

Revisión

FACTORES PREVIOS INVOLUCRADOS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL, ASPECTOS A CONSIDERAR

Jorge Noel GRACIDA RODRÍGUEZ^{1*} y Baruc PÉREZ-DÍAZ²

¹Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de Las Campanas s/n, Querétaro. C. P. 76010, Querétaro, México

²Departamento de Biotecnología, Universidad Politécnica de Pachuca, Carretera Pachuca-Cd.- Sahagún km 20. Exhacienda de Santa Bárbara. 43830 Hidalgo, México

*Autor responsable; gracidaj@netscape.net

(Recibido agosto 2013, aceptado abril 2014)

Palabras clave: biocombustible, azúcares fermentables, pretratamientos de sustratos, características de legislaciones

RESUMEN

Este trabajo es una revisión sobre los factores previos involucrados en la producción de bioetanol. Se enfoca en una primera parte en los sustratos que desde la última década hasta la fecha se han utilizado para la producción de bioetanol, los pretratamientos que reciben algunos sustratos para favorecer la liberación de azúcares fermentables presentes en los mismos, las legislaciones alrededor del bioetanol en algunos países, las características que debe cumplir este líquido para su utilización como combustible y algunas barreras que delimitan su producción. Se muestra que la producción de bioetanol es un problema complejo y que está influenciado por aspectos sociales, políticos y de índole tecnológico.

Key words: biofuels, fermentable sugars, substrates pretreatments, environmental laws

ABSTRACT

This work is a review of some previous factors involved in bioethanol production. The first part focuses on the substrates that are being used for the production of bioethanol from the last decade to date, and to pretreatments applied to some substrates to promote the release of fermentable sugars present in them. Few comments are made about bioethanol production legislations in some countries, the required characteristics for its use as liquid fuel and some barriers that limit their production. It is shown that the production of bioethanol is a complex problem that is influenced by social, political and technological aspects.

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de la población mundial está ocasionando grandes problemáticas, algunas de ellas relacionadas con el agotamiento de las fuentes

de energía. Por ejemplo los combustibles fósiles, productos derivados del petróleo, son una materia prima que se está agotando en todo el mundo por su sobreexplotación; causando un incremento en sus costos y subproductos (Gutiérrez 2009).

Dicho fenómeno ha impulsado el desarrollo de fuentes de energías sustentables, baratas y amigables con el ambiente, como es el caso de los biocombustibles (bioetanol, biodiésel, biogás). El bioetanol junto con el biodiésel, forman los dos grandes grupos de biocombustibles líquidos en la actualidad.

El mercado mundial dedicado a la producción de bioetanol se incrementó alrededor del 40 % de 2007 a 2012. Estados Unidos y Brasil producen el 19 % del total mundial.

En México se produjo menos del 0.3 % del total mundial en 2012. Entre 2006 y 2007 Estados Unidos produjo 6000 millones de galones de bioetanol (Pérez *et al.* 2007) y en 2010, Brasil produjo 6921.54 millones de galones (RFA 2013).

El bioetanol (alcohol etílico o alcohol carburante), cuya fórmula química es C_2H_5OH , se obtiene vía fermentativa utilizando diversas fuentes, como por ejemplo la material vegetal. Ésta contiene azúcares no libres (almidones y celulosa principalmente) que son fermentados por distintos microorganismos para la obtención de bioetanol. Algunas de las principales materias primas para la producción de bioetanol son maíz, trigo, sorgo, remolacha azucarera, caña de azúcar, melaza, madera y residuos de podas entre otros. Sin embargo el uso excesivo y la demanda por estas materias primas en distintos sectores (alimenticio, ganadero, etc.), ha incentivado la búsqueda de sustratos alternos, con disponibilidad de azúcares fermentables que permitan producir el bioproducto de manera eficiente y barata.

Por ejemplo, en México la producción de energía primaria en el año 2011 fue de más de 9 mil PetaJoules (PJ) y solo el 7 % provenía de energías renovables (Fig. 1).

Entre las industrias en México que producen azúcares a partir de caña, se encuentran los ingenios azucareros; de estos, 18 cuentan con destilería para la producción de etanol y únicamente lo producen La Concepción (19 751 m³/año), San José de Abajo (2027 m³/año), San Nicolás (4159 m³/año), Constanza (1709 m³/año), Puljitic (8640 m³/año), Tamazula (1795 m³/año), Calipán (426 m³/año) y San Pedro (196 m³/año). Dicha producción se destina a satisfacer la demanda de bebidas alcohólicas y de la industria química (Noriega 2009).

La Secretaría de Energía (SENER) tiene identificados 13 proyectos de investigación para la producción de etanol de segunda generación, utilizando residuos de podas y de algas, siendo el más relevante el de la empresa *Blue Fuel*, ubicada en el estado de Jalisco, dedicada a la producción de etanol anhidro a

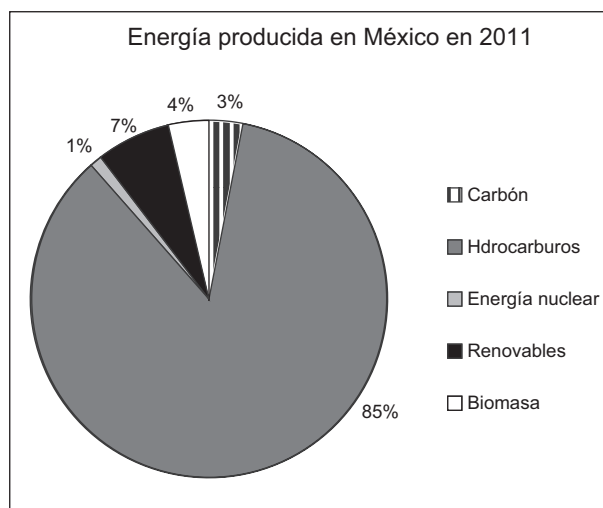


Fig. 1. Representación de la energía producida en México por los distintos tipos de fuentes

partir de agave y sus residuos, la cual alcanza los 9.2 millones de litros mensuales (SENER 2013).

