



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
GANADERÍA

## RENDIMIENTO DE BIOMASA Y SU TRANSFORMACIÓN A BIOETANOL DE ONCE CULTIVARES DE *Cenchrus purpureus* A DIFERENTES EDADES DE COSECHA

**SERVANDO REYES CASTRO**

**TESIS**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2016

La presente tesis, titulada: **Rendimiento de biomasa y su transformación a bioetanol de once cultivares de *Cenchrus purpureus* a diferentes edades de cosecha**, realizada por el alumno: **Servando Reyes Castro**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD-GANADERÍA

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO:

  
\_\_\_\_\_  
DR. ALFONSO HERNÁNDEZ GARAY

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. JAVIER FRANCISCO ENRÍQUEZ QUIROZ

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DRA. MARÍA MAGDALENA CROSBY GALVAN

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2016

# RENDIMIENTO DE BIOMASA Y SU TRANSFORMACIÓN A BIOETANOL DE ONCE CULTIVARES DE *Cenchrus purpureus* A DIFERENTES EDADES DE COSECHA

Servando Reyes Castro  
Colegio de Postgraduados, 2016.

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue, evaluar el rendimiento de biomasa de once variedades del género *Cenchrus purpureus*: Taiwán, King Grass, Merkeron, Elefante, CT-115, OM-22, Maralfalfa, Mott, Roxo, Vrokwona y Caña Africana a cuatro frecuencias de corte (90, 120, 150 y 180 días de edad); así como realizar los análisis de laboratorio pertinentes al cultivar Mott para conocer su potencial en la producción de bioetanol. El mayor rendimiento de biomasa ( $p < 0.05$ ) a los 90 días fue de 51364 kg de MS  $\text{ha}^{-1}$   $\text{año}^{-1}$  para el cultivar Mott. Al comparar el rendimiento entre edades de rebrote, se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), siendo a los 180 días donde se produjo la mayor cantidad de forraje (41121 kg de MS  $\text{ha}^{-1}$   $\text{año}^{-1}$ ). En cuanto a las alturas antes del corte, se encontraron diferencias ( $p < 0.05$ ) entre cultivares, siendo Merkeron, Elefante, Roxo, Vrokwona y Caña Africana los que presentaron las mayores alturas con 2.83, 2.89, 2.82, 2.85 y 2.83 m, respectivamente. En promedio, la mayor altura promedio de plantas se observó a los 180 días con 2.90 m ( $p < 0.05$ ). En el cultivar Mott, el mayor contenido de celulosa y hemicelulosa ( $p < 0.05$ ) fue de 50.3 y 40.2 %, respectivamente, ambas a los 90 días de rebrote. El menor contenido de lignina se observó ( $p < 0.05$ ) a los 90 días con 19.8 %. El poder calorífico ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) presentó diferencias ( $p < 0.05$ ) entre frecuencias de corte, teniendo el mejor comportamiento a los 90 días (16.95  $\text{MJ kg}^{-1}$ ). El mayor rendimiento teórico de bioetanol ( $\text{L ha}^{-1}$   $\text{año}^{-1}$ ) se presentó en los cortes cada 180 días con 14202.9 L. Dado el rendimiento de MS y características químicas observadas, los once cultivares de *Cenchrus purpureus*, presentan un alto potencial para la producción de bioetanol.

Palabras clave: materia seca, bioetanol, composición química, poder calorífico.

# BIOMASS YIELD AND ITS BIOETHANOL TRANSFORMATION OF ELEVEN *Cenchrus purpureus* CULTIVARS TO DIFFERENT HARVEST FREQUENCIES

Servando Reyes Castro

Colegio de Postgraduados, 2016.

## ABSTRACT

The objective of the present research was to evaluate the biomass yield of eleven cultivars of *Cenchrus purpureus*: Taiwan, King Grass, Merkeron, Elephant, CT-115, OM-22, Maralfalfa, Mott, Roxo, Vrokwona and Caña Africana at four cutting frequencies (90, 120, 150 and 180 days of age); As well as carry out the laboratory analyzes pertinent to the Mott cultivar to know its potential in the bioethanol production. The highest biomass yield ( $p < 0.05$ ) at 90 days was 51,364 kg DM ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> for the Mott cultivar. When comparing herbage yield among cutting frequencies, significant differences were found ( $p < 0.05$ ), with the highest herbage yield (41,121 kg DM ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) being produced at 180 days. In terms of heights before cutting, differences ( $p < 0.05$ ) were found among the cultivars, with Merkeron, Elephant, Roxo, Vrokwona and Caña Africana being those with the highest heights of 2.83, 2.89, 2.82, 2.85 and 2.83 m, respectively. In average, the highest plant height was observed at 180 days with 2.90 m ( $p < 0.05$ ). In the Mott cultivar, the highest content of cellulose and hemicellulose ( $p < 0.05$ ) was 50.3 and 40.2%, respectively, both at 90 days of regrowth. The lowest lignin content was observed ( $p < 0.05$ ) at 90 days with 19.8%. The calorific value (MJ kg<sup>-1</sup>) presented differences ( $p < 0.05$ ) between cutting frequencies, with the best behavior at 90 days (16.95 MJ kg<sup>-1</sup>). The highest theoretical yield of bioethanol (L ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) was presented in the cuts every 180 days with 14202.9 L ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. Given the DM yield and chemical characteristics observed in the eleven cultivars of *Cenchrus purpureus*, they present a high potential for production of bioethanol.

Keywords: dry matter, bioethanol, chemical composition, heating value

## DEDICATORIA

A mis padres **Ramiro Reyes** y **María Elena Castro**:

Por el amor, entrega y dedicación al cuidado de sus hijos, por no rendirse nunca ante las adversidades de la vida y hacer de mí el hombre que ahora soy. Gracias por realizar tantos sacrificios para darme estudios y brindarme la posibilidad de tener un mejor futuro, por motivarme y apoyarme, ya que según sus palabras, no podrían heredarme dinero...ahora sé que la herencia que me dejan es de un valor incalculable y no me alcanzará la vida para pagar por ello.

A mi esposa **Diana**:

Por ser mi compañera, mi amiga, mi apoyo incondicional, por luchar junto a mí en la dura batalla de la vida. Gracias por darme tanto amor, por motivarme a seguir adelante, por darme fuerza en los momentos de flaqueza, por no dejarme caer, y sobre todo, por el regalo más grande en la vida: convertirme en padre.

A mi hija **Sarah**:

Mi más preciado tesoro, mi más grande motivación... nuestra razón de vivir y de luchar todos los días.

Agradezco a Dios por tenerlas conmigo porque llenan mi vida de luz y alegría. **Diana y Sarah, LAS AMO.**

A mis hermanos: **Martín, Ramiro, Santiago Alfonso** y **Luz Elena**:

Por ser parte de mi vida y llenarla de cariño y apoyo. Gracias por esos sacrificios, que aunque tal vez no recuerdan, hicieron por mí.

A mi segunda familia:

**Eulogio Gutiérrez** y **Cruz Arenas** que han sido para mí como unos padres, porque he recibido de ustedes cariño, apoyo y motivación para cerrar este ciclo. **Armando, Areli** y **Tita** se convirtieron en mis amigos, cómplices y hermanos... ¡soy afortunado de tenerlos en mi vida!

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados, Recursos Genéticos y Productividad-Ganadería por la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) campo experimental “La Posta” y campo experimental “San Martinito” por todo el apoyo y las facilidades brindadas para la realización de la fase de campo y laboratorio de este proyecto.

Al Dr. Alfonso Hernández Garay por dirigir este trabajo, por sus consejos, sugerencias y por la dedicación para que esta tesis se culminara de buena manera.

Al Dr. Javier Francisco Enríquez Quiroz por el tiempo dedicado, por todo el apoyo y por estar siempre pendiente de que este trabajo se realizara lo mejor posible.

Al Dr. José Amador Honorato Salazar por el apoyo, paciencia, colaboración y valiosas enseñanzas en la realización de esta investigación.

A la Dra. Maria Magdalena Crosby Galván por su valiosa participación y aportación a la redacción de éste escrito.

Al Dr. Humberto Vaquera Huerta por el tiempo y todo el apoyo brindado en la parte estadística de este trabajo.

A **Faustino Prieto** por toda la ayuda en la fase de campo de esta investigación.

## CONTENIDO

LISTA DE CUADROS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	ix
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	3
<b>1.2.1. Objetivo general</b> .....	3
<b>1.2.2. Objetivos específicos</b> .....	3
II. REVISION DE LITERATURA .....	4
<b>2.1. CARACTERISTICAS DEL PASTO <i>Cenchrus purpureus</i></b> .....	4
2.1.1. Generalidades .....	4
2.1.2. Características morfológicas .....	5
2.1.3. Adaptación a suelo y clima .....	6
2.1.4. Preparación del terreno .....	7
2.1.5. Establecimiento .....	7
2.1.6. Rendimiento de forraje .....	8
<b>2.2. BIOMASA LIGNOCELULOSICA</b> .....	9
2.2.1. Composición química y estructura de la biomasa .....	9
2.2.2. Lignocelulosa .....	11
2.2.3. Celulosa .....	11
2.2.4. Hemicelulosa .....	12
2.2.5. Lignina .....	13
2.2.6. Biomasa .....	13
2.2.7. Biomasa lignocelulósica y Producción de etanol .....	14
<b>2.3. LOS BIOCOMBUSTIBLES Y EL PANORAMA ACTUAL</b> .....	15
2.3.1. De primera generación (1G) .....	16
2.3.2. De segunda generación (2G) .....	17
<b>2.4. BIOCOMBUSTIBLES EN MEXICO: PANORAMA Y PERSPECTIVAS</b> .....	19
<b>2.5. PROBLEMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A NIVEL COMERCIAL</b> .....	24
IV. MATERIALES Y METODOS .....	28
<b>4.1. FASE DE CAMPO</b> .....	28
4.1.1. Localización .....	28
4.1.2. Establecimiento del experimento .....	28

4.1.3. Variables evaluadas.....	29
4.2.1. Liberación de extractivos.....	31
4.2.2. Determinación de holocelulosa .....	33
4.2.3. Determinación de celulosa y hemicelulosa.....	34
4.2.4. Determinación de lignina insoluble.....	35
4.2.5. Poder calorífico .....	36
4.2.6. Rendimiento teórico de etanol.....	36
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	39
<b>5.1. RENDIMIENTO DE MATERIA SECA (MS) .....</b>	<b>39</b>
<b>5.2. ALTURA DE PLANTA .....</b>	<b>41</b>
<b>5.3. DENSIDAD POBLACIONAL DE TALLOS.....</b>	<b>43</b>
<b>5.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL PASTO MOTT .....</b>	<b>44</b>
5.4.1. Porcentaje de Holocelulosa.....	44
5.4.2. Porcentaje de celulosa .....	45
5.4.3. Porcentaje de hemicelulosa .....	46
5.4.4. Porcentaje de lignina.....	46
5.4.5. Porcentaje de extractivos .....	47
<b>5.5. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA Y HUMEDAD .....</b>	<b>47</b>
5.5.1. Poder calorífico y humedad.....	47
5.5.2. Producción de energía .....	49
<b>5.6. PRODUCCIÓN TEÓRICA DE ETANOL.....</b>	<b>49</b>
VI. CONCLUSIONES.....	51
VII. LITERATURA CITADA .....	52



## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Composición química de algunos materiales lignocelulósicos de interés industrial.....	<b>10</b>
<b>Cuadro 2.</b> Proyectos para la producción de bioetanol en el estado de Veracruz .....	<b>21</b>
<b>Cuadro 3.</b> Volumen de ventas de gasolinas a nivel nacional.....	<b>23</b>
<b>Cuadro 4.</b> Costo de producción por litro de etanol (pesos/L).....	<b>26</b>
<b>Cuadro 5.</b> Rendimiento anual de forraje de 11 variedades de <i>Cenchrus pupureus</i> cosechado a diferentes frecuencias de corte (kg MS ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ).....	<b>41</b>
<b>Cuadro 6.</b> Altura promedio antes del corte de 11 variedades de <i>Cenchrus pupureus</i> cosechado a diferentes frecuencias (m).....	<b>42</b>
<b>Cuadro 7.</b> Densidad poblacional de tallos de 11 variedades de <i>Cenchrus pupureus</i> cosechado a diferentes frecuencias de corte (tallos m <sup>2</sup> ).....	<b>44</b>
<b>Cuadro 8.</b> Composición química del pasto Mott.....	<b>47</b>
<b>Cuadro 9.</b> Caracterización energética del pasto Mott.....	<b>49</b>
<b>Cuadro 10.</b> Rendimiento teórico de etanol.....	<b>51</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema del género <i>Pennisetum</i> .....	<b>6</b>
<b>Figura 2.</b> Peso de muestra completa.....	<b>30</b>
<b>Figura 3.</b> Unidad de extracción automática marca Buchi.....	<b>32</b>
<b>Figura 4.</b> Equipo y material para extracción en agua.....	<b>33</b>
<b>Figura 5.</b> Equipo y proceso para determinación de Holocelulosa.....	<b>34</b>
<b>Figura 6.</b> Equipo y proceso para determinación de lignina.....	<b>36</b>
<b>Figura 7.</b> Calorímetro y bomba calorimétrica.....	<b>36</b>

## I. INTRODUCCIÓN

La energía de biomasa es la energía contenida en la materia orgánica y que tiene diversas formas de aprovechamiento, según se trate de materia de origen animal o vegetal. El aprovechamiento de la energía de la biomasa se hace directamente (por ejemplo, por combustión) o por transformación en otras sustancias que pueden ser aprovechadas más tarde como combustibles o alimentos (De Lucas *et al.*, 2004; Escobar y Villamil, 2008).

Lo anterior es una alternativa que contribuye a la diversificación en las fuentes de energía de los países y al desarrollo de tecnologías para las energías emergentes, reduciendo las emisiones de gases con efecto invernadero, la generación de empleo en el área rural y la sustitución de la importación de combustibles (Islas *et al.*, 2006).

