadado en una solución afín al CO<sub>2</sub> (NaOH o Solución NaCl con ácido cítrico).



**Figura 1.** Equipos usados para la medición de producción de biogás.

## Resultados

Se llevó a cabo la digestión de las mezclas por 30 días, y se registró diariamente su generación de biogás y los resultados de la co-digestión de excretas de vaca con residuos agroindustriales se compilan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resumen de los resultados obtenidos.

Mezcla	C/N*	pH <sub>final</sub>	ST (%)	SV (%) <sub>reducción</sub>	DQO (%) <sub>reducción</sub>	Biogás (Lts/KgVS)
Blanco EV:1/H2O:1	25	7	7	63	94	30
A EV:1/ S:1	18	5.9	9	29	31	13
B EV:1/ PJ:0.5	27	8	14	22	91	52
C EV:1/ FV:1	30	5.3	8	20	87	24
D EV:1/ S:1/ PJ:0.5	24	8	13	2	93	2
E EV:2/ S:1/LA:0.5	16	6.6	11	66	90	5
F EV:2/ S:1	20	6.5	9	22	91	29
G EV:2/ PJ:0.5	27	7.7	14	24	89	10
H EV:2/ FV:1	28	6.2	10	19	99	29
I EV:2/ S:1/ PJ:0.5	20	7.4	13	64	28	19
J EV:2/ FV:1/ PJ:0.5	27	7	14	19	84	0
1 EV:1/ S:1 / LA:1	12	6.8	8	59	77	20
2 EV:1/ PJ:0.5 / LA:1	14	8.3	17	15	94	75
3 EV:1/ FV:1 / LA:1	18	6.5	8	31	63	27
4 EV:1/ S:1/ PJ:0.5 / LA:1	13	7.2	12	73	58	97
5 EV:1/ S:1/ PJ:0.5/ LA:1	19	7	12	93	98	8
6 EV:2/ S:1/ LA:1	14	6.5	9	24	77	67
7 EV:2/ FV:1/ LA:1	18	6.9	9	25	72	60
8 EV:2/ PJ:0.5/ LA:1	16	6.9	13	22	76	4
9 EV:2/ S:1/PJ: 0.5/ LA:1	28	7.8	13	19	79	0
10 EV:2/ FV:1/PJ: 0.5/ LA:1	27	7.7	13	62	87	32

## Discusión

La relación C/N de los RA, co-digestante e inóculo fueron tomados de los reportados en la bibliografía [4, 5], la importancia de este parámetro es la relación de nutrientes existentes para crecimiento y reproducción de las bacterias responsables de la digestión anaerobia que debe estar en un rango óptimo de 20 a 30 [6]. Las mezclas B(27), C(30), D(24), F(20), G(27), H(28), I(20), J(27), 9(28) y 10(27) incluido el blanco (25) presentaron valores que se encuentran en el rango óptimo recomendado por la literatura, sin embargo al ser calculado de manera teórica no se tomó en cuenta como factor determinante de selección de la mejor mezcla. El parámetro que evalúa la estabilidad es el pH, que se utiliza normalmente como un indicador de la salud del digestor. El pH fue tomado como primer criterio de selección de las mezclas evaluadas. Las mezclas de RA ácidos (FV y SL) sin inóculo (A(5.9), C(5.3) y H(6.2)), presentaron el pH bajo, comparado con el óptimo marcado por la literatura (6.5-8) lo que indica que son propensos a la acumulación de ácidos grasos volátiles, comparado con la adición de inóculo (1 (6.8), 3(6.5) y 7(6.9)) que al contar con la humedad y alcalinidad de los LA, son capaces de amortiguar la baja de pH. En contraste la mezcla 2 (EV/PJ/LA), obtuvo un pH 8.3 de tal manera que podría presentar inhibición por amonio, pues una de las razones del incremento de pH, como lo menciona Veyna Castañeda [7], es por la acumulación de amonio durante la degradación de proteínas. El segundo criterio de selección de las mezclas es la cantidad de biogás acumulado. El blanco (EV / agua), obtuvo 30 lts/KgSV, que representa la DA individual de la EV, en base a este resultado las mezclas B (52 lts/KgSV), 2 (75 lts/KgSV), 4 (97 lts/KgSV), 6 (67 lts/KgSV), 7 (38 lts/KgSV) y 10 (32 lts/KgSV) obtuvieron una generación mayor, F(29 lts/KgSV) y H(29 lts/KgSV), obtuvieron una generación igual comparados con el blanco. La reducción de carga química evalúa la cantidad de sustrato consumido durante la digestión que en relación con la reducción de %SVT, nos da una idea de la eficiencia de la digestión. Ambos parámetros evalúan el tiempo de digestión y la forma de alimentación de los reactores al ser el tiempo determinado de 30 días y utilizar sistemas batch no son factores de selección.

## Conclusiones

Según el análisis de resultados, los mejores ensayos de la co-digestión anaerobia que cumplen con los criterios establecidos fueron: 2 (Excretas de Vaca: 1/Paja y Rastrojos: 0.5/ inóculo: 1), 4 (Excretas de Vaca: 1/Pajas y rastrojos: 0.5/ inóculo:1), 6 (Excreta de Vaca: 2 /Suero de Leche: 1/inóculo: 1), y 7 (Excretas de Vaca: 2/ Residuos de Frutas y Verduras: 1/ inóculo: 1) con valores de 75, 97, 67 y 60 L/ Kg SVT respectivamente. De estas mezclas podemos concluir que los residuos agroindustriales seleccionados (residuos de frutas y verduras, suero de leche y pajas y rastrojos) en este trabajo, al ser co-digeridos con excretas de vaca son factibles para la producción de biogás y a su aprovechamiento como combustible, logrando así un ahorro de energía. De igual importancia al emplear residuos agroindustriales se obtiene una disminución de volumen y contaminación que podrían generar, consecuentemente se genera un ahorro de costos en el manejo de residuos.

## Agradecimientos

CONACYT

## Bibliografía

1. APHA (2005), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater(21st Ed.). Washington DC, USA.
2. Zhong, W., & Zhang, Z. (2011). Comparison of chemical and biological pretreatment of corn straw for biogas production by anaerobic digestion. *Renewable Energy* , 36, 1875-1879.
3. Converti, A., Oliveira, R., Torres, B., Lodi, A., & Zilli, M., "*Biogas production and valorization by means of a two-step biological process*", *Bioresource Technology* , Vol. 100, Pg. 5771–5776, (2009).
4. Bouallagui, H., Lahdheb, H., Ben Romdan, E., Rachdi, B., & Hamdi, M. (2009), "*Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance*", *Journal of Environmental Management* , Vol. 90, Pg. 1844–1849.
5. Rasi, S., Lantela, J., & Rintela, J., (2011). "*Trace compounds affecting biogas energy utilisation*", *Energy Conversion and Management* , Pg. 3369-3365.
6. Lahdheb, H., Bouallagui, H., & Hamdi, M., (2009), "*Improvement of activated sludge stabilisation and filterability during anaerobic*", *Bioresource Technology*, Vol. 100, Pg. 1555–1560.
7. Veyna Castañeda, S. (2007). Tesis de maestria "Efecto del control de pH, temperatura y adiccion de nitrógeno sobre la digestion anaerobia de residuos hoticolas". México D.F.: Instituto Politecnico Nacional.

## Artículo XVI

# COMPARACIÓN FISCOQUÍMICA Y MICROBIANA DE DOS DISTINTOS TIPOS DE LODOS DE ALIMENTACIÓN PARA UN PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Vásquez M. A.<sup>1</sup>, Montes C.M.E.<sup>1</sup>, Santiago R.V.<sup>2</sup> y Méndez R.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Av. Juan Pablo II s/n, C.P. 94294, Boca del Río, Ver.,  
+52 229 7752027, alejvasquez@uv.mx

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Boca del Río, Ver.

### Abstract

Los lodos producidos en las plantas de tratamiento de agua residuales son un subproducto con un alto contenido de materia orgánica y una mala disposición puede generar un problema ambiental mayor. Estos lodos son susceptibles de reutilización en el proceso de digestión anaerobia (DA), sin embargo las características de estos varían dependiendo su origen haciendo difícil la estandarización del proceso. La comparación de los parámetros fisicoquímicos y las poblaciones microbianas presentes en dos diferentes tipos de lodos permitió determinar que las características presentadas por un lodo de origen industrial es superior al de origen doméstico como sustrato del proceso de DA. La diferencia principal está en la población microbiana presente en cada uno de ellos. Esto nos ayudará a realizar una selección o acondicionamiento del sustrato óptimo, el cuál repercutirá en la producción de biogás y por ende la valorización energética de estos residuos que impactan en el ambiente.

Sludge produced in the Wastewater Treatment Plant is a subproduct with a high biodegradable material contains and an incorrect disposal can generate a environmental problem. This sludge is suitable for reuse in the process of anaerobic digestion (AD), however these features vary their origin making it difficult to standardize the process. Comparison of the physicochemical parameters and microbial populations on two different types of sludge allowed to determine that the characteristics presented by a industrial sludge are better that the sludge domestic as substrate in AD process. The main difference among them is the microbial community present in each one of them. This will help us for make selection or conditioning of an optimal substrate, which will affect the biogas production and energy recovery from the waste that impact on the environment.

**Palabras Clave:** *Biogás, Lodos, digestión anaerobia, microorganismos aerobios*

### Introducción

Las plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR) generan un subproducto, conocido como lodos, el cual es un material semisólido, oscuro, con alto contenido de materia orgánica, actualmente representa un problema de tipo ambiental debido al contenido de contaminantes [1]. Se ha considerado que los lodos por sus

características propias o por las adquiridas después de un proceso de estabilización pueden ser susceptibles a aprovechamiento, siempre y cuando cumplan, con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos. Teniendo presente la cantidad de lodos generados por los tratamientos de las aguas residuales, una de las alternativas que está siendo utilizada en diferentes partes del mundo para tratar los residuos municipales es la digestión anaerobia, el cual es un proceso en el cual la materia orgánica es degradada por grupos de microorganismos, produciendo una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono) conocida como biogás y un desecho sólido rico en nutrientes [2]. El proceso requiere de 4 grupos de microorganismos, para los procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La digestión anaerobia empleando como sustrato lodos de una PTAR es un proceso ampliamente estudiado y son muchas las empresas que implementan esta tecnología para generación de energía, sin embargo está claro que existen diferentes tipos de lodos por lo que las características fisicoquímicas y microbiológicas de cada uno de ellos afectará el proceso de digestión anaerobia. Actualmente, es necesario desarrollar investigaciones que nos permitan la optimización y la mejora de las características en la producción de biogás mediante el estudio de dichas características. El análisis comparativo de las características fisicoquímicas y principalmente el conocimiento de las poblaciones microbianas, presentes en los lodos de alimentación, para un proceso de digestión anaerobia de una planta de tratamiento de aguas residuales doméstica y de una industria empacadora de alimentos, nos ayudará a comprender y mejorar las condiciones del proceso con el objetivo de incrementar la producción de biogás y así lograr su implementación en el tratamiento de lodos.

### **Material y Métodos**

Para la realización de este proyecto se emplearon dos tipos distintos de lodos, el primero fue muestreado en un PTAR doméstica ubicada en la zona conurbada Veracruz-Boca de Río y el segundo en una PTAR de una empresa empacadora de alimentos, ambos lodos fueron trasladados y acondicionados para su uso en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana. Los procedimientos analíticos y microbiológicos se realizaron de igual manera en este laboratorio. El acondicionamiento del lodo fue realizado de forma manual conforme a procedimientos ya estandarizados para obtener una concentración final de 25%. Para la caracterización fisicoquímica de los lodos de alimentación se determinaron parámetros como: pH, DQO, Sólidos Totales, Sólidos Totales Volátiles de acuerdo a los métodos estándares de la APHA-AWWA-WPCF. El aislamiento de microorganismos se realizó mediante diluciones seriadas y siembra en placa. Se seleccionaron aproximadamente 100 unidades formadoras de colonias tanto de bacterias como de hongos propios de los lodos en medios CN-agar y PDA para estos dos tipos de microorganismos. Una vez que se obtuvieron las cepas puras se identificaron morfológicamente por microscopia y mediante tinción de Gram y tinción con azul de lactofenol para bacterias y hongos respectivamente. Finalmente, los microorganismos aislados fueron conservados en una solución de glicerol bajo refrigeración para posteriores estudios.

## Resultados

A pesar de acondicionar las muestras de lodos a 25% de ST, las variaciones en la apariencia física fueron sobresalientes. La muestra industrial es de color grisáceo y oloroso y presenta una fácil sedimentación, la doméstica tiene una apariencia color café /negro y presenta suspensión semi-floculenta, la diferencia fundamental entre los lodos reportados es el tipo de tratamiento que reciben. Fisicoquímicamente, también muestran características distintas como se observa en la tabla 1. Las diferencias son notables en los valores de DQO, STV y en los valores de pH posteriores al proceso de acondicionamiento. En cuanto las poblaciones microbianas presentes los resultados se muestran en las tablas 2 y 3 para bacterias y hongos respectivamente, en los lodos domésticos se encontraron 54% de hongos y levaduras y 46% de bacterias, mientras que en los industriales se obtuvieron 33% de hongos y levaduras y 67% de bacterias. En estos últimos un 48% de las bacterias son bacilos Gram positivos mientras que en los domésticos solo detectó un 15%. La diferencia en las características fisicoquímicas y en el tipo de microorganismos presentes en los dos lodos hace evidente que existan variaciones en los respectivos procesos de DA con los que se alimentan estas muestras.

**Tabla 1.** Caracterización fisicoquímica

Caracterización fisicoquímica			
Determinaciones fisicoquímicas	Tipo de Lodo	Doméstico	Industrial
Sólidos Totales (ST) (kg/m <sup>3</sup> )	Fresco	5.84	11.24
	Acondicionado para alimentación	25.12	25.71
Sólidos Volátiles (SV) (kg/m <sup>3</sup> )	Fresco	4.99	4.80
	Acondicionado para alimentación	16.98	12.60
Demanda química de oxígeno (DQO) (Kg de O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	Fresco	8.52	16.15
	Acondicionado para alimentación	24.03	33.60
Densidad T= 25°C (g/ml)	Fresco	0.9983	1.0027
	Acondicionado para alimentación	1.0005	1.0075
	Fresco	7.3	7
	Acondicionado para alimentación	6.5	7.3

**Tabla 2.** Caracterización microbiana: bacterias

Caracterización microbiana: Bacterias				
PTAR	Industrial		Doméstica	
	Bacilos	Cocos	Bacilos	Cocos
Gram / Morfología				
Positivos	32	6	7	2
Negativos	26	3	20	17
<b>Total</b>	<b>58</b>	<b>9</b>	<b>27</b>	<b>19</b>

**Tabla 3.** Caracterización microbiana: hongos y levaduras

Caracterización microbiana: Hongos y Levaduras				
PTAR	Industrial		Doméstica	
	Hongos	Levaduras	Hongos	Levaduras
Total	27	15	21	14
Ligninolíticos	25	N/A	5	N/A
No ligninolíticos	2	N/A	16	N/A

N/A: No aplica

### Discusión

Se ha observado que existe una relación en el contenido de ST y la apariencia física de los lodos, los lodos frescos de color gris-oscuro normalmente tienen un alto contenido de ST, mientras que los lodos negro/marrón poseen normalmente un bajo contenido de ST [3]. Las muestras recolectadas en ambas plantas tenían apariencia física distinta, los lodos industriales presentaron un color gris oscuro y una mayor sedimentación aparente, mientras que los domésticos eran oscuros marrón y con menor sedimentación, al estudiar el contenido de ST se obtuvo que en los primeros el contenido de ST era mucho mayor que el del segundo. Esto nos indica que el aspecto físico del lodo fresco es un primer indicativo de las características de éste. Todo ecosistema requiere de un equilibrio, el pH es uno de los principales indicadores de los cambios en el equilibrio de un sistema. Además se observó que un mismo porcentaje de ST presentes en una muestra de lodos no significa que exista la misma concentración de STV, por lo tanto tampoco una misma cantidad de materia

orgánica. Durante el proceso de acondicionamiento de las muestras no hubo un cambio significativo en el pH, sin embargo los lodos frescos de la planta industrial demostraron tener una mayor estabilidad.

Los microorganismos predominantes que contribuyen a la descomposición de la materia orgánica incluyen miembros de los *Eubacteria* y *Archaea*. Ciertas comunidades de bacterias son capaces de realizar una hidrólisis eficiente de la biomasa vegetal rica en lignocelulosa. La mayoría de estas bacterias pertenecen al género *Clostridium* las cuales tienen forma de bacilos, Gram positivas, parásitas y en algunos casos tiene la capacidad de esporular [4]. El gran número y la proporción de miembros del género *Clostridium* son indicativos de la función importante de estas bacterias en el buen funcionamiento de la comunidad microbiana en un digestor anaeróbico alimentados con sustratos complejos [4]. De acuerdo a lo anterior, la presencia de un alto número de bacilos Gram positivos, 48 % del total de aislamientos de bacterias, en los lodos de la planta de tratamiento industrial nos habla de las características superiores, como lodos de alimentación para un digestor anaerobio en comparación al de la planta doméstica. De los microorganismos aislados de la PTAR doméstica únicamente el 15 % son Gram positivos lo que nos indica porqué este lodo tiene una baja eficiencia en la producción de biogás.

### Conclusiones

Después de comparar los resultados obtenidos en ambos tipos de lodos podemos indicar que el aspecto físico de los lodos es indicativo inicial de las características fisicoquímicas de los lodos. Así mismo, un mismo porcentaje de ST no es indicativo de tener una misma concentración de STV, por lo tanto tampoco una misma cantidad de materia orgánica. El proceso de acondicionamiento no afecta la estabilidad de los lodos. El tipo de microorganismos presentes en las dos muestras de lodos varía significativamente pues el predominio de bacilos Gram positivos en los lodos industriales es indicativo de la superior eficiencia microbiana de estos lodos. Debido al tipo de residuos presentes en las aguas de tratamiento se encontraron principalmente hongos ligninolíticos en los lodos de la PTAR industrial, existiendo una mayor variedad de especies de hongos y levaduras en los lodos domésticos. Por lo anterior, es evidente que ambos lodos tienen características fisicoquímicas y microbiológicas muy diversas que influirán en el proceso de digestión anaerobia. Con la experiencia de tener ya varios procesos de digestión anaerobia bien estudiados y caracterizados, se hace mayor la necesidad de seguir con las tendencias dentro del tema y es por esto, que ya con el conocimiento de las características fisicoquímicas y microbiológicas que contienen los lodos de alimentación de los procesos anaerobios, el siguiente paso a seguir es el estudio y aplicación de los microorganismos aislados con el objetivo de poder emplearlos para mejorar la eficiencia de la producción de metano.

### Bibliografía

1. Jurado, P; Luna, M y Barretero. R (2004). Aprovechamiento de biosólidos como abono orgánico en pastizales áridos y semiáridos. *Tec. Pecu. Mex.* 42:379-395.
2. Veyna, C.S. (2007). Efecto de control de pH, temperatura y adición de nitrógeno sobre la digestión anaerobia. *Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología*

3. Barrios, J.A., (2009). Aspectos Generales del Manejo de Lodos. Curso sobre manejo y aprovechamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento. CONAGUA. México, D.F,
4. Roland W., Etelka K. (2012). Characterization of biogas - production microbial community by short – read next generation DNA sequencing. *Biotechnology for biofuels*. 5:41

## *RESIDUOS SÓLIDOS Y COGENERACIÓN*

Artículo XVII

## CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE LA DESLIGNIFICACIÓN PARA SU APROVECHAMIENTO MEDIANTE HONGOS LIGNOCELULÓSICOS DENTRO DEL ESQUEMA DE BIOREFINERÍA

Serafín Muñoz A.H.<sup>1\*</sup>, López Alvarado H.<sup>1</sup>, Mejía López A.<sup>1</sup>, Álvarez Vargas A.<sup>2</sup>, Cano Canchola C.<sup>2</sup> y Coreño Alonso O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, División de Ingenierías, Departamento de Ing. Civil, (Ing. Ambiental), <sup>2</sup> División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Biología. .

[\\*sermuah@ugto.mx](mailto:sermuah@ugto.mx).