Los sustratos utilizados en la producción de bioetanol son ricos en lignocelulosa, que es el principal componente de la pared celular de las plantas. El material lignocelulósico es de bajo costo y altamente disponible. Sin embargo, el principal impedimento para su utilización es la falta de tecnología de bajo costo para degradar la fracción recalcitrante de la biomasa. Existen procesos fisicoquímicos para la obtención de biocombustibles a partir de este tipo de biomasa, no obstante, el uso de microorganismos que pueden degradar este material y así obtener azúcares fermentables es una alternativa viable para llevar a cabo este proceso.

Anualmente se producen 200 000 millones de toneladas de lignocelulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) en todo el mundo (Ragauskas 2006). La composición y porcentajes de los polímeros varían de acuerdo con la especie, la edad y la etapa de crecimiento de la planta (Jeffries 1994).

La celulosa, principal componente de la lignocelulosa es un polímero de D-glucosa con enlaces glucosídicos β -1,4 que forma largas cadenas lineales (microfibrillas) unidas por fuerzas de Van der Waals o por puentes de hidrógeno, lo que da lugar a una estructura cristalina resistente a la hidrólisis y con regiones amorfas ideales para la degradación enzimática (Ovando y Waliszewski 2005).

La hemicelulosa es un polímero formado por heteropolisacáridos (polisacáridos formados por diferentes monosacáridos) como pentosas (como L-arabinosa y D-xilosa) y hexosas (como D-manosa, D-glucosa y D-galactosa) con formas ramificadas

unidas por enlaces β -1,4 y en algunos casos por enlaces β -1,3, además de los ácidos D-glucurónico, 4-O-metilglucurónico y D-galacturónico.

La lignina es un heteropolímero, de estructura amorfa, ramificada y tridimensional constituida por alcoholes aromáticos que le brindan rigidez, impermeabilidad y protección a los polisacáridos (celulosa y hemicelulosa). Es su estructura la que la hace resistente a la degradación química y biológica, característica importante en la selección de fuentes de carbono para la obtención de bioetanol (Nogués *et al.* 2010).

En la naturaleza, la degradación la llevan a cabo microorganismos a través de sistemas enzimáticos extracelulares que van rompiendo la celulosa (celulasas) en moléculas más pequeñas, la hemicelulosa, que a su vez es degradada por las hemicelulasas; por otra parte, las peroxidasas y las lacasas degradan a la lignina (Quintanar *et al.* 2012). Sin embargo, en el laboratorio o la industria el sustrato debe someterse a un tratamiento previo para poder tener fácil acceso a los azúcares que serán fermentados. Existen diversos procesos para el tratamiento del material lignocelulósico y se clasifican por la naturaleza de su fundamento en métodos físicos, químicos y biológicos (Sun y Cheng 2002), ejemplos de los mismos se exponen en esta revisión.

Además de los sustratos reportados para la producción de bioetanol, hay que considerar otras características como su composición, la cantidad de bioetanol que se obtiene y el microorganismo fermentador. En la presente revisión se describen algunos procesos previos a la fermentación de diversos sustratos probados y las características más relevantes de los mismos. Se discuten también consideraciones relacionadas con el retorno económico de la producción. Por último se mencionan algunos aspectos de las legislaciones respecto de la producción de bioetanol.

Hidratos de carbono presentes en los sustratos

Los azúcares, también llamados hidratos de carbono, pueden clasificarse por su complejidad estructural, en donde las unidades más complejas están formadas por unidades más sencillas.

Monosacáridos

Los monosacáridos son moléculas simples con una estructura de cadenas carbonadas lineales por lo regular de 3 a 8 carbonos, también reciben el nombre de polihidroxialdehídos y polihidroxicetonas, el extremo de su cadena tiene un grupo hidroxilo (OH). Estos a su vez se pueden clasificar por la posición de

su grupo aldehído o cetona y la longitud de su cadena: las moléculas con un grupo aldehído se conocen como aldosas y las moléculas con un grupo cetona se nombran cetosas. Para el largo de cadena se ocupan prefijos como tri, tetro, pento, etc., los monosacáridos más comunes en la naturaleza y en alimentos son las aldopentosas, aldohexosas, cetopentosas y cetohehexosas.

Disacáridos

Son moléculas formadas por dos monosacáridos unidos mediante un enlace O-glicosídico, entre el carbono anomérico de un monosacárido y el carbono no anomérico del otro, con la intervención de una molécula de agua. Existen también monosacáridos unidos por dos carbonos anoméricos. Algunos ejemplos son la sacarosa (azúcar de mesa formada por una molécula de glucosa más una molécula de fructosa), la lactosa (molécula de galactosa más glucosa), presente en leche, y la maltosa (molécula obtenida de la hidrólisis del almidón), disacárido presente en la elaboración de cerveza y whisky.

Oligosacáridos

Es el nombre que se usa para denominar a las cadenas de monosacáridos que contienen de unas pocas unidades hasta varios cientos de estos monómeros unidos. Están presentes en fuentes naturales, aunque en mucha menor frecuencia y cantidad que los mono, di y polisacáridos; condición que no los hace ser de importancia menor, un ejemplo de oligosacáridos en la industria son las dextrinas.