Los países de América Latina y el Caribe vienen registrando un crecimiento más dinámico en los últimos años, revitalizado por la recuperación de sus términos de intercambio y estimulado por la mayor demanda mundial de los recursos naturales disponibles en la región. Sin embargo, este nuevo ciclo de crecimiento ha coincidido también con una fuerte elevación de los precios del petróleo. Este fenómeno, junto a problemas vinculados a la seguridad del abastecimiento, han puesto en evidencia los problemas que podría ocasionar la dependencia energética sobre las opciones de crecimiento y equidad social en el futuro. Sin embargo, el cambio de los precios relativos entre las fuentes energéticas y las nuevas tecnologías disponibles, han

revalorizado las ventajas competitivas del patrimonio natural y han mejorado la factibilidad económica de introducir fuentes alternativas y renovables de energía (Coviello *et al*, 2007).

El daño al ambiente que está dejando el uso de combustibles fósiles (como el petróleo), es uno de los criterios que lleva a plantear la necesidad de desarrollar tecnologías alternativas. El Protocolo de Kioto hace un llamado a comprometerse en la disminución de emisión de gases de efecto invernadero, lo cual justificaría, en primera instancia, la producción de biocombustibles que, para algunos expertos en la materia, prometen condiciones de sustentabilidad que no cumplen los combustibles fósiles. Sin embargo, en México, las políticas para la gestión en relación a la producción de biocombustibles están influenciadas por las políticas que han implementado los países más industrializados como Estados Unidos y no en una política propia (González y Castañeda, 2008).

El etanol es un combustible que puede producirse a partir de un gran número de plantas, con una variación, según el producto agrícola, del rendimiento entre el combustible consumido y el generado en dicho proceso. Este etanol, conocido como bioetanol, para algunos se perfila como un recurso energético potencialmente sostenible que puede ofrecer ventajas ambientales y económicas a largo plazo (Monbiot, 2008).

México se beneficiaría de la producción del etanol como combustible de muchas formas: creación de empleo, desarrollo de la economía rural, ampliación de las infraestructuras sociales en zonas rurales, mejora de la seguridad energética, conservación de los recursos petrolíferos, expansión de la agricultura a tierras más secas, motivación de la comunidad científica y tecnológica, incentivos a la industria de bienes de producción, mejora del medio ambiente local y global, entre otras (SENER, 2006).

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Evaluar el rendimiento de biomasa de 11 cultivares de *C. purpureus*, así como caracterizar química y energéticamente al menos 1 cultivar, a diferentes edades de rebrote para determinar su potencial como materia prima para la producción de etanol.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar el porcentaje de celulosa y hemicelulosa del cultivar Mott como valor necesario para estimar el rendimiento de etanol.
- Determinar el rendimiento teórico de etanol del cultivar Mott a través del porcentaje de celulosa y hemicelulosa.

## II. REVISION DE LITERATURA

### 2.1. CARACTERISTICAS DEL PASTO *Cenchrus purpureus*

#### 2.1.1. Generalidades

La producción de forrajes está limitada por las condiciones de temperatura y humedad presentes en cada lugar, así pues, la calidad de éstos forrajes se encuentra en función de dichos factores (Velasco *et al.*, 2006).

Las cultivares de *Cenchrus purpureus*, antes *Pennisetum purpureum*, tienen como característica ser los de mayor potencial de crecimiento y producción de biomasa en el mundo, tales como: el zacate Taiwán, el Gigante o Elefante, el King grass, Merkerón, Napier, Maralfalfa, Roxo y otros. Este grupo de plantas forrajeras presenta un hábito de crecimiento erguido, con cepas muy vigorosas y porte muy alto. Todas estas plantas son muy parecidas en morfología, fisiología y manejo (López y Enríquez, 2011).

Son plantas originarias de África, de talla alta, pueden alcanzar los 3 m (o más) en suelos fértiles. De crecimiento rápido, nutritivas para el ganado cuando la planta es joven, a medida que avanza la edad, la proporción de celulosa se incrementa disminuyendo su calidad nutritiva. *Cenchrus purpureus*, fue descubierta en Sudáfrica en 1908, desde entonces se ha propagado por todo el mundo. (Havard-Duclos, 1969; Bemhaja, 2000).

### **2.1.2. Características morfológicas.**

Son gramíneas perennes cespitosas de la tribu Paniceae, se han naturalizado en América tropical y subtropical. La mayoría de los tipos son altos y robustos aunque han sido desarrollado tipos enanos. De raíces gruesas y rizomatosas, tallos cilíndricos y sólidos, folíolos lanceolados, generalmente pubescentes, que pueden alcanzar una longitud de 1.25 m. Su inflorescencia es una espiga de forma cilíndrica que se forma en el ápice de los tallos, cubierta densamente por espiguillas (Figura 1). Son plantas C4, presentan alta tasa fotosintética y consecuentemente alta producción de materia seca. Las bajas temperaturas son la mayor limitante para su producción de forraje. El mayor volumen radicular se encuentra en los primeros 15 cm de profundidad, dependiendo del suelo (Bemhaja, 2000; Marmol, 2006).

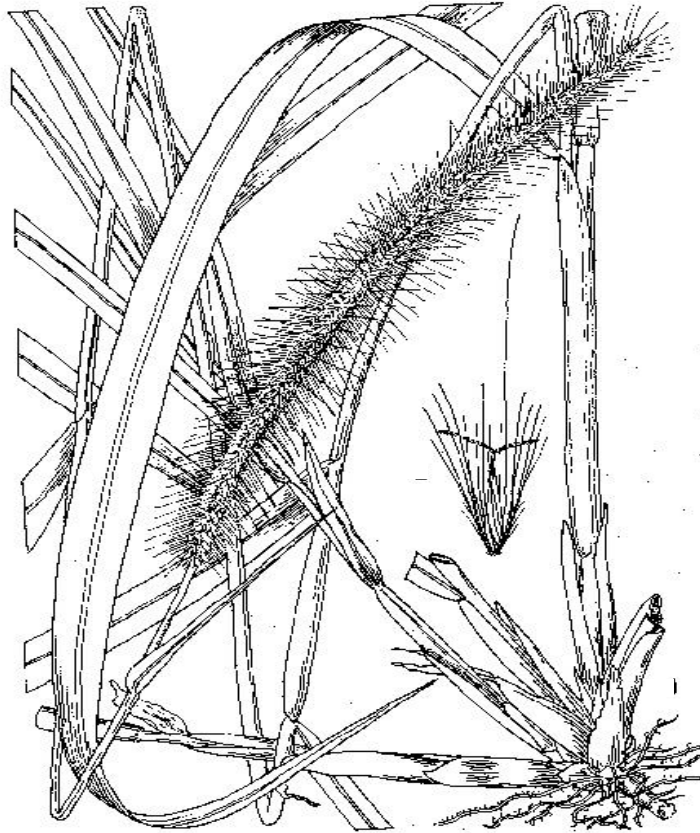


Figura 1. Esquema del género *Pennisetum*

### **2.1.3. Adaptación a suelo y clima**

Los cultivares de esta especie se adaptan a una gran variedad de condiciones edafoclimáticas dentro de las regiones tropicales, aunque es preferible establecerlos en terrenos fértiles, en los que puedan expresar su capacidad productiva como terrenos con poca pendiente, ubicados a una altura menor de 800 m.s.n.m., suelos profundos y fértiles sin problemas fuertes de acidez o alcalinidad y de preferencia en las zonas más húmedas del clima cálido subhúmedo y las no pantanosas del clima cálido húmedo, con más de 1,000 mm de precipitación anual (López y Enríquez, 2011).

Crece bien desde nivel de mar hasta 2200 m, su mejor desarrollo se tiene a 1500 m.s.n.m.; la variedad Taiwán tiene adaptación hasta 2300 m. Presentan buen crecimiento a temperaturas de 18 a 30 °C, con el óptimo a 24 °C., resiste alta humedad y una precipitación entre 800 y 4000 mm anuales (www.tropicalforages, 2016).

#### **2.1.4. Preparación del terreno**

La preparación del terreno se comienza realizando chapeo para eliminar las malezas existentes en el terreno y facilitar la mecanización, posteriormente debe procederse con un barbecho con arado de discos, esto con la finalidad de voltear el terreno e incorporar la materia orgánica presente. Cuando se trata de terrenos con alto grado de compactación debe realizarse al menos un paso de subsuelo para favorecer la aireación y la infiltración, así como romper las capas compactas. Posteriormente se recomiendan dos pasos de rastra para mullir los terrones y para destruir las malas hierbas, uno inmediatamente después del barbecho y el segundo antes de la siembra para eliminar malezas (López y Enríquez, 2011).

#### **2.1.5. Establecimiento**

El establecimiento se realiza a través de material vegetativo, bien por cepas o tallos, ya que producen pocas semillas y éstas tienen un bajo porcentaje de germinación. La plantación de cepas es muy efectiva pero también muy costosa, por lo cual es preferible hacer la plantación con tallos que tienen entre 3 y 5 meses edad. Cuando la plantación se hace con tallos, éstos se cortan en pedazos con 3 nudos, y



cada uno de ellos se entierra a la mitad del lomo del surco, debiendo quedar un nudo enterrado, otro a ras de suelo o apenas tapado y el tercero expuesto totalmente, en un ángulo aproximado de 45°, a unos 80 cm entre tallos. Si la distancia entre surcos es de 92 cm, y en cada surco la distancia entre tallos es de 80 cm, entonces el arreglo topológico es de 92 cm por 80 cm, lo que hace una densidad de 13,587 puntos por ha, para lo cual se requieren de 3 a 4 toneladas de tallos por ha. También se pueden colocar estos enterrados a cordón simple o a doble cordón en el fondo del surco y taparlos con una capa de no más de 5 cm de tierra (López y Enríquez, 2011).

#### **2.1.6. Rendimiento de forraje**

En condiciones óptimas de suelo, humedad y fertilidad, algunas variedades sobrepasan las 300 t año<sup>-1</sup> de materia verde, sin embargo, lo más frecuente es esperar rendimientos que fluctúen entre 35 a 40 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de MS, con 6 cortes al año, cosechando cada 60 días (Rodríguez-Carrasquel, 1983).

En México se han encontrado rendimientos de hasta 160 t MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para algunas variedades cuando se usa riego y se aplica urea como fuente de nitrógeno a razón de 300 kg de N ha<sup>-1</sup> (Ramos *et al.*, 2013).

En Venezuela se han reportado rendimientos de 40,9, 29,7 y 37,7 t MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para las variedades Taiwán, Roxo y Maralfalfa respectivamente establecidos bajo temporal (Márquez *et al.*, 2007).

Lo anterior, convierte al género *Cenchrus* en una muy buena opción para la producción de biocombustible de segunda generación, debido a que presenta un alto rendimiento de biomasa. Al usar materiales lignocelulósicos para la producción de bioetanol se cumple con la premisa de no entrar en competencia con los cultivos usados para la alimentación humana y con las áreas destinadas para producción agrícola, evitando provocar un eventual alza en los precios de dichos cultivos.

## **2.2. BIOMASA LIGNOCELULOSICA**

### **2.2.1. Composición química y estructura de la biomasa**

Las fibras que se obtienen de las plantas han sido empleadas en muchos procesos industriales, algunas de estas plantas y su composición química pueden observarse en el cuadro 1. Principalmente en el sector de papel y textil. En los últimos años, estos materiales lignocelulósicos han tenido aplicaciones como fuente de energía. En la actualidad se producen biocombustibles a partir de cultivos que son materias primas para productos comestibles, mientras tanto, se están investigando cultivos que no compiten en el mercado de materias primas comestibles (Prinsen, 2010).

Las gramíneas constituyen una buena fuente de energía renovable debido a que los azúcares contenidos en los polisacáridos de la pared celular pueden ser transformados en combustibles líquidos, y la pared celular usada para producción de calor o electricidad (Service, 2007). La pared celular de las plantas contiene, celulosa,

**Cuadro 1.-** composición química de algunos materiales lignocelulósicos de interés industrial

Cultivo	Extraíbles	Celulosa	lignina	Ácido urónico	Arabinano	Xilano	manano	Galactano
Bagazo de caña	3.78	39.01	23.09	2.16	2.06	22.05	0.35	0.46
Rastrojo de maíz	5.61	37.69	18.59	2.99	2.42	21.61	0.38	0.87
Paja de trigo	12.95	32.64	16.85	2.24	2.35	19.22	0.31	0.75
Pinus radiata	2.7	41.7	25.9	2.5	1.6	5.9	10.7	2.4
Eucalipto	4.15	48.07	26.91	4.07	0.3	10.42	1.23	0.74
Swichgrass	16.99	30.97	17.56	1.17	2.75	20.42	0.29	0.92
Sorgo dulce	22.03	34.01	16.09	1.07	1.65	14.14	0.2	0.52

Fuente: tomado de Prinsen (2010).

hemicelulosa, lignina, sustancias pépticas,  $\beta$ -glucanos y pequeñas cantidades de extractivos y cenizas (Girio *et al.*, 2010), mientras que en el contenido celular se pueden encontrar almidón, azúcares y fructanos y ocasionalmente ácidos orgánicos (Ishler y Varga, 1993).

La matriz en la pared primaria está formada por celulosa, hemicelulosas, pectinas y glicoproteínas, que constituyen del 60 al 75% del peso seco, siendo la porción fibrilar entre un 25 y 40%. En la pared secundaria esa matriz está formada básicamente por celulosa, hemicelulosas y lignina, mientras que las pectinas y las proteínas desaparecen (Waldron *et al.*, 2003).

### **2.2.2. Lignocelulosa**

La lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas, esta biomasa producida por la fotosíntesis es la fuente de carbono renovable más prometedora para solucionar los problemas actuales de energía (Cuervo *et al.*, 2009).

Está compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina, y es el principal y más abundante componente de la biomasa producida por la fotosíntesis, anualmente se producen 200,000 millones de toneladas en el mundo (Ragauskas *et al.*, 2006).

Una solución apropiada y renovable es el uso de la energía solar en forma de biomasa (bioenergía) y puede ser potencialmente representado como cosechas energéticas y residuos lignocelulósicos (Castro *et al.*, 2009).