### Resumen

Se llevó a cabo la caracterización del efluente residual proveniente de la deslignificación de paja de trigo, se cuantificaron siringaldehído (SIR), 4 hidroxibenzaldehído (HBA) y vanilina (VAL) los valores fueron  $34.5 \pm 2.5$ ,  $20.39 \pm 3.5$  y  $2.02 \pm 0.8$ , respectivamente; no se detectó 5-hidroxi metil furfuraldehído (5-HMF), formaldehído (FAL)  $0.706 \text{ mg/ml}$ . Respecto a ácidos carboxílicos; ferúlico  $13.14 \pm 1.22 \text{ mg/ml}$  y del ácido cumárico  $65.22 \pm 3.9 \text{ mg/ml}$ . La concentración de aldehídos totales y ácidos carboxílicos totales fue  $57.62 \pm 1.9 \text{ mg/ml}$  y  $78.64 \pm 2.1 \text{ mg/ml}$  respectivamente. No se detectaron aldehídos furánicos y las concentraciones de aldehídos fueron inferiores de  $1 \text{ mM}$ , deduciendo que estos compuestos no inhiben el crecimiento de microorganismos para su posterior tratamiento biológico. Respecto a la cuantificación de monosacáridos; la xilosa encontrada en los hidrolizados fue de  $44.4 \text{ mg/ml}$ , glucosa y arabinosa fueron muy inferiores. En el análisis referente a la NOM-001-SEMARNAT-1996; se observaron concentraciones de nitrógeno total, fósforo total y DQO superiores a los límites máximos permisibles (Tabla 1). Las condiciones óptimas para el crecimiento en medio líquido para el *P. ostreatus* fueron; concentración del medio MMM con 25% de licor a un  $\text{pH}=5.5 \pm 0.3$  a  $28^\circ\text{C}$  y  $100 \text{ rpm}$  obteniéndose valores de actividad enzimática de  $9.23 \text{ UI}$ , que comparándola con celulasa comercial ( $23 \text{ UI}$ ), se tuvo un 40% de actividad enzimática.

### Abstract

Wheat straw delignification wastewater was characterized, syringaldehyde (SIR), 4 hydroxybenzaldehyde (HBA) and vanillin (VAL) were quantified obtaining  $34.5 \pm 2.5$ ,  $20.39 \pm 3.5$  and  $2.02 \pm 0.8$ , respectively; the compound 5- hydroxymethylfurfuraldehyde (5-HMF) was not detected, formaldehyde (FAL)  $0.706 \text{ mg/ml}$ . About the carboxylic acids; ferulic and coumaric, were detected  $13.14 \pm 1.22 \text{ mg/ml}$  and  $65.22 \pm 3.9 \text{ mg/ml}$  respectively. The total aldehyde were  $57.62 \pm 1.9 \text{ mg/ml}$  and total carboxylic acids concentration were  $78.64 \pm 2.1 \text{ mg/ml}$ . Furanic aldehyde compounds were not detected and the total aldehyde concentration were lower than  $1 \text{ mM}$ , assuming this concentration is not considered a significant biological inhibition factor, being feasible the biological treatment of wastewater. The monossacarídeos quantification was as

follows; the xylose in the hydrolyzed compounds 44.4 mg/ml, glucose and arabinose were detected in lower concentration. The NOM-001-SEMARNAT-1996 analysis; proved that the Total Nitrogen, Total Phosphor and COD concentrations are higher then exceeding the maximum permissible limit (Table 1). The ideal reaction conditions for the biological treatment using *P. ostreatus* were as follows; medium concentration MMM with 25% of liqueur at pH=5,5  $\pm$ 0,3 and 28°C, fermenting at 100 rpm. The enzyme activity was measured achieving 9.23 UI, at contrasting with commercial cellulase (23UI), it showed 40% of enzyme activity.

**Palabras Clave:** Residuos lignocelulósicos, deslignificación, Aguas Residuales, biorefinería.

## Introducción

Una de las alternativas sustentables para atender las problemáticas ambientales está enfocada al desarrollo de tecnologías verdes dirigidas a la implementación de biorefinerías con procesos biotecnológicos en donde la finalidad principal es evaluar la serie de productos generados a partir de los diferentes procesos involucrados. El objetivo principal de este proyecto es caracterizar de las aguas residuales provenientes de la deslignificación la cuál es una etapa del proceso de la obtención de etanol a partir de paja, dentro de estos análisis están: la determinación de aldehídos, Sólidos Sedimentables (SS), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total (N), Fósforo Total y Demanda Química de Oxígeno (DQO). La importancia de este trabajo deriva en varios aspectos fundamentales como el cumplimiento a la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales y de esta manera analizar el grado de contaminación del efluente. Por otro lado cabe hacer notar que una gran cantidad de aldehídos (furánicos) y algunos ácidos orgánicos inhiben el crecimiento de microorganismos, sin embargo los monosacáridos lo favorecen [1, 2]. Además según los resultados de este trabajo, existe la factibilidad de recuperación de estos bioproductos de alto valor agregado [3, 4].

## Material y Métodos

Para la determinación de los parámetros se toma como base la NOM-001-SEMARNAT-1996. La determinación de aldehídos y ácidos (ferúlico y cumárico) del filtrado de paja se realiza por cromatografía de gases (GC), usando estándar interno. La determinación de azúcares de la hidrólisis ácida se lleva a cabo mediante TFA, empleando estándar interno. La determinación de sólidos sedimentables se hace empleando conos de sedimentación tipo Imhoff; utilizando una muestra de 1 litro, perfectamente homogenizada, en tanto para determinar los sólidos totales fijos y volátiles la muestra se calcina a 550°C durante 20 minutos, por su parte la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se realiza según la Norma NMX-AA-030-SCFI-2001 por el método a reflujo cerrado empleando dicromato. La determinación de Nitrógeno Total se efectúa por HACH TNT plus 826 (Método digestión de persulfato). La determinación de Fósforo total se realiza mediante HACH (Método de PhosVer 3). Por otro lado el *Pleurotus ostreatus* se crece en Medio Mínimo Mineral (MMM) con diferentes concentraciones de licor residual proveniente de la deslignificación. La determinación de celulasas del extracto enzimático se midió aplicando el procedimiento de Loera y

Córdova [5] y la concentración de azúcares reductores se realiza por el método del ácido dinitrosalicílico [6].

### Resultados y Discusión

En el efluente residual (licor) proveniente de la deslignificación, se cuantificaron siringaldehído (SIR), 4 hidroxibenzoaldehído (HBA) y vanilina (VAL) los valores fueron  $34.5 \pm 2.5$ ,  $20.39 \pm 3.5$  y  $2.02 \pm 0.8$ , respectivamente; no se detectó 5-hidroximetilfurfuraldehído (5-HMF), las cantidades encontradas de formaldehído (FAL) fueron insignificantes  $0.706 \text{ mg/ml}$  con respecto a las demás concentraciones. En cuanto a los ácidos carboxílicos se obtuvo del ácido felúrico  $13.14 \pm 1.22 \text{ mg/ml}$  y del ácido cumárico  $65.22 \pm 3.9 \text{ mg/ml}$ . El contenido total de los aldehídos identificados fueron  $57.62 \pm 1.9 \text{ mg/ml}$  de aldehídos mientras que de ácidos carboxílicos fueron  $78.64 \pm 2.1 \text{ mg/ml}$ . Es necesario resaltar que, en ninguna de las muestras analizadas se detectó la presencia de aldehídos furánicos y las concentraciones de aldehídos fueron inferiores de  $1 \text{ mM}$ , de lo que se deduce que este tipo de compuestos no influyen en la inhibición del crecimiento de microorganismos para su posterior tratamiento biológico. Otra parte de trabajo consistió en la cuantificación de monosacáridos, mediante hidrólisis ácida con TFA. La solución obtenida fue preparada para el análisis por GC-FID, como se describió en el procedimiento. Según el cromatograma se puede observar una buena resolución de derivados. La xilosa encontrada en los hidrolizados fue de  $44.4 \text{ mg/ml}$ , mientras la glucosa y arabinosa fueron muy inferiores. Finalmente también se llevó a cabo la determinación de los parámetros en base a la NOM-001-SEMARNAT-1996. En donde observamos que los valores de nitrógeno total, fósforo y DQO exceden los valores límites permisibles, (tabla 1) lo cual nos indica que existe una alta concentración de materia orgánica, que concuerda con los resultados obtenidos de los compuestos aromáticos provenientes de la degradación de lignina así como en menor aportación con los azúcares cuantificados. Las condiciones óptimas para el crecimiento en medio líquido para el *P. ostreatus* fueron; concentración del medio MMM con 25% de licor a un  $\text{pH} = 5.5 \pm 0.3$  a  $28^\circ\text{C}$  y  $100 \text{ rpm}$  en estas condiciones se obtiene una mejor limpieza del efluente y un mejor desarrollo del hongo, luego del periodo de incubación se procedió a medir la actividad de celulasas del extracto generado en el sobrenadante del cultivo, obteniéndose un resultado relevante ya que en una de las variantes utilizada la actividad fue  $9.23 \text{ UI}$ , que comparándola con lo producido con una celulasa comercial que fue  $23 \text{ UI}$ , se tuvo un 40% de actividad enzimática.

**Tabla 1.** Valores obtenidos en las aguas residuales provenientes del proceso de designificación en base a la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Parámetro		Resultados de los valores obtenidos	Límite máximo permisible NOM-001-SEMARNAT-1996
Temperatura		60°C ± 2	40°C
pH		11.5 ± 0.3	5 – 10
Sólidos Sedimentables		2 ± 0.4ml/l	2 ml/l
Sólidos Totales		63 ± 1.3g/l	No aplica
Sólidos Suspendidos	Totales	7.0 ± g/l	125mg/l
	Fijos	6.0g/l	N.A
	Volátiles	1.0g/l	N.A.
Sólidos Disueltos	Totales	56g/l	N.A.
	Fijos	35.5g/l	N.A.
	Volátiles	20.5g/l	N.A.
Nitrógeno		240mg/l	60 mg/l
Fósforo		70mg/l	30 mg/l
DQO		20,000 mg/l	200 mg/l

### Conclusiones

La cuantificación de los compuestos aromáticos provenientes de la degradación de lignina presentan una concentración menor a 1mM lo cual no interfiere en el crecimiento de microorganismos, lo que permite el uso de ellos para el tratamiento de estas aguas residuales de acuerdo con las normas oficiales mexicanas establecidas por la SEMARNAT. En cuanto a la determinación de celulasas del extracto producido por *P. ostreatus* se puede considerar muy relevante ya que tiene un 40% de actividad

con respecto a una celulosa comercial. Estos resultados pueden ser la pauta para el estudio de otros productos de alto valor agregado como la lignina, xilana, etc..

### Agradecimientos

Los autores agradecen el valioso apoyo al M.C. Ignacio Macías, Q. Manuel Alejandro Méndez Vazquez; Universidad de Guanajuato, al Dr. Crecensio Rodríguez Flores, CINVESTAV-IPN, al Ing. Guillermo Hernández y el Sr. Díaz del Castillo de la Empresa MADISA, S.A.de C.V., al CONACYT y la Universidad de Guanajuato.

### Bibliografía

1. Klinke, H.B., A.B. (2001) Thomsen, and B.K. Ahring, Potential inhibitors from wet oxidation of wheat straw and their effect on growth and ethanol production by *Thermoanaerobacter mathranii*. *Appl Microbiol Biotechnol.* 57(5-6): p631-8.
2. Klinke, H.B., et al. (2003). Potential inhibitors from wet oxidation of wheat straw and their effect on ethanol production of *Saccharomyces cerevisiae*: wet oxidation and fermentation by yeast. *Biotechnol Bioeng*, 81(6): p. 738-47.
3. Alper, H. and G. (2009). Stephanopoulos, Engineering for biofuels: exploiting innate microbial capacity or importing biosynthetic potential *Nat Rev Microbiol.*, 7(10): p. 715-23.
4. Berry, D.A., (2010). *Engineering organisms for industrial fuel production*. *Bioeng Bugs*,. 1(5): p. 303-8.
5. Loera O. Córdova, J. (2003) Improvement of xylanase production of xylanase production by a parasexual Cross between *A. Niger strains*. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 46;177-181.
6. Miller GL (1959) Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal. Chem.* 31:426-48.

## Artículo XVIII

# ELABORACIÓN DE *PELLETS* A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PROVENIENTE DE PALMA DE ACEITE

Rincón S.<sup>1</sup>, González Y.<sup>1</sup>, Camargo G.<sup>1</sup>, Dévora G.E.<sup>2</sup> y Astorga S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> [sahran.rinconr@unilibrebog.edu.co](mailto:sahran.rinconr@unilibrebog.edu.co) - [yuria.gonzalezc@unilibrebog.edu.co](mailto:yuria.gonzalezc@unilibrebog.edu.co) -

[gabriel.camargov@unilibrebog.edu.co](mailto:gabriel.camargov@unilibrebog.edu.co)

Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre, Bogotá, Colombia. Tel: (+57- 1-4232842)

<sup>2</sup> [german.devora@itson.edu.mx](mailto:german.devora@itson.edu.mx) - [sebas\\_astorga@hotmail.com](mailto:sebas_astorga@hotmail.com)

Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, Cd Obregón-Sonora, México. Tel: (+52 -410 90 00 Ext. 1716)

### Resumen

Una de las principales actividades económicas de Colombia es la agricultura, por lo tanto sus residuos ofrecen la posibilidad de reducir el consumo de combustibles fósiles y aumentar las fuentes energéticas del país. Un ejemplo, es la palma de aceite, una planta cultivada en Colombia principalmente para fabricación de aceites y biodiesel, que en los últimos años ha incrementado su siembra, provocando mayor cantidad de residuos y a su vez un problema higiénico-ambiental al no ser reutilizados. Es por esto, que se desea utilizar dicho residuo, realizando su transformación de biomasa a *pellet*, como una adecuada alternativa para solucionar el exceso de residuos. Inicialmente se analizó la biomasa por medio de una prueba del contenido de lignina. Posteriormente, se realizaron cinco diferentes combinaciones para la fabricación de *pellets*, con el fin de establecer cuál era el más adecuado. Por último, se hizo un estudio de las propiedades físico-químicas, como densidad, contenido de humedad, poder calorífico, entre otras. Lo anterior dio como resultado un óptimo biocombustible con un 81.8% de lignina y un poder calorífico de 4,400 kCal/kg demostrando su buena combustión, lo que lo convierte en una atractiva fuente de energía.

**Palabras Clave:** *Pellets, Palma de Aceite, residuos, biocombustibles.*

### Abstract

One of the main economic activities in Colombia is agriculture, so their waste offers the possibility of reducing fossil fuel consumption and increasing the country's energy sources. An example is the palm oil, a plant cultivated in Colombia mainly for oils and biodiesel manufacturing, which in recent years has increased its planting, causing more waste and environmental-hygienic problem not being reused. This is why we want to use that waste, making his transformation of biomass to pellet, as appropriate alternative to solve the excess waste. Biomass initially analyzed by a lignin content test. Subsequently, there were five different combinations for manufacturing pellets, in order to establish which was the most suitable. Finally, we did a study of the physico-chemical properties, such as density, moisture content, calorific value, among others. This resulted in an optimal biofuel, with 81.8% lignin and a calorific value of 4,400 kCal/kg demonstrating good combustion, which it makes an attractive source of energy.

**Key words:** *Pellets, palm oil, waste, biofuels.*

## Introducción

El aumento y la dependencia del hombre hacia los recursos naturales no renovables, ha incrementado uno de los mayores problemas ambientales, el calentamiento global. Para mitigar esta problemática, ha sido necesario encontrar otras fuentes energéticas, como lo son las energías alternativas, en este caso la biomasa, una fuente importante de energía renovable con gran viabilidad, ya que se encuentra en grandes cantidades alrededor del mundo [1]. La biomasa de Palma de Aceite se caracteriza por tener un gran potencial energético cuyos residuos son abundantes y poco utilizados, ya que Colombia en los últimos años ha aumentado su producción con más de 360,000 hectáreas sembradas, catalogándolo como el primer país productor en América Latina y el sexto en el mundo [2]. Este aumento en el área cultivada trae consigo un exceso de residuos orgánicos sin un uso en particular. En otros casos, la quema indiscriminada de este residuo contribuye a problemas de contaminación atmosférica, ya que produce gases de efecto invernadero, además del desperdicio energético debido a que no se le da un uso eficiente a esta biomasa.

Las posibilidades energéticas de esta biomasa se han venido conociendo por medio de diferentes investigaciones en todo el mundo, donde emplean el cuesco de la palma de aceite como materia prima para procesos de gasificación [3], pirólisis, etc. En esta investigación se utilizó la biomasa para la obtención de pellets, los cuales permiten obtener un combustible de mayor densidad. En el plano ambiental, si al material lignocelulósico no se le reduce el tamaño y se emplea sin densificar, acarreará problemas en cuanto a su manejo y transporte, lo que incrementa el costo, la contaminación y genera problemas de salud; por el contrario al darle un buen manejo se producirían ventajas competitivas que incrementan la productividad, además de ser una buena estrategia de comercialización. En este contexto se enmarcó el presente proyecto, determinar la factibilidad del material lignocelulósico proveniente de palma de aceite para la obtención de *pellets*.

## Materiales y Métodos

Esta investigación determinó si las propiedades de la biomasa y de los pellets eran factibles para la obtención de un buen biocombustible. Para llegar a dicha conclusión se realizaron diversos procedimientos basados en diferentes normas internacionales, entre los cuales se tienen:

**Porcentaje de lignina:** Se llevó a cabo siguiendo la norma TAPPIT 222 os-74 [4], y se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ lignina} = (\text{Peso de lignina} \times 100) / (\text{Peso anhidrido de la muestra}) \quad (1)$$

**Fabricación de pellets:** Para la elaboración de *pellets* se llevaron a cabo cinco diferentes condiciones de proceso a partir de cuesco, fibra y una mezcla de cuesco-fibra de palma de aceite. Estas fueron molidas y pasadas por los tamices No. 16 (1.18

mm) y No. 50 (0.300 mm). Posteriormente se prensaron en una peletizadora a una presión de 40 bares. Lo anterior siguiendo apartes de la metodología usada por Husain *et al.*[5].

### **Propiedades físico-químicas**

- **Densidad**

La masa se calculó con una balanza analítica y el volumen midiendo la altura y el diámetro del *pellet* (cilindro) a través de un calibrador digital. Para el cálculo de la densidad se tomaron 3 *pellets* de cada composición y posteriormente fue promediada la información. Por otra parte, se determinó la densidad de los *pellets* recién elaborados y 24 horas después de haberlos hecho, con el fin de establecer si la densidad de estos se mantenía constante.

- **Contenido de humedad**

Para determinar el contenido de humedad de los *pellets* se siguió el procedimiento de la norma Austriaca ÖNORM M 7135 [6]. El porcentaje de humedad se midió de la siguiente manera:

$$\% \text{ humedad} = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{m_{\text{inicial}}} * 100 \quad (2)$$

- **Resistencia al impacto (porcentaje de durabilidad)**

Este experimento se hizo con base en las pruebas realizadas por otros autores. El porcentaje de durabilidad es la relación entre la masa final tras las cuatro caídas y la masa inicial, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Durabilidad} = \frac{\text{masa final}}{\text{masa inicial}} * 100 \quad (3)$$

- **Módulo de elasticidad**

Para el desarrollo de esta prueba es necesario de un deformímetro y de una prensa hidráulica la cual aplique una fuerza axial al *pellet*. Inicialmente se tomaron las dimensiones del *pellet* (diámetro y altura), después se colocó en la prensa y se empezó a aplicar la fuerza. A medida que esta se aplicaba, se tomó la medida de su deformación a un intervalo de tiempo determinado hasta llegar a su punto de ruptura. El esfuerzo y la deformación se calcularon de la siguiente manera:

$$D = \frac{l_o - l_f}{l_o} \quad (4)$$

$$E = \frac{F}{A} \quad (5)$$

- **Poder calorífico**

Se analizó el poder calorífico de cada pellet por medio de la bomba calorimétrica modelo 1341 marca Parr, siguiendo el procedimiento indicado en el manual de dicha bomba [7]:

$$H_g = \frac{t W - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (6)$$

## Resultados y Discusión

### **Porcentaje de lignina**

Al realizar la prueba para hallar el contenido de lignina en la biomasa de palma de aceite se obtuvo que dicha biomasa tiene un 81.8% de lignina, siendo este un alto porcentaje, el cual indica la resistencia del mismo, debido a que este actúa como un aglutinante natural. Además, se evita el uso de químicos, los cuales pueden generar gases contaminantes al ambiente.