Polisacáridos

Son moléculas lineales o ramificadas con muchos cientos o miles de monosacáridos, siendo la glucosa el más importante. Estos azúcares forman parte de la reserva y estructura fundamental en las plantas, por ejemplo el almidón, un polisacárido de importancia industrial. Estas moléculas se pueden clasificar por su función, como estructurales o de reserva. Los polisacáridos de reserva, como el almidón que es almacenado en gránulos, forman hasta el 75 % del cereal o tubérculo al que pertenezcan. En tejidos animales el azúcar que se almacena se llama glucógeno, mayormente presente en las células musculares. Los dextranos, polisacáridos de reserva producidos por algunas bacterias, son estructuras constituidas por cadenas ramificadas de glucosa, con enlaces α -1-6, y ramificaciones α -1-3 y α -1-4. Estos polisacáridos son clasificados como de reserva; los clasificados como estructurales son la celulosa y la hemicelulosa presentes en la composición de la madera (Quintanar *et al.* 2012).

Para la producción de bioetanol los polisacáridos de reserva son más fáciles de hidrolizar y de fermentar.

Pretratamientos para liberar azúcares

Para poder utilizar los azúcares presentes en los materiales lignocelulósicos es necesario realizar uno o varios pretratamientos que ayuden a la hidrólisis de la lignocelulosa. El objetivo de realizar un pretratamiento es generar regiones amorfas que sean débiles ante la hidrólisis (Hu y Wen 2008).

Los pretratamientos varían de acuerdo con la composición de la materia a hidrolizar, y conforme su fundamento, ya sea físico, fisicoquímico, químico o biológico, los cuales a su vez difieren en costo y eficiencia. A continuación se muestran algunos de los principales pretratamientos usados para la materia lignocelulósica.

Métodos físicos

Estos consisten en una reducción en el tamaño de partícula mediante la molienda, exposición a altas temperaturas, radiación, vapor, secado y humectación; los principales métodos son:

- **Pulverizado mecánico o molienda:** consiste en triturar el material lignocelulósico hasta reducir el tamaño de partícula a 0.2-2 mm, exponiendo la celulosa.
- **Pirólisis:** se lleva el material lignocelulósico a una temperatura mayor de 300 °C, descomponiendo el material en gases y carbón.
- **Agua caliente:** se utiliza agua a presión (350-400 psi), a una temperatura de 170-230 °C, de 1 a 46 minutos.

Métodos fisicoquímicos

Combinan métodos físicos y químicos, se reduce el tamaño de partícula cambiando su estructura por medio de métodos químicos; los principales son:

- **Explosión a vapor:** se utiliza vapor saturado (160-260 °C) y presión (0.69-4.85 MPa), por un tiempo corto (segundos o minutos), y ocurre una autohidrólisis, en donde el agua produce protones que interactúan con el grupo acetilo presente en la hemicelulosa, produciendo ácido acético (Barroso 2010) y oligómeros (Soderstrom *et al.* 2003).

Las ventajas de este método son que se logra la hidrólisis casi completa de la hemicelulosa y que hay poca hidrólisis de lignina. Entre sus desventajas están

la producción de derivados del furano y la generación de derivados fenólicos (Barroso 2010).

- **Explosión de fibra con amoniaco:** se utiliza una solución, la cual al combinarse con el efecto físico producido por el vapor a alta temperatura, degrada la estructura lignocelulósica y a la vez, aumenta la solubilidad de la hemicelulosa. Además se rompen los enlaces lignina-carbohidrato, lo que provoca una disminución en la cristalinidad de la celulosa y aumento en la porosidad, lo que a su vez mejora el rendimiento de liberación de monosacáridos durante la hidrólisis. El material lignocelulósico se trata con amoniaco con una relación de 1 a 2 kg de amoniaco/kg de material seco a temperaturas superiores a 90 °C por 30 minutos. Se nombra AFEX (por sus siglas en inglés *Ammonia Fiber Expansion*) si el proceso es por lotes y FIBEX cuando es en continuo (*Fiber Expansion*).

En estos métodos ya no se requeriría hidrólisis enzimática. Algunas de sus ventajas son la recuperación y reutilización del amoniaco, que el material tratado tiene una amplia estabilidad en función del tiempo y que no se requiere de un tratamiento previo para la posterior hidrólisis enzimática. Su principal desventaja es que el contenido de lignina de la biomasa a tratar deberá ser menor al 15% para la obtención de un rendimiento del 90 % (hemicelulosa y celulosa) en la hidrólisis enzimática, de lo contrario el rendimiento es menor al 50 % (Barroso 2010).

- **Explosión con CO₂:** se trata al material con CO₂ en una relación de 4 kg de CO₂ /kg de material, a una presión de 5.62 MPa (Sun y Cheng, 2002).

Métodos químicos

Su objetivo es la alteración de la estructura del material lignocelulósico, específicamente en la estructura de la celulosa, empleando distintos químicos, como ácidos y bases.

- **Hidrólisis con ácidos:** el método utiliza ácidos diluidos a 1-5 % o concentrados a 21-60 %, los ácidos que más se emplean son:

Ácido sulfúrico (H₂SO₄): es un ácido fuerte que al calentarse a más de 30 °C desprende vapores y por encima de 200 °C emite trióxido de azufre, cuando está frío reacciona con metales y al estar caliente su reactividad aumenta; tiene afinidad por el agua, razón por la que extrae el agua de las

materias orgánicas, carbonizándolas (Angiolani 1960). Se ha utilizado en el pretratamiento de *Pennisetum* sp. (pasto gigante), donde se empleó a un 2 % (p/p) a 190 °C (Mateus 2001).

Ácido clorhídrico (HCl): En solución acuosa también llamado ácido muriático, de color amarillo (causado por elementos traza como hierro, cloro o materia orgánica), se utiliza en la hidrólisis de almidón y proteínas, y como catalizador y disolvente en síntesis orgánicas (UNAM 2013).