El material lignocelulósico es atractivo por su bajo costo y alta disponibilidad en diversos climas y localidades, sin embargo, el principal impedimento para su utilización es la falta de una tecnología de bajo costo para degradar la fracción recalcitrante de la biomasa (Cuervo *et al.*, 2009).

### **2.2.3. Celulosa**

La celulosa es el biopolímero más abundante en la tierra y el principal componente de la pared celular (Brown, 2003). Está compuesto de cadenas lineales de celobiosa (D-glucopiranosil- $\beta$ -1,4-D-glucopiranososa) de aproximadamente 10.000

unidades glicosídicas (Prinsen, 2010). Estas cadenas largas (llamadas fibrillas elementales) unidas entre sí por enlaces de hidrógeno y fuerzas de van der Waals, juntas forman la fibra de celulosa (Pérez *et al.*, 2002). Gran parte de la celulosa está presente, en la célula vegetal, como microfibrillas empaquetadas muy densamente (Prinsen, 2010).

Jacobsen y Wyman (2000), describen a la celulosa como altamente cristalina dada su estructura (~50 y 90%), debido a la presencia de puentes de hidrógeno inter e intramoleculares que influyen en su morfología, rigidez, orientación, resistencia y reactividad, las zonas de alta cristalinidad son difíciles de hidrolizar en sus unidades monoméricas, mientras que las zonas de menor cristalinidad (zonas amorfas) son accesibles y susceptibles a las reacciones químicas y susceptibles a la degradación enzimática (Béguin y Aubert, 1994).

#### **2.2.4. Hemicelulosa**

Es la encargada de proporcionar rigidez a la pared celular en interacción con la celulosa y la lignina (Sun *et al.*, 1998). Presenta grandes variaciones con la celulosa en cuanto a composición y disposición entre los distintos tipos de biomasa (Puls, 1997). Son polímeros ramificados que están compuestos de pentosas y hexosas, que, para ser hidrolizados y poder liberar azúcares, pueden usarse enzimas (hemicelulasas) o ácidos. Las pentosas como xilosa y arabinosa se pueden transformar a etanol por medio de levaduras y bacterias, generalmente dando un bajo rendimiento, mientras que las hexosas como glucosa, galactosa y manosa se fermentan fácilmente a etanol por

muchos organismos. Dado que la xilosa comprende del 15-30 % de la biomasa lignocelulósica de maderas latifoliadas, restos agrícolas y pastos, cuando se fermenta, aumenta la eficiencia en el proceso de obtención de alcohol (Aristidou y Penttila, 2000; Sues *et al.*, 2005).

### **2.2.5. Lignina**

Según Scheller y Ulvskov (2010), la lignina puede alcanzar hasta un 30 % en peso seco, de las paredes celulares secundarias. Es el segundo biopolímero más abundante dentro de la estructura de la pared celular de los materiales lignocelulósicos, generalmente contiene tres precursores aromáticos incluyendo alcohol coniferílico (4-hidroxi-3-metoxicinámico), sinapyl (4-hidroxi-3,5-dimetoxicinámico) y *p*-coumarico (4-hidroxicinámico), estos precursores forman dentro de la lignina moléculas de guaiacyl-(G), syringyl-(S) y *p*-hydroxyphenyl (H) respectivamente (Dashtban *et al.*, 2010).

Su principal función es dar soporte estructural a la planta, impermeabilidad y resistencia, tanto a ataques microbianos como al estrés oxidativo. Es un polímero insoluble en agua por lo cual su degradación es complicada (Fengel y Wegener, 1984).

### **2.2.6. Biomasa**

Se define como el material vegetal, marítimo y terrestre, incluidos los residuos orgánicos industriales y municipales sujetos a degradación térmica, química o

enzimática; producida a partir de la fotosíntesis, donde las plantas, al combinar dióxido de carbono y agua, producen oxígeno y energía, la cual se almacena en forma de carbohidratos (Aguilar, 2003).

### **2.2.7. Biomasa lignocelulósica y Producción de etanol**

El uso de la biomasa lignocelulósica, parece tener más perspectivas como fuente de materias primas para la obtención de etanol, debido a que el empleo de granos en la producción de etanol, es inaceptable, desde el punto de vista ético, en un mundo donde una gran parte de la población pasa hambre, aunque debe analizarse con gran profundidad y con un enfoque objetivo, que incluya todas las implicaciones actuales y futuras de estas tecnologías, sin caer en un falso optimismo, incluyendo las limitaciones cada vez mayores de la tierra disponible en el mundo para la agricultura, que ya es escasa en muchos lugares y es necesario darle el uso más racional y eficiente (Abril y Navarro, 2012).

Las cosechas de materiales energéticos lignocelulósicos que no se utilicen para la alimentación humana podrían ayudar a disminuir la erosión del suelo, así como proteger la diversidad natural (Castro *et al.*, 2009).

### **2.3. LOS BIOCOMBUSTIBLES Y EL PANORAMA ACTUAL**

La historia de los biocombustibles se remonta a finales del siglo XIX. Aunque desde 1895, cuando Rudolf Diesel desarrolló el primer motor diésel, estaba previsto que funcionara con aceite de cacahuate. En 1908, Henry Ford desarrolla su primer automóvil y se pensaba que funcionara con etanol. A principios de los años 20, la Standar Oil en Estados Unidos, ya utilizaba una mezcla de gasolina con 25% de etanol (Salinas y Gasca, 2009).

Los combustibles fósiles (el petróleo y sus derivados) como fuente de energía no renovable, están presentando señales de agotamiento y se estima que a mediano plazo ya no será posible cubrir la demanda mundial. Esta situación, sumada a la contaminación ambiental y al calentamiento global, provocados en gran medida por el uso de este tipo de combustibles, es un reto de enormes proporciones, pero también una oportunidad para la implementación de energías renovables (IICA, 2007).

Hoy en día, los biocombustibles como fuentes alternas de energía, han tenido un papel muy importante en las necesidades energéticas de la población mundial, ya que la demanda de energía en la mayoría de los países va creciendo. Esta alternativa energética ofrece ventajas de tipo ambiental, social y económico, como la disminución en la emisión de contaminantes, incremento del empleo y de la seguridad energética, especialmente en áreas rurales, disminución de la importación de combustibles (Gonsalves, 2006).



Existen, diversos tipos de biocombustibles y se les clasifica de acuerdo al insumo o materia prima y a la tecnología empleada para producirlos. Debido a los avances en la tecnología, esta clasificación se realiza por generaciones. A continuación se describen los de primera y segunda generación, aunque se han clasificado hasta cuarta generación (Álvarez, 2009).

### **2.3.1. De primera generación (1G)**

Algunos de los insumos provienen de cultivos agrícolas y están conformados por las partes alimenticias de las plantas, que tienen un alto contenido de almidón, azúcares y aceites (Álvarez, 2009), por ejemplo cereales (maíz, trigo y cebada), tubérculos (yuca, camote, patata y malanga), celulosa (madera y residuos agrícolas), y sacarosa (remolacha, caña de azúcar, melaza y sorgo dulce), esto para el caso de bioetanol (Salinas y Gasca, 2009). Para la producción de biodiesel se pueden usar: aceite de semilla de girasol, aceite de soya, aceite de palma, aceite de ricino (higuerilla), aceite de semilla de algodón, aceite de coco, aceite de cacahuate, entre otros. También pueden emplearse las grasas animales, grasas y aceites de desecho provenientes de la cocción y elaboración de alimentos, y desperdicios sólidos orgánicos (Álvarez, 2009). Algunos de los cultivos empleados para obtener biocombustibles de primera generación también pueden ser usados para obtener biocombustibles de segunda generación, tal es el caso del sorgo dulce, y la caña de azúcar, de los cuales se puede emplear el bagazo como materiales lignocelulósicos para obtención de azúcares fermentables.

### **2.3.2. De segunda generación (2G)**

Podemos considerar como biocombustibles de segunda generación a aquellos que utilizan materias primas no convencionales (Viguiristi, 2008).

Se distinguen de los de primera generación debido a que se obtienen de vegetales que no tienen una función alimentaria, y se producen con innovaciones tecnológicas que permiten ser más ecológicos y avanzados que los actuales, se pueden cultivar en tierras marginales que no se emplean para el cultivo de alimentos (Salinas y Gasca, 2009).

Para obtener biocombustibles de segunda generación se usan residuos agrícolas y forestales como el bagazo de la caña de azúcar, rastrojo de maíz, paja de trigo, aserrín, hojas y ramas secas de árboles, etcétera. Los procesos de producción tienen un nivel de complejidad más alto que los de primera generación, como la fermentación y sacarificación, y el proceso Fischer-Tropsch. Este último se le conoce también como proceso GTL y proceso BTL, cuyas siglas en inglés provienen de “Gas-To-Liquids” y “Biomass-To-Liquids” respectivamente, los cuales consisten en la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa, para después sintetizar algún combustible líquido como el etanol. Mediante los procesos de segunda generación se fabrica etanol, metanol, gas de síntesis (mezcla de anhídrido carbonoso, mejor conocido como monóxido de carbono, e hidrógeno), biodiesel, entre otros (Álvarez, 2009).

En general, todos los países tienen centros de investigación agrícola donde se llevan a cabo investigaciones sobre distintos aspectos de la producción de materias primas para la producción de biocombustibles. Sin embargo, la investigación e innovación para la producción de etanol es limitada a unos pocos países, entre ellos, EE UU, Brasil, México, Colombia y Argentina (IICA, 2007). Aunque los mayores productores son Brasil y Estados Unidos, los cuales producen etanol a partir de caña de azúcar y maíz, esto ha generado debate social ya que ambos cultivos son usados para la alimentación humana, lo cual llevaría a un eventual encarecimiento en el precio de los alimentos (Castro *et al.*, 2009).

Por otra parte, estos mismos países (con excepción de Venezuela) son los principales consumidores de gasolina del continente americano, siendo de la siguiente manera: Estados Unidos (86,2%), México (6,21%), Brasil (2,52%), Venezuela (2,0%), Colombia (0,7%) y Argentina (0,7%) los países que presentan mayor nivel de consumo, el 1.67% restante corresponde al resto de países (IICA, 2007).

El etanol es el biocombustible más utilizado actualmente. En EE.UU., más de 6,5 billones de litros son agregados a la gasolina cada año, con el fin de aumentar el rendimiento de los vehículos y reducir la contaminación. En este país actualmente se utiliza una mezcla que contiene 10% de etanol (gasohol). En menor cantidad se usa la mezcla con 85% de etanol. Además éste puede utilizarse puro (Stratta, 2000).

En Colombia por ejemplo, sin excepción, todos los vehículos que circulan en esta nación, usan gasolina mezclada con un promedio de 25% de etanol originado en la biomasa. Brasil consume 15 mil millones de litros por año para alimentar su flota de 42 millones de vehículos. Adicionalmente, desde finales del 2003, circulan en Brasil 200 mil autos Flex-Fuel, que pueden utilizar indistintamente gasolina, alcohol o cualquier mezcla de esos dos combustibles y alrededor de 4 millones de automóviles brasileños se mueven con etanol al 95 % (Higuera *et al*, 2007).

#### **2.4. BIOCOMBUSTIBLES EN MEXICO: PANORAMA Y PERSPECTIVAS**

El 1 de febrero de 2008 se publicó en México la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, cuyo objetivo es coadyuvar a la diversificación energética y el desarrollo sustentable que permitan garantizar el apoyo al campo mexicano (LPDB, 2008). En cumplimiento de dicha ley, en mayo de 2008 se presentó la Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos, la cual plantea “propiciar y consolidar las cadenas de producción de insumos de biomasa y de producción de bioenergéticos que favorezcan la seguridad energética a través de la diversificación de fuentes de energía, generando e integrando sinergias y dando respaldo al desarrollo rural sustentable” (Fletes *et al.*, 2013).

Ese mismo año, se anunció una inversión de al menos 300 millones de dólares en nuestro país para la producción y comercialización de biodiesel a base de aceite de *Jatropha*, esto por parte de empresas extranjeras, como por ejemplo Jatro Biofuels, empresa alemana, la cual planeaba sembrar en Michoacán 100 mil hectáreas de

*Jatropha* en tierras ociosas, con una inversión superior a 100 millones de dólares en los próximos dos años; así mismo planeaba invertir 120 millones de dólares en Chiapas. Ahí establecería otras 100 mil hectáreas de cultivos de *Jatropha* e instalaría plantas extractoras y de refinación en un lapso de cuatro años. Mientras tanto, en Yucatán, la Global Clean Energy Holdings, con base en Los Ángeles, a través de su subsidiaria GCE México, adquirió poco más de 2 mil hectáreas de tierra para invertir 5 millones de dólares con el objetivo de extraer el aceite (El Financiero, 2008).

En Tamaulipas, se tenía prevista una planta productora de etanol a base de sorgo, por Bioenergéticos Mexicanos S.A.P.I. de C.V. en Valle Hermoso, desde el año 2007, promovida por diversas organizaciones de productores, para desarrollar el proyecto regional de construcción de la Planta Productora de Etanol Tamaulipas Norte, teniendo como principal objetivo el dar un valor agregado a la producción de sorgo. Se pretendía moler 1,280 toneladas de sorgo diariamente para producir etanol al 99.5% (Bioenergeticos.mx., 2016).

En el cuadro 2 se muestran varios proyectos establecidos en algunos municipios del estado de Veracruz. En el 2010, una nota del periódico El Herald de Chiapas, describe la visita al municipio de Tapachula, por el entonces presidente de México, Felipe Calderón Hinojosa, para poner en marcha la primera planta de biodiesel en el país, como parte del proyecto integral contra el cambio climático que inició en Chiapas con la reconversión productiva, mediante la siembra de especies como la *jatropha curcas* o piñón para la producción de biocombustible.