### **Obtención de los pellets**

Por medio de una prueba de ensayo y error se realizaron diferentes experimentos con dos tamaños de tamices N° 16 (1.18 mm) y N° 50 (0.30 mm) y una presión de 40 bares, dando como resultado cinco combinaciones, las cuales se muestran en la tabla 1. Estas cinco combinaciones fueron las que presentaron un mejor comportamiento al momento de elaborar los *pellets* (figura 1). Se obtuvieron *pellets* de 2 cm de diámetro y 5 cm de altura, aproximadamente.

**Tabla 1.** Combinación de *pellets*

No. pellet	Materia prima (g)	Porcentaje de materia prima (%)	Tamaño de partícula (mm)	Presión (Bar)
1	10 de Cuesco	100	0.300 – 1.18	40
2	10 de Fibra	100	0.300 - 1.18	40
3	10 de Fibra	100	≤ 0.300	40
4	5 de cuesco y 5 de fibra	50-50	0.300 – 1.18	40
5	5 de cuesco y 5 de fibra	50-50	≤ 0.300	40

Se escogieron estos tamaños de tamices debido a que se comprobó que entre menor sea el tamaño de partícula mejor será la densificación del *pellet*. De igual manera, la máxima presión que daba la peletizadora era 40 bares, por lo que se tomó ésta, ya que una menor presión no arrojaba buenos resultados de compactación.



**Figura 1.** *Pellets* de palma de aceite.

### **Propiedades físico-químicas**

En la siguiente tabla se exponen los resultados obtenidos de las propiedades físico-químicas de los *pellets*.

**Tabla 2.** Resultados de las propiedades físico-químicas de los *pellets*

	Densidad		Humedad (%)	Durabilidad (%)	Módulo de elasticidad
	Después de ser prensado (kg/dm <sup>3</sup> )	24 h después (kg/dm <sup>3</sup> )			
Pellet 1	1.06	1.07	8.6	2.20	4.32
Pellet 2	1.06	1.07	8.7	31.11	36.83
Pellet 3	1.28	1.28	6.7	69.15	34.11
Pellet 4	1.05	1.09	8.9	32.46	27.26
Pellet 5	1.15	1.15	6.9	40.65	21.93

- **Densidad**

De acuerdo a la norma Austriaca ÖNORM M 7135 [6], la densidad de los *pellets* debe ser  $\geq 1.12 \text{ kg/dm}^3$ , siendo los *pellets* 3 y 5 los que cumplieron con este parámetro (tabla 2). Una mayor densidad implica un menor volumen, lo que favorece su manejo, almacenamiento y transporte, demostrando así la viabilidad de estos *pellets* a ser manipulados con mayor facilidad que los demás. De igual forma, se comparó la variación de la densidad del biocombustible 24 horas después de su elaboración, lo que indica un cambio poco significativo. Por último, se observó el comportamiento de la densidad de los *pellets* según su composición, indicando que los *pellets* 3 (100% fibra con un tamaño de partícula  $\leq 0.300 \text{ mm}$ ) y 5 (50% cuesco y 50% fibra con un tamaño de partícula  $\leq 0.300 \text{ mm}$ ) presentaron una mejor densidad, lo que demuestra que entre menor sea el tamaño de partícula de la materia prima mejor será su densidad.

- **Contenido de humedad**

El contenido de humedad de los *pellets* (tabla 2), según la norma Austriaca [6] debe ser  $\leq 18.0\%$ , lo que indica que todos los *pellets* elaborados pueden arder de manera fácil debido a su baja humedad. De otro lado, mientras más baja sea la humedad mejor será la combustión del *pellet*, lo que aumenta el poder calorífico. Esto significa que los *pellets* 3 y 5 son óptimos pues tienen menos contenido de humedad que los demás.

- **Resistencia al impacto**

En la tabla de resultados se observa el comportamiento de cada *pellet* en cuanto a su durabilidad; donde se puede observar que el *pellet* 1 no soporta movimientos bruscos ni fuertes caídas, por lo tanto su transporte y almacenamiento requieren de mayor cuidado. Caso contrario del resto de los *pellets* en especial el No. 3, el cual soporta cuatro caídas y no presenta rompimientos aunque si algunas fallas, como se muestra en la figura 3.



Figura 2. Falla del *pellet* 4



Figura 3. *Pellet* 3

- **Módulo de elasticidad**

La gráfica de esfuerzo-deformación muestra el comportamiento elástico de los *pellets*, ya que en la mayoría de ellos el punto de ruptura ocurre poco tiempo después del límite elástico. De igual forma esta gráfica muestra que los *pellets* tienen características de un material plástico (deformaciones irreversibles por pequeño que sea el esfuerzo).

El módulo de elasticidad es tomado como la pendiente de la gráfica de esfuerzo-deformación, ratificando la plasticidad de los *pellets* 2 y 3.

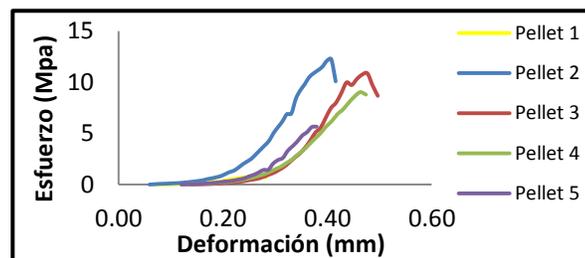


Figura 4. Esfuerzo-deformación

- **Poder calorífico**

Los resultados obtenidos indican que los *pellets* tienen un poder calorífico que se encuentran alrededor de 4,105 kCal/kg, siendo el No. 3 el más factible con 4,400 kCal/kg, lo que demuestra la amplia energía que éste posee.

## Conclusiones

Este estudio evaluó el comportamiento de la biomasa de palma de aceite en la elaboración de *pellets*, determinando que es un buen biocombustible, ya que su porcentaje de lignina y poder calorífico son altos. La factibilidad de la biomasa se

comprobó por medio de cinco condiciones de proceso a partir de fibra, cuesco y una mezcla de fibra-cuesco, donde es claramente identificable que el *pellet 3* (100% fibra) presenta las condiciones adecuadas ya que su contenido de humedad, su densidad y la reacción ante diversas pruebas de resistencia mecánica sobresalen a las demás. Caso contrario ocurre con el *pellet 1* (100% cuesco) el cual no presenta las características apropiadas, debido a su desfavorable reacción ante algunos ensayos. Lo anterior se encuentra plenamente relacionado con el tipo de biomasa, ya que la fibra es el complemento que necesita el cuesco para compactar de una mejor forma, debido a que éste cuenta con pequeños filamentos capaces de unir las partículas. De igual forma el alto módulo de elasticidad que presenta la fibra ayuda a recibir gran parte de la presión, soportándola mejor que el cuesco. Por otra parte, las características visuales de los *pellets* ratifican lo anteriormente expuesto, ya que un buen *pellet* se identifica por tener una superficie lisa y brillante, no presentar grietas y no desmoronarse en su manejo. Por lo anterior, se puede concluir que elaborar un *pellet* con 100% biomasa de cuesco no desempeña un buen trabajo como biocombustible, pero elaborar un *pellet* con 100% fibra y con un tamaño de partícula  $\leq 0.30$  mm o hacer una mezcla de cuesco-fibra si es viable y factible.

### Bibliografía

1. Jenkins, B; Baxter, L y Koppejan, J. (2011). Biomass combustion. En: *Thermochemical processing of biomass conversion into fuel, chemicals and power*. Brown, R. Ed. Wiley, USA. 27-63.
2. Aqeel Ahmed, B; Gholamreza, Z y Haslenda, H. (2011). Progress and challenges in utilization of palm oil biomass as fuel for decentralized electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol (15): 574-583.
3. Márquez Lasso, I. (2012). Gasificación por lecho fijo de fibra obtenida en el proceso de extracción del aceite de palma africana. *Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería*. 81p.
4. Tappit Test Methods. (1999). Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI Press.
5. Husain, Z; Zainac, Z y Abudllah, Z. (2002). Briquetting of palm fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil. *Biomass and bioenergy*. vol (22): 505- 509.
6. Austrian Standard. Technical Committee 241. (2000). Energy from solid biofuels. Compressed wood and compressed bark in natural state – Pellets and briquettes. ÖNORM M 7135. Edition: 2000-11-01. Austria. 10 p.
7. Operating Instruction Manual. Oxygen Bomb Calorimeter. Marca Parr 1341.

## *Resúmenes*

## EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SOBRE LA PRODUCCIÓN DE AZÚCARES E INHIBIDORES EN EL TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO

Toribio Cuaya H.<sup>1</sup>, Pedraza Segura, L.<sup>1</sup>, Vásquez Medrano R.<sup>1</sup> y Martínez Jiménez A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Iberoamericana, Paseo de la Reforma 880 CP. 01219, (55) 59 50 40 33, [hectortk@hotmail.com](mailto:hectortk@hotmail.com)

<sup>2</sup> Instituto de Biotecnología /UNAM, Av. Universidad #2001, Col. Chamilpa C.P. 62210, Cuernavaca, Morelos, Apdo. Postal 510-3, C.P.62250, (52 777) 329 16 00, (52 55) 56 22 76 00

**Palabras clave:** Tratamiento termoquímico, azúcares, inhibidores, residuos agrícolas, olote de maíz

**Resumen.** La situación mundial sobre el desarrollo de tecnologías que permitan obtener biocombustibles como etanol a partir de recursos renovables que no compitan con el abasto alimenticio ha planteado el hecho de utilizar residuos orgánicos, entre los que figuran con mayor posibilidades de desempeño los residuos agrícolas y forestales además de los residuos sólidos urbanos porque estos están con mayor disponibilidad y se encuentran utilizables en lugares específicos. Para poder aprovechar de la mejor manera estos recursos y obtener el mejor rendimiento de conversión de polisacáridos a monosacáridos tanto los pretratamientos como la hidrólisis son el mayor cuello de botella en los proyectos. El acondicionamiento del material lignocelulósicos busca romper la compleja matriz celular vegetal para poder aprovechar la celulosa y hemicelulosa, esto se logra utilizando procesos físicos, químicos y biológicos. En nuestro estudio se propone el uso de un pretratamiento llamado termoquímico (TQ) [1], donde se solubiliza alrededor del 70% de la hemicelulosa y alrededor de 65% de la lignina, las condiciones de operación son moderadas lo que permite que el conjunto principal de reacciones que describen las depolimerización dominen en lugar de la deshidratación de las pentosas que producen inhibidores [2]. Esta investigación tiene la intención de estudiar el efecto que tiene el aumentar la concentración de ácido en las reacciones que se llevan a cabo durante la hidrólisis de la hemicelulosa y lignina presentes en olote de maíz durante el pretratamiento. Se utilizó ácido sulfúrico al 1.5, 3.5 y 5.5 % en el TQ y con una carga de sólidos del 15%, las reacciones se llevaron a cabo por triplicado. La determinación de azúcares e inhibidores se determino mediante HPLC y la concentración de la lignina ácida se cuantifico utilizando UV/Vis. Las concentraciones de xilano, hemicelulosa, celulosa y polímero de lignina se determinaron por balance de materia de acuerdo a la composición inicial del olote de maíz (celulosa 39.27 %, hemicelulosa 32.48% y lignina 22.17 %). Se analizó el comportamiento de los perfiles de concentración de cada componente con respecto al tiempo (0, 10, 20 y 40 minutos) y de acuerdo al conjunto de reacciones modelo que ocurren durante el proceso, se concluye que: la velocidad de la hidrólisis de hemicelulosa y lignina aumenta así como la rapidez de la depolimerización de xilano a pentosas, ácido acético y glucosa. Sin embargo, también se favorece a las reacciones de deshidratación de las pentosas y glucosa que aumenta la concentración de inhibidores en los hidrolizados. Aún con esta limitante el TQ resulta ser muy noble y tan solo se alcanza una concentración de 0.3 g/L de furfural lo cual no representa un problema para su uso posterior en la fermentación a etanol. La desventaja más evidente que podría impactar al TQ se encuentra en la posterior neutralización del licor debido a que aumentaría los costos de consumibles en la reacción.

**Agradecimientos.** Al financiamiento brindado por CONACYT proyecto 94290 y FICSAC.

### Bibliografía

1. Pedraza-Segura, L., Toribio-Cuaya, H y Flores-Tlacuahuac, A. (2013). Multiobjective Optimization Approach for Cellulosic Biomass Pretreatment. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52 (15): 5357-5364.
2. Ajit-Singh, M., Jong-Min, L., Yeong-Cheol, K., In-Taek, H., No-Joong, P., Young-Kyu, H., Jong-San, Ch. and Jin-Soo., H. (2008) Furfural: Hemicellulose/xylose derived biochemical. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 2(5):438-454.

## PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y AZÚCARES EN SORGOS DULCES APTOS PARA PRODUCIR BIOETANOL

Aguilar U.M.G.<sup>1</sup>, Montes G.N.<sup>2</sup>, Ramírez R.E.<sup>3</sup>, Vargas V.E.<sup>2</sup>, Hernández M.O.L.<sup>2</sup> y Uribe G.S.<sup>4</sup>

Miguel Angel de Quevedo 2779, Col. Formando Hogar, Veracruz, Ver, MEXICO, Tel. (229) 934-1500, correo: maguilaruscanga@yahoo.com.mx

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Veracruz; <sup>2</sup> INIFAP-Campo Experimental Río Bravo; <sup>3</sup> INIFAP-CENID Fisiología Animal; <sup>4</sup> INIFAP-Campo Experimental Cotaxtla.

**Palabras Clave:** sorgo dulce, biomasa, etanol

**Resumen.** El cambio climático y sus efectos han originado que se inicie la búsqueda de nuevas alternativas, como el uso de los biocombustibles, los cuales producen energía limpia y eficiente que puede reducir los gases de efecto invernadero. El sorgo dulce puede ser transformado en alcohol etílico. Por ello se evaluaron sorgos dulces, los cuales en la etapa de grano masoso mostraron mayor altura de planta (RB-Cañero y Topper 76-6). Asimismo, Fortuna, Topper 76-6 y RB-Cañero, fueron superiores a Theis y Dale hasta con 76.5% en el peso total de planta. El RB-Cañero y Topper 76-6 mostraron los mayores valores de azúcar en el tallo, mientras que Topper 76-6 mostró 21% menos fibra que Dale, y hasta 18% menos lignina que RB Cañero, Theis y Fortuna.

**Introducción.** En la actualidad y debido al calentamiento global es importante iniciar el uso de los biocombustibles, los cuales producen energía limpia y eficiente que puede reducir los gases de efecto invernadero. El sorgo dulce puede ser transformado biológicamente en alcohol etílico de primera generación, etanol celulósico o para producir energía eléctrica con el bagazo, además es tolerante a la sequía, altas temperaturas, inundaciones, salinidad del suelo y toxicidad por acidez (Almodares y Hadi, 2009). Posee amplia adaptabilidad, rápido crecimiento y alta acumulación de azúcar. Es la principal materia prima alternativa que puede suplementar el uso de la caña de azúcar en la producción de etanol. En México, se requiere de información básica sobre el comportamiento del sorgo dulce para producir bioetanol, es por ello que se inició este trabajo para observar el comportamiento de genotipos extranjeros y mexicanos en la producción de biomasa y azúcares.

**Metodología.** En el Campo Experimental Río Bravo del INIFAP, se estableció un experimento en 2012 para evaluar sorgos dulces (RB Cañero, Dale, Theis, Topper 76-6 y Fortuna). El diseño experimental utilizado fue en bloques al azar con cuatro repeticiones. Plantas fueron cortadas en la etapa de grano masoso y las variables de respuesta evaluadas fueron: altura de planta, peso total de planta, peso de tallo, peso de hojas, peso de panoja y sólidos totales (°Brix). También se determinó la producción de materia seca, cenizas, fibra y lignina en cada una de las muestras. La información se analizó con el Programa SAS (Statistical Analysis System).

**Resultados y discusión.** Se observa que el sorgo dulce (Topper 76-6 y RB-Cañero) presenta capacidad para desarrollarse ya que producen alturas de planta superiores a los 2.6 m. De acuerdo al contenido promedio de azúcar en el tallo del RB-Cañero y Topper 76-6, este se muestra en el rango del contenido de azúcar observado por Almodares y Sepahi (1996), quienes mencionan que los °Brix fluctúan entre 14 y 22. El sorgo requirió de al menos 4 meses, por lo que es muy parecido a los resultados que Hills et al., (1990) observaron. La producción de biomasa observada fue de hasta 117 ton/ha en el genotipo Fortuna, mientras que la del tallo fue de hasta 90 ton/ha, muy similar a la obtenida en Estados Unidos por Hills, et al., (1990), quienes observaron 118 ton/ha de biomasa con una producción de tallo de 98 ton/ha.

**Conclusiones.** Los genotipos que presentan características más favorables (altura, tallo, precocidad y azúcares) para la producción de bioetanol son Topper 76-6 y RB-Cañero.

**Agradecimientos.** Al Fondo Sectorial SAGARPA-CONACYT, para el desarrollo del proyecto 173411.

### Bibliografía.

1. Almodares, A., and Hadi, M.R. 2009. Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. African Journal of Agricultural Research. 4 (9):772-780.

2. Almodares, A., and Sepahi, A. 1996. Comparison among sweet sorghum cultivars, lines and hybrids for sugar production. *Ann. Plant Physiol.* 10: 50-55.
3. Hills, F.J., Lewellen, T. and Skoyen, I.O. 1990. Sweet sorghum cultivars for alcohol production. *California Agric.* 44: 14-16.

## OBTENCIÓN DE AZÚCARES A PARTIR DE PAJA DE TRIGO (*Triticum sp.*) CULTIVADO EN EL VALLE DEL YAQUI, SONORA, PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Ávila García J.C., Mondaca Fernández I.\*, Meza Montenegro M., Balderas Cortés J.J., Rodríguez  
Ramírez R.R. y Villavicencio Córdova C.

<sup>1</sup> Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias, Instituto Tecnológico de Sonora,  
5 de Febrero 818 Sur, Col. Centro, Ciudad Obregón, Sonora, México, CP: 85000.

**Palabras Clave:** obtención de azúcares, hidrólisis, bioetanol

**Introducción.** Anualmente se producen en México alrededor de 45 millones de toneladas de materia seca, siendo los principales cultivos (maíz, sorgo, trigo, frijol, arroz, cebada, soya, algodón, cártamo y ajonjolí); el rastrojo y olote de maíz (25, 500, 000 toneladas), las pajas de sorgo (6, 600,000 toneladas) y de trigo (4, 500,000 toneladas) representan el 81% de los residuos de los cultivos [1]. Sonora es el principal producto de trigo con una superficie sembrada de 320,476 hectáreas y una producción de 320,432 toneladas [2]. De tal manera que Sonora cuenta con una gran fuente de materia prima en la producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos. Se realizó caracterización de paja de trigo y se evaluaron distintos tratamientos en la obtención de azúcares y la liberación de compuestos fenólicos.

**Metodología.** La caracterización de celulosa, hemicelulosa y lignina se realizó según el método de Kirk modificado, y los azúcares totales fueron determinados por el método de Grohmann. Los azúcares liberados por cada tratamiento se cuantificaron por el método de DNS y los compuestos fenólicos por el método de Folin-Ciocalteu adaptado a ácido vanílico. Se realizaron 3 tratamientos distintos: tratamiento alcalino el cual consistió en Hidróxido de sodio al 1% y autoclave 121 °C por 1 h, tratamiento ácido con 1.85% a 90 °C por 18 h y 0.5% de ácido sulfúrico y autoclave a 121 C por 1 h. Para la evaluación de liberación de azúcares reductores se utilizó un conjunto enzimático Viscozyme L, se realizó un diseño experimental completamente al azar 3X3X2 por triplicado, empleando como variables cantidad de paja (1, 2.5 y 5 gramos de paja), concentración de enzima (1, 2 y 10 g de enzima/100 g de paja) y tiempo de reacción 24 y 72 h). El experimento se llevó a cabo en tubos de 15 mL, la temperatura se mantuvo a 50 °C y 150 rpm en un baño maría Labgenius durante la totalidad del experimento.