Ácido nítrico (HNO₃): líquido incoloro o amarillo pálido, utilizado en la síntesis de colorantes, fertilizantes, fibras, plásticos y explosivos, en contacto con el agua genera calor; cuando actúa sobre el material lignocelulósico, modifica su estructura y se obtienen azúcares solubles en el agua (UNAM 2013).

Los procesos mencionados se llevan a cabo regularmente a temperaturas entre 120-160 °C para ácidos diluidos y 170-190 °C para ácidos concentrados, con una presión de 1 MPa (Rodríguez *et al.* 2004).

- **Hidrólisis alcalina:** el tratamiento se realiza con químicos básicos diluidos, se produce un hinchamiento del material separando las uniones de la lignina, la eficiencia del tratamiento depende de la cantidad de lignina contenida en el material, la base más usada es el hidróxido de sodio (NaOH), también llamada sosa cáustica. Es un sólido de color blanco, higroscópico, utilizado en la fabricación de papel, algodón, prendas textiles y jabones (Acosta 2008). El material lignocelulósico se trata por un periodo de 24 h, a una temperatura de 60 °C (Sung y Cheng 2002). Se ha utilizado en la obtención de azúcares de aserrín de pino al 8 % (p/v), y a una temperatura de 120 °C (López *et al.* 2007).
- **Ozonólisis:** es un método de ruptura por medio de ozono (O₃), comúnmente usado para preparar cetonas y aldehídos en la industria química, también se utiliza en la determinación de alquenos; el método consiste en la adición de ozono al material lignocelulósico, se agrega a una temperatura de 4 °C a una concentración 10 % (p/v) (Silverstein *et al.* 2007), lo que provoca la degradación de la hemicelulosa y la lignina (Ben-Ghedalia y Miron 1981).
- **Solventes orgánicos:** se ocupan metanol y acetona, combinados con ácidos al 1 %, H₂SO₄ y HCl, o sustancias alcalinas como el NaOH, que funcionan como catalizadores; los solventes se remueven para evitar la inhibición de los microor-

ganismos (Lynd *et al.* 2002). Por ejemplo en el tratamiento de residuos de hojas y cogollos de la cosecha de caña de azúcar se realiza un proceso de deslignificación por solventes orgánicos a una temperatura de 150 °C por 2 h; en una porción sólido/líquido de 1:8 (p/v), constituido por una fase líquida de 45 % de etanol, usando como catalizador NaOH al 3 %; para después ser lavado con agua por 15 minutos (Mutis 2009).

Métodos biológicos

Los métodos biológicos consisten en cultivar organismos sobre el material lignocelulósico, los principales organismos utilizados son hongos y algunas bacterias: *Phanerochaete chrysosporium*, *Polyporus brumalis*, *Polyporus versicolor*, *Trametes* sp., *Poria* sp., *Nocardia* sp., *Streptomyces* sp., *Pseudomonas* sp. y *Flavobacterium* sp. (Ortiz 2008). Existen preparados enzimáticos para degradar el material lignocelulósico específicamente a celulosa y hemicelulosa.

- **Viscozyme:** es un complejo multienzimático, en forma líquida, de β -glucosidasa, arabinasa, celulasa y xilanasa generadas por *Aspergillus aculeatus* con una actividad enzimática de 100 U β G/g (unidades de β -glucosidasa por gramo).
- **Cellubrix L:** es una suspensión de las enzimas celulasa y celobiasa generadas por *Trichoderma longibrachatum* y *Aspergillus niger*, fermentadas por separado.
- **Pulpzyme HC:** es un líquido producido por una cepa genéticamente modificada (GM) de *Bacillus* sp. con una actividad catalítica de 1000 UX/g (unidades de actividad xilanolítica por gramo).
- **Novozyme:** preparación producida por una cepa GM de *Aspergillus* sp. contiene una endoglucanasa con una actividad catalítica de 5000 UEG/g (unidades de endoglucanasa por gramo).
- **Celluclast:** celulasas producidas por *Trichoderma reesei* con una actividad enzimática de 700 UCG/g (unidades de actividad celulolítica por gramo) (Hernández *et al.* 2009).

En la industria el preparado enzimático más utilizado es Celluclast ® en su presentación de 1.5 L (Triana 2010), debido a las facilidades que presenta en cuanto precio y adquisición. Sin embargo necesita condiciones específicas para la producción de glucosa, tales como un pH constante. Los compuestos como furfural, hidroximetilfurfural (HMF) y ácido acético pueden afectar la hidrólisis enzimática (Beck 1990), por lo que se debe mezclar una solución

amortiguadora y un agente inhibidor (opcional), este último para eliminar algunos microorganismos que puedan afectar la hidrólisis; el tiempo de residencia puede ser desde 72 hasta 160 h (Saha y Cotta 2008).

Generalmente se utilizan hidrolasas en el tratamiento del material lignocelulósico como las xilanasas; oxireductasas como las peroxidadas ligninolíticas y lacasas que al combinarse con compuestos sintéticos, como el 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolin-6-sulfonato) (ABTS) y el 1-hidroxibenzotriazol (HBT), aumentan la degradación de la lignina (sistema mediador por lacasa) (Bourbonnais y Paice 1996).

Inhibidores

En la producción de bioetanol, los principales inhibidores son compuestos como el furfural, el HMF y el ácido acético (Taherzadeh y Karimi 2007), que son utilizados durante el pretratamiento del material lignocelulósico. Esto ha llevado a la búsqueda y empleo de microorganismos, los cuales, además de producir bioetanol con altos rendimientos son resistentes a los inhibidores presentes en los hidrolizados (Zaldivar *et al.* 1999).