**Cuadro 2.** Proyectos para la producción de bioetanol en el estado de Veracruz.

Cultivo	Rendimiento (T ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento o biocombustible (L T <sup>-1</sup> )	Municipios	Empresa	Área sembrada (ha) 2011-2012	Área sembrada (ha) 2016 (proyección)
Yuca	30	267	Lerdo de Tejada, Ángel R. Cabada, Santiago Tuxtla, Tlilapan, Catemaco y Zontecomatlán	Bioetanol del Golfo SAPI S.A de C.V	16 000	26 000
sorgo	60	65	Pánuco, Acayucan, Hueyapan, Mecayapan, Chacaltianguí, J. Carranza, Agua Dulce y Moloacan	Alimentos Especiales Tenerife	23 000	20 000
Caña de azúcar	70	80	Tlalixcoyan, Tierra Blanca, Isla, Rodríguez, Clara, Azueta, Acayucan, Hueyapan, Mecayapan, Chacaltianguis, J. Carranza, Agua Dulce, Moloacan y Tezonapa.	Destiladora Energética Atoyac	12 000	12 000

Fuente: Agüero-Rodríguez *et al* (2015).

Algunos autores afirman que muchos de los proyectos previstos o anunciados no están operando a tienen problemas en su funcionamiento, por ejemplo, el proyecto chiapaneco, que pretendía abastecer unidades de transporte público con biodiesel, y la Planta de Biodiesel de Tapachula ni siquiera están en funcionamiento (Guzmán, 2016).

Aunque a los biocombustibles se les ha considerado una alternativa para enfrentar el cambio climático, pueden ocasionar problemas más graves que los derivados de usar combustibles fósiles (Espinoza *et al.*, 2009).

Desde hace varios años en nuestro país se produce etanol de caña de azúcar en los diferentes ingenios del país que cuentan con destilerías, sólo que su uso es para

bebidas embriagantes e industriales, no para uso combustible. A pesar de contar con capacidad instalada para producir mayor cantidad, los ingenios del país no la utilizan, dado que la demanda es limitada y que el insumo es cíclico. En promedio, la capacidad utilizada es de 44% respecto a la capacidad instalada; además es relativamente fácil hacer adecuaciones para ampliar esa capacidad (Becerra, 2009).

Durante el presente año, PEMEX reportó ventas de gasolina en México de 131.5 millones y 129.6 millones de L día<sup>-1</sup> en los meses de marzo y mayo respectivamente, como lo muestra el Cuadro 3. Conociendo estas cifras, y sabiendo que PEMEX pretende sustituir el MTBE (Metil Terbutil Eter) como oxigenante de la gasolina por etanol (6% en volumen), como fue anunciado en 2015 durante el simposio: “Bioetanol a partir de sorgo dulce”, realizado en Boca del Rio, Veracruz, y que constituye uno de los escenarios propuestos por la SENER (2006) en su estudio sobre “Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el transporte en México”, se necesitarían alrededor de 7.5 millones de L de etanol diarios para cubrir ésta demanda, esto significa que se necesitan 2,737.5 millones de L año<sup>-1</sup> de etanol, aproximadamente.

Durante el ciclo agrícola 2002-2003, la oferta total de etanol fue de 39.2 millones de L, producidos por los ingenios en México, aunque la capacidad instalada podría llegar hasta 89.2 millones de L (Becerra, 2009), aunque sólo dos ingenios cuentan con la capacidad para producir etanol carburante, La Gloria y San Nicolás, ubicados en el estado de Veracruz, produciendo aproximadamente 33 millones de L año<sup>-1</sup> (SENER,

2006). Lo anterior deja claro que existe un amplio margen entre lo que se requiere y lo que se produce, abriendo una ventana de oportunidades para los biocombustibles de segunda generación.

**Cuadro 3.** Volumen de ventas de gasolinas a nivel nacional

<b>VENTAS DIARIAS</b>	<b>2016</b>		
	<b>MARZO</b>	<b>ABRIL</b>	<b>MAYO</b>
<b>MILES DE BARRILES/DIA</b>	827.26	811.47	815.09
<b>LITROS DE GASOLINA/DIA</b>	131,534,340	129,023,730	129,599,310

Fuente: PEMEX, 2016.

En México, en virtud de las características de su producción agrícola, su bajo grado de autosuficiencia alimentaria, de la organización social en la producción de maíz y sus generosos trópicos, debemos mencionar en primer lugar a la caña de azúcar, como uno de los cultivos energéticos más usados, además se realizan investigaciones con sorgo dulce y materiales lignocelulósicos para la producción de etanol (Montes, *et al.*, 2010; Santiago, 2015; SENER, 2006). En cuanto a la producción de biodiesel se tienen ya establecidos cultivos específicos para este fin como son la Palma Africana, *Jatropha curcas* e Higuierilla (SAGARPA, 2009; Valero *et al.*, 2011; Zamarripa *et al.*, 2009).



## **2.5. PROBLEMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A NIVEL COMERCIAL**

México como país petrolero, descuidó el desarrollo de sus recursos renovables para la producción de energía. Así, aquéllos que se pueden obtener del sol, el viento, la biomasa, no han sido apoyados o lo han sido tímidamente, hasta ahora. Quizás las razones más importantes que explican el descuido en el desarrollo de la biomasa, lo ha sido PEMEX y la falta de investigación y desarrollo científico y tecnológico alrededor de este recurso. Así mismo, las autoridades sin visión de futuro, han cerrado instituciones de investigación y retirado presupuestos para tal propósito (SENER, 2006).

Hay quienes opinan que la producción de biocombustibles debe ser analizada debido al impacto que negativo que puede llegar a tener, especialmente en agua, áreas forestales, impacto en monocultivos, genética y especies invasivas, todo esto debe ser tomado en cuenta a fin de no provocar daños secundarios que pudieran ser mayores que los beneficios de producir energías alternativas (Ottinger, 2007).

Cuando se legisla en este sentido, toda ley debe aspirar a reunir las características de legítima, eficiente y eficaz para que se aproxime al ideal de realizar la justicia y propiciar el bien común entre los ciudadanos. Estos fundamentos filosóficos motivan la expedición de una norma jurídica y son los que deben plasmarse en disposiciones positivas que regulen determinada actividad humana. En este sentido, se considera que la elaboración de una ley sobre biocombustibles debe estar precedida por un estudio exhaustivo de factibilidad sobre los principales escenarios donde tendrá

incidencia la nueva ley, tales como el económico, energético, ambiental, agrícola, social y el escenario jurídico (Ajila y Chiliquina, 2007).

Países como Paraguay (IICA, 2007) y Perú (IICA, 2008) ya tienen bien establecidos sus costos de producción por litro de etanol, a partir de caña de azúcar. Así, para el primero, sus costos son:

- a. US\$ 0,46 por litro para alcohol absoluto, el cual es apto para mezclarse con la gasolina que será utilizada en motores nafteros de ciclo Otto.
- b. US\$ 0,41 por litro para alcohol hidratado, el cual ya puede ser usado sin mezcla alguna en los motores nafteros de ciclo Otto que estén especialmente diseñados para su uso.

Y para Perú su costo por litro de etanol, es de US\$ 0.27

Para el caso de México, los costos de producción por litro de etanol, usando diferentes materias primas, pueden apreciarse en el cuadro 4.

Hay autores como Boron (2007), que afirman que la transformación de los alimentos en energéticos constituye un acto monstruoso mediante el cual se viola la naturaleza misma de un bien, en este caso los alimentos, y se lo convierte, en virtud de complejos procesos tecnológicos, en uno de naturaleza totalmente distinta.

**Cuadro 4.** Costo de producción por litro de etanol (pesos/L)

	CAÑA DE AZUCAR	SORGO GRANO	SORGO DULCE
Insumo básico	7.184	8.627	4.982
Otros insumos	0.235	0.380	0.235
Mano de obra	0.460	0.540	0.460
Costos de producción	0.302	0.295	0.302
Gastos de operación	0.016	0.026	0.016
Amortizaciones	0.387	0.752	0.387
Otros gastos	0.184	0.255	0.184
<b>TOTAL</b>	<b>8.768</b>	<b>10.875</b>	<b>6.566</b>

Fuente: SENER con información de SAGARPA.

En el caso de México, y en especial el panorama ya controvertido del desarrollo de la ingeniería genética, asociada con la producción de maíz, se muestra con un potencial de mayor conflicto social al considerar, nuevamente el maíz como un recurso importante para la producción de etanol. Sin embargo, la utilización de la ingeniería genética para la producción de biocombustibles no está planteada todavía como parte de una política nacional a corto plazo. Dentro del contexto del mercado mundial de biocombustibles, México incursiona tardíamente, además de que cuenta con una política agrícola débil, desde la perspectiva de apoyo económico y social a los pequeños y medianos productores, que constituyen la mayoría de los productores agrícolas en nuestro país. La producción de bioenergéticos puede tener graves impactos a la seguridad alimentaria y a la agricultura, por el uso intensivo de suelos, agua, pesticidas, entre otros (González y Castañeda, 2008).

El éxito en el lanzamiento de un programa de etanol dependerá en gran medida de un programa de inspección y mantenimiento de las estaciones de venta o gasolineras diseñado cuidadosamente e implementado de manera experta, en especial los tanques subterráneos de almacenamiento, y de los vehículos, en particular aquéllos fabricados antes de 1986. PEMEX y la industria automotriz mexicana tendrían un papel importante que jugar aquí. Todo programa de etanol puesto en marcha en el mundo fue lanzado con el apoyo de incentivos financieros y de todo tipo, inclusive mandatos y los contratos de compra resultantes; impuestos diferenciales del etanol para ser mezclado con gasolina para nivelar los costos del etanol y de la gasolina en la mezcla distribuida a través de la red de venta y otros. Esto tendría como resultado a corto plazo pérdidas para el erario, que podrían ser compensadas a través de fondos que deberían establecerse en la implementación de la legislación mexicana sobre biocombustibles y energías alternativas (SENER, 2006).

México tiene ya proyectos específicos de bioenergéticos en algunos estados de la República como son Sinaloa, Chiapas, Michoacán, Veracruz, Tamaulipas, Morelos, Jalisco y Monterrey donde se planea construir plantas para la producción de etanol, con lo que se impulsará y desarrollará la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. Desde el 2007, Sinaloa está en proceso de construcción de cuatro plantas de etanol y Chiapas, una de etanol y dos de biodiesel, los demás estados esperan aprobación gubernamental (González y Castañeda, 2008).

## **IV. MATERIALES Y METODOS**

### **4.1. FASE DE CAMPO**

#### **4.1.1. Localización**

La fase de campo de éste estudio se llevó a cabo en el campo experimental “La Posta” del INIFAP, en Paso del Toro, Veracruz, localizado en el km. 22.5 de la carretera libre Veracruz-Córdoba, en las coordenadas que forman el paralelo 19° 02´ LN con el meridiano 96° 08´ LO. Según la clasificación climática de Koppen modificada por García (1987), el clima en el área de influencia de “La Posta”, corresponde al intermedio del tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw1), con temperaturas media, máxima y mínima de 25.4, 31.3 y 19.5 °C, respectivamente, y una precipitación pluvial de 1336.8 mm, y 1379.5 mm de evaporación. La altura del sitio es de 16 msnm. Los suelos predominantes son del tipo vertisol, con pH ácido de 5.4, con textura arcillosa y un contenido de materia orgánica de alrededor del 2.6 %.

#### **4.1.2. Establecimiento del experimento**

Para el experimento se usaron parcelas con dos años de edad, con medidas de 2.5 m de ancho por 5 m de largo, y tres repeticiones cada una. Las variedades evaluadas fueron: Taiwán, King Grass, Merkeron, Elefante, CT-115, OM-22, Maralfalfa, Mott (Elefante enano), Roxo, Vrokwona y Caña Africana. El corte de uniformización se realizó el 11 de julio de 2014. Se evaluaron 4 frecuencias de cosecha: 90, 120, 150 y 180 días. Los muestreos se realizaron durante un año, desde octubre de 2014 (primer corte de 90 días) hasta julio de 2015. Se aplicaron dos fertilizaciones de 300-100-00, kg

ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de N, P y K; la primera a razón de 150 y 50 kg ha<sup>-1</sup> de N y P, respectivamente, una semana después del corte de uniformización; la segunda se realizó un mes después de la primera aplicación, repitiendo la dosis.

#### **4.1.3. Variables evaluadas**

##### **4.1.3.1. Altura de la planta**

Ésta se midió desde la base de la planta (suelo) hasta las hojas superiores, donde presentan doblez la mayor cantidad de hojas (estrato superior). Se realizaron cinco mediciones en cada parcela.

##### **4.1.3.2. Número de tallos por m<sup>2</sup>**

Se contabilizaron todos los tallos dentro del área de muestreo (cuadrante de 1m x 1m), contemplando todos aquellos que se encontraban anclados dentro del cuadrante, aunque parte del tallo y hojas se encontraran fuera del mismo debido a la inclinación natural de la planta o como consecuencia del acame.

##### **4.1.3.3. Rendimiento de biomasa y contenido de materia seca**

Para medir estas variables se delimito un cuadrante de 1m x 1m, tratando de eliminar (en la medida de lo posible) el efecto de orilla, para lo cual se tomó sólo la parte central de cada parcela, esto eliminó aproximadamente 75 cm de cada lado. Por la parte más larga de la parcela se dejaron 20 cm entre cada edad de rebrote. El procedimiento fue el siguiente:

- ✓ Cortar el material dentro de dicho cuadrante (1m x 1m) dejando una altura de 30 cm de forraje remanente y cuidando siempre de incluir todos los tallos cuya

base hayan quedado dentro del cuadrante aun cuando su parte aérea se encuentre fuera del mismo.

- ✓ Una vez cortado el material se pesó toda la muestra obtenida del cuadrante usando una báscula digital con una base y altura adecuada para tal efecto (Fig. 2).
- ✓ Se seleccionaron diez tallos al azar, cinco de los cuales se pesaron completos, picados para facilitar el secado y llevados a una estufa de aire forzado a 55 °C y secadas hasta peso constante para obtener el rendimiento de materia seca.
- ✓ Los otros cinco tallos se pesaron por separado (hojas y tallos). Después del pesado, se picó el material. Se obtuvo una muestra de 200 g de hoja y otra de 200 g de tallo, mismas que fueron llevadas a una estufa de aire forzado para conocer el peso por componente morfológico.



**Figura 2.** Peso de muestra completa (1 m<sup>2</sup>).

## **4.2. FASE DE LABORATORIO**

Las determinaciones físico-químicas del forraje se realizaron en el laboratorio para materiales lignocelulósicos del INIFAP, Campo Experimental “San Martinito”, ubicado en el municipio de Tlahuapan, Puebla.