**Resultados y discusión.** La paja utilizada en la experimentación estaba constituida por 17.13% de hemicelulosa, 45.41% de celulosa y 45.41% de lignina, lo que corresponde al valor obtenido por el método de Grohmann de 60% de conversión a azúcares. En cuanto la liberación de azúcares el tratamiento alcalino liberó 2.77 g/L, seguido por el tratamiento ácido (1.85%) con 14.7 g/L y finalmente el tratamiento ácido (0.5%) con 33.98 g/L. La liberación de compuestos fenólicos fue de 24.64 mg/L, 23.84 mg/L y 15.29 mg/L respectivamente para tratamiento alcalino, ácido (1.85%) y ácido (0.5%). Emplear 2.5 g de paja y 72 horas de reacción resultaron en la mayor liberación de azúcares incrementando el rendimiento hasta un 89.97% del ideal teórico.

**Conclusiones.** El proceso de producción de azúcares a partir de paja de trigo es posible con una metodología robusta que requiere de pocos reactivos y tiene una generación moderada de inhibidores. Sin embargo es necesario investigar las condiciones ideales del proceso fermentativo.

**Agradecimientos.** Fondos Fundación Produce Sonora. Proyecto 001272. 2010-2011

### Bibliografía.

1. SAGARPA. 2010. Aprovechamiento de esquilmos y subproductos en la alimentación del ganado. SAGARPA. Pág. 1-8.
2. INEGI. 2009. México en Cifras Información Nacional, por entidad federativa y municipios. Capturado el 26 de Octubre del 2011 de: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>

## OBTENCION DE CEPAS MUTANTES PARA LA OBTENCION DE BIOCOMBUSTIBLES BAJO EL ESQUEMA DE BIOREFINERÍA SUSTENTABLE.

De Pavía Zepeda A.<sup>1</sup>, Álvarez Vargas A.<sup>2</sup>, Coreño Alonso O.<sup>1</sup>; Cano Canchola C.<sup>2</sup>  
Serafín Muñoz A.H.<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> División de Ingenierías, <sup>2</sup> División de Ciencias Naturales y Exactas. Campus Guanajuato. Universidad de Guanajuato. Lascurain de Retana 5. Col Centro. C.P.36000. Guanajuato, Gto. México. Tel, +52(473)1020100.ext.2244. \*E-mail: \*[sermuah@ugto.mx](mailto:sermuah@ugto.mx)

**Palabras Clave:** *Biotecnología, Saccharomyces cerevisiae, Candida shehatae, Bioetanol, Fermentación.*

**Resumen** Bajo un esquema de biorefinería, en la Universidad de Guanajuato lleva a cabo el proyecto global del desarrollo de tecnología en el tratamiento y aprovechamiento de residuos. Una de las líneas es la obtención de bioetanol. Una parte del proyecto es la optimización de la etapa de la fermentación, para ello se obtuvieron levaduras mutantes tolerantes al etanol: *Sacharomyces cerevisiae* y *Candida shehatae*. En paralelo, se realizaron ensayos de fermentación de residuos agroindustriales deslignificados y sacarificados mediante el uso de cepas mutantes, con el fin de obtener mayor producción de bioetanol.

**Introducción.** Los combustibles de origen fósil generan residuos de difícil tratamiento y aumentan las emisiones de gases que causan efecto invernadero (GEI). La tendencia actual es la utilización de energías alternas que contribuyan a disminuir los GEI y la demanda energética. El bioetanol es ejemplo de una energía renovable ya que es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como cereales, remolacha, caña de azúcar, sorgo o biomasa. Estos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa. En este proceso se obtiene el alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5% de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como una fuente de energía renovable en motores de combustión. Se ha reportado que para optimizar el proceso de fermentación se están utilizando cepas mutantes de *S. cerevisiae* [3] y *C. shehatae* [2], debido a que el alcohol generado durante el proceso inhibe la eficiencia de las levaduras, se ha llevado a cabo mutaciones de cepas de levaduras para seleccionar aquellas que sean más tolerantes al etanol. Con el propósito de lograr una mejor eficiencia durante el proceso de fermentación y obtener mayor producción de Bioetanol.

**Metodología.** Se realizaron tres tipos de medios de cultivo (F1X, F1G y F4XG), los cuales contienen Xilosa y/o Glucosa como fuente de carbono. Las cepas fueron distribuidas en los medios de la siguiente manera: La *C. shehatae* se cultivó en un medio mínimo F1X con Xilosa, la *S. cerevisiae* en medio de cultivo F1G con Glucosa y asimismo se incluyó un medio de cultivo adicional F4XG combinando Xilosa y Glucosa en partes iguales 50:50 con ambas levaduras en la misma proporción, esto se realizó con el fin de verificar si la asociación microbiana entre ambas levaduras es benéfica o sinérgica lo cual podría conducirnos a mayor producción de etanol. Cabe mencionar que en todos los medios de cultivo se aplicaron las siguientes condiciones de crecimiento: incubación a 28°C durante 120 horas. Para verificar la producción de bioetanol después de la fermentación se utilizó la técnica colorimétrica que se basa en la utilización de dicromato de potasio [4] el cual se fundamenta en el cambio de coloración del cromo conforme reacciona con el etanol presente en la solución. Esta técnica produce una disminución en la absorbancia del cromato lo cual es una medida directa de la variación de la cantidad de alcohol que pueda presentar la mezcla fermentada.

**Resultados y discusión.** Se obtuvo una mayor producción de etanol con la cepa de *S. cerevisiae* en el medio F4G, que contiene glucosa, debido a que este microorganismo es comúnmente empleado a nivel industrial en los procesos de fermentación alcohólica. No obstante tiene una gran limitación ya que no es capaz de fermentar pentosas como la xilosa, que está presente en el 25% de peso en seco de la paja de trigo. La *C. shehatae* es una de las levaduras que tienen la capacidad de fermentar la xilosa a etanol.

**Conclusiones** El proceso de fermentación más factible es el obtenido a partir de la mezcla de F6XG y con las 2 cepas mutadas fermentativas (*C. shehatae* y *S. cerevisiae*) que nos da una producción de 97% de etanol. Además se concluye que al utilizar ambas cepas no se inhiben una con la otra, es decir presentan una asociación sinérgica.

**Agradecimientos.** Al CONACYT y a la División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de GUANAJUATO.

#### **Bibliografía.**

- 1 Garay-Arroyo, A., Covarrubias, A. A., Clark, I., Niño, I., Gosset, G., and Martínez, A. Response to different environmental stress conditions of industrial and laboratory *Saccharomyces cerevisiae* strains. Accepted in Applied Microbiology and Biotechnology, 2003.
- 2 Chandel, A. K., Kapoor, R. K., Singh, A., y Kuhad, R. C. (2007). Detoxification of sugarcane bagasse hydrolysate improves ethanol production by *Candida shehatae* NCIM 3501. *Bioresource Technology*. 98, 1947–1950.
- 3 Gibson, John G.; Blother, H.L., *J. Biol Chem.*, 1986, 119, 551 Timmer, W.C., *Journal of Chemical Education*. p. 897-898

## OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE XILANAS EXTRACELULARES POR *Fusarium solani* CON OLOTE DE MAÍZ COMO FUENTE DE CARBONO

Alvarez Navarrete M.<sup>1</sup>, López Gómez R.<sup>1</sup>, Salgado Garciglia R.<sup>1</sup> y Martínez Pacheco M. M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, UMSNH, Francisco J. Mújica s/n. Col. Felicitas del Río, CP. 58060, Morelia, Michoacán, México, Tel-Fax: 52 (443) 326 57 88 y 326 57 90  
[maralvnav@yahoo.com.mx](mailto:maralvnav@yahoo.com.mx)

**Palabras Clave:** Xilanasas, *Fusarium solani*, olate de maíz, optimización.

**Resumen.** Las actividades agropecuarias y agroindustriales dan origen a una cantidad importante de residuos sólidos (esquilmos) que generan contaminación. Por ejemplo, la cantidad que se genera de rastrojo y olate de maíz en México es de 25,500,000 toneladas por año [1]. El olate de maíz está constituido principalmente por biomasa lignocelulósica, la celulosa (45 %) y hemicelulosa (35 %) están presentes en mayor cantidad [2], de los cuales la hemicelulosa se compone mayoritariamente por xilana (28-35 % base seca) y que puede ser aprovechada para la obtención a gran escala de enzimas xilanolíticas, las cuales son producidas principalmente por hongos filamentosos y tienen diversas aplicaciones industriales. Sin embargo, el costo de las enzimas representa el 50 % del costo total de los procesos de hidrólisis de los materiales lignocelulósicos [3], por lo que el olate de maíz es una fuente potencialmente rentable para la producción de xilanasas fúngicas por fermentación. El objetivo de este trabajo fue optimizar la producción de xilanasas extracelulares por el hongo filamentosos *Fusarium solani*, por su destacada actividad xilanolítica [4]. Un diseño rotatable compuesto Box-Wilson se estableció con 27 tratamientos y como factores: olate de maíz (OM) como fuente de carbono (FC), urea, sulfato de amonio, extracto de levadura, como fuentes de nitrógeno y tiempo. El OM se lavó, secó, molió, tamizó y la fracción que se seleccionó para las fermentaciones tuvo un tamaño de partícula menor a 250  $\mu\text{m}$ . Las variables de respuesta fueron la actividad xilanolítica, celulolítica y de  $\beta$ -xilosidasa. Los resultados del diseño se ajustaron a un modelo matemático de segundo orden, que incluyó efectos principales, cuadráticos e interacciones entre factores. Las mejores condiciones experimentales para la producción de xilanasas ( $13.39 \pm 1.48$  U/mg) y  $\beta$ -xilosidasas ( $0.43 \pm 0.07$  U/mg) fueron: 35 % w/v de OM (medio de cultivo semisólido), 7.0, 2.0, 0.4 g/L de extracto de levadura,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  y urea, respectivamente y 156 h de incubación (tratamiento 7). Las condiciones nutrimentales para alcanzar los niveles óptimos de actividad enzimática de 14.07, 0.25 y 0.17 U/mg de xilanasas,  $\beta$ -xilosidasas y celulasas, respectivamente, fueron: 2.5 % w/v de OM (medio de cultivo líquido), 1.0, 1.5 y 1.3 g/L de extracto de levadura,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  y urea, respectivamente, y 192 h de incubación.

**Agradecimientos.** Los autores agradecen el apoyo de la UMSNH y CONACyT para la realización de este trabajo.

### Bibliografía.

1. González, M. S. S. (2010). Aprovechamiento de esquilmos y subproductos en la alimentación del ganado. SAGARPA, Subsecretaría de Desarrollo Rural, Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural. Consultado en 2013. <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Aprovechamiento%20de%20esquilmos.pdf>.
2. Saha, B. C. (2003). Hemicellulose bioconversion. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 30: 279-291.
3. Howard, R. L., Abotsi, E., Jansen van Rensburg, E. L. y Howard, S. (2003). Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *Afr J Biotechnol.* 2: 602-619.
4. Alvarez-Navarrete, M., López-Gómez, R., Salgado-Garciglia, R., Reyna-López, G., Martínez-Pacheco, M. M. (2013). Selección de aislados fúngicos productores de enzimas xilanolíticas. *XXXIV Encuentro Nacional y III Congreso Internacional de la AMIDIQ.* Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química, A.C. Mazatlán, Sinaloa, México, 7-10 de Mayo de 2013, 1357-1361.

## ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL CON ACEITE DE COCINA USADO vs. ACEITE DE *Jatropha curcas*

Morales F. y Fuentes A.

Ante la búsqueda de alternativas de fuentes de energías renovables, se han generado en México proyectos relacionados con la producción de biodiesel con aceite de plantas oleaginosas y aceite usado, sin embargo, es casi nula la evaluación de los impactos ambientales relacionados con este biocombustible. El presente estudio, consistió en el uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para determinar y comparar las emisiones de CO<sub>2</sub>eq por la producción de biodiesel con dos materias primas diferentes: aceite de cocina usado (ACU) y aceite de *Jatropha curcas*. La producción de biodiesel con aceite de cocina usado no requiere de tantos insumos comparada con la producción de biodiesel con aceite de *Jatropha*, donde gran parte de las emisiones se atribuyen a la producción de la materia prima. Las etapas evaluadas para los dos casos fueron transporte del aceite usado, procesos de esterificación y transesterificación, tratamiento del biodiesel producido; además el ACV de *Jatropha* incluyó las etapas iniciales de producción de semilla en campo y extracción de aceite. Para el caso del biodiesel producido con ACU la etapa que representó mayores emisiones de CO<sub>2</sub>eq fue la relacionada con el uso de metanol (etapa de transesterificación) con 0.064kgCO<sub>2</sub>eq por litro producido. En total de emisiones del biodiesel a partir de aceite usado fue de 19.21KgCO<sub>2</sub>eq/GJ y el de *Jatropha curcas* fue de 37.04 kgco<sub>3</sub>eq/GJ estimando la cascara como combustible. Con el ACU hubo un porcentaje de mitigación de un 77.29% y con el de *Jatropha* un 56.01%.

## BÚSQUEDA DE LEVADURAS CON APLICACIONES POTENCIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Niehus X.<sup>1</sup>, Ruiz Ruiz P.<sup>1</sup> y Sandoval, G.<sup>1,+</sup>

<sup>1</sup>[Unidad de Biotecnología Industrial, CIATEJ A.C. / Av. Normalistas 800 Col. Colinas de la Normal C.P. 44270 Guadalajara, Jalisco, México]

+ Autor de correspondencia; Tel.: (52)-(33)-4552000 ext. 1302; Fax: (52)-(33)-4552000  
[gsandoval@ciatej.mx](mailto:gsandoval@ciatej.mx) / [georgina@confluencia.net](mailto:georgina@confluencia.net)

**Palabras Clave:** Levaduras; levaduras oleaginosas; lipasas; cribado.

**Resumen.** En este trabajo se realizaron dos procesos de cribado de levaduras aisladas de diferentes fuentes para la búsqueda de cepas productoras de lípidos intracelulares (oleaginosas) y lipasas. Ambos productos pueden ser utilizados como materia prima y catalizadores, respectivamente, en la elaboración de biodiésel. Se obtuvieron 19 cepas oleaginosas y 36 productoras de lipasas.

**Introducción.** El biodiésel se define como una mezcla de alquil ésteres de ácidos grasos, elaborado principalmente a partir de aceites vegetales y un alcohol en presencia de un catalizador [1]. Las levaduras oleaginosas son aquellas capaces de producir más de un 20% de su peso seco en lípidos [2] cuya composición es similar a la de los aceites vegetales y tienen muchas aplicaciones potenciales como materia prima para biocombustibles (biodiésel y bioturbosina), complementos nutricionales y medicamentos entre otros. Por lo general las levaduras oleaginosas también son productoras de lipasas, que son enzimas o catalizadores biológicos, de interés industrial capaces de sintetizar e hidrolizar diversos tipos de lípidos (por ejemplo en la elaboración de biodiésel) de una manera eficiente y amigable con el ambiente. En este trabajo se hicieron aislamientos de levaduras a partir de diferentes fuentes y un posterior cribado para seleccionar las mejores.

**Metodología.** Se hicieron aislamientos de levaduras a partir de diferentes fuentes como aceituna, zanahoria, chícharo, leche, queso, jatrofa, higuera, ciruela, cacao y café; utilizando dos medios de cultivo líquidos cuya única fuente de carbono fue glicerol o aceite de oliva, favoreciendo así, hasta cierto punto, la producción de lípidos o lipasas respectivamente. Una vez aisladas, las levaduras fueron sometidas a dos procesos de cribado en agar basados en el propuesto por Sandoval y Marty [3] para diferenciar de manera cualitativa a las mejores productoras de lípidos intracelulares y lipasas respectivamente.

**Resultados y discusión.** Se obtuvieron un total de 59 cepas aisladas de las diferentes fuentes, 26 en el medio con glicerol y 31 en el medio con aceite de oliva. De entre ellas 19 resultaron ser potencialmente oleaginosas, principalmente de las aisladas de cacao, jatrofa y queso. Mientras que 36 son productoras de lipasas, provenientes en su mayoría de las aisladas de cacao, jatrofa y ciruela; 17 de ellas coincidieron en ser oleaginosas.

**Conclusiones.** Las semillas oleaginosas son buenas fuentes de obtención de levaduras oleaginosas y productoras de lipasas. Se verificó que la mayoría de las levaduras potencialmente oleaginosas también resultaron ser productoras de lipasas. La determinación cualitativa utilizada es una herramienta rápida de discriminación. Las cepas seleccionadas tienen potenciales aplicaciones industriales como la producción de biodiésel, aunque son necesarios más estudios además de su identificación, que será la continuación del presente trabajo.

### Bibliografía.

1. Fan, X., Niehus, X. y Sandoval, G. (2012). Lipases as Biocatalyst for Biodiesel Production. *Lipases and Phospholipases: Methods and Applications*. G. Sandoval. Springer-Humana Press, Mexico. 471-483.
2. Ratledge, C. (1991) Microorganisms for lipids. *Acta Biotechnologica*. 11:429-438.
3. Sandoval, G. y Marty, A. (2007) Screening methods for synthetic activity of lipases. *Enzyme and Microbial Tech.* 40: 390-393.

## ESTUDIO COMPARATIVO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL EMPLEANDO UN PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN ÁCIDA Y BÁSICA Y UTILIZANDO UN PROCESO ACOPLADO BIOETANOL-BIODIESEL

Peña Calva A.<sup>1</sup>, Villavicencio B. y Elizalde L.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Boulevard Acceso a Tolcayuca # 1009 Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860, Tolcayuca, Hidalgo, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, [apena01@its.jnj.com](mailto:apena01@its.jnj.com), (743) 7411015, (743) 7412243.

**Palabras Clave:** Bioetanol, Biodiesel, Yuca, *Jatropha*, Remolacha

**Resumen.** La tendencia mundial en el manejo de los combustibles en especial el bioetanol y el biodiesel ha llevado a la exploración de nuevas metodologías de procesos que permiten optimizar su producción, por lo que el acoplamiento de procesos nos permitiría reducir tiempos y costos, esta es la finalidad del presente trabajo, el explorar y comparar métodos y materias primas que nos permitan reducir el costo de producción del biodiesel. El biodiesel es un biocombustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, mediante procesos industriales de transesterificación [1]. El biodiesel es un combustible oxigenado, por eso tiene una combustión completa en comparación al diesel derivado del petróleo y produce menos gases contaminantes. Tiene un punto de inflamación relativamente alto (150 °C) que le hace menos volátil que el diesel del petróleo y es más seguro de transportar [2]. Existen variedades de cultivos con características favorables que permiten adaptarse a climas como el de nuestro país por lo que se analizarán algunas especies (*Jatropha* y remolacha) que se cultivan actualmente en el estado de Hidalgo (Huasteca) para observar el costo de producción por litro de biodiesel elaborado. El proceso de transesterificación puede ser catalizado por un ácido como el sulfúrico. Este catalizador dan una alta producción de ésteres alquílicos, pero las reacciones son lentas en comparación con el proceso alcalino. Se piensa que la transesterificación ácida es más conveniente para ácidos o grasas que tienen altas cantidades de ácidos grasos libres y humedad. En el método de transesterificación con bioetanol vía alcalina, el catalizador (KOH o NaOH) es disuelto en el alcohol (proveniente de la yuca) en un pequeño reactor (2.2 L). El aceite es obtenido de la *Jatropha* o remolacha y es transferido al reactor y posteriormente se incorpora la mezcla catalizador/bioetanol. Se agitada a 60 °C y una presión ambiente. La reacción de transesterificación produce dos fases líquidas: éster y glicerina cruda. La glicerina cruda se recolecta por sedimentación. La separación de la fase puede ser observada en 10 minutos y completarse en 2 a 6 hrs. Después se agrega agua para lavar el éster. El proceso para la obtención del bioetanol que es utilizado en el proceso de producción del biodiesel, utiliza como materia prima la yuca, que es producida en el Valle del Mezquital en el Estado de Hidalgo, se obtendrá mediante el proceso de sacarificación y fermentación simultánea de acuerdo a Castañón [3], esto con la finalidad de reducir los tiempo de producción y la necesidades energéticas, que con lleva a una reducción del en el costo de producción.

### Bibliografía.

1. [www.sagpya.mecon.gov.ar/new/oo/agricultura/otros/biodiese/foronacional/indexforonacional.php](http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/oo/agricultura/otros/biodiese/foronacional/indexforonacional.php), Consultada Noviembre 2011.
2. Petróleo, I. M. D. 2009.
3. Castañón, H, Mejía, C. (2008). Producción de etanol a partir de almidón de yuca utilizando la estrategia de proceso sacarificación- fermentación simultánea (SSF). Vitae Revista de la Facultad de química Farmacéutica, Vol. 15(2): 151-158.