El efecto de estos compuestos sobre el proceso de fermentación se relaciona con el decremento de la velocidad de crecimiento del o los microorganismos, así como con el rendimiento de masa celular en relación con el ATP (Palmqvist *et al.* 1999) y también con el rendimiento volumétrico. Para contrarrestar el efecto de estos compuestos se ha optado por procesos de detoxificación, donde se emplean resinas de intercambio iónico (Horváth *et al.* 2004), carbón activado, enzimas (lacasas) (Jönsson *et al.* 1998) o se agrega cal (Fernández *et al.* 2009).

El HMF así como el furfural, afectan la fisiología microbiana, sus efectos radican directamente en un daño al ADN de la célula y en la inhibición de enzimas de la ruta metabólica de glucólisis (Ask *et al.* 2013), también inhiben a la deshidrogenasa del alcohol (Palmqvist *et al.* 1999); esto afecta el crecimiento de la célula y por lo tanto la producción de bioetanol. Se ha demostrado que estos compuestos afectan el sistema redox de xilosa llevado a cabo por levaduras como *S. cerevisiae* (Ask *et al.* 2013).

Algunas consideraciones sobre la legislación para el bioetanol

Las legislaciones acerca de la síntesis de bioetanol y su empleo como biocombustible se aplican a partir del año 2004, cuando los fabricantes de automóviles de diversos países plantearon algunas especificaciones en un documento denominado *Ethanol guidelines from the Worldwide Fuel Charter Committee*.

En dicha guía se habla sobre el uso del bioetanol como combustible en sus diversas combinaciones o porciones como la E85 usada en Estados Unidos y Europa y la E100 utilizada en Brasil; en México su uso se limita a la utilización del bioetanol E6.

En países como los Estados Unidos se han implementado las Normas para Combustibles Fósiles (RFS, *Renewable Fuel Standard*), con lo que se busca incrementar la utilización del bioetanol como combustible. La American Society for Testing and Materials (ASTM) establece dos normas: la D4806 y la D5798, las cuales consideran que las mezclas E85 y E15 deben contener 85 y 15 % de gasolina respectivamente, el resto debe ser etanol (SENER 2013).

En otros países como Argentina, Colombia, Honduras, Paraguay, Perú, República Dominicana y Uruguay existen normativas que atienden lo relevante en cuanto a biocombustibles, incluyendo el bioetanol. En Argentina es el Régimen de Regulación y Promoción y Uso Sustentables de Biocombustibles; en Colombia la Ley 939 de diciembre de 2004; en Honduras se propuso el Decreto No. 144-2007; Paraguay aplica la Ley No. 2748 de Fomento de los Biocombustibles; Perú se rige por la Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles; en República Dominicana se sigue la Ley No. 57-07 sobre el Incentivo al Desarrollo de Fuentes Renovables de Energía y de sus Regímenes Especiales, y por último, en Uruguay la Ley de Agrocambustibles.

El objetivo de las normas es el de incentivar el desarrollo de energías renovables por medio del apoyo y promoción que otorga el gobierno; las cuales junto con el apoyo de instituciones u organismos reguladores, vigilan el cumplimiento de las mismas. En Argentina, por ejemplo, existe la Comisión Nacional Asesora, organismo encargado de verificar el cumplimiento de la normativa, lo mismo sucede en Colombia con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo; en Honduras, la Secretaría de Estado en los Despachos de Industria y Comercio y la Secretaría de Agricultura y Ganadería; en Perú, la Comisión Técnica; en Paraguay, el Ministerio de Industria y Comercio y el Ministerio de Agricultura y Ganadería; en la República Dominicana, la Comisión Nacional de Energía y su Organismo Asesor. Los organismos competentes en cada país son los encargados de realizar sanciones si no cumple con lo acordado, las cuales pueden ir desde una multa hasta la revocación total. Uruguay, Perú y Colombia no sancionan en caso de incumplimiento (Camara de Diputados, LX legislatura 2009).

En la unión Europea, Francia es el mayor productor de bioetanol y las especificaciones para su uso

como combustible se explican en la norma EN15376 (Automotive Fuels Ethanol as a Blending Component For Petrol Requirements and Test Methods) así como en las siguientes directivas:

- a) Directiva 2003/17/CE: 3 de marzo de 2003, calidad del gasóleo y la gasolina.
- b) Directiva 2003/30/CE: 8 de mayo de 2003, uso de biocarburantes para los transportes del país.
- c) Directiva 2003/96/CE: 27 de octubre de 2003, da reducciones de tipo fiscal al uso de los biocarburantes.

Estas se complementan con el “Libro Blanco para una Estrategia y un plan de Acción Comunitarios COM” el cual habla sobre las fuentes de energía renovables.

España espera para 2020 que el 12 % del total de la energía del país provenga de biocombustibles por lo que ha puesto en marcha la Disposición Adicional Decimosexta de la ley 34/1998 del Sector de Hidrocarburos que se enfoca en incrementar el uso de biocarburantes, así como las siguientes normativas:

- a) Ley 38/1992: impuestos aplicables a los biocombustibles
- b) Real Decreto 1165/1995: impuestos especiales
- c) Ley 40/1995: modificaciones a la ley 38/1992, exenciones en proyectos a escala piloto que estuvieran relacionados con biocarburantes.
- d) Ley 34/1998: definición legal de biocombustibles.
- e) Real Decreto-Ley 6/2000: impone al Gobierno fomentar la utilización de los biocombustibles, garantizando la calidad en los productos que son comercializados y crea la Comisión para el estudio del uso de los biocombustibles.
- f) Real Decreto 1700/2003: especificaciones a biocarburantes y combustibles como gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo. Ley 22/2005: que en su segundo artículo altera la Ley 38/1992 de Impuestos Especiales, aplicando tarifas a cada biocarburante; dentro de la primera se encuentran el bioetanol y el biometanol junto con el biodiésel, cada uno con una tarifa de cero euros por mil litros hasta el 31 de diciembre de 2012.
- g) Real Decreto 61/2006: regulación en el uso de algunos biocarburantes, especificaciones para gasolinas y gasóleo de automoción, utilización de bioetanol en adición directa a la gasolina en un máximo de 5 %. Real Decreto Legislativo 4/2004: Fija una deducción del 10 % en inversiones para instalaciones y equipos con el objetivo de utilizar

productos agrícolas, forestales o aceites, para la producción de biocarburantes como bioetanol o biodiésel.