En esta fase se decidió tomar sólo una de las once variedades, en base a su comportamiento productivo durante su desarrollo en la fase de campo. Se tomaron en cuenta aspectos como: rendimiento de materia seca, resistencia al acame y otros aspectos como el hecho de que fuera una variedad con la que no se hubiera trabajado antes para producción de etanol. Fue así como se decidió trabajar la fase de laboratorio con la variedad Mott. Se determinaron: extractivos, holocelulosa, celulosa, lignina y poder calorífico.

### **4.2.1. Liberación de extractivos**

#### **4.2.1.1. Etanol-benceno**

Se utilizó la norma TAPPI T-264 que consiste en colocar de 5 a 6 g de muestra seca y molida en un dedal para una unidad de extracción automática marca Buchi, E-816 (Fig. 3) usando 150 ml de la mezcla etanol-benceno (1:2 v/v). Se ajusta la temperatura a 100 °C y se programa el equipo para que se realicen 35 ciclos de recirculación. Logrado lo anterior se programa para que la mezcla sobrante de solvente sea recuperada por el sistema. Una vez que las muestra se sacan, se pre-secan a temperatura ambiente en una campana de extracción hasta que el olor a benceno sea



mínimo. Posteriormente se llevan las muestras a la estufa para secarse a  $105 \pm 3$  °C hasta peso constante.

#### 4.2.1.2. Etanol

El procedimiento es similar al usado para etanol-benceno, la diferencia radica en ajustar la temperatura a 120 °C. Se utilizan 150 ml de alcohol al 96% como solvente. El mismo equipo es usado y se ajusta para que realice el mismo número de ciclos de recirculación (35).



**Figura 3.** Unidad de extracción automática marca Buchi, E-816

#### 4.2.1.3. Agua

Las muestras secas obtenidas de las extracciones de etanol-benceno y etanol se pasan a un dedal de celulosa previamente seco y pesado. Se agregan 150 ml de agua destilada a un matraz Erlenmeyer de 250 ml de boca esmerilada. El dedal se coloca en un equipo de extracción tipo Soxhlet unido al matraz y a un equipo de recirculación que

sirve como refrigerante (Fig. 4). Se coloca el matraz sobre parrillas eléctricas las cuales se ajustan a una temperatura tal que la velocidad de recirculación del agua sea de aproximadamente 5 veces por hora. Una vez que se han cumplido 15 ciclos de recirculación, y quitando el equipo de condensación, la muestra se deja en la parrilla por el tiempo necesario para que se evapore el agua, posteriormente se lleva a la estufa para secarse a  $105 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta peso constante.



**Figura 4.** Equipo y materiales para extracción en agua.

#### **4.2.2. Determinación de holocelulosa**

Se usó el método de cloración (Rowell *et al.*, 2005) que consiste en pesar 2.5 g de muestra libre de extractivos, agregar 80 ml de agua destilada caliente, 0.5 ml de ácido acético y 1 g de clorito de sodio. Esta mezcla se calienta a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 60 minutos usando un baño termorregulador (Fig. 5), posteriormente se agregan de nuevo 0.5 ml de ácido acético y 1 g de clorito de sodio, este proceso se repite cada 60 minutos hasta completar un total de 6 veces. Una vez hecha la última adición, la muestra se deja reposar por 24 h. Pasado este tiempo, la muestra se lava con acetona hasta eliminar el olor a clorito (aprox. 250 ml de acetona) para llevarla a la estufa y secar hasta peso constante.



**5. Figura** Equipo y proceso para determinación de holocelulosa

El contenido de holocelulosa se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{ DE HOLOCELULOSA} = \frac{\textit{peso de holocelulosa}}{\textit{peso seco de la muestra sin extractivos}} * 100$$

#### **4.2.3. Determinación de celulosa y hemicelulosa**

Se determinó de acuerdo con la norma ASTM D1103, para lo cual se tomaron 2 g de holocelulosa libre de extractivos y se agregaron 10 ml de NaOH al 17.5% y una temperatura constante de 20 °C en un baño termorregulador. Luego, cada 5 minutos se agregan 5 ml de solución NaOH hasta completar 25 ml de la misma. Se dejó la muestra a 20 °C durante 30 min para alcanzar un total de 45 min. Pasado el tiempo se agregaron 33 ml de agua destilada a 20 °C y se dejó reposar por 1 hora antes de filtrar. Se usaron crisoles GOOCH para llevar el cabo la filtración y se agregaron 15 ml de ácido acético al 10% por 3 minutos. Una vez transcurrido el tiempo se retiró el ácido mediante succión y se lavó la muestra con agua destilada hasta lograr la mínima concentración de ácido. La muestra se secó en la estufa hasta peso constante.

El contenido de celulosa se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ DE CELULOSA} = \frac{\text{peso de celulosa} * 100}{\text{peso anhidro de la muestra}}$$

El contenido de hemicelulosa se obtuvo como:

$$\% \text{ DE HEMICELULOSA} = (\% \text{ de holocelulosa}) - (\% \text{ de celulosa})$$

#### **4.2.4. Determinación de lignina insoluble**

Para la determinación de lignina se usó la norma TAPPI T-222 os-74. Se usaron vasos de precipitado de 50 ml a los cuales se les agregó 1 g de muestra seca y libre de extractivos, se le agregaron 15 ml de ácido sulfúrico al 72% manteniéndose durante 2 horas en baño maría a 20 °C y con agitación constante (Fig. 6). Posteriormente se vertió el contenido total del vaso de precipitado a un matraz Erlenmeyer de 1 litro con 400 ml de agua destilada aproximadamente, hasta alcanzar un volumen de 575 ml. Se puso a hervir a reflujo durante 4 horas (Fig. 6). Pasado el tiempo, la solución se decantó manteniendo el matraz inclinado el tiempo necesario para la sedimentación de la lignina. Una vez logrado lo anterior se filtró a través de un crisol GOOCH de porosidad fina (Fig. 6). Se lavó la muestra con agua destilada y caliente durante el filtrado. Se pasó a la estufa para secarse a 105 ± 3 °C hasta peso constante.

Se calculó el porcentaje de lignina mediante la fórmula:

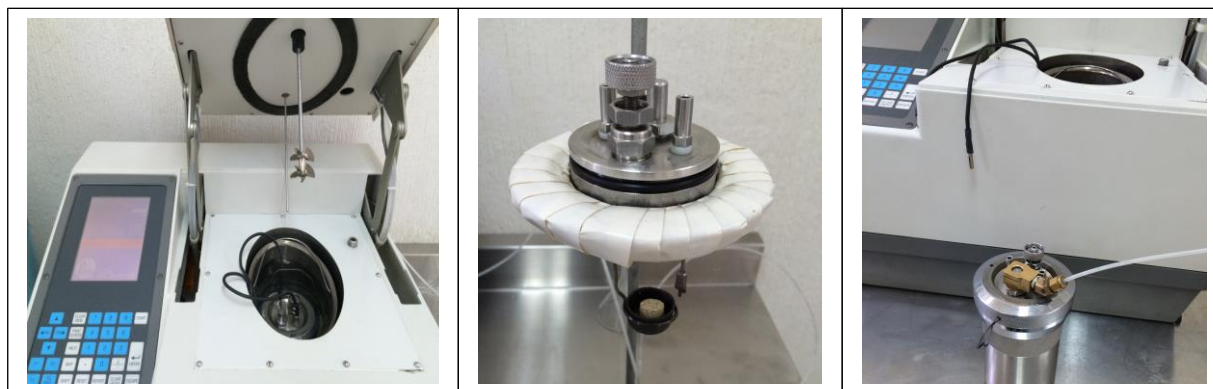
$$\% \text{ DE LIGNINA} = \frac{\text{peso de lignina} * 100}{\text{peso seco de la muestra}}$$



**Figura 6.** Equipo y proceso para determinación de lignina.

#### 4.2.5. Poder calorífico

Se determinó en un calorímetro de bomba marca Isoperibol, Parr 1266, de acuerdo a la norma ASTM E711 (Fig. 7), a una temperatura de  $30 \pm 0.5$  °C, con pastillas comprimidas de 1 g de peso aproximadamente. Se determinó el contenido de humedad de cada muestra con una balanza Ohaus MB45 realizándose 4 repeticiones por muestra.



**Figura 7.** Calorímetro y bomba calorimétrica.

#### 4.2.6. Rendimiento teórico de etanol

De acuerdo a Castaño (2008), la transformación de glucosa a etanol es un proceso llamado fermentación alcohólica en donde, mediante el metabolismo energético de microorganismos como levaduras y bacterias, la fuente de carbono se

oxidada parcialmente hasta etanol. Este proceso se desarrolla según la siguiente ecuación estequiométrica:

Hidrólisis de pentosanos a pentosas:

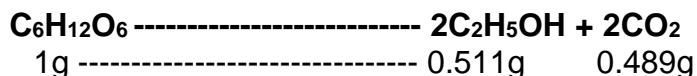
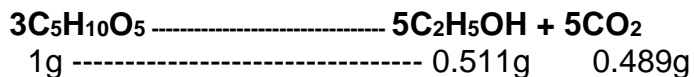


Hidrólisis de hexanos a hexosas:



La conversión teórica de celulosa a glucosa es de 1.111 g de glucosa / g de celulosa; la conversión de hemicelulosa a xilosa es de 1.136 g de glucosa / g de xilosa.

La fermentación de pentosas y hexosas a etanol, se da mediante las siguientes ecuaciones estequiométricas:



Según Balat *et al.* (2008), el rendimiento teórico máximo de etanol es de 0.51 kg de etanol y 0.49 kg de dióxido de carbono por kg de glucosa y xilosa.

Teniendo en cuenta la cantidad de celulosa y hemicelulosa, así como el rendimiento de MS de la materia prima, se puede estimar el rendimiento teórico de

etanol. Se consideran eficiencias del 76% para la hidrólisis de celulosa y de 90% para la hidrólisis de hemicelulosa; los valores de conversión de glucosa a etanol de 75% y de xilosa a etanol del 50% (Castaño, 2008).

Se utilizó la formula descrita por Castaño (2008) para calcular el rendimiento teórico de etanol:

### **Celulosa:**

Litros de etanol por tonelada de biomasa =  $(kg\ celulosa\ por\ t\ de\ biomasa) * (1.111) * (0.76) * (0.511) * (0.75) * (0.78)$

Dónde:

1.111= factor de conversión de glucosa a partir de celulosa.

0.76= eficiencia de procesos de glucosa a partir de celulosa.

0.511= factor de conversión de etanol a partir de glucosa.

0.75= eficiencia del proceso de etanol a partir de celulosa.

0.78= densidad del etanol.

### **Hemicelulosa:**

Litros de etanol por tonelada de biomasa

$$= (kg\ hemicelulosa\ por\ t\ de\ biomasa) * (1.136) * (0.90) * (0.511) * (0.75) * (0.78)$$

Dónde:

1.136= factor de conversión a partir de hemicelulosa

0.90= eficiencia del proceso de glucosa a partir de hemicelulosa

0.511= factor de conversión de etanol a partir de glucosa

0.75= eficiencia del proceso de etanol a partir de hemicelulosa

0.78= densidad del etanol.

Para obtener el rendimiento teórico total de etanol por tonelada, se suman los rendimientos a partir de celulosa y hemicelulosa.

Se estimó el rendimiento anual en litros de etanol por hectárea que se produciría en cada frecuencia de corte (90, 120, 150 y 180 días), multiplicando el rendimiento teórico de etanol por el rendimiento anual de biomasa en cada uno de los casos.

## **V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **5.1. RENDIMIENTO DE MATERIA SECA (MS)**

Al analizar el rendimiento de MS de *Cenchrus purpureum* se pueden observar diferencias significativas entre cultivares al cosechar cada 90 días ( $p < 0.05$ ), mostrando al cultivar Mott el mejor rendimiento con  $51,364 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , mientras que CT-115 el menor rendimiento con  $23,136 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Cuadro 4). Las frecuencias de corte a 120, 150 y 180 días no presentan diferencias estadísticas.



Al comparar cada cultivar entre frecuencias de corte, se observaron diferencias solo con el pasto Elefante ( $p < 0.05$ ), siendo a los 180 días donde se registró el mayor rendimiento de MS y no se observan diferencias entre las frecuencias de corte a 90, 120 y 150 días (Cuadro 4).

Ramos *et al.* (2012) reportan rendimientos de hasta 160 t de MS  $\text{ha}^{-1}$   $\text{año}^{-1}$  en el cultivar OM-22, hasta 95 t de MS  $\text{ha}^{-1}$   $\text{año}^{-1}$  con el cultivar CT-115 y 140 t de MS  $\text{ha}^{-1}$   $\text{año}^{-1}$  utilizando fuentes nitrogenadas y realizando cortes cada 60 días, bajo condiciones de riego.

Por otra parte, Araya y Boschini (2005) evaluaron cinco cultivares obtuvieron resultados diferentes bajo condiciones similares de fertilización a los del presente trabajo, realizando cortes a los 70, 84, 98, 112, 126 y 140 días. Ellos encontraron rendimientos de 55.464 t de MS  $\text{ha}^{-1}$  en el cultivar Taiwan, 61.048 t MS  $\text{ha}^{-1}$  en King Grass, 48.976 t MS  $\text{ha}^{-1}$  en el cultivar Gigante (Elefante), 18.632 MS t  $\text{ha}^{-1}$  en Elefante enano (Mott) y 27.736 t de MS  $\text{ha}^{-1}$  en el cultivar Camerún (Roxo). Uvidia *et al.* (2014) encontraron un rendimiento de 34.4 t de MS  $\text{ha}^{-1}$  en la cultivar Maralfalfa a los 120 días de edad de rebrote, sembrando a distancia de 1 m entre plantas y con dos estacas por punto de siembra.

Las variaciones en cuanto a rendimiento, al hacer las comparaciones con otros autores, puede deberse a varios factores, como por ejemplo al uso o no de riegos durante la época seca, tipo de suelo y temperatura promedio del sitio de crecimiento. Es por eso que los datos obtenidos en cada experimento son útiles como referencia y las evaluaciones deben hacerse específicamente para cada ambiente.