## ***Jatropha curcas* (L) MEXICANAS Y EL PELIGRO DE LA REINTRODUCCIÓN. CARACTERIZACIÓN CON MARCADORES MOLECULARES ESPECÍFICOS**

<sup>1</sup>Toledo García L., <sup>1</sup>Servín Garcidueñas L., <sup>1</sup>Ormeño Orrillo E., <sup>3</sup>Rosas Ramírez F., <sup>3</sup>Cruz Gómez J.,  
<sup>2</sup>Islas Samperio J., <sup>2</sup>Pérez Morales G. y <sup>1</sup>Martínez Romero E.

<sup>1</sup>Centro de Ciencias Genómicas, UNAM, Av. Universidad s/n, Cuernavaca, Mor., 62210, ivonne@ccg.unam.mx ; <sup>2</sup>CIE-UNAM, Privada Xochicalco St. Temixco, Mor., 62580., <sup>3</sup> Edificio E de Posgrado, Fac. de Química, Lab 212 UNAM, 04510

**Palabras clave:** *Jatropha curcas* mexicanas, ésteres de forbol, marcadores moleculares

**Resumen.** La producción de biocombustibles usando recursos vegetales nativos como la *Jatropha curcas* (L) o piñoncillo como se le conoce, puede contribuir en la disponibilidad de energía renovable. La producción extensiva e intensiva que será requerida y la introducción de germoplasma tóxico no nativo utilizado para este fin, puede atentar contra la diversidad genética de la especie y la conservación de los recursos genéticos nativos no tóxicos endémicos de nuestro país. El objetivo es la utilización de marcadores moleculares RAPD, ISSR específicos y SCAR utilizados para la determinación de diversidad en la especie, origen, confirmación de contaminación de germoplasma, etc., de plantas silvestres y cultivadas, que a través de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) permiten generar productos con variables longitudinales característicos de una región del genoma para definir su origen y toxicidad. Resultados: El registro de los patrones polimórficos obtenidos a partir del ADN de *J. curcas* de 9 entidades de México, permitió generar matrices binarias. La similitud genética fue calculada usando los coeficientes de similitud de Dice y de Jaccard y se visualizaron en dendograma por el método UPGMA. Los resultados nos reportan diversidad genética alta entre las 63 accesiones analizadas. Los patrones obtenidos indican que los seis marcadores utilizados (3-RAPD y 3-ISSR) son bastante informativos. Generaron un conjunto de 72 bandas donde 58 fueron polimórficas con un promedio general de polimorfismo de 80.7% y un PIC promedio de 0.43, que contrasta con el bajo o moderado porcentaje reportado (33.5 y 35.5%) en países donde esta oleaginosa ha sido aparentemente introducida (India, China y África). Los marcadores SCAR utilizados definen solo al 65.12% de accesiones como mexicanas –no tóxicas en 6 de las 9 entidades estudiadas. El análisis filogenético se realizó por la ampliación de la región ITS y su secuenciación utilizando los marcadores JCITS-1-F, las secuencias fueron alineadas contra secuencias depositadas en el GenBank, la reconstrucción filogenética se realizó mediante el análisis de máxima verosimilitud y el modelo de ajuste Kakusan 4. Visualizamos un grupo divergente de *J. curcas* tóxico y un grupo mayoritario exclusivo de *J. curcas* mexicanas en su mayoría determinadas como de baja o nula toxicidad a través de la determinación de ésteres de forbol por HPLC.

**Agradecimientos.** PAPIIT IT 110911-3 y a la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del gobierno del Estado de Morelos.

## MICROPROPAGACIÓN DE *Jatropha curcas* L.

Cano Sosa, J.<sup>1</sup>, Navarrete Yabur A. E.<sup>2</sup>, Góngora Canul C.C.<sup>2</sup> y López Puc G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. Unidad Sureste. Calle 30 No. 151 entre 7 y 7a Int. Canacintra, Col. García Gineres. C.P. 97070, Mérida, Yucatán, México.]

<sup>2</sup>[Agroindustria Alternativa del Sureste S.P.R. DE R.L. DE C.V. Calle 60 diagonal No. 490 entre 59 y 61 Parque Industrial Yucatán. C.P. 97300.]

**Palabras Clave:** *Jatropha Curcas* L., cultivo *in vitro*, organogénesis.

**Resumen.** El Presente trabajo consistió en el establecimiento del cultivo *in vitro* de *Jatropha curcas* L. Para la micropropagación se utilizaron tres reguladores de crecimiento (una auxina y dos citocininas). Como resultado se obtuvieron dos tipos de regeneración 1) organogénesis directa y 2) organogénesis indirecta en el mismo experimento lo cual nos da ventajas en comparación con otros métodos de propagación de la especie, existentes en la literatura.

**Introducción.** El género *Jatropha* pertenece a la familia *Euphorbiaceae*. Dentro de este género se encuentra *Jatropha curcas*, reportada como de importancia económica por su aceite desde 1987 [1]. El cultivo sustentable de esta planta, sin interferir con la producción de alimentos, es una opción viable en proyectos de energías renovables porque ofrece ventajas adicionales sobre otros cultivos. Debido a esto es importante desarrollar técnicas de cultivo *in vitro* para obtener plantas libres de patógenos, con altas producciones en su contenido de aceite y acortando el tiempo para la multiplicación de la planta.

**Metodología.** El material utilizado para el establecimiento del cultivo *in vitro* de *Jatropha* fue material colectado de campo, por lo cual en la desinfección se utilizó cloruro de benzalconio, agroquímicos, alcohol e hipoclorito de sodio. Se evaluaron tres reguladores de crecimiento en medio base Murashige y Skoog con sacarosa y gel Rite para micropropagar plántulas de *Jatropha curcas* L. a partir de explantes tipo esqueje. Los experimentos se mantuvieron bajo fotoperiodo en el cuarto de cultivo *in vitro*. La iluminación en el cuarto de cultivo fue mediante focos leds lo cual permite un mejor control de la temperatura del cuarto de cultivo.

**Resultados y discusión.** Se obtuvieron básicamente dos tipos de respuesta en los experimentos planteados: 1) organogénesis directa y 2) organogénesis indirecta, con los tres tipos de reguladores probados, cabe destacar que se obtuvo mayor presencia visual de callo y organogénesis en los tratamientos con uno de los reguladores de crecimiento tipo citocinina. A los 15 días el testigo no presentó respuesta y los esquejes con los reguladores probados ya presentaban brotes y callo en la base del tallo. A los 30 días el testigo poseía un brote, oscurecimiento del tejido y muerte celular en los ápices del tallo, en los tratamientos observamos claramente la presencia de brotes nuevos, callo y organogénesis. Todos los tratamientos con sus réplicas presentaron múltiples brotes así como callo en la base del tallo, por lo cual la metodología es aplicable para la regeneración *in vitro* de *Jatropha*. A diferencia de lo reportado por Li *et al.*[2] que obtuvo regeneración utilizando este tipo de reguladores de crecimiento pero en dos pasos primero se obtuvo callo y luego se indujo la regeneración o brotes pasando a otro medio de cultivo y utilizaron dos reguladores para la inducción. En el presente trabajo se obtuvo tanto organogénesis indirecta como organogénesis directa en un solo paso sin la necesidad de transferir a medio con otro tipo de regulador.

**Conclusiones.** Se obtuvo respuesta en cuanto a la formación de brotes o morfogénesis directa y callo o morfogénesis indirecta utilizando tres reguladores de crecimiento vegetal, uno tipo auxina y dos tipo citocinina.

**Agradecimientos.** Fondo Sectorial SAGARPA-CONACYT. Proyecto con Clave 163502.

### Bibliografía.

- 1.- Maberley D. J. 1987. *The Plant Book*. Cambridge University Press, Cambridge.
- 2.- Li Z. G., Ming G. Yang S. Z. and Long W. B. 2012. Efficient callus induction and indirect plant regeneration from various tissues of *Jatropha curcas*. *AJB*. 11(31): 7843-7849.

## PRODUCCIÓN DE BIODIESEL CATALIZADA POR LA LIPASA LIP2 DE *Yarrowia lipolytica* INMOVILIZADA EN DIVERSOS NANOSOPORTES

Rivera I.<sup>1</sup>, Carbajal G.<sup>2</sup> y Sandoval G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unidad de Biotecnología Industrial. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). Av. Normalistas #800. Colinas de la Normal. Guadalajara, Jal., México  
[georgina@confluencia.net](mailto:georgina@confluencia.net)

<sup>2</sup>Depto. de Química. Universidad de Guadalajara. Marcelino García 1429. Guadalajara, Jal., México

**Palabras Clave:** Biodiesel, *Yarrowia lipolytica*, lipasa

**Resumen.** Las lipasas son catalizadores biológicos cuya función biológica es la degradación de triglicéridos; sin embargo bajo condiciones de reacción son capaces de llevar a cabo diversas reacciones de síntesis incluyendo la transesterificación. Sin embargo para la mayoría de estos usos es necesario la inmovilización (confinamiento de la enzima en una porción específica del espacio) del biocatalizador. El biodiesel es una mezcla de ésteres de ácidos grasos que puede ser sintetizado por lipasas. Por lo que en este trabajo se evalúan diferentes derivados inmovilizados empleando la lipasa Lip2 de *Yarrowia lipolytica* y diversos nanosoportes en la reacción modelo de síntesis de biodiesel.

**Introducción.** El biodiesel se define como una mezcla de monoacilésteres de ácidos grasos de cadena larga de origen vegetal o animal, para uso en combustión. Este biocombustible constituye una alternativa viable para la obtención de energía limpia [1]. Convencionalmente el biodiesel se produce utilizando catalizadores básicos que presentan problemas de recuperación del mismo y corrosión, por lo que la catálisis enzimática utilizando lipasas se ha explorado recientemente con buenos porcentajes de conversión. Por otro lado las lipasas pueden ser reutilizadas si se encuentran inmovilizadas, lo que reduce el costo de producción del proceso. El objetivo de este trabajo es inmovilizar la lipasa Lip2 de *Yarrowia lipolytica*, caracterizar los derivados inmovilizados y determinar la capacidad de realizar la síntesis de biodiesel empleando Lip2 de *Yarrowia lipolytica* como catalizador.

### Metodología



**Resultados.** El soporte LDH 2,5 Zn / Al tiene la mayor capacidad de adsorción de la lipasa de Lip2 de *Yarrowia lipolytica* y conserva la mayor cantidad de actividad catalítica, la cual además es comparable con la nanoarcilla comercial Bentonita. En cuanto a la reacción de síntesis de biodiesel en una mezcla de grasa de cerdo y aceite de coco (50:50), los nanosoportes sintetizados comercialmente presentaron conversiones comparables con las del soporte microporoso tipo lewattit.

**Conclusiones.** La lipasa Lip2 de *Yarrowia lipolytica* es una enzima eficiente en la producción de biodiesel. Los diversos nanosoportes empleados como catalizadores de la reacción alcanzan conversiones comparables con aquellas alcanzadas por soportes disponibles comercialmente.

**Agradecimientos** Proyecto CONACYT: CB-2008-01-104429

### Bibliografía.

1.Knothe G., Dunn R.O., Bagdy M.O. (1996). "Technical aspects of biodiesel standards". USDA. Inform.7, 827-829

## IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ENZIMAS BACTERIANAS RESPONSABLES DE LA DEGRADACIÓN DE LA PARED CELULAR

Hernández Guzmán G.<sup>1</sup> y García Rodríguez G.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca. Universidad de Guanajuato. Ex-Hacienda El Copal, C.P. 36821 Irapuato, Gto. Contacto: gustavohdz@ugto.mx

**Palabras Clave:** Biodiesel, microalgas, ruptura-pared-celular.

**Resumen.** Entre los combustibles alternos que son viables para competir contra los combustibles fósiles, el diesel procedente de microalgas es una de las mejores opciones, por su baja toxicidad al ambiente, necesidades mínimas de producción y por su potencial de escalar el proceso en reactores industriales. Durante el proceso de producción de biodiesel, uno de los pasos críticos es la ruptura celular de las microalgas, siendo éste uno de los limitantes para la producción industrializada del combustible.

En nuestro laboratorio se han caracterizado un grupo de bacterias que contienen actividades líticas eficientes para degradar la pared celular de microalgas [1]. La naturaleza bioquímica de dicha actividad lítica no ha sido completamente estudiada y puede involucrar enzimas degradadoras de los componentes membranales y de pared celular, proteínas que formen poros o compuestos químicos que induzcan inestabilidad en la membrana y pared celular. En el presente proyecto hemos detectado actividades enzimáticas que podrían participar en el proceso y mediante la modificación de algunos protocolos de detección de actividad de lipasa [2, 3], identificamos un grupo bacteriano cuya actividad enzimática es considerable y correlaciona con la actividad de degradación de pared celular.

Mediante técnicas moleculares y utilizando oligonucleótidos degenerados [4], logramos la amplificación de varios fragmentos de DNA que presumiblemente forman parte de lipasas. La caracterización de las secuencias está en proceso.

De manera alterna, estamos trabajando en una estrategia de mutagénesis insercional [5], para identificar al resto de genes involucrados en codificar a las vías metabólicas bacterianas que participan en la degradación celular. Se espera identificar genes codificantes de glicosil-hidrolasas, proteasas, porinas, toxinas, etc.

La caracterización de las enzimas y/o metabolitos capaces de romper membrana y pared celular de microalgas, proporcionará las bases para diseñar un método más eficiente en la extracción del aceite para la obtención del biodiesel. Esto permitirá una gran mejora en el proceso así como la reducción de costos.

**Agradecimientos.** Agradecemos a la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato por el apoyo al proyecto.

### **Bibliografía.**

- (1) García Navarro, Rosa Berenice. Identificación de bacterias de vida libre con actividad lítica sobre microalgas. Tesis de licenciatura. Universidad de Guanajuato.
- (2) Kourer, G. *et al.* (1987). Specific and Sensitive Plate Assay for Bacterial Lipases. *Appl Environ Microbiol* : 53(1).
- (3) Becker, P., *et al.* (1997). Determination of the kinetic parameters during continuous cultivation of the lipase-producing thermophile *Bacillus* sp. IHI-91 on olive oil. *Appl Microbiol Biotechnol*: 42:184–90.
- (4) Bell, P.J. *et al.* (2002). Prospecting for novel lipase genes using PCR. *Microbiology*. 148: 2283-2291.
- (5) Marsch-Moreno, R. *Et al.* (1998). pTn5cat: a Tn5-derived genetic element to facilitate insertion mutagenesis, promoter probing, physical mapping, cloning, and marker exchange in phytopathogenic and other gram-negative bacteria. *Plasmid* 39(3):205-14.

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA PROCESADORA DE PESCADO: COMPARACIÓN Y ACOPLAMIENTO DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA CON UN PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Picos A. R.<sup>1</sup>, Rodríguez A.<sup>1</sup> y Mora Tovar L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Parque Tecnológico Querétaro S/N. C.P. 76703, 01 442 211 6000. [apicos@cideteq.mx](mailto:apicos@cideteq.mx)

**Palabras Clave:** Harina de pescado, sal, procesos anaerobios y de oxidación avanzada, inteligencia artificial.

**Resumen.** En el presente estudio se utilizó un sistema de tratamiento anaerobio basado en un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente y un Proceso de Oxidación avanzada para tratar aguas residuales provenientes de la industria procesadora de harina de pescado, esto con el fin de analizar el efecto sinérgico que tiene el uso de dos sistemas de tratamiento combinados en la remoción de los contaminantes. El estudio tiene tres partes principales, la primera de ellas es el acondicionamiento del sistema anaerobio a operar en condiciones de media salinidad (15-22 g/L); se han logrado obtener eficiencias de remoción en un agua residual sintética con cargas orgánicas elevadas (10 gDQO/L), de hasta 86% a salinidades de 18 g/L. Una segunda etapa en la cual se trabaja actualmente es la optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales para eficientar el proceso biológico mediante el uso de un modelo computacional de inteligencia artificial llamado computación evolutiva. Se ha reportado que a salinidades altas, la eficiencia de remoción y producción de biogás decaen significativamente [1], otros estudios reportan que al utilizar mezclas de lodos convencionales con lodos adaptados a trabajar a salinidades elevadas, se obtienen buenas eficiencias de remoción [2], estas adaptaciones se logran incrementando de manera escalonada la salinidad en el sistema [3]. El objetivo del modelo computacional es hallar las condiciones a las cuales el sistema de tratamiento presenta las mejores eficiencias de remoción de carga orgánica y obtiene el mejor rendimiento de producción de biogás.

### Bibliografía.

1. Abou-Elela, S. K. (2010). Biological treatment of saline wastewater using a salt-tolerant microorganism. *Desalination*, 250, 1-5.
2. Kimata-Kino, N. I. (2011). Saline adaptation of granules in mesophilic UASB reactors. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65, 65-72.
3. Vyrides, I., Stuckey, D. (2009). Effect of fluctuations in salinity on anaerobic biomass and production of soluble microbial products (SMPs). *Biodegradation*, 20, 165-175.

## DIÓXIDO DE CARBONO E HIDRÓGENO A PARTIR DE GUAYACOL

Rodríguez N.E.<sup>1</sup>, Castro A.J.<sup>1</sup>, Saucedo J.<sup>1</sup> y Rutiaga J.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. [neloisanancy@gmail.com](mailto:neloisanancy@gmail.com)

**Palabras Clave:** *Guayacol, lignina, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>*

**Resumen.** En este trabajo se ha analizado la reacción de descomposición del guayacol a bióxido de carbono e hidrógeno, encontrando las condiciones de temperatura (300 °C-400 °C) y presión (0.1 atm) que maximizan la conversión; en este desarrollo la estructura aromática y sustituciones que tiene el guayacol se considera representativo de una de las unidades básicas que integran la lignina [1] esta última, tiene un gran potencial de desarrollo como fuente de energía [2] dada su complejidad estructural [3] este análisis resulta útil para el diseño de una fase experimental .

### **Bibliografía.**

1. Fengel, D., Wegner G.(1989) Lignin. En: *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*.Walter de Gruyter & Co., Berlín. Pag 132-179.
2. Holladay, J., Bozell, J., White, J., & Jhonson, D. (2007). Lignin and its impact on biorefinery. En: *Top Value Added Chemicals from Biomass Volumell Results of Screening for Potential Candidaters from Biorefinery Lignin*.Pacific Northwest National Laboratory Estados Unidos pag 8-10
3. Heutelings, G. (2011). Lignin variability in plant cell walls: Contribution of new models.Plant Sci 181(2011) pag 379-386.

## GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA CODIGESTIÓN DE PULPA DE CAFÉ CON EXCRETAS OVINAS Y SU APROVECHAMIENTO EN UN BENEFICIO DEL CAFÉ

Pedreguera F.J., Montes M.E., Vásquez A. y Chabat S.I.

S.S. Juan Pablo II s/n. Zona Universitaria. Fracc. Costa Verde. C.P. 94294. Boca del Río, Ver.  
Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana; [emontes@uv.mx](mailto:emontes@uv.mx).

**Palabras Clave:** *codigestión, biogás, pulpa de café, excretas*

**Resumen.** Se evaluó el proceso de generación de metano a partir de la codigestión anaerobia de la pulpa de café fermentada con estiércol ovino, residuos principales de un beneficio de café y el potencial de adaptación del biocombustible como fuente térmica durante el proceso de secado del café. Obteniéndose un ahorro del 30% en combustible.

**Introducción.** El presente trabajo está elaborado con el fin de plantear una propuesta energética alternativa para un beneficio de café ubicado en Coatepec, Veracruz, que a su vez cuenta con ganado ovino. Dicha propuesta está basada principalmente en el aprovechamiento del principal residuo de un beneficio de café, la pulpa de café, en combinación con deyecciones ovinas, como co-sustrato. La digestión anaeróbica del estiércol implica la conversión de las partículas disueltas y materia orgánica en metano y dióxido de carbono a través de una serie de interrelaciones metabólicas microbianas [1].