- h) Real Decreto 1777/2004, 30 de julio, Aprobación del Reglamento del Impuesto sobre Sociedades.

En 1904, Brasil organizó el primer Congreso Nacional sobre Aplicaciones Industriales del Alcohol y se planteó el uso del bioetanol como combustible. Sin embargo no fue sino hasta 1975 cuando el *Proálcool*, Programa Brasileño de Alcohol, propuesto por el gobierno estableció con carácter obligatorio el uso del biocombustible en una fracción de 5 %. Los parámetros y valores que debe cumplir el biocombustible están escritos en la resolución ANP 36/2005 (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis); resolución fundamentada en las metodologías propuestas por la Asociación Brasileña de Normas Técnicas y Metodologías (SENER 2013).

En México, el bioetanol que se usa para oxigenar las gasolinas o sustituir la gasolina en ciertas porciones, sigue la NOM-086-Semarnat-Sener-SCFI-2005 (especificaciones de los combustibles fósiles para protección ambiental), y menciona que las gasolinas que se utilizan en el país deben tener el 2.7 % de oxígeno en su peso. PEMEX optó por utilizar teramil metil éter (TAME) y metil terbutil éter (MTBE), dejando a las gasolinas con un octanaje mínimo de 87 en el caso de la gasolina Magna y 92 para la Premium. Se refiere también al límite permitido en el contenido de azufre (830-80 ppm) en gasolinas y biodiésel, lo que originó la producción de gasolinas ultra bajas en azufre (UBA), a partir de 2009. Tomando en cuenta los requerimientos de la norma se planteó un panorama para el año 2010, en donde se pretendía sustituir a los éteres MTBE y TAME por el etanol al 5.7 % en el 44 % de las gasolinas utilizadas en el país o lograr implementar 10 % de etanol en las gasolinas (Becerra 2010).

En México la mayor parte de la producción de bioetanol parte de la caña de azúcar, por lo que el gobierno puso en marcha la ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar en el año 2005. En ésta los artículos 107 y 108 mencionan a los bioenergéticos; el primero establece que el Centro de Investigación Científica y Tecnología de la Caña de Azúcar (CICT-CAÑA) impulsará al etanol para que sea empleado como carburante y oxigenante de gasolinas, utilizando las mieles y bagazos de la caña; esto a través de proyectos y estudios agroenergéticos propuestos ante un Comité Nacional. El segundo se encarga de gestionar la inversión para biocombustibles ante la Comisión Intersecretarial.

En 2007 se implementó el Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (PRONAC), donde se propone a los bioenergéticos como una alternativa para disminuir la afectación del ambiente; el apartado 2.21 estimula la producción de biocombustibles y cogeneración de energía eléctrica a través de acciones como la producción adicional de caña de azúcar a más de 6 millones de toneladas (CIECO 2008). De acuerdo con el Banco Mundial hasta 2008 México enfocaba su potencial energético en tres tipos de biomasa, las denominadas “de madera”, los agrocombustibles y los subproductos de origen municipal (**Fig. 2**).

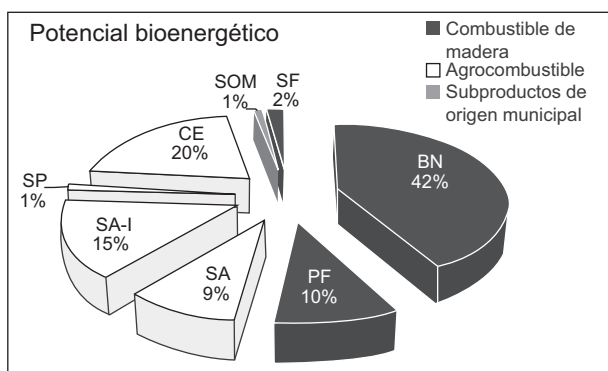


Fig. 2. Potencial energético de México (BN: Bosques Naturales; PF: Plantaciones Forestales; SP: Subproductos Pecuarios; CE: Cultivos Energéticos; SA: Subproductos Agrícolas; SA-I: Subproductos Agrícolas Agroindustriales y SOM: Subproductos de Origen Municipal (CIECO, Centro de Investigaciones en Ecosistemas, 2008)

En junio de 2011, la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos, junto con Petróleos Mexicanos, determinaron la compra de bioetanol para los próximos cinco años (**Cuadro I**).

Existen organizaciones encargadas de fomentar y guiar el desarrollo de biocombustibles. Por ejemplo la Convención de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que en 1997 incorporó

medidas energéticas dentro del Protocolo de Kyoto, programa que busca la disminución de la contaminación a nivel mundial, especialmente la disminución en la concentración de los gases de efecto invernadero. También la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), que en 1972 pidió a los miembros que la integraban sumar esfuerzos para explorar, desarrollar, fomentar y legislar el uso de los recursos naturales para la producción de energía (Camara de Diputados, LX legislatura, 2009).

El perfil de México en la utilización de energías renovables hasta 2010 se reduce a un 14 %, energía obtenida a través de la energía hidroeléctrica y proyectos de energía geotérmica, eólica y solar (SENER 2013). Con lo anterior y de llegar a una cultura en el empleo de combustibles alternos como el bioetanol, en México el escenario adecuado para su introducción es el sector de transporte, donde el gasto energético es representado por un 19 % del total de la energía mundial y por otro lado este sector representa casi la cuarta parte de las emisiones de CO₂ (IEA 2009). Para México este gasto representa el 47.6 % de la energía del país y el 38 % de las emisiones de CO₂ (SENER 2013).