**Cuadro 5.** Rendimiento anual de forraje (kg MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) de 11 variedades de *Cenchrus purpureus* cosechado a diferentes frecuencias de corte.

CULTIVAR	FRECUENCIA DE CORTE (DIAS)				MEDIAS
	90	120	150	180	
TAIWAN	30565 <sup>ab A</sup>	33063 <sup>a A</sup>	24779 <sup>a A</sup>	43271 <sup>a A</sup>	32919 <sup>a</sup>
KING GRASS	41943 <sup>ab A</sup>	26593 <sup>a A</sup>	31346 <sup>a A</sup>	45266 <sup>a A</sup>	36287 <sup>a</sup>
MERKERON	38117 <sup>ab A</sup>	29808 <sup>a A</sup>	30113 <sup>a A</sup>	42314 <sup>a A</sup>	35088 <sup>a</sup>
ELEFANTE	29367 <sup>ab B</sup>	32644 <sup>a B</sup>	25079 <sup>a B</sup>	45479 <sup>a A</sup>	33142 <sup>a</sup>
CT-115	23136 <sup>b A</sup>	25897 <sup>a A</sup>	19974 <sup>a A</sup>	30426 <sup>a A</sup>	24858 <sup>a</sup>
OM-22	26702 <sup>ab A</sup>	33481 <sup>a A</sup>	44441 <sup>a A</sup>	32877 <sup>a A</sup>	34375 <sup>a</sup>
MARALFALFA	34835 <sup>ab A</sup>	25533 <sup>a A</sup>	34921 <sup>a A</sup>	37823 <sup>a A</sup>	33278 <sup>a</sup>
MOTT	51364 <sup>a A</sup>	35909 <sup>a A</sup>	42167 <sup>a A</sup>	55920 <sup>a A</sup>	46340 <sup>a</sup>
ROXO	36469 <sup>ab A</sup>	27446 <sup>a A</sup>	21484 <sup>a A</sup>	36659 <sup>a A</sup>	30514 <sup>a</sup>
VROKWONA	39505 <sup>ab A</sup>	35319 <sup>a A</sup>	27337 <sup>a A</sup>	42218 <sup>a A</sup>	36095 <sup>a</sup>
CAÑA					
AFRICANA	25499 <sup>b A</sup>	41789 <sup>a A</sup>	33193 <sup>a A</sup>	40082 <sup>a A</sup>	35141 <sup>a</sup>
<b>MEDIAS</b>	34318 <sup>AB</sup>	31589 <sup>B</sup>	30439 <sup>B</sup>	41121 <sup>A</sup>	
<b>EE</b>		<b>2360.16</b>			<b>5787.43</b>

\*\*\*Medias con literales mayúsculas iguales en las filas, no presentan diferencias estadísticas.

\*\*\*Medias con literales minúsculas iguales en columnas, no presentan diferencias significativas.

## 5.2. ALTURA DE PLANTA

Al hacer las comparaciones entre alturas de planta (cuadro 5) se observa que a los 90 días la mayor altura la presenta OM-22 ( $p < 0.05$ ) con 3.04 m y las menores alturas se dan en Taiwan con 2.52 m y CT-115 con 2.60 m ( $p < 0.05$ ). A los 120 no se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los once cultivares. A los 150 días se observaron diferencias significativas entre cultivares ( $p < 0.05$ ), siendo Roxo el que presenta la mayor altura (3.03 m) y CT-115 menor (2.46 m).

Cuando se compararon las alturas entre cultivares a los 180 días, se encontraron diferencias significativas, presentando Taiwan la mayor altura con 3.08 m, mientras que CT-115 registró la menor altura con 2.61 m. Uvidia *et al.*

(2014) se encontraron resultados diferentes en pasto Maralfalfa a las 16 semanas, obteniendo alturas de 3.35 m sembrando a 50 cm entre plantas y 3.47 m de altura sembrando a distancias de 1 m entre plantas.

Nava *et al.* (2013) reportaron alturas de 33 a 46 cm en el cultivar CT-115 a los 45 días en una zona semiárida en el noroeste de México, aunque las condiciones climáticas y edáficas no fueron iguales, y el crecimiento de las plantas está directamente influenciado por estas condiciones, sólo tomaremos estos valores como referencia para conocer el comportamiento de las variedades en diferentes zonas.

**Cuadro 6.** Altura promedio antes del corte (m) de 11 variedades de *Cenchrus purpureus* cosechado a diferentes frecuencias de corte.

CULTIVAR	FRECUENCIA DE CORTE (DIAS)				MEDIAS
	90	120	150	180	
<b>TAIWAN</b>	2.52 <sup>b B</sup>	2.71 <sup>a AB</sup>	2.88 <sup>ab AB</sup>	3.08 <sup>a A</sup>	<b>2.80<sup>ab</sup></b>
<b>KING GRASS</b>	2.69 <sup>ab A</sup>	2.48 <sup>a A</sup>	2.76 <sup>ab A</sup>	2.82 <sup>ab A</sup>	<b>2.69<sup>ab</sup></b>
<b>MERKERON</b>	2.87 <sup>ab A</sup>	2.74 <sup>a A</sup>	2.79 <sup>ab A</sup>	2.93 <sup>ab A</sup>	<b>2.83<sup>a</sup></b>
<b>ELEFANTE</b>	2.80 <sup>ab B</sup>	2.87 <sup>a AB</sup>	2.86 <sup>ab AB</sup>	3.04 <sup>ab A</sup>	<b>2.89<sup>a</sup></b>
<b>CT-115</b>	2.60 <sup>b A</sup>	2.30 <sup>a A</sup>	2.46 <sup>b A</sup>	2.61 <sup>b A</sup>	<b>2.49<sup>b</sup></b>
<b>0M-22</b>	3.04 <sup>a A</sup>	2.81 <sup>a A</sup>	2.87 <sup>ab A</sup>	2.67 <sup>ab A</sup>	<b>2.85<sup>a</sup></b>
<b>MARALFALFA</b>	2.73 <sup>ab A</sup>	2.47 <sup>a A</sup>	2.57 <sup>ab A</sup>	2.68 <sup>ab A</sup>	<b>2.61<sup>ab</sup></b>
<b>MOTT</b>	2.67 <sup>ab AB</sup>	2.48 <sup>a B</sup>	2.75 <sup>ab AB</sup>	2.89 <sup>ab A</sup>	<b>2.70<sup>ab</sup></b>
<b>ROXO</b>	2.73 <sup>ab AB</sup>	2.55 <sup>a B</sup>	3.03 <sup>a A</sup>	2.95 <sup>ab A</sup>	<b>2.82<sup>a</sup></b>
<b>VROKWONA</b>	2.75 <sup>ab B</sup>	2.77 <sup>a B</sup>	2.82 <sup>ab B</sup>	3.04 <sup>ab A</sup>	<b>2.85<sup>a</sup></b>
<b>CAÑA AFRICANA</b>	2.69 <sup>ab B</sup>	2.76 <sup>a AB</sup>	2.83 <sup>ab AB</sup>	3.04 <sup>ab A</sup>	<b>2.83<sup>a</sup></b>
<b>MEDIA</b>	<b>2.7<sup>B</sup></b>	<b>2.6<sup>C</sup></b>	<b>2.8<sup>B</sup></b>	<b>2.9<sup>A</sup></b>	
<b>EE</b>		<b>0.03</b>			<b>0.06</b>

\*\*\*Medias con literales mayúsculas iguales en las filas, no presentan diferencias estadísticas.

\*\*\*Medias con literales minúsculas iguales en columnas, no presentan diferencias significativas.

### 5.3. DENSIDAD POBLACIONAL DE TALLOS

Al comparar el número de tallos vivos por metro cuadrado (Cuadro 6) no se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en las frecuencias de 90, 120 y 150 días. El número de tallos a los 90 días va desde 27 (Taiwan) hasta 51 (CT-115 y Mott) tallos  $m^{-2}$ . A los 120 días la cantidad de tallos  $m^{-2}$  va desde 21 (OM-22) hasta 40 (Mott). El número de tallos a los 150 días vario de 19 (Roxo) a 44 (Maralfalfa).

Cuando se compara el número de tallos a los 180 días, se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), donde Maralfalfa presenta el mayor número de tallos  $m^{-2}$ , mientras que OM-22 y Roxo mostraron el menor número de tallos  $m^{-2}$  (23 y 22, respectivamente).

Se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la densidad poblacional de tallos sólo en el cultivar Elefante al comparar entre frecuencias de corte, presentando la mayor cantidad de tallos a los 90 días (39) y la menor a los 120 días (27).

El pasto Mott es uno de los cultivares que mayor número de tallos vivos  $m^{-2}$  presenta, esto explicaría el alto rendimiento de MS que mostró, ya que su capacidad para generar nuevos tallos compensa su baja altura, aunado a su persistencia y resistencia al acame.

**Cuadro 7.** Densidad poblacional de tallos vivos de 11 cultivares de *Cenchrus purpureum* cosechado a diferentes frecuencias de corte (tallos m<sup>-2</sup>).

CULTIVAR	FRECUENCIA DE CORTE (DIAS)				MEDIAS
	90	120	150	180	
TAIWAN	27 <sup>a</sup> A	26 <sup>a</sup> A	26 <sup>a</sup> A	32 <sup>ab</sup> A	28 <sup>ab</sup>
KING GRASS	36 <sup>a</sup> A	27 <sup>a</sup> A	30 <sup>a</sup> A	40 <sup>ab</sup> A	33 <sup>ab</sup>
MERKERON	30 <sup>a</sup> A	27 <sup>a</sup> A	26 <sup>a</sup> A	32 <sup>ab</sup> A	29 <sup>ab</sup>
ELEFANTE	39 <sup>a</sup> A	27 <sup>a</sup> B	29 <sup>a</sup> AB	32 <sup>ab</sup> AB	32 <sup>ab</sup>
CT-115	51 <sup>a</sup> A	44 <sup>a</sup> A	27 <sup>a</sup> A	29 <sup>ab</sup> A	38 <sup>ab</sup>
OM-22	31 <sup>a</sup> A	21 <sup>a</sup> A	22 <sup>a</sup> A	23 <sup>b</sup> A	24 <sup>b</sup>
MARALFALFA	42 <sup>a</sup> A	38 <sup>a</sup> A	44 <sup>a</sup> A	50 <sup>a</sup> A	44 <sup>a</sup>
MOTT	51 <sup>a</sup> A	40 <sup>a</sup> A	36 <sup>a</sup> A	46 <sup>ab</sup> A	43 <sup>a</sup>
ROXO	37 <sup>a</sup> A	25 <sup>a</sup> A	19 <sup>a</sup> A	22 <sup>b</sup> A	26 <sup>b</sup>
VROKWONA	39 <sup>a</sup> A	24 <sup>a</sup> A	27 <sup>a</sup> A	38 <sup>ab</sup> A	32 <sup>ab</sup>
CAÑA AFRICANA	29 <sup>a</sup> A	26 <sup>a</sup> A	24 <sup>a</sup> A	30 <sup>ab</sup> A	27 <sup>ab</sup>
<b>MEDIA</b>	<b>38<sup>A</sup></b>	<b>30<sup>B</sup></b>	<b>28<sup>B</sup></b>	<b>34<sup>AB</sup></b>	
<b>EE</b>	<b>1.70</b>				<b>3.30</b>

\*\*\*Medias con literales mayúsculas iguales en las filas, no presentan diferencias estadísticas.

\*\*\*Medias con literales minúsculas iguales en columnas, no presentan diferencias significativas.

#### 5.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL PASTO MOTT

Por su mayor rendimiento de forraje se decidió hacerle composición química a la variedad Mott. Los resultados se muestran en el Cuadro 7.

##### 5.4.1. Porcentaje de Holocelulosa

La holocelulosa se define como la suma de celulosa y hemicelulosa; estos dos polímeros combinados son una fuente de energía para las células de las plantas, y puede representar entre el 60 y el 80% de la biomasa lignocelulósica. En teoría, a mayor contenido de carbohidratos, mayor producción de etanol (Santiago, 2015).

El contenido de holocelulosa mostró diferencias ( $p < 0.05$ ) entre frecuencias de corte, siendo mayor a los 90 días ( $p < 0.05$ ) con 90.7%. El contenido más bajo se

presentó a los 120 y 150 días (84.3 y 85.9%, respectivamente). Estos resultados difieren de los encontrados en otros materiales lignocelulósicos por otros autores, como los reportados por Vega-Baudrit *et al.* (2008) y Romero-Uscanga *et al.* (2014) quienes encontraron valores de 66.12% en bagazo de caña de azúcar y 73.91% en paja de trigo, respectivamente. Por su parte Santiago (2015), al evaluar pasto Toledo (*Brachiaria brizantha* CIAT 26110) a diferentes frecuencias de corte reporta valores desde 68.5% a los 90 días, hasta 73.6% a los 180 días, mostrando un incremento del contenido de holocelulosa a medida que aumenta la edad del pasto, lo cual difiere de lo encontrado en el presente trabajo dado que el mayor contenido se obtuvo a los 90 días.

#### **5.4.2. Porcentaje de celulosa**

El mayor contenido de celulosa se registró a los 90 días ( $p < 0.05$ ) con 50.3% mientras que a los 120 días se presentó el menor porcentaje (47.2%); este valor es similar a los obtenidos por Vega-Baudrit *et al.* (2008) (47.29 %) y Forero *et al.* (2015) (46.7%) ambos trabajos realizados en bagazo de caña de azúcar usando el mismo método que el empleado en el presente trabajo (norma ASTM D1103). Mientras que Cardona *et al.* (2013) encontraron valores de 22.6 y 23.6% en pasto Elefante y King Grass, respectivamente usando espectroscopía UV-vis, aunque no especifican la edad de las muestras. Por su parte, Quesada-Solís *et al.* (2005) reportan resultados similares a los obtenidos en el presente estudio a los 120 días (45.12%).