**Metodología.** Para la evaluación del proceso de codigestión de la pulpa de café fermentada con deyecciones ovinas para la obtención de biogás y su posterior adaptación en un beneficio de café, se caracterizaron y cuantificaron los principales parámetros involucrados durante el proceso, tanto para el influente, como para el efluente [2]. Se usó un digester tipo bolsa en monoetapa y en rango mesofílico. Se determinó pH, temperatura, Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Totales y Volátiles, Relación AGV/alcalinidad, C/N [3]. Posteriormente se analizó el secado del grano, para estimar la cantidad de energía térmica necesaria durante el proceso y así, poder relacionar con el volumen de biogás requerido para satisfacer dicha demanda. Finalmente se comparó con el potencial de generación de biogás sobre la base de los residuos generados en el beneficio.

**Resultados y discusión.** Se operó en semicontinuo y en rango mesofílico. Se inoculó y se alimentó con una mezcla de pulpa de café-estiércol de ovino con una concentración de sólidos totales y sólidos volátiles en promedio de 74.09 Kg/m<sup>3</sup> y 60.79 Kg/m<sup>3</sup> respectivamente. La relación AGV's /Alcalinidad fue de 0.10. El proceso de codigestión anaerobia demostró ser una excelente elección para el tratamiento de pulpa de café-estiércol de ovino, logrando reducir en un 96 % en promedio a los sólidos volátiles. La producción promedio de biogás fue de 0.6 m<sup>3</sup>.

**Conclusiones.** El tratamiento anaeróbico de la pulpa de café con deyecciones ovinas, es una interesante opción para el correcto manejo y estabilización de los residuos agropecuarios, al mismo tiempo que genera un combustible rico en metano, que puede ser adaptado durante la etapa de secado del grano, dando un ahorro en los gastos por insumo de combustible.

**Agradecimientos.** Al Beneficio de Café "Sajay" por las facilidades prestadas.

### **Bibliografía.**

1. Angelidaki I., Lars E. (2003). "Applications of the anaerobic digestion process". Biomethanation II. Advances in Biochemical engineering/Biotechnology. Springer Berlin/Heidelberg.
2. Marañón, E., Castrillón, G., Fernández-Nava, Y. (2012). Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. Waste Manag. 32 (2012) 1821-1825
3. Gómez N., Hontoria G. (2003). "Técnicas analíticas en el control de Ingeniería Ambiental". Universidad de Granada, España.

## PRODUCCIÓN DE GAS DE SINTESIS MEDIANTE REFORMADO DEL GLICEROL

Mendoza Chávez E. A.<sup>1</sup>, Saucedo Luna J.<sup>1</sup>, Jaime Castro Montoya A.<sup>1</sup>, Campos García J.<sup>2</sup>, Chávez Parga C.<sup>1</sup> y Ponce Ortega J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Química, Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mújica S/N, Col. Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, CP 58060, MÉXICO.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mújica S/N, Col. Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, CP 58060, MÉXICO  
[emendoza@umich.mx](mailto:emendoza@umich.mx)

**Palabras Clave:** Glicerol, reformado, gas de síntesis, CO<sub>2</sub>

**Resumen.** El sector de producción de biodiesel es una industria dinámica, con un rápido crecimiento del mercado global, bajo esta situación, se producen continuamente cantidades elevadas de glicerol ya que se obtiene en una proporción de 10% en peso respecto a la producción de biodiesel [1]. El glicerol se ha convertido en una fuente renovable potencial para la producción de gas de síntesis [2]. El reformado ofrece muchas ventajas, desde el punto de vista técnico y económico, minimiza la demanda de calor en el proceso de reformado. El glicerol puede ser convertido en una mezcla de hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono [3, 4]. Se llevó cabo un análisis usando ASPEN PLUS con los siguientes rangos de variables: temperaturas de 300-1200 K, encontrando las mejores condiciones para la producción de gas de síntesis.

### Bibliografía.

1. Gupta M. y Kumar. N. (2012). Scope and opportunities of using glycerol as an energy source. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol (6): 4551–4556.
2. Bohon, M., Metzgera, B., Linak, W., C. King, Roberts, W. (2011). Glycerol combustion and emissions. Proceedings of the Combustion Institute. Vol (33): 2717–2724.
3. Rossi, C., Alonso, C., Antunes, O., Guirardello, R., Cardozo-Filho, L. (2009). Thermodynamic analysis of steam reforming of ethanol and glycerine for hydrogen production. . International Journal of Hydrogen Energy. Vol (34): 323-332.
4. Aktas, S. Karakaya, M., Avc. A. (2009). Thermodynamic analysis of steam assisted conversions of bio-oil components to synthesis gas. International Journal of Hydrogen Energy. vol (34): 1752-1759.

## UTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE LA INCINERACIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS EN EL TRATAMIENTO DE BIOGÁS

Leal Castillor J.A.<sup>1</sup>, Germain P.<sup>2</sup>, Benbelkacem H.<sup>3</sup> y Serafín Muñoz A. H.<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, e-mail [ja.leal.castillo@gmail.com](mailto:ja.leal.castillo@gmail.com)

<sup>2</sup>Institute National de Science Appliquées, Lyon, Francia.

**Resumen.** Los residuos provenientes de la incineración de desechos sólidos han sido previamente utilizados en investigaciones para el tratamiento de biogás, eliminación de H<sub>2</sub>S, y con el objetivo de aprovecharlo en la producción de energía. El trabajo realizado muestra las características de diferentes cenizas producidas en la incineración de materiales sólidos para la reducción de su volumen antes de su disposición final en rellenos sanitarios. La capacidad de absorción del ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) fue medida con relación a la composición de estas cenizas. En este proyecto se ha probado la reactividad de una muestra de cenizas durante su contacto con un biogás proveniente de la misma zona de descarga de residuos en la ciudad de Lyon, Francia. Los experimentos se realizaron con diferentes tamaños de granos, porcentajes de humedad, altura de cama absorbente de ceniza, diferentes concentraciones de H<sub>2</sub>S y cantidad de flujo de biogás. De la misma manera se ha probado la reactividad de una muestra de ceniza sometida a un proceso de carbonatación acelerada y una muestra de carbón activo comercial. Algunas características de las cenizas han sido estudiadas antes y después de las reacciones con el biogás.

**Introducción.** La gestión de nuestros residuos tiene una gran importancia, tanto en términos de impactos ambientales como de salud y de la necesidad de preservar los recursos de materias primas. La producción de residuos sólidos urbanos (RSU) *per cápita* se ha incrementado dramáticamente en los últimos tres años, de 240 kg / año en 1980 a 374 kg / año en 2009, en Francia. Actualmente, el destino de los residuos es la siguiente: 30% en incineración, 36% en rellenos sanitarios, 20% en recuperación de materiales (reciclaje), y 14% en gestión orgánica (compostaje y digestión anaerobia de residuos orgánicos). Las fábricas de incineración de residuos domésticos (IRSU por sus siglas en francés) reducen en gran medida el volumen de los residuos, y permite la recuperación de energía mediante la combustión de estos. Sin embargo, la incineración genera dos subproductos: ceniza de incineración de residuos domésticos (MIOM por sus siglas en francés) y residuos de depuración de humos de incineración de residuos domésticos (REFIOM por sus siglas en francés). La Directiva Europea de Residuos 2008/98/CE establece que los Estados miembros deben tomar medidas para tratar sus residuos, de acuerdo con la siguiente jerarquía se aplica por orden de prioridad: prevención, reutilización, reciclado y otras (producción de energía y la eliminación). El artículo 14 de la Orden Ministerial de 25 de enero 1991 dio directrices preliminares para la eliminación (maduración, almacenamiento o recuperación de la construcción de carreteras) de desechos de la incineración de residuos sólidos en Francia. Más concretamente, la ley del 18 de noviembre de 2011 habla del reciclaje de cenizas de la incineración de residuos no peligrosos en carreteras. El tratamiento con residuos de biogás utilizando cenizas de la incineración sigue siendo objeto de debate y de investigación, actualmente existen proyectos que muestran resultados interesantes en la eliminación de H<sub>2</sub>S en el biogás, pero todavía no existe la reglamentación de este modo de tratamiento. El biogás es una fuente de energía que proviene de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este fenómeno natural se puede observar en los pantanos o los vertederos de basura. La liberación de biogás a la atmósfera contribuye de manera significativa al efecto invernadero como resultado de su composición, principalmente de metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La ley Europea de 9 de septiembre de 1997 obliga a los operadores de vertederos, capturar el biogás y producir energía con él, o en su defecto, quemarlo, pero nunca liberarlo al medio ambiente. Para el uso de biogás en la producción de energía se debe eliminar su composición de H<sub>2</sub>S que puede impedir el buen funcionamiento del motor de producción de energía. En este proyecto se busca la recuperación de cenizas de fondo como materiales de filtración para la eliminación de H<sub>2</sub>S presente en el biogás. Se ha de cambiar el tamaño y el porcentaje de agua de la ceniza para el tratamiento del biogás. Asimismo, se

analiza la cantidad de  $H_2S$  que disminuye una muestra de ceniza de madera y una de REFION de cálculos con ecuaciones.

**Metodología.** Se realizaron una serie de experimentos con el siguiente orden: 1) experimentos en el laboratorio, antes de la reacción entre el biogás y la ceniza (determinación de la cantidad de ceniza necesaria, humidificación de la misma con un valor específico y verificación del valor de humedad de la ceniza con ayuda de la estufa), 2) experimentos en campo: se pasó un volumen específico de biogás por un filtro de ceniza de la incineración de residuos sólidos y se observaron los cambios de temperatura, humedad y composición en el biogás, 3) experimentos posteriores a la reacción en el laboratorio: análisis de lixiviación para comprobar el pH de la ceniza antes y después de la reacción y verificación de su humedad.

**Resultados y discusión.** Después de 4 horas de reacción, se obtuvo una tasa de carga de 4 mg de  $H_2S/g$  de ceniza con una muestra humedad al 15%, talla de grano  $<2mm$ , flujo de biogás de 1L/min y concentración de  $H_2S$  de 2000 ppm aproximadamente. Los resultados son comparables con los obtenidos en el Estudio de las Propiedades Depuradoras de la Ceniza de la Incineración de Residuos Sólidos de Daniela Radu y col. [1], quien ha experimentado con una talla de grano mucho mayor que la nuestra ( $<30mm$ ), un flujo de biogás de 1L/min, humedad de ceniza al 15 % y 100 ppmv de concentración de  $H_2S$  en el biogás; la duración del experimento fue 404 horas y con una masa de 1kg de ceniza, la tasa de carga encontrada fue 2,97 mg  $H_2S/g$  MIOM. Otros trabajos de investigación han sido realizados con la ceniza de la incineración de residuos. Estos últimos han encontrado una tasa de carga de 037 mg d' $H_2S/g$  de ceniza con una talla de grano  $<20mm$ , flujo de biogás de 33 L de biogás sintético/min, 237 ppm de  $H_2S$ , de 75 a 90 kg de ceniza húmeda y la manipulación ha durado 45 horas.

**Conclusiones.** El agua tiene un papel muy importante en los mecanismos de adsorción de  $H_2S$  por la ceniza, disuelve los metales que puede reaccionar con el biogás, sin embargo, si el material contiene un exceso de agua, esta se va entre los poros de la ceniza, que disminuye el contacto entre los metales disueltos en el agua y el biogás y disminuye la adsorción de  $H_2S$ . Los resultados experimentales de la adsorción de  $H_2S$  con las cenizas de residuos sólidos en campo es muy complicado debido a la variabilidad de la concentración de  $H_2S$  y el cambio de la temperatura y la humedad del medio ambiente en el relleno sanitario, estos ajustes incrementan la incertidumbre de los resultados pero al mismo tiempo brindan resultados más completos y realistas para la aplicación de este proceso a nivel industrial, que se verán reflejados en cambios de humedad en el biogás después de pasar a través de la ceniza. También es importante el correcto uso de los motores de biogás para la producción de electricidad. En efecto, el biogás de alta humedad puede provocar un mal funcionamiento del desarrollo motor. Las cenizas adsorben 100 % de  $H_2S$  durante un corto período, el avance se compara muy rápido con absorbentes comerciales, pero la escoria húmeda a 15 % parece ser capaz de adsorber  $H_2S$  para otro largo período antes de la saturación. Como consecuencia, este método podría ser utilizado sólo como un pretratamiento para la purificación de biogás a escala industrial. Para que la humedad del biogás sea adecuada, la ceniza podría colocarse justo antes de la secadora y el biogás antes del tratamiento con carbón activado. Sería conveniente evaluar en futuras investigaciones el potencial de las cenizas de fondo para la adsorción de otros compuestos en el biogás (COVSi por ejemplo) que pueden impedir el funcionamiento de la potencia del motor.

#### **Bibliografía.**

1. RADU TIRNOVEANU D. Etude des propriétés épuratoires des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères et de leur mise en oeuvre. Thèse LGCIE. Lyon : INSA de Lyon, 2004.

## PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN UN CONTENEDOR BIODIGESTOR MÓVIL PARA SU USO EN ZONAS MARGINADAS

Schlegel M<sup>1</sup>., Rössel Kipping D<sup>2</sup>., Ortiz Laurel H<sup>2</sup>. y Kanswohl N<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad de Rostock. Justus-von-Liebig Weg 8. 18059. Rostock, Alemania.

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados. LPI-3 Energía Alterna y Biomateriales. Campus San Luis Potosí. Iturbide 73. Salinas de Hgo., S.L.P. C.P. 78600. México. Fax: 4969630240. edietmar@colpos.mx

**Palabras Clave:** *Descentralización, bioenergético, conversión energética, bio-contenedor, biogás.*

A nivel global, todos los países tienen limitaciones en la provisión de energía. Aunque de manera individual o grupal se exploran diferentes estrategias y alternativas para subsanar esta escasez energética, se infiere que las energías renovables juegan un papel de alta prioridad, donde trasciende la producción de biogás. Las regiones que disponen de una infraestructura perfectamente instalada les resulta relativamente sencillo lograr la integración de plantas centralizadas de producción de biogás. Sin embargo, una tecnología avanzada con viabilidad de destinarse hacia los países en desarrollo debe operar confiadamente bajo las diferentes condiciones prevalecientes de las áreas marginadas [1]. La primera condición se refiere a su descentralización, donde se busca satisfacer primeramente las demandas locales; en específico lo referente al uso de las masas biológicas locales. La propuesta de la descentralización es importante debido a que la densidad energética de la biomasa es pequeña, por lo que, el transporte de este insumo debe realizarse en distancias cortas, para no gastar más energía que la que se transporta [2]. Estas operaciones de abastecimiento local exigen una tecnología de integración de pequeñas plantas productoras de biogás. Sin embargo, este tipo de instalaciones son menos eficientes que las grandes plantas centralizadas. Asimismo, la recuperación de las inversiones es a largo plazo, por lo que conviene proponer otras soluciones tecnológicas. En este sentido, una segunda condición se refiere al sistema de instalaciones portátiles, que permiten satisfacer la condición de su aplicabilidad a los sitios que disponen de una capacidad estacional variable de suministro de biomasa para la generación de biogás. La tercera condición se refiere al desarrollo de procedimientos autosuficientes energéticamente hablando. En muchas zonas se carece de una cultura de producción de biogás como fuente de energía, especialmente en las más alejadas y marginadas [3]. Para el éxito de la descentralización y facultado de movilidad se pretende utilizar un bio-digestor, el cual satisface plenamente el concepto de autosuficiencia de energía. Finalmente, la cuarta condición donde se persigue una alta eficiencia de la energía neta, maximizando el coeficiente de la energía técnica, referido al de la masa biológica respecto al de la máxima energía del biogás. Los materiales lignocelulósicos ya empleados en estos procesos se caracterizan por tener una conversión incompleta. Otro inconveniente es el alto consumo de energía en la transportación del insumo comparado con la ganancia a partir del biogás. Esta desventaja ha limitado la experimentación de la paja de cereales u otros residuos secos, los que con un tratamiento previo puede lograrse una conversión completa en la generación de gas y una mayor rentabilidad, inclusive alcanzar una optimización de vanguardia de la eficiencia energética [4]. El contenedor funciona en su modalidad de equipo móvil de una localidad a otra como una instalación de acopio de insumos para su proceso y al mismo tiempo de entrega de combustible y de material fertilizante en las comunidades. Su funcionamiento sólo es restringido por la adición de insumos de baja calidad que generan poco biogás y a veces interrumpido por la carencia de suficientes insumos para operar.

### **Bibliografía.**

- [1] Obernberger, I. Hammerschmidt, A. (1999). Dezentrale Biomasse Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien. „erneuerbare energie“, Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE – AEE.
- [2] Besgens, S. Kempkens, K. (2004). Energie- und Stoffumsetzung in Biogasanlagen– Ergebnisse messtechnischer Untersuchungen an landwirtschaftlichen Biogasanlagen im Rheinland. Abschlussbericht Projekt Biogas Rheinland, Landesamt für Ernährungswirtschaft und Jagd, Aktenzeichen: A.4-21.30.01.01.
- [3] Gerber, M. (2009). Ganzheitliche stoffliche und energetische Modellierung des Biogasbildungsprozesses. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau.

[4] Schegel, M. Pérez Pineda, E. Ortiz Laurel, H. Schnabel, D. Kanswohl, N. Rössel, D. 2013. Adaptación de un biocontenedor para la generación de biogás en instalaciones descentralizadas en zonas marginadas. Energía alterna y biocombustibles. Editores: Pérez Vázquez, A. García Pérez, E. Colegio de Postgraduados. bba (41): 1-12.

## BIOCHAR: UNA PROPUESTA INTEGRADA DE MANEJO DE RESIDUOS, REDUCCIÓN DE EMISIONES Y SUSTENTABILIDAD DE LA AGRICULTURA EN MÉXICO

González Esquivé C.<sup>1</sup>, Larsen J.<sup>1</sup>, Masera O.<sup>1</sup>, Ibarrola R.<sup>2</sup>, Evar B.<sup>2</sup>, Riegelhaupt E.<sup>3</sup>, Gutiérrez J.P.<sup>3</sup>, Shackley S.<sup>2</sup>, Bennet M.<sup>4</sup>, Weber B.<sup>5</sup>, Etchevers J.<sup>6</sup>, Ariza R.<sup>7</sup>, Zagal A.<sup>7</sup>

<sup>1</sup>CIEco-UNAM, <sup>2</sup>Universidad de Edimburgo, Gran Bretaña, <sup>3</sup>REMBio, <sup>4</sup>British Biochar Foundation, Gran Bretaña <sup>5</sup>Facultad de Ingeniería, UAEMex <sup>6</sup>Colegio de Posgraduados <sup>7</sup>INIFAP

El biochar es una forma de materia orgánica carbonizada producida por degradación térmica en condiciones hipóxicas. Por su estructura aromática, el biochar puede permanecer estable por periodos que han sido estimados desde más de 100 hasta miles de años, por lo que su almacenamiento en el suelo puede cumplir con los criterios de captura de carbono para mitigación del cambio climático. Al mismo tiempo, el biochar puede tener efectos benéficos en los suelos agrícolas, como el incremento de la materia orgánica, la retención y liberación lenta de agua y nutrientes (principalmente nitratos), aumento del pH en suelos ácidos y aumento de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), reduciendo así los requerimientos de agua y fertilizantes en los cultivos. Dado que provee un excelente medio para la colonización microbiana, ha sido utilizado exitosamente para la inoculación con bacterias diazotróficas y hongos micorrízicos arbusculares. Bajo ciertas condiciones, la aplicación de biochar a suelos agrícolas puede reducir sustancialmente las emisiones de óxido nitroso.

Los diferentes tipos de suelo y cultivos responden de manera distinta a la aplicación de biochar, por lo que es fundamental realizar experimentación en laboratorio, invernadero y campo, para conocer bajo qué condiciones es viable su utilización. De igual manera, el sustrato, el tiempo y la temperatura a la que se realiza la carbonización son determinantes en la composición elemental y la calidad del biochar resultante, por lo que es importante conocer las características ideales de biochar para cada uso. Los trabajos para estandarizar la calidad del biochar para su uso en suelos agrícolas se encuentran en etapa temprana.

En México prácticamente no existen estudios sobre la elaboración, aplicación y efectos del biochar en suelos agrícolas. Sin embargo, se requiere de un enfoque integral en donde su uso se aborde como una estrategia conjunta de obtención de energía renovable, manejo de residuos, mejoramiento de suelos y mitigación de emisiones. Se presenta una propuesta de programa de investigación orientada a evaluar la viabilidad técnica y económica de diferentes técnicas de producción de biochar en México y el efecto de su aplicación en suelos y cultivos agrícolas. Los beneficiarios de este programa incluyen productores agropecuarios, productores de residuos orgánicos y consumidores de energía fósil.