Tomando en cuenta que la producción mundial de bioetanol en 2008 fue de 65 614 millones de litros (RFA 2013), y que México se considera el sexto productor de caña de azúcar a nivel mundial (SAGARPA 2012), se muestra una oportunidad para la producción de bioetanol a partir de este sector productivo, que en el periodo 2008-2009 procesó 42.5 millones de toneladas de caña de azúcar (UNC 2008).

El empleo de bioetanol como combustible para el sector del transporte en México es un escenario posible, idea apoyada por algunos autores (Johnson *et al.* 2009, García y Manzini 2011). Con el uso de 2.9 millones de hectáreas para siembra de caña de azúcar se evitaría la disputa energía versus alimentos por el uso del cultivo. Se puede obtener un pronóstico a 20 años en el cual se visualiza que México necesitaría cerca de 100 plantas de producción con 29 000 hectáreas sembradas cada una, de las cuales se requiere un gasto energético de 1.83 m³ de agua/ton de caña de azúcar (Moreira 2007), equivalente a 4.6 L_{agua}/L_{combustible} (Wu *et al.* 2009). Los factores anteriores junto con gastos de estructura y operación generarían una inversión de 2478 millones de dólares, de los cuales 10 % sería necesario para investigación. Respecto a la contaminación, se lograría una reducción de emisiones de CO₂, con una relación de 57.52 kg de CO₂/GJ, cifra menor a la de un escenario actual con un 78.7 kg de CO₂/GJ (García y Manzini 2011).

CUADRO I. PANORAMA DE LA DEMANDA DE BIOETANOL EN MÉXICO

Año	Millones de litros por año Mínimo-Máximo
2012	50-100
2013	75-150
2014	85-175
2015	100-200
2016	115-230
Total	425-855

Desde el punto de vista de la sustentabilidad, para poder proponer el uso de algún cultivo para generación de energía limpia, se necesita de un análisis enfocado a la situación en la que se vive. Algunos de los principales criterios para este análisis son:

- La conservación y uso eficiente de los recursos naturales como el suelo y el agua.
- Analizar la productividad del sistema de cultivo.
- Rentabilidad de la producción obtenida por el cultivo.
- El posible empleo de los residuos de la cosecha en el proceso productivo.
- Eficiencia.
- El empleo de subproductos.
- Cumplir con las normativas por lo general de índole ambiental.

De igual manera, en el análisis de sustentabilidad, no se deben pasar por alto los gastos energéticos necesarios para la explotación de la fuente de energía y la cantidad de energía que se puede producir por la misma, parámetro que es representado por la tasa de retorno energético (*EROI*, por sus siglas en inglés *energy return on investment*). Para el grupo de energías verdes a las que pertenece el bioetanol, se calcula que esta tasa tiene un índice alrededor de 1, si bien el valor no es muy alto, resultados recientes indican que el valor es propenso de alcanzar un índice de 5.2 (Schmer *et al.* 2008). En particular para el etanol se estima una *EROI* actual entre 0.7 y 1.7 mientras que para el maíz de 0.8 a

1.8, aunque la potencialidad de estas tecnologías logrará un máximo estimado de 5.4, aunado al valor decreciente de *EROI* para los combustibles fósiles. El incremento en el valor de *EROI* se podrá lograr si se optimizan procesos y aprovechan todos los residuos para generación de vapor de agua con la quema de residuos y la subsecuente generación de energía eléctrica (Hall *et al.* 2014).

Un ejemplo que apoya claramente el aumento del índice *EROI* para las energías verdes es el expuesto por la FAO (por sus siglas en inglés Food and Agriculture Organization), donde se presenta lo sucedido en Cuba, que desde 1991 emplea el bagazo de caña para la generación de energía. Este proceso se lleva a cabo cuando se está realizando la cocción de la caña de azúcar, en donde se produce vapor para impulsar generadores. En la actualidad Cuba produce 5.2 millones de toneladas de combustible al año, de las cuales 4.2 millones se utilizan para la generación de energía térmica para el proceso azucarero y para la generación de 17.5 kW/h por tonelada de caña molida, cifra que es menor a otras reportadas (Pippo *et al.* 2007).

Propiedades del bioetanol como carburante

Para que el bioetanol sea empleado como carburante en combinación o solo, debe de cubrir ciertas propiedades, físicas y químicas, con el fin de asegurar su calidad; en el **cuadro II** se presentan algunas características y especificaciones, y las propiedades que se deben tener en cuenta según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) son:

CUADRO II. CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES DE LA ASTM Y ABNT/NBR, QUE DEBE CUMPLIR EL BIOETANOL PARA SU USO COMO COMBUSTIBLE

Características	Unidades	Método		Especificación
		ASTM*	ABNT/NBR**	
Aspecto	-	Visual	-	Limpio y sin impurezas
Color	-	Visual	-	Incoloro
Acidez total (ácido acético)	mg/L	D 1613	9866	30 máx.
Conductividad eléctrica	µs/m	D 1125	10547	500 máx.
Masa específica a 20°C	kg/m ³	D 4052	5992	791.5 máx.
Grado alcohólico	°INPM	--	5992	99.3 mín.
Grado de hidrocarburos	%vol	D 512	13993	3 máx.
Ion cloruro	mg/kg	D 5501	10894/10895	1.1
Grado de etanol	%vol	-	-	99.3 mín.
Ion sulfato	mg/kg	-	10894/12120	4.3 máx.
Hierro	mg/kg	-	113331	5.5 máx.
Sodio	mg/kg	-	10422	2.2 máx.
Cobre	mg/kg	-	10893	0.07 máx.

* ASTM Internacional

** Associação Brasileira de Normas Técnicas

- Acidez total: indica la corrosividad del bioetanol, toma en cuenta el material del cual está hecho el motor del automóvil que lo utilizará.
- Conductividad eléctrica: cantidad de iones presentes en el bioetanol, mientras más iones contenga, su conductividad es mayor y su poder corrosivo en el sistema de distribución del combustible aumenta.
- Aspecto y color: El color permite la identificación de impurezas en el líquido, las cuales pueden causar problemas en filtros, depósitos e inyectores de los automóviles; el color también indica el empobrecimiento del combustible, causado por la oxidación de aldehídos y alcoholes.
- Grado alcohólico: muestra la pureza del bioetanol, al evaluar el grado de agua soluble y de alta densidad presente en el biocombustible.
- Masa específica: equivalente a la densidad del biocombustible, indica de forma indirecta la proporción presente de alcohol y agua, si la densidad presenta es baja señala la presencia de metanol y aldehídos, si el valor es alto, la cantidad de agua en el biocombustible es considerable; la consecuencia son las emisiones de gases al ambiente. Este parámetro sirve como guía en el diseño y distribución del combustible en los motores.
- Grado de etanol: muestra la presencia de otros alcoholes en el biocombustible.
- Grado de hidrocarburos: indica la cantidad de compuestos orgánicos no oxigenados que contaminan el biocombustible.
- Grado de iones cloruro, sulfato, hierro y sodio: Se relacionan con el poder de corrosión del biocombustible.
- Contenido de etanol y contenido de alcohol superior: estas características demuestran el grado de contaminación en el bioetanol, cuantifica el contenido de metanol y alcoholes superiores (SENER 2013).

Especificaciones del bioetanol como carburante

Las diferentes propiedades del bioetanol, ya sean cualitativas o cuantitativas, son monitoreadas y comparadas con un estándar para su aprobación como combustible. El estándar se apoya en dos metodologías:

- ASTM
- ASTM D 512: cloruro en agua.
- ASTM D 1125: conductividad eléctrica y resistividad del agua.
- ASTM D 1613: acidez en solventes volátiles e intermediarios químicos usados en pintura, barniz, laca y productos relacionados.
- ASTM D 4052: densidad relativa de los líquidos.

- ASTM D 5501: determinación del contenido de etanol.

Las Normas Brasileñas (NBR) de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT), al igual que las metodologías ASTM, son un conjunto de ensayos que determinan las propiedades del bioetanol como combustible:

- NBR 5992: determinación de la masa específica y del grado alcohólico del alcohol etílico y sus mezclas con agua.
- NBR 9866: verificación de la alcalinidad y determinación de la acidez total.
- NBR 10422: determinación del grado de sodio.
- NBR 10547: determinación de la conductividad eléctrica.
- NBR 10893: determinación del grado de cobre.
- NBR 10894: determinación de iones cloruro y sulfato.
- NBR 10895: determinación del grado de ion cloruro.
- NBR 11331: determinación del grado hierro.
- NBR 13993: determinación del grado de hidrocarburos (Duarte 2006).

Los resultados se comparan con el siguiente estándar.

De acuerdo con la Unión Europea, hasta 2010 el estándar incluye los siguientes parámetros:

- EN 15721: contenido de metanol por cromatografía gaseosa.
- EN 15721: contenido de etanol por cromatografía gaseosa.
- EN 15721: contenido de alcoholes por cromatografía gaseosa.
- EN 15489: contenido de agua por el ensayo Karl Fisher, titulación coulométrica.
- EN 15491: acidez total por titulación ácido-base con indicador de fenolftaleína.
- EN 15488: contenido de cobre por medio de absorción atómica u horno de grafito.
- EN 15484: contenido de cloruro a través de titulación potenciométrica.
- EN 15492: contenido de cloruro por medio de cromatografía de iones.
- EN 15486: contenido de azufre por fluorescencia UV <20ppm.
- EN 15485: contenido de azufre por fluorescencia de rayos X.
- EN 15492: contenido de sulfato por medio de cromatografía de iones.

Además de lo mencionado y con nuevas incorporaciones por ejemplo, la ASTM D4814; las especificaciones se muestran en el **Cuadro III**.

Barreras para la producción de bioetanol

La producción de bioetanol se enfrenta a problemas de índole técnico, transporte, almacenamiento y distribución, por ejemplo:

- La afinidad que presenta el bioetanol con el agua.
- La capacidad de decoloración y disolvente del bioetanol.
- Su capacidad de corrosión.
- Su volatilidad.
- Que no es compatible con algunos materiales.
- Es propenso a contaminación cruzada

Otros problemas que hay enfrentar son los costos de la materia prima, la desinformación que existe en cuanto a biocombustibles, por ejemplo:

- Costos relacionados con la logística.
- Costos de producción.
- Actividades fiscales.
- Inadaptación de las normativas.
- Falta de especificaciones en el área técnica.

- Poca colaboración por parte de las industrias automotrices.

Sobresalen las barreras políticas y la falta de normatividad. Por ejemplo, los impuestos determinan la rentabilidad de los proyectos dedicados a la producción de biocombustibles y los colocan en función del precio del petróleo. A pesar de que en la legislación fiscal se contempla al bioetanol con una tasa provisional de 0 %, el incremento a largo plazo en los precios es un riesgo latente. Además, las limitaciones en presupuestos junto con los aranceles y barreras comerciales limitan su distribución.

Las barreras culturales y sociales, consecuencia de la falta de conciencia social respecto al uso de energías fósiles, truncan el desarrollo