### **5.4.3. Porcentaje de hemicelulosa**

Se encontraron diferencias significativas en el contenido de hemicelulosa ( $p < 0.05$ ), siendo a los 90 días donde se presentó el mayor porcentaje (40.2%) y los valores más bajos a los 120 y 150 días (37.1 y 36.8 % respectivamente), los cuales difieren de los obtenidos por Forero *et al.* (2015) de 23.62% en bagazo de caña de azúcar. Al respecto, Romero-Uscanga *et al.* (2014) reportan 16.81% y Cardona *et al.* (2013) 21.9%, en paja de trigo y pasto King Grass, respectivamente.

### **5.4.4. Porcentaje de lignina**

El contenido de lignina presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre frecuencias de corte, siendo a los 90 días donde se registró el contenido más bajo (19.8%); este resultado es similar a los encontrados por Cardona *et al.* (2013) quienes reportaron 19.4% en pasto Elefante. Así mismo, son similares a los obtenidos en otras especies vegetales por diferentes autores como Forero *et al.* (2015), quienes encontraron un valor de 19.71% en bagazo de caña de azúcar; del mismo modo, Romero-Uscanga *et al.* (2014) obtuvieron un valor de 19.1% en paja de trigo y los resultados obtenidos por Quesada-Solís *et al.* (2005) son similares a los observados a los 150 días. Estos autores reportan 27.7% en rastrojo de piña, así mismo Vega-Baudrit (2008) obtuvieron 24.4% en bagazo de caña de azúcar, lo cual es similar a lo obtenido en el presente trabajo a los 120, 150 y 180 días. Guyat *et al.* (2005) encontraron 26.5% en aserrín, lo cual es similar a lo obtenido a los 150 días.

#### 5.4.5. Porcentaje de extractivos

Al analizar el contenido de extractivos se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las frecuencias de corte. El mayor contenido de extractivos se encontró a los 180 días (16.8%) y la menor cantidad a los 150 días (12.7%) como puede observarse en el cuadro 8. Este resultado difiere de lo encontrado por Albarracín *et al.* (2015), quienes encontraron 6.7% en paja.

**Cuadro 8.** Composición química del pasto Mott a diferentes frecuencias de corte.

FRECUEN CIA DE CORTE (DÍAS)	COMPONENTE (%)				
	HOLOCELULOSA	CELULOSA	HEMICELULOSA	LIGNINA	EXTRACTIVOS
<b>90</b>	90.7 <sup>a</sup>	50.3 <sup>a</sup>	40.2 <sup>a</sup>	19.8 <sup>b</sup>	15.4 <sup>ab</sup>
<b>120</b>	84.3 <sup>b</sup>	47.2 <sup>b</sup>	37.1 <sup>b</sup>	24.6 <sup>a</sup>	14.2 <sup>ab</sup>
<b>150</b>	85.9 <sup>b</sup>	49.0 <sup>ab</sup>	36.8 <sup>b</sup>	26.7 <sup>a</sup>	12.7 <sup>b</sup>
<b>180</b>	87.8 <sup>ab</sup>	48.8 <sup>ab</sup>	39.0 <sup>ab</sup>	25.3 <sup>a</sup>	16.8 <sup>a</sup>
<b>MEDIA</b>	<b>86.8</b>	<b>48.7</b>	<b>38.1</b>	<b>24.6</b>	<b>14.7</b>

\*\*\*Medias con las mismas literales en las columnas, son estadísticamente iguales.

### 5.5. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA Y HUMEDAD

En cuanto a los resultados de caracterización energética y humedad, éstos pueden apreciarse en el Cuadro 8.

#### 5.5.1. Poder calorífico y humedad

El poder calorífico expresado en MJ por kg de MS, presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), encontrando que el mayor poder calorífico se registró a los 90



días ( $16.95 \text{ MJ kg}^{-1}$ ), mientras que las frecuencias de corte a 120, 150 y 180 días no muestran diferencias entre ellas y se encuentran en un rango de 16.25 a  $16.57 \text{ MJ kg}^{-1}$  (cuadro 8).

Lo anterior tiene relación directa con el contenido de humedad de las muestras, ya que es precisamente a los 90 días donde se observa el menor porcentaje de humedad (8.39%), aunque ésta es similar a la observada a los 180 días (8.63%). Según Kollmann (1959), a mayor contenido de humedad, menor será la eficiencia del balance energético, ya que las materias con mayor humedad demandan más energía para el proceso de secado. Carluccio *et al.* (2015) reportaron una humedad de 9.78 % para madera de olivo, similar a lo encontrado a los 180 días en pasto Mott. Ventura (2016) reporta humedades con valores de 6.62 a 7.48%, con frecuencias de corte de 90,120, 150 y 180 días, en pasto Taiwan, y 7.40, 7.27 y 7.22% en Maralfalfa a los 120, 150 y 180 días respectivamente, lo cual se encuentra ligeramente por debajo de lo observado en este trabajo; de la misma manera, reporta poder calorífico de 16.98 a 17.5 a edades de cosecha de 90,120, 150 y 180 días en pasto Taiwan, lo cual es similar a lo encontrado en Mott.

En un análisis calorimétrico realizado a dos cultivares de *Cenchrus* (Vrokwona y King Grass), se encontraron valores de 16.66 y  $16.48 \text{ MJ kg}^{-1}$  a los 90 días de edad de rebrote; mientras que a los 150 días se obtuvieron 15.79 y  $15.55 \text{ MJ kg}^{-1}$ , respectivamente (datos no publicados); tales valores están muy por debajo de lo obtenido con el pasto Mott.

### 5.5.2. Producción de energía

La producción de energía expresada en GJ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, presenta diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre frecuencias de corte. La mayor producción de energía se da a los 180 días (926.4 GJ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y el menor valor a los 120 días con 583.6 GJ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, y se encuentra estrechamente relacionado con la producción de MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, ya que la mayor producción se encontró a los 180 días y la menor a los 120 días.

**Cuadro 9.** Caracterización energética del pasto Mott a diferentes frecuencias de corte.

FRECUENCIA DE CORTE (DIAS)	RENDIMIENTO DE MS (kg ha <sup>-1</sup> AÑO <sup>-1</sup> )	PODER CALORÍFICO (MJ kg <sup>-1</sup> )	PRODUCCIÓN DE ENERGÍA (GJ ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	HUMEDAD (%)
90	51364	16.95 <sup>a</sup>	870.4 <sup>b</sup>	8.39 <sup>c</sup>
120	35909	16.25 <sup>b</sup>	583.6 <sup>d</sup>	9.87 <sup>b</sup>
150	41167	16.47 <sup>b</sup>	678.2 <sup>c</sup>	10.83 <sup>a</sup>
180	55920	16.57 <sup>b</sup>	926.4 <sup>a</sup>	8.63 <sup>c</sup>
<b>MEDIA</b>		16.52	755.0	9.62

\*\*\*Medias con las mismas literales en las columnas, son estadísticamente iguales.

### 5.6. PRODUCCIÓN TEÓRICA DE ETANOL

El rendimiento teórico de etanol por tonelada de biomasa no mostró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las frecuencias de corte (Cuadro 9). El rango va de 254.0 a 261.5 L t<sup>-1</sup> de biomasa. Forero *et al.* (2015) obtuvieron 126.41 L t<sup>-1</sup> en bagazo de caña. Albarracín *et al.* (2015), al trabajar con diferentes tiempos de fermentación, obtuvieron un rendimiento máximo de 0.18 g de etanol por g de paja a las 72 horas, lo que equivale a 140.4 L t<sup>-1</sup> de paja. Sin embargo, debido a que el rendimiento anual de

etanol por hectárea se encuentra en función del rendimiento total anual de biomasa, se pueden observar diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las edades de cosecha, siendo a los 180 días donde se encuentra la mayor producción teórica de etanol por hectárea ( $14202,9 \text{ L ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y la menor producción se presenta a los 120 días ( $9201.6 \text{ L ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Estos resultados difieren de lo encontrado por Wongwatanapaiboon *et al.* (2012), quienes reportan rendimientos de  $2720.55 \text{ L ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  al realizar sacarificación y co-fermentación simultánea en pasto Mott. Ellos mencionan que éste resultado representa el 30.6% del valor teórico, lo que significa que se obtendrían  $8890.7 \text{ L ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de forma teórica.

Ventura (2016) menciona que se necesitan 0.573 g de biomasa para obtener 0.0301 L de etanol, al realizar pre-tratamiento básico-oxidante, hidrólisis enzimática, fermentación y destilación en biomasa de pasto Maralfalfa, lo cual significa que sólo se podrían producir alrededor de  $53 \text{ L t}^{-1}$  de biomasa mediante esta técnica, lo cual se encuentra muy por debajo de lo encontrado de manera teórica en el presente estudio. Sin embargo, reporta rendimientos teóricos de 3373.3, 4691.5, 4435.9 y  $7936.2 \text{ L ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  a 90, 120, 150 y 180 días respectivamente en pasto Taiwan usando la fórmula propuesta por Badger (2002).

**Cuadro 10.** Rendimiento teórico de etanol del pasto Mott a diferentes frecuencias de corte.

<b>FRECUENCIA DE CORTE (DIAS)</b>	<b>REDIMIENTO DE ETANOL (L t<sup>-1</sup>)</b>	<b>RENDIMIENTO DE ETANOL (L ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)</b>
<b>90</b>	254.0 <sup>a</sup>	13009.5 <sup>b</sup>
<b>120</b>	256.2 <sup>a</sup>	9201.6 <sup>d</sup>
<b>150</b>	261.5 <sup>a</sup>	10765.3 <sup>c</sup>
<b>180</b>	254.0 <sup>a</sup>	14202.9 <sup>a</sup>
<b>MEDIA</b>	256.5	11684.4

\*\*\*Medias con las mismas literales en las columnas, son estadísticamente iguales.

## **VI. CONCLUSIONES**

Con excepción del cultivar Mott que presento el mayor rendimiento de forraje a en la frecuencia de corte de 90 días, la mayor producción de forraje en todos los cultivares se obtuvo en la frecuencia de corte de 180 días.

En todos los cultivares las mayores alturas de plantas se observaron en la frecuencia de corte de 180 días (2.9 m), y la menor altura entre cultivares se observó en el CT-115 con 2.49 m.

Las mayores densidades poblacionales de tallos vivos se registraron en los cultivares Maralfalfa y Mott. La mayor densidad poblacional de tallos se registró en la frecuencia de corte de 90 días en todos los cultivares.

En la composición química del pasto Mott, se encontraron los contenidos más altos de holocelulosa, celulosa, hemicelulosa y poder calorífico a los 90 días y el menor

contenido de lignina. El mayor porcentaje de extractivos y producción de energía y se observó a los 180 días.

El mayor rendimiento teórico de etanol en todos los cultivares se registró en la frecuencia de corte de 180 días.

## VII. LITERATURA CITADA

Agüero-Rodríguez, J. C., Tepetla-Montes J. y Torres-Beristáin B. 2015. Producción de biocombustibles a partir de la caña en Veracruz, México: perspectivas y riesgos socio-económicos. CienciaUAT. Vol. 9, núm. 2.

Aguilar, R. N. 2003. Retos de la biomasa en el desarrollo sustentable. Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Veracruzana. Córdoba, Ver.

Ajila, M. V. H. y Chiliquinga M.B. 2007. Análisis de legislación sobre biocombustibles en América Latina. Artículos técnicos.

Albarracín, K., Jaramillo L., Albuja M. 2015. Obtención de bioetanol anhidro a partir de paja (*Stipa ichu*). Revista Politécnica. Vol. 36, núm. 2.

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

Álvarez, M. C. 2009. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. Economía Informa, núm. 359.

Araya, M. M., y Boschini F. C. 2005. Producción de forraje y calidad nutricional de variedades de *Pennisetum purpureum* en la meseta central de Costa Rica. Agronomía Mesoamericana, vol. 16, núm. 1. Pp. 37-43.

- Aristidou, A. and Penttila M. 2000. Metabolic engineering applications to renewable resource utilization. *Current opinion in Biotechnology*. 11: 187-198.
- Badger, C. P. 2002. Ethanol from cellulose: A general review. *Trends in new crops and new uses*. J. Janick y A. Whipkey (eds.) ASHS Press, Alexandria, VA.
- Balat, M., H. Balat and S. Oz. 2008. Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and combustion Science*. 34: 551-573.
- Becerra, P. L. A. 2009. La industria del etanol en México. *Revista Economía UNAM*. Vol. 6, núm. 16.
- Béguin, P. y J. P. Aubert .1994. The biological degradation of cellulose. *FEMS Microbiol Rev*. 13:25–58.
- Bemhaja, M. 2000. Pasto elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) INIA Lambaré. Boletín de divulgación núm. 72. INIA Tacuarembó.
- Bioenergeticos.mx. 2016. Planta Etanol Tamaulipas Norte. <http://www.bioenergeticos.mx/index.php/espanol>. Consultado el 22 de junio de 2016.
- Blade Energy Crops. 2010. Managing High-Biomass Sorghum as a Dedicated Energy Crops. [http://www.bladeseeds.com/wp-content/themes/Divi/pdf/Blade\\_SorghumMgmtGuide2010.pdf](http://www.bladeseeds.com/wp-content/themes/Divi/pdf/Blade_SorghumMgmtGuide2010.pdf). Consultado el 27 de junio de 2016.
- Boron, A. 2007. Biocombustibles: el porvenir de una ilusión. INI – Justicia ambiental. <http://www.tni.org/es/article/biocombustibles-el-porvenir-de-una-ilusi%C3%B3n>. Mayo de 2013.