## DISEÑO DE UNA PLATAFORMA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA FORSU BAJO EL CONCEPTO DE BIORREFINERÍA SUSTENTABLE

Serafín Muñoz, A.H.<sup>1</sup>, Ceseña Quiñonez J. I.<sup>1</sup>, Guerrero Aguilar A.<sup>1</sup>, Rodríguez Castrejón U.E.<sup>1</sup>, Álvarez Vargas A.<sup>2</sup>, Coreño Alonso O.<sup>1</sup>, Mendoza Puga L.E.<sup>1</sup>, Ramos Arroyo Y.R.<sup>1</sup> y Cano Canchola C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> División de Ingenierías, <sup>2</sup> División de Ciencias Naturales y Exactas. Campus Guanajuato. Universidad de Guanajuato. Lascurain de Retana 5. Col Centro. C.P.36000. Guanajuato, Gto. México. Tel, +52(473)1020100.ext.2244. \*E-mail: \*[sermuah@ugto.mx](mailto:sermuah@ugto.mx)

**Palabras Clave:** *Biorefinería, residuos sólidos urbanos, bioproductos*

**Resumen.** En México gran parte de los residuos sólidos urbanos (RSU) que se generan son de naturaleza orgánica [1]. El tratamiento y aprovechamiento de los RSU con ayuda de microorganismos es un área actual de investigación con gran potencial. Existen técnicas, como el compostaje, donde organismos como la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) y microorganismos participan en los procesos de descomposición de la fracción orgánica y enriquecimiento nutrimental de la tierra [2-4]. Métodos como este son alternativas naturales al uso de fertilizantes convencionales con contenidos de sustancias químicas artificiales que pueden resultar dañinas a la salud o el medio ambiente así como opciones de uso sustentable de los RSU. El uso de combustibles renovables como bioetanol y biogás a partir de basura orgánica es una solución de energías más limpias, siendo la basura orgánica una materia prima siempre disponible y de bajo costo que no compite con la producción de alimentos ni causa daños al medio ambiente. Por lo que podría reducir hasta en cerca del 50% la carga de residuos en los sitios de disposición final. Ésta práctica sin duda contribuye a disminuir los daños al medio ambiente y es excelente para la generación de energía [4]. El presente trabajo se llevó a cabo partiendo de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), se llevo el diseño de una plataforma para la producción de bioproductos de alto valor agregado. El objetivo principal es obtener una plataforma enfocada al buen manejo y aprovechamiento de los residuos con la obtención de diversos coproductos. En base a los resultados obtenidos se concluye que una plataforma diseñada en el aprovechamiento de residuos puede generar un mercado potencial en la obtención de productos de alto valor agregado con una visión sostenible y sustentable.

**Abstract.** In Mexico, most of the generated urban solid waste is organic (USW) [1]. Treatment and improvement of the USW with microorganisms is now a great potential research field. There are technics such as compost, were organisms like the Californian red worm (*Eisenia foetida*) and microorganisms take part in the process of the organic fraction decomposition and earth enrichment with nutrients [2-4]. Methods like these are natural alternatives for the use of conventional synthetic chemical fertilizers that can harm health or environment, apart from sustainable uses of the USW. Use of renewable fuels like bioethanol and biogas from organic garbage is a clean energy solution to the problem since organic garbage is an always available and low cost raw material that doesn't compete with food production and does not damage the environment. Therefore it could reduce nearly 50% of the final disposal site amount. This practice without a doubt contributes to reduce environment damage, and It is an excellent energy producer [4]. This work was carried out from the organic fraction of the urban solid wastes (OFUSW), to take a value-added bio products production platform design. The main objective is to get a well waste handle and improvement platform with obtaining diverse co-products. Based on the obtained results the conclusions show that a designed platform for a waste improvement can generate a potential market on the obtaining of high value-added products with a sustainable vision.

**Agradecimientos.** CONACYT, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

### **Bibliografía.**

1. Fredga, K. and K.G. Maler, *Life cycle analyses and resource assessments*. *Ambio*, 2010. **39 Suppl 1**: p. 36-41.
2. Abad, S. and X. Turon, *Valorization of biodiesel derived glycerol as a carbon source to obtain added-value metabolites: Focus on polyunsaturated fatty acids*. *Biotechnol Adv*, 2012. **30(3)**: p. 733-41.

3. Angel Siles Lopez, J., Q. Li, and I.P. Thompson, *Biorefinery of waste orange peel*. *Crit Rev Biotechnol*, 2010. **30**(1): p. 63-9.
4. Luo, G., et al., *Enhanced bioenergy recovery from rapeseed plant in a biorefinery concept*. *Bioresour Technol*, 2011. **102**(2): p. 1433-9.

## SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BRIQUETAS A PARTIR DE LIRIO ACUÁTICO

Zamudio Jaramillo M.A.<sup>1</sup> y Alvarez Navarrete M<sup>1</sup>

<sup>1</sup>[Departamento de Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico de Morelia, Avenida Tecnológico #1500, Col. Lomas de Santiaguito, Morelia, Michoacán, MEXICO . CP 58140, mikezamjara@hotmail.com

**Palabras Clave:** briquetas, lirio acuático

**Resumen.** El lirio acuático en el Lago de Pátzcuaro es una planta que es considerada una plaga por los problemas de índole económica, ecológica y de salud que ocasiona como son pérdidas de agua por evotranspiración, el azolvamiento prematuro de los embalses, la limitación de la actividad pesquera y recreativa, estancamiento del agua, disminución del oxígeno disuelto y la muerte de especies acuáticas. Los métodos de control actuales son muy costosos o peligrosos para la salud del ecosistema acuático. Por esta razón se buscan alternativas para su control y aprovechamiento. En este trabajo se propone la construcción de una planta de producción de briquetas con el objetivo de producir energía. Se utilizó el programa SuperPro Designer (Intelligen) para construir un modelo computacional de la planta. Las etapas del proceso que fueron consideradas fueron macerado, lavado, secado, molienda, prensado, enfriamiento y empaquetado. Dicho modelo fue construido utilizando cotizaciones y costos del año 2012 de proveedores reales. Se realizaron simulaciones para evaluar el comportamiento de la tasa interna de retorno (TIR), el tiempo de recuperación y la inversión inicial modificando factores como el precio del lirio, la concentración de aditivos y la humedad inicial del lirio. Se encontró que el proyecto mantiene su viabilidad económica ante fuertes fluctuaciones del costo del lirio y que la etapa que más impacta al proceso es el secado del lirio y el uso de materiales aglutinantes.

## IMPACTOS SOCIOAMBIENTALES EN EL CONSUMO DE LEÑA POR EL USO SOSTENIDO DE ESTUFAS EFICIENTES PATSARI EN LAS COMUNIDADES DE MICHOACÁN

Miranda Gamboa M.A. y Masera O.

<sup>1</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Laboratorio de Bioenergía. Antigua carretera a Pátzcuaro #8701, Col. Ex Hacienda de San Jose de la Huerta, CP. 58190, Morelia, Michoacán.  
[mmiranda@cieco.unam.mx](mailto:mmiranda@cieco.unam.mx), [omasera@cieco.unam.mx](mailto:omasera@cieco.unam.mx)

*Palabras Clave: Estufas Eficientes, Patsari, Consumo de Leña, Fogón Tradicional.*

La leña proporciona más del 9% de la energía primaria a nivel mundial [1]. En México representa el 8% de la demanda final de energía y es el combustible de mayor uso en las zonas rurales donde representa del 50-90% de combustible usado y puede ser la única fuente de energía asequible y disponible [2, 3]. Las personas que cocinan con leña utilizan el fogón abierto como principal dispositivo de cocción, sin embargo, su uso conlleva a problemas ambientales y sociales; como una alternativa para paliar estos problemas se han desarrollado las estufas eficientes de leña como es el caso de las Patsari; éstas tienen como objetivo principal mitigar los problemas que conlleva el uso de fogón [4]. El objetivo de este trabajo es analizar los efectos en los patrones de consumo de leña por el uso sostenido de las estufas Patsari, de manera específica evaluar los cambios en el volumen de leña usado en la estufa y detectar si existen cambios en la composición de especies utilizadas así como en las prácticas de cosecha de leña, todo lo anterior en comparación de otros dispositivos tradicionales de cocción. En este estudio para conocer los cambios en el consumo de leña se realizó la Prueba de Funcionamiento de Cocina (PFC) durante 7 días consecutivos a 22 familias agrupadas de la siguiente manera: familias con uso exclusivo de fogón (n=6), familias con uso exclusivo de estufa Patsari (n=11) y familias que emplean ambos dispositivos (n=5), además se identificó el tipo de leña que se emplea en cada grupo. Los resultados obtenidos muestran que el consumo de leña en los diferentes grupos varía, para el caso de usuarios exclusivos de fogón el consumo es de 3.61 Kg/cap/día, para usuarios mixtos es de 2.83 kg/cap/día y para usuarios exclusivos de estufa Patsari es de 2.40 Kg/cap/día, lo cual indica que la estufa Patsari ahorra un 33% de leña para realizar las tareas de cocinado. En lo que respecta al tipo de leña, se identificaron 5 géneros de leña; *Pinus sp.* (pino), *Acacia sp.* (tepamo), *Quercus sp.* (encino), *Cedrus sp.* (cedro) y *Arbutus sp.* (madroño). El grupo de usuarios exclusivos de estufa Patsari es el más diverso al usar 4 géneros diferentes, posteriormente el grupo de usuarios de fogón y mixtos que emplean 3 géneros. Para los tres grupos la leña que se emplea en mayor proporción es la de pino. De este trabajo se puede concluir que el uso sostenido de la estufa Patsari conlleva un ahorro en el consumo de leña lo cual es de suma importancia en la preservación de los recursos forestales del país y la mejora de la calidad de vida de las personas de las comunidades rurales.

### **Bibliografía.**

1. FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2012, <http://www.fao.org/forestry/energy/es/>. Última vista Mayo 2012.
2. CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), 2012. Programa Nacional de Dendroenergía Forestal 2007-2012. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?articulo=1585&grupo=4>, última visita Mayo, 2012.
3. Masera, O. y Navia, J. 1996. Fuel switching or multiple cooking fuels? Understanding inter-fuel substitution patterns in rural Mexican households. *Biomass and Energy* 12:5, 347-361.
4. Masera, O. Díaz, R; Berrueta, V. 2005. From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in México. *Energy Sustainable Development*. 9: 25-36

## EL MODELO WISDOM COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN SUSTENTABLE DE LOS RECURSOS MADERABLES CON PROPÓSITOS DENDROENERGÉTICOS

Serrano M.<sup>1,2</sup>, Martínez R<sup>1</sup>., García C<sup>3</sup>. y Masera O<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Antigua carretera a Patzcuaro No. 8701 C.P. 58190,  
[mserrano@cieco.unam.mx](mailto:mserrano@cieco.unam.mx)

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, UNAM

<sup>3</sup> Escuela Nacional de Estudios Superiores campus Morelia UNAM

**Palabras Clave:** WISDOM, dendroenergía, consumo leña, análisis espacial

**Resumen.** El uso de los recursos maderables como fuente primaria de combustible es una actividad constante en las comunidades rurales de México. En algunos casos cuando la demanda supera la oferta, se pone en riesgo el recurso forestal por medio de la degradación ó deforestación de los bosques ocasionando problemas de abasto o la pérdida de la fuente de recursos. En este trabajo, se presenta el Modelo Wisdom como una alternativa que permite planear el manejo de los recursos forestales, mediante la estimación de la oferta disponible en el ecosistema que se puede gestionar. El modelo es un enfoque integrado donde interactúan la oferta y la demanda de biomasa para leña por las comunidades consumidoras en un marco geográfico. El modelo se puede aplicar desde un nivel de escala de Municipio y permite identificar si el recurso puede ser factor de riesgo o no mediante su renovabilidad. Los resultados del modelo permiten identificar a través de mapas los diferentes grados de riesgo que el consumo del recurso dendroenergético puede aportar a los bosques cercanos a las comunidades por medio de *buffers* o áreas críticas. Masera *et al.* [1] estimaron que, aproximadamente 300 municipios en México son críticos por consumo de leña. Es decir, sus consumos sobrepasan la oferta poniendo en riesgo las fuentes de biomasa para leña y con ello la renovabilidad del bosque. Esta herramienta permite además proyectar el consumo y la oferta y, de esta manera establecer escenarios de la dinámica en que los bosques pueden comportarse si continúan siendo la fuente dendroenergética de las comunidades rurales.

### Bibliografía.

1. Masera, O., Berrueta, V., García C.A., Serrano-Medrano, M., Martínez-Bravo, R., 2012. Escenarios de mitigación de gases efecto invernadero, carbono negro y otros forzadores climáticos de vida corta, mediante el uso de biocombustibles sólidos, Proyecto GEF-PIMS4371 CC Quinta Comunicación Nacional de México a la CMNUCC. GIRA A.C. Morelia, México.

## MODELACIÓN ESPACIAL DE LA PRODUCTIVIDAD DE BIOMASA LEÑOSA DE ENCINO EN LA CUENCA DE CUITZEO, MICHOACÁN

Ramírez Mejía D.<sup>1</sup> y Ghilardi A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CIECO, Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pázcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México, [diana.masher@gmail.com](mailto:diana.masher@gmail.com)

<sup>2</sup>CIGA, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pázcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México

**Palabras Clave:** *Carbón vegetal, patrones espaciales, degradación forestal*

**Resumen.** La extracción de madera para leña y carbón vegetal en los países en desarrollo es frecuentemente identificada como una causa de degradación forestal, e incluso de deforestación. Esto tiene a su vez implicaciones climáticas por las emisiones netas de CO<sub>2</sub> y ambientales por la pérdida de servicios ecosistémicos. Sin embargo, bajo prácticas de manejo sustentable, la leña y el carbón vegetal representan una fuente de energía renovable y de ingresos para la población rural de bajos recursos. Por otra parte, se ha resaltado la necesidad de contar con metodologías y modelos espaciales para evaluar los impactos asociados a la producción de carbón vegetal, como así también su potencial de producción sustentable. La distribución espacial de biomasa utilizable para leña o carbón vegetal constituye una fuente de información sumamente valiosa para el diseño de programas y estrategias de aprovechamiento eficiente de los recursos forestales con fines energéticos. Si bien existen trabajos que reportan métodos cuantitativos para evaluar la relación entre demanda y oferta de biomasa leñosa a escala de paisaje, éstos han simplificado las estimaciones del potencial de revegetación después del aprovechamiento, lo que puede producir resultados engañosos o erróneos, más aún cuando no existe ninguna validación con datos de campo o percepción remota. Los objetivos del presente estudio son: 1) estimar las variaciones espaciales en la productividad de biomasa leñosa aérea de encino, 2) modelar la distribución espacial de la productividad de biomasa leñosa aérea de encino (*Quercus spp.*) en función de variables biofísicas, tales como la topografía, geomorfología, radiación solar, índice topográfico hídrico, tipo y características del suelo y, 3) identificar áreas con menor biomasa leñosa a la esperada de manera natural (i.e. por causas biofísicas) y buscar relaciones con el manejo (e.g. prácticas de cosecha de madera para carbón, uso mixto de los encinares para carbón y ganadería, entre otras). Este estudio se inserta en un proyecto de mediano plazo cuyo objetivo principal es modelar, a través de herramientas espaciales y geoestadísticas, el impacto de la extracción de madera para leña y carbón vegetal en la vegetación a escala de paisaje.

## POTENCIAL DE *Quercus laurina* PARA PRODUCIR CARBÓN VEGETAL EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA

López López Adilia, Rodríguez-Ortiz Gerardo, Ernesto Hernández Santiago<sup>1</sup>

<sup>1</sup>[Ex-Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca., C.P.71230. Tel. y Fax. 01 (951)70444,5170788, [adhy\\_11@hotmail.com](mailto:adhy_11@hotmail.com), Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO)].

**Palabras Clave:** Carbón vegetal, *Quercus laurina*, anatomía de la madera

**Resumen:** El estudio de las características físicas y anatómicas de la madera de *Quercus laurina* Humbert Bonpl. es de gran utilidad para analizar su potencialidad como materia prima para producir carbón vegetal. En 2013, en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca se llevó a cabo este estudio para evaluar el potencial de la especie, identificando las características microscópicas como son: vasos, fibras, traqueidas, parénquima, entre otras, características físicas, así como variables dendrométricas. Con esta información se determinó que dicha especie es factible para la producción de carbón vegetal.

**Introducción.** Las propiedades y características del uso de la madera pueden definirse de manera satisfactoria mediante pruebas directas, pero debido a que son costosas y en muchos casos generalmente destructivas, sólo pueden aplicarse en escala reducida [1]. La comunidad de Ixtlán de Juárez, en la Sierra Norte de Oaxaca tiene bajo programa de manejo forestal maderable cerca de 3 469 ha de encino con existencias maderables de 883 060 m<sup>3</sup> de diversas especies de *Quercus* sin un mercado de consumo definido. El objetivo fue evaluar el potencial de la especie *Q. laurina* para producir carbón vegetal en Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

**Metodología.** En 2013, se realizó un recorrido de campo para identificar los rodales naturales de *Quercus laurina* y establecer 12 parcelas de monitoreo. Se utilizó un diseño de muestreo simple dirigido, con sitios de 400 m<sup>2</sup> en forma circular donde se tomaron variables dendrométricas y del sitio. Se derribaron siete árboles de tamaños diferentes; en cada árbol, se cortaron tres rodajas para el cálculo de la gravedad específica y una troza muestra de 1 m de longitud. De las trozas obtenidas se sacaron tres cortes (radial, tangencial y transversal) para muestras de laboratorio obteniendo un total de 21 cortes, con medidas de 5, 10 y 15 cm para la contracción radial, transversal y longitudinal, las cuales se utilizaron para determinar las características macroscópicas y microscópicas.

**Resultados y discusión.** Se identificaron características anatómicas: vasos, traqueidas, parénquima, fibras, madera temprana y tardía, radios medulares, y la diferenciación entre la albura y duramen. De la médula hacia el cambium, se midieron los datos de los radios medulares, obteniendo un promedio de 2 a 4.6 cm y la distancia entre radios fue de 0.2 a 0.25 cm, mientras que la medida del líber fue de un rango de 0.1 a 0.15 cm, y la de cambium de 0.15 a 0.25 cm. También se determinó el peso específico de la madera (peso anhidro/volumen fresco) generando un valor de 0.8-0.86 g·cm<sup>-3</sup>.

**Conclusiones.** De las características anatómicas y tecnológicas realizadas se concluye que la madera del encino es muy factible para obtener buenos rendimientos en la producción de carbón vegetal de buena calidad, ya que resulta ser una madera muy dura y con altas existencias en el área de estudio.

**Agradecimientos.** Al Ing. Julio A. Ruíz Aquino, responsable de los servicios técnicos forestales de Ixtlán, por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

### **Bibliografía.**

1. Giménez, A. y C. López. 2000. Caracteres anatómicos que determinan la variabilidad del leño en *Schinopsis quebracho-colorado* (Schlecht.) barkl. Et Meyer, Anacardiaceae. *Invest. Agr.:Sist. Rec. For.* 9 (2):219-235.

## ADOPCIÓN DE ESTUFAS ONIL EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN GUICHICOVI, OAXACA

Arcos Canseco M. C., Santos Benítez A. R.

**Palabras Clave:** *Adopción, Estufa Eficiente, Estufa ONIL, Helps International, Implementación.*

**Resumen:** En México el principal combustible de madera es la leña y su mayor uso se concentra en las áreas rurales, principalmente en aplicaciones domésticas. La mayoría de la gente que cocina con leña utiliza fogones abiertos lo que se traduce en un alto consumo de leña por la combustión ineficiente; emisiones de gases y de partículas a la atmósfera provocando contaminación dentro de las viviendas y a su vez enfermedades en ojos y sistema respiratorio [1, 2]. Ante esta problemática gobiernos, organismos y fundaciones han tomado como iniciativa la implementación de Estufas Eficientes (EE) para tratar de resolver los problemas de salud, así como el alto consumo de leña por parte de 2,500 millones de personas alrededor del mundo asociados a la combustión incompleta de leña en los fogones tradicionales, [3, 4 5]; Sin embargo, no todas las implementaciones tienen éxito en el proceso de adopción pues es necesario que los programas de estufas incluyan desde la sensibilización, promoción, capacitación, instalación hasta el seguimiento de la tecnología [6].

Helps International es una Asociación Civil que desde el 2009 se ha dedicado a implementar poco más de 50 mil estufas ONIL en la mayor parte del país, de las cuales la mayoría cuentan con información referente a la ubicación e identificación única de la beneficiaria de cada una de las estufas. Parte de la necesidad de recopilar esta información es que al tenerla, permite dar seguimiento al comportamiento que se tiene en la adopción de esta tecnología. El caso que se describe en este trabajo es en el Municipio de San Juan Guichicovi, ubicado en la región del Istmo de Tehuantepec, al este del Estado de Oaxaca, en donde se implementaron 616 estufas durante los años 2010 y 2011, lo que representa un 5% de las estufas implementadas en el Estado de Oaxaca durante estos años. En el municipio se realizó el seguimiento y la evaluación un año después de su instalación y una segunda visita en agosto del 2013, ya que la aceptación de la tecnología no garantiza el funcionamiento óptimo de la misma sino que esto se da sólo cuando el usuario se vuelve independiente en el manejo y mantenimiento de ella [2], por lo que las visitas periódicas a las usuarias son de mucha importancia para garantizar la adopción. Se tomó una muestra del 12% del total de las estufas implementadas en el municipio, la cual reflejó en la primera visita que un 86.8% están en uso, de las cuales un 79% las usan junto con algún otro sistema tradicional para cocer sus alimentos; esto coincide con lo que Troncoso-Torrez [2] afirma, los usuarios normalmente no cambian de combustible o de tecnología sino que generalmente siguen una estrategia de consumo múltiple en la que las tecnologías introducidas para cocinar son utilizadas sin que los sistemas tradicionales sean abandonados completamente; además el porcentaje de adopción para esta pequeña muestra supera lo que Troncoso-Torrez [2] reporta para la región sur del país (75%) sin embargo, este dato no representa a toda la región sur del país sino solo a una región del Estado de Oaxaca. Aún así, hubo un porcentaje del 8% que utilizaba sólo la Estufa ONIL. La razón que se encontró para no abandonar completamente el uso de fogones tradicionales es porque esta región del Estado de Oaxaca se caracteriza por realizar totopos de manera comercial, los cuales se preparan en hornos de leña especiales para su cocción y según Troncoso-Torrez [2] cuando se busca que se dé la adopción de una tecnología se debe tomar en cuenta que los usuarios la evaluarán seleccionando los elementos que mejor se adapten a sus circunstancias particulares y en este caso la estufa ONIL, desde la perspectiva de los usuarios, no cumple con las características para la cocción de totopos. Las estufas que se encontraron abandonadas es de un 13%, los motivos identificados son: deterioro de algunas de las piezas, desinstalación por remodelación de la cocina y falta de conocimiento del correcto uso y mantenimiento de la estufa. En la segunda visita se notó una diferencia en el comportamiento de los datos; se incrementó un 1.3% de uso de la estufa lo cual representa un 88.1%, también hubo un aumento en el uso exclusivo de la estufa ONIL en un 10.5% y disminuyó 1.32% el abandono de las estufas. En las dos visitas que se han realizado hasta la fecha, se trabajó en informar a la gente nuevamente sobre los beneficios que representa tener una estufa ONIL en su vivienda así como enseñar la manera correcta del uso y mantenimiento, en el caso de las estufas que estaban mal

instaladas o desinstaladas se les asesoró para que se armaran correctamente. Estas actividades hicieron la diferencia para poder recuperar un porcentaje (26.4%) de estufas que fueron abandonadas a falta de información e implementación adecuada. Respecto al consumo de leña el 85.52% de los encuestados dijo haber observado un ahorro de combustible, aunque este dato es resultado de la percepción de las usuarias de la estufas, podemos indicar que en el 2013 GIRA realizó WBT en las estufas implementadas los años 2010 y 2011 en el Estado de Oaxaca teniendo un promedio de eficiencia térmica del 23% lo cual se encuentra dentro de los parámetros esperados; los principales beneficios que los usuarios notaron son: no genera humo dentro de la cocina, por lo tanto no causa irritación en los ojos ni daños en el aparato respiratorio; es más segura para cocinar y permite la cocción rápida de los alimentos. Con el análisis de los resultados obtenidos en las dos visitas a las usuarias de las estufas ONIL se concluye que la adopción de nuevas tecnologías se da de una manera paulatina y que en la mayoría de los casos se sigue combinando con el uso de sistemas tradicionales, el seguimiento de las tecnologías implementadas es importante para detectar las necesidades que se tienen en la adopción de las mismas. La recopilación de información de cada una de las beneficiarias al momento de la implementación ayuda a generar una línea base para evaluar si el uso de la estufa conlleva a realizar cambios positivos en el hogar, así como tener la herramienta para poder dar un seguimiento y evaluación a las poblaciones beneficiadas de las estufas para garantizar la adopción de la tecnología.

#### **Bibliografía.**

- 1.- Díaz-Jiménez, R. y Masera, O. 2002. "Uso de Leña en México: situación actual, retos y oportunidades" En: Balance Nacional de Energía. 2002. Secretaría de Energía (SENER). México. DF. pp. 99-108.
- 2.- Troncoso-Torrez, K. (2010). Manejo de recursos forestales en la región purhépecha: Diseño, difusión y adopción de tecnología para cocción con leña. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco). Morelia, Michoacán.
- 3.- Díaz-Jiménez, R. 2000. Consumo de leña en el sector residencial de México. Evolución histórica y emisiones de CO<sub>2</sub>. Tesis de Maestría en Ingeniería. UNAM. México, D.F.
- 4.- Smith, K.R., J.M. Fomet, I. Romieu y N. Bruce. 2000. Indoor Air Pollution in Developing Countries and Acute Lower Respiratory Infections in Children. *Thorax S.S.* (6): 518-32.
- 5.- Guadarrama, R. H. 2009. Impulsan el uso de estufas ahorradoras en las comunidades rurales de México, en Aire y Energía. Centro Mexicano de Derecho Ambiental.
- 6.-Díaz-Jiménez, R., Berrueta-Soriano, V. y Masera-Cerutti, O. 2011. Estufas de Leña. Red Mexicana de Bioenergía. Cuaderno Temático N° 3. México.

## ÍNDICES DE CALIDAD ENERGÉTICA PARA BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS FORESTALES

Correa F. <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa Académico en Desarrollo Sustentable, Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carretera Huecorio Pátzcuaro km 3, Pátzcuaro, Michoacán, México, C.P. 61614. Tel. (434) 3425532 y 3422307, Fax. (434) 3458088, correa.mendez.fermin@gmail.com

**Palabras Clave:** características, astillas, pelets, briquetas

### Resumen.

Desarrollar el gran potencial de los biocombustibles sólidos forestales en México, requiere caracterizarlos energéticamente, facilitando así su comercialización dentro del territorio. Entre las principales características físicas se encuentran su forma y tamaño, superficie específica, aspecto (color, brillo), densidades, humedades, friabilidad, resistencia a la compresión y absorción de gases; las propiedades químicas más importantes: composición química elemental, composición química por compuestos y poderes caloríficos, además de las físico-químicas: coeficiente de conductividad térmica, combustibilidad e inflamabilidad (temperaturas y tiempos de combustión e inflamación, temperatura máxima de llama, potencia calorífica, densidad energética e índices de calidad energética). Tales características influyen en el comportamiento energético de las astillas, pelets y briquetas [1, 2]. Según Marcos [3], la calidad energética de una astilla [que puede extrapolarse a las leñas] se puede medir según un índice, denominado índice de calidad de la astilla. Su valor es adimensional. El índice de calidad de la astilla,  $ICA = (K1 \cdot PCV + K2 \cdot PCA - K3 \cdot TM - K4 \cdot CQ) / Hh$ , donde:  $K1 =$  Constante, vale  $0.002 \text{ dm}^3/\text{KJ}$ .  $PCV =$  Poder calorífico volumétrico, o densidad energética, medido en  $\text{KJ}/\text{dm}^3$ .  $K2 =$  Constante, medida en  $\text{kg}/\text{W}$ , su valor se está investigando actualmente.  $PCA =$  Potencia calorífica, medida en  $\text{KW}/\text{kg}$ .  $K3 =$  Constante, vale  $0.7 \text{ cm}^{-1}$ .  $TM =$  Tamaño medio de la astilla, como media entre el valor de la longitud, anchura y espesor, medidos en  $\text{cm}$ .  $K4 =$  Constante, vale 2.  $CQ =$  Suma de los porcentajes, en tanto por ciento, de cloro, azufre y nitrógeno.  $Hh =$  Humedad de la astilla, medida en base húmeda, adimensional. Por otra parte, en cuanto a la calidad en pelets [1, 2], denominado  $ICP = (K1 \cdot PCS0 + K2 \cdot D + K3 \cdot (1-M)) / (Hh \cdot FR)$ , donde:  $K1 =$  Constante, en  $\text{kg}/\text{kcal} = 1/4500 \text{ kg}/\text{kcal} = 1/18810 \text{ kg}/\text{KJ}$ .  $PCS0 =$  Poder calorífico superior anhidro, en  $\text{kcal}/\text{kg}$  o en  $\text{KJ}/\text{kg}$ .  $K2 =$  Constante, en  $\text{dm}^3/\text{kg} = 1/1.1 \text{ dm}^3/\text{kg}$ ,  $D =$  Densidad, en  $\text{kg}/\text{dm}^3$ .  $K3 =$  Constante adimensional = 0.5.  $M =$  Tanto por uno en material mineral.  $Hh =$  Humedad en base húmeda.  $FR =$  Friabilidad como media entre la friabilidad y la media de las friabilidades en hogar cerrado y en hogar abierto. Por otro lado, para evaluar la calidad de las briquetas (1, 2), se puede definir el índice de calidad de la briqueta (ICB), siendo  $ICB = (K1 \cdot PCS0 + K2 \cdot D + K3 \cdot TT + K4 \cdot (1-M)) / (Hs \cdot FR)$ , donde  $K1$  se mide en  $\text{kg}/\text{KJ}$ , un valor útil puede ser  $1/18810 \text{ kg}/\text{KJ} = 1/4500 \text{ kg}/\text{kcal}$ .  $PCS0$  es el poder calorífico superior, medido en  $\text{kg}/\text{KJ}$  o en  $\text{kg}/\text{kcal}$ .  $K2$  se mide en  $\text{dm}^3/\text{kg}$ , un valor útil puede ser  $1/1.1 \text{ dm}^3/\text{kg}$ .  $D$  es la densidad, medida en  $\text{kg}/\text{dm}^3$ , (briqueta sin envolver).  $K3$  se mide en  $\text{s}^{-1}$ , un valor útil puede ser  $1/3600 \text{ s}^{-1}$ .  $TT$  es una variable que mide el tiempo total de combustión, para una briqueta de un peso estandarizado, se mide en  $\text{s}$ .  $K4$  es adimensional = 0.5.  $M =$  Tanto por uno en material mineral.  $Hs =$  Humedad en base seca.  $FR =$  Friabilidad como media entre la friabilidad en hogar cerrado y la friabilidad en hogar abierto. Así, en función de todas las clases de las calidades, se pueden determinar las aplicaciones de los biocombustibles, de mayor a menor calidad, respectivamente, en los sectores de la calefacción y cocción a nivel residencial a pequeña y mediana escala [4, 5], así como a nivel de gran escala (generación de calor y energía mecánica) para su uso a nivel industrial (electricidad y anteriores), [6].

### Bibliografía.

1. Camps, M. y Marcos F. (2008). *Los biocombustibles*. Ediciones Mundi-Prensa. España. 384 p.
2. Ortiz, L. (2006). *La biomasa como fuente de energía renovable*. Domaio, España. Universidad de Vigo. 345 p.
3. Marcos F., 2001. Biocombustibles sólidos de origen forestal. AENOR. Madrid.
4. Obernberger I., Thek G. (2010). *The Pellet Handbook*. First ed. London-Washington DC: Earthscan. 593 p.
5. Obernberger, I. and Thek G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*. 27(6). 653-669 p.
6. Moragues, J. A. y Rapallini, A. T. (2003). *Energía de la biomasa*. Proyecto Energético - n. 65. Buenos Aires, Argentina. 24-27 p.

## POTENCIAL SUSTENTABLE DE REDUCCIÓN DE EMISIONES GEI Y COSTOS DE MITIGACIÓN DE OPCIONES DE BIOENERGÍA PARA MÉXICO

García C.A., Riegelhaupt E., Ghilardi A., Masera O., Islas J. y Manzini F.

### Abstract.

La bioenergía es una de las opciones de energía renovable que podría contribuir a la sustitución de combustibles fósiles y a la mitigación de emisiones GEI en México, sin embargo se requiere considerar criterios de sustentabilidad en las evaluaciones sobre su participación en los sistemas energéticos.

En este trabajo realizamos con esta condicionante un escenario exploratorio sobre la participación que podría tener la bioenergía en México para sustitución de combustibles fósiles y mitigación de emisiones GEI.

Los escenarios se construyen de esta manera a partir de una evaluación del potencial de producción de biomasa que cumple criterios de sustentabilidad ambiental. Además definimos principios de factibilidad para la selección de las tecnologías, considerando una amplia gama de demandas energéticas (electricidad, calor, fuerza motriz) utilizadas en distintos sectores de la economía nacional 151 y en las cuales realizamos un estudio detallado de los costos para delinear la dimensión económica de su implementación.

Los resultados muestran que se puede sustituir, usando opciones sustentables de bioenergía, combustibles fósiles que equivalen al 38% del consumo de energía primaria en 2010 (79.9% son combustibles sólidos, 18% biocombustibles líquidos y 2.1% combustibles gaseosos). El potencial de mitigación identificado, equivale al 17% de las emisiones del sector energético en 2010. Los costos de mitigación de la mayoría de las intervenciones analizadas son negativos, lo que significa que son económicamente rentables, en tanto que las restantes tienen costos de mitigación menores a 28 USD/tCO<sub>2e</sub>.

Las opciones de estufas eficientes de leña, hornos eficientes para la producción de carbón vegetal, así como la producción de *pellets* para su uso en el sector industrial, tienen costos de mitigación negativos y bajos costos de inversión por lo que son acciones interesantes para su pronta implementación. Varios de ellos ofrecen importantes ventajas en términos de desarrollo sustentable.

## ÍNDICE DE AUTORES

	<b>Página</b>
<b>A</b>	
Aguilar U.M.G.	119
Albarrán Rivas M.G.	44
Almanza Estrada M.V.	81
Álvarez Navarrete M.	124, 143
Álvarez Vargas A.	105, 122, 141
Amaya Delgado L.	24
Arcos Canseco M.C.	148
Arellano Plaza M.	24
Ariza R.	140
Astorga S.	55, 110
Ávila García J.C.	121
Ávila Reséndiz C.	63
<b>B</b>	
Balderas Cortés J.J.	121
Becerra L.A.	15
Benbelkacem H.	136
Bennet M.	140
<b>C</b>	
Camargo G.	110
Campos García J.	135
Cano Canchola C.	105, 122, 141
Cano Sosa J.	129
Carbajal G.	145
Carmona G.M.	51
Carrasco F.G.	56
Castro A.J.	133
Ceseña Quiñonez J.I.	141
Chabat S.I.	134
Chávez Parga C.	135
Coreño Alonso O.	105, 122, 141
Cortés R.J.A.	69
Correa F.	150
Cruz Gómez J.	128
<b>D</b>	
De los Ríos Ibarra E.	86
De Pavia Zepeda A.	122
Dévora G.E.	55, 110
<b>E</b>	
Elizalde L.A.	127
Ernesto Hernández S.	162
Estrada Martínez R.J.	10
Etchevers J.	140
Evar B.	140
<b>F</b>	
Flores R.J.A.	77
Fuentes A.	125

## G

García C.	160
García C. A.	151
García Pérez E.	63
García Rodríguez G.A.	131
Germain P.	136
Ghilardi A.	146, 151
Góngora Canul C.C.	129
González Castañeda J.	81
González Esquivel C.	140
González L.V.	93
González Y.	110
Gschaedler Mathis A.	24
Guerrero Aguilar A.	141
Gutiérrez J.P.	140

## H

Hernández Guzmán G.	131
Hernández L. F.J	69
Hernández M.O.L.	119
Hernández Santiago E.	147
Hernández V.J.	69, 77
Hernández Zaragoza A.D.	63

## I

Ibarrola R.	140
Islas J.	151
Islas Samperio J.	128

## J

Jaime Castro Montoya A.	135
Jiménez O.R.	51

## K

Kanswohl N.	139
-------------	-----

## L

Lara Bautista J.	63
Larsen J.	140
Leal Castillor J.A.	136
León Becerril E.	44
López Alvarado H.	105
López Domínguez C.	29
López Gómez R.	124
López Vázquez P.	34
López López A.	44, 147
López Puc G.	129
López Romero G.	63

## M

Manzini F.	151
Martínez Jiménez A.	118
Martínez Pacheco M.M.	124
Martínez R.	145
Martínez Romero E.	128
Masera O.	140, 144, 145, 151

Mejía López A.	105
Méndez R.M.	98
Mendoza Chávez E.A.	150
Mendoza Puga L.E.	141
Meza Montenegro M.	121
Miranda Gamboa M.A.	144
Mondaca Fernández I.	121
Montes C.M.E.	98
Montes G.N.	119
Montes M.E.	134
Mora Tovar L.	132
Morales A.F.	69, 73, 77
Morales F.	125
<b>N</b>	
Niehus X.	126
Navarrete Yabur A.E.	129
<b>O</b>	
Ormeño Orrillo E.	128
Ortiz Laurel H.	139
Ortiz Rodríguez N.M.	86
<b>P</b>	
Pacheco López N.A.	10, 29
Pedraza Segura L.	118
Pedreguera F.J.	134
Peña Calva A.	127
Pérez Morales G.	128
Pérez Vázquez A.	63
Picos A.R.	132
Plascencia C.E.	93
Ponce Ortega J.	135
<b>R</b>	
Ramírez Mejía D.	146
Ramírez R.E.	119
Ramos Arroyo Y.R.	141
Ramos U.D.	56
Riegelhaupt E.	140, 151
Rincón S.	110
Rivera I.	130
Rodríguez A.	132
Rodríguez Buenfil I.M.	10, 29
Rodríguez Castrejón U.E.	141
Rodríguez N.E.	133
Rodríguez Ortiz G.	147
Rodríguez Ramírez R.	121
Rosales S.R.	51
Rosas Ramírez F.	128
Rössel Kipping D.	139
Ruiz Aguilar G.M.L.	81
Ruiz Ruiz P.	126
Rutiaga J.G.	133
<b>S</b>	

Salazar S. L.M.	51
Saldaña L.J.	51
Salgado Garciglia R.	124
Salinas H.P.	69, 73, 77
Sánchez Contreras M.A.	10, 29
Sandoval G.	126, 130
Sandoval Núñez D.	24
Santiago R.V.	98
Santos Benítez A.R.	148
Saucedo J.	133
Saucedo Luna J.	135
Schlegel M.	139
Serafín Muñoz A.H.	105, 122, 136, 141
Servín Garcidueñas L.	128
Serrano M.	145
Shackley S.	140
<b>T</b>	
Toledo García I.	128
Toribio Cuaya H.	118
Tzompantzi M.F.J.	69, 77
<b>U</b>	
Uribe G.S.	119
<b>V</b>	
Valdés Rodríguez O.A.	63
Valdez Balero A.	34
Valdez L.C.	56
Valdez Vázquez I.	81
Vargas V.E.	119
Vargas Zúñiga M.M.	81
Vásquez A.	134
Vásquez M.A.	98
Vásquez Medrano R.	118
Villavicencio B.	127
Villavicencio Córdova C.	121
<b>W</b>	
Weber B.	140
<b>Z</b>	
Zagal A.	140
Zamudio Jaramillo M.A.	143

*Tecnologías para la bioenergía en México* es una obra compilada que contiene los trabajos presentados en la IX Reunión Nacional de Bioenergía y se terminó de editar en diciembre de 2013 en la Oficina de Producción de Obras Literarias y Científicas del ITSON en Ciudad Obregón, Sonora, México.

El tiraje fue de 200 Cd's más sobrantes para reposición.



**Red Mexicana de  
Bioenergía**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA**  
Educar para Trascender



**IX Reunión Nacional de la REMBIO 29-31 Octubre 2013, Querétaro, Qro.**

## **Tecnologías para la bioenergía en México**

[www.rembio.org.mx](http://www.rembio.org.mx)

[www.itson.mx](http://www.itson.mx)