- Brown, R. M. 2003. Cellulose structure and biosynthesis: What is in store for the 21st century? *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*. 42: 248-495.
- Cardona, E., Rios, J., Pena, J. y Rios L. 2013. Pre tratamiento alcalino de pasto elefante (*Pennisetum sp*) y king grass (*Pennisetum hybridum*) cultivados en Colombia para la producción de Bioetanol. *Información Tecnológica*, Vol. 24, No. 5. Pp. 69-80.
- Carluccio, D., Trejo J., Pozzi M. y Filippin A. J. 2015 Evaluación de biomasa olivícola a partir de la caracterización química y el poder calorífico. *Enfoques Interdisciplinarios para la sustentabilidad del ambiente. SACyTA 2015*. Pp. 279-284.
- Castaño, P. H. I. 2008. La yuca como alternativa para la producción de alcohol carburante. *Revista Politécnica*. 6: 25-38.
- Castro, M. C., Valverde M. E. y Paredes L. O. 2009. Biocombustibles: biomasa lignocelulósica y procesos de producción. *Ideas Concyteg*, Año 4, Número 54.
- Centro de Documentación e Información Mtro. Jesús Silva Herzog CEDI. 2008. El Financiero. <http://biblioteca.iiec.unam.mx>. Consultado el 15 de junio de 2016.
- Chuck-Hernandez, C., Pérez-Carrillo E., Heredia-Olea E. y Serna-Saldívar S. O. 2011. Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de Bioetanol en México: tecnologías, avances y áreas de oportunidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 10, núm. 3. Pp. 529-549.
- CONADESUCA. 2016. Reporte de producción de caña y azúcar, semana 37 del ciclo zucarero 2015/2016.

- Coviello, M. F., Gómez J. J., Razo C. Rodríguez A. 2007. Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe. CEPAL.
- Cuervo, L., Folch J. L., Quiroz R. E. 2009. Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol. BioTecnología. Vol. 13, núm. 3.
- Dashtban, M., Schraft H., Syed A. T. y W. Qin. 2010. Fungal biodegradation and enzymatic modification of lignin. Int J. Biochem. Mol. Biol. 1(1):36-50.
- De Lucas, A., Villaseñor, J. y Lobato, J. 2004. Termotecnia básica para ingenieros químicos: bases de termodinámica aplicada; Cuenca – Ediciones de la Universidad de la Castilla – La Mancha. Pp. 10.
- Periódico Oficial. 2011. Programa institucional biodiesel Chiapas 2011-2012. Periódico Oficial No. 327-3a.
- El Heraldo de Chiapas. 2010. Planta de biodiesel en Chiapas. <http://www.moreco.com.mx/noticias/planta-de-biodiesel-en-chiapas/>. Consultado el 22 de junio de 2016.
- Enerall. 2016. La higuera, un cultivo bioenergético. [http://bioturbosina.asa.gob.mx/work/models/BIOTurbosina/Docs\\_BIOTurbosina/14Higuera.pdf](http://bioturbosina.asa.gob.mx/work/models/BIOTurbosina/Docs_BIOTurbosina/14Higuera.pdf). Consultado el 1 de julio de 2016.
- Escobar, C. L. y Villamil E. L. 2008. Gestión sobre los recursos bioenergéticos (biomasa vegetal) y la importancia de regulación de las áreas de producción. Monografía. Universidad Tecnológica de Pereira, facultad de Ciencias Ambientales.



- Espinosa, de A. W., Goddard J. M. G., Gutiérrez A. C. y Bonfil S. C. 2009. Los biocombustibles. Revista ¿Cómo ves? Número 123. <http://www.comoves.unam.mx/numeros/indice/123>.
- Fengel, D. and Wegener G. 1984. Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions. W. de Gruyter (ed.). 2<sup>nd</sup> Edition. Berlin. 613 p.
- Fletes, H. B., Rangel F., Oliva V. A., Ocampo G. G. 2013. Pequeños productores, reestructuración y expansión de la palma africana en Chiapas. Región y Sociedad. Año XXV, núm. 57.
- Forero, H., García C. y Cardona C. 2015. Aplicación de la termodinámica en la síntesis óptima de procesos químicos y biotecnológicos. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas. Núm. 13.
- García, J. A. 2008. Biocombustibles de segunda generación a partir de biomasa. El Palmicultor, columna de opinión, núm 434.
- Girio, F. M., Fonseca, C., Carvalheiro, F., Duarte, L.C., Marques, S. y R. Bogel-Lukasik. 2010. Hemicelluloses for fuel ethanol: A review. Bioresour Technol. 101(13):4775-800.
- Gonsalves, Joseph B. 2006. An Assessment of the Biofuels Industry in India. United Nations Conference on Trad and Development.
- González, A. A., García M. K. de la P., Hernández G. M. A., Rico P. H. R., Hernández M. M., Solís B. J. L. y Zamarripa C. A. 2011. Guía para cultivar higuierilla (*Ricinus communis* L.) en Jalisco. INIFAP, campo experimental Centro Altos de Jalisco.

- González, M. A. y Castañeda Z. Y. 2008. Biocombustibles, biotecnología y alimentos. Impactos sociales para Mexico. Argumentos (Mex), Vol. 21, Número 57.
- Guyat, D. M. A., Alderete R. E., Velazquez V. D., Manzanares A. K. y López E. I. 2005. Producción de energía y biofertilizante a partir de aserrín. Revista Forestal Baracoa. Vol. 24, Núm. 1.
- Guzmán, R. A. La bioenergía en México: proyectos, más no realidades. <http://energiaadebate.com/la-bioenergia-en-mexico-proyectos-mas-no-realidades/>. Consultado el 22 de junio de 2016.
- Havard-duclos, B. 1969. Las plantas forrajeras tropicales. Ed. Blume. Barcelona, España.
- Higuera, C. O. F., Trisancho R. J. L., Florez G. L.C. 2007. Biocombustibles y su aplicación en Colombia. Scientia et Technica, número 34, año XIII.
- IICA. 2007. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: i. etanol. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica.
- IICA. 2007. El estado del arte de los biocombustibles en Paraguay. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Asunción, Paraguay.
- IICA. 2008. Situación y perspectivas de los biocombustibles en el Perú. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Lima, Perú.
- Ishler, V. y G. Varga. 1993. Carbohydrate nutrition for lactating dairy cattle. Department of Dairy and Animal Science. The Pennsylvania State University. DAS 01-29.
- Islas, J., Manzini, F. y O. Maser. 2007. A prospective study of bioenergy use in México. Energy. 32: 2306-2320.

- Jacobsen, S. y C. Wyman. 2000. Cellulose and hemicellulose hydrolysis models for application to current and novel pretreatment processes. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 84: 81–96.
- Kollmann, F. 1959. *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera. Madrid, España.
- Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. 2008. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de febrero de 2008.
- López, G. I., Enriquez Q. J. F. 2011. *Paquete Tecnológico Zacate Pennisetum purpureum* Establecimiento y producción. INIFAP: Programa Estratégico para el Desarrollo Rural Sustentable de la Región Sur – Sureste de México Trópico Húmedo 2011.
- MAG. 2016. Higerilla. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. [www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/tec-higerilla.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec-higerilla.pdf). consultado el 30 de junio de 2016.
- Mármol, J. 2006. Manejo de pastos y forrajes en la ganadería de doble propósito. En: *Memorias del X Seminario Manejo y Utilización de Pastos y Forrajes en Sistemas de Producción Animal*. FUNDAPASTO y Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad de Zulia Maracaibo (Venezuela).
- Monbiot, G. 2008. *Calor: Como parar el calentamiento global*. Barcelona: RBA Libros.
- Montes, G. N., PECINA Q. V., María Eugenia CISNEROS L. M. E. y GARCÍA G. M. A. 2010. RB CAÑERO: sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para la producción de etanol. INIFAP, Centro de Investigación Regional del Noreste, Campo Experimental Río Bravo. Folleto Técnico Núm. 43.

- Nava, C. J. J., Gutiérrez O. E., Zavala G. F., Olivares S. E., Treviño J. E., Hugo Bernal B. H. y Herrera G. R. S. 2013. Establecimiento del pasto 'CT-115' (*Pennisetum purpureum*) en una zona semiárida del noreste de México. Rev. Fitotec. Mex. Vol. 36, núm. 3. Pp. 239-244.
- PEMEX. 2016. Indicadores petroleros. Consultado en el 27 de junio de 2016: <http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/IndicadoresPetroleros.aspx>.
- Pérez, J., Muñoz, D. A., De la Rubia, T. y E. Martínez. 2002. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. Int. Microbiol. 5: 53–63.
- Puls, J. 1997. Chemistry of Hemicelluloses: Relationship between hemicellulose structure and enzymes requerid for hydrolysis. Macromolecular symposia. (eds). Volume 120. Germany. Pp. 183-196.
- Quesada-Solís, K., Alvarado-Aguilar P., Sibaja-Ballesteros R. y Vega-Baudrit. 2005. Utilización de las fibras del rastrojo de piña (*Ananas comusus*, variedad *champaka*) como material de refuerzo en resinas de poliéster. Revista Iberoamericana de Polímeros. Vol. 6, núm. 2.
- Ragauskas, A. J., Williams C. K., Davison B. H., Britovsek G., Cairney J., Eckert C. A., Frederick W. J. Jr., Hallett J. P., Leak D. J., Liotta C. L., Mielenz J. R., Murphy R., Templer R. y Tschaplinski T. 2006. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science*. 311: 484-489.
- Ramos, T. O., Canul S. J. R., y Duarte V. F. J. 2013. Producción de tres variedades de *Pennisetum purpureum* fertilizadas con dos diferentes fuentes nitrógenadas en Yucatán, México. Revista BioCiencias. Vol. 2, num. 2. Pp.60-68.

- Richard, L. Ottinger. 2007. Biofuels – Potential, Problems & Solutions. BIOFUELS CONFERENCE. Pp. 3, 4.
- Rodríguez-Carrasquel, S. 1983. Pasto Elefante (*Pennisetum purpureum*, Schumacher), originario de África. FONAIAP DIVULGA No. 12
- Romero-Uscanga, E., Montero-Alpirez G., Toscano-Palomar L., Pérez-Pelayo L., Torres-Ramos R. y Beleño-Cabarcas M. T. 2014. Determinación de los principales componentes de la biomasa lignocelulósica; celulosa, hemicelulosa y lignina de la paja de trigo para su posterior pretratamiento biológico. XVII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas.
- Rowell, R. M., Pettersen R., Han J. S., Rowell J. S. y Tshabalala M. A. 2005. Cell wall chemistry. In: Rowell R. M. (ed.) handbook of Wood chemistry and Wood composites. CRC Press, Boca Ratón, Florida, USA. Pp: 35-74.
- SAGARPA. 2009. Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico 2009-2011.
- SAGARPA. 2010. Palma de aceite. Monografías de cultivos. Secretaría de Fomento a los Agronegocios. SAGARPA.
- Santiago, O. M. A. 2015. Evaluación de la biomasa lignocelulósica del pasto Toledo (*Brachiaria brizanta* CIAT 26110) para la producción de bioetanol. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, campus Montecillo.
- SAS Institute. 2002. Statistical Analysis System (SAS). Software v.9.0. User's Guide. N. C., USA. 315 p.

- Scheller, H. V. and Ulskov P. 2010. Hemicelluloses. *Annual Review Plant Biology*. 61: 263-289.
- SENER. 2006. Potenciales y Viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México. Secretaría de Energía (SENER).
- Service, R. F. 2007. Biofuel researchers prepare to reap a new harvest. *Science*. 315:1488-1491.
- SIAP. 2014. Producción agrícola ciclo 2014. SAGARPA.
- J. Suárez, G. J. Martín, J. A. Sotolongo, E. Rodríguez, Valentina Savran, L. Cepero, F. Funes-Monzote, J. L. Rivero, D. Blanco, R. Machado, C. Martín y A. García. 2011. Experiencias del proyecto BIOMAS-CUBA. Alternativas energéticas a partir de la biomasa en el medio rural cubano. *Pastos y Forrajes*, Vol. 34, No. 4; Pp. 473-496.
- Stratta, J. 2000. BIOCMBUSTIBLES: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel. Investigación y Desarrollo – Departamento de Capacitación y Desarrollo de Mercado. Rosario, Argentina.
- Sun, R. C., Fang J. M., Rowlands P. and Bolton J. 1998. Physicochemical and thermal characterization of wheat straw hemicelluloses and cellulose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 46: 2804-2809.
- Sues, A., Millati R. and Edebo L. 2005. Ethanol production from hexoses, pentoses and dilute-acid hydrolysate by *Mucor indicus*. *Federation of European Microbiological Societies (FEMS) Yeast Research*. 5: 669-676.
- Uvidia, H., Buestán D., Leonard I., Robalino T. y Benítez D. 2014. Influencia de la distancia de siembra y el número de estacas en el establecimiento del pasto

- Maralfalfa (*Pennisetum purpureum*) en condiciones de la Amazonía ecuatoriana. Revista Amazónica Ciencia y Tecnología. Vol. 3, Núm. 1. Pp. 13-20.
- Valero, P. J., Cortina V. H. S. y Vela C. M. P. 2011. El proyecto de biocombustibles en Chiapas: experiencias de los productores de piñón (*Jatropha curcas*) en el marco de la crisis rural. Estudios Sociales, Vol. XIX, núm. 38.
- Vega-Baudrit, J., Delgado-Montero K., Sibaja B. M. y Alvarado A. P. 2008. Materiales poliméricos compuestos obtenidos a partir de los residuos generados por la agroindustria de la caña de azúcar. Una alternativa adicional. Revista Iberoamericana de Polímeros. Vol. 9, núm. 4.
- Velasco, Z. Ma. E., Hernández-Garay A., Perezgrovas G. R. A., y Sánchez M. B. 2006. Producción y manejo de los recursos forrajeros tropicales. Universidad Autónoma de Chiapas.
- Viguiristi, J. A. 2008. Biocombustibles de segunda generación. Reportaje de la Revista del Colegio Oficial de Físicos. Física y Sociedad.
- Waldron, K. W., Parker, M. L. y A. C. Smith. 2003. Plants cell walls and food quality. Comprehensive reviews in food science and food safety. 2:101-119.
- Wongwatanapaiboon, J., Kangvansaichol, K., Burapatana, V., Inochanon, R., Winayanuwattikun, P., Yongvanich, T. y W. Chulalaksananukul. 2012. The potential of cellulosic ethanol production from grasses in Thailand. J. Biomed. Biotech. 2012: 303748.

Zamarripa, C. A., Ruiz C. P. A., Solís B. J. L., Martínez H. J., Olivera de los S. A. y  
Martínez V. B. 2009. Biocombustibles: perspectivas de producción de  
biodiesel a partir de *Jatropha curcas* L. en el trópico de México. INIFAP,  
Folleto técnico núm. 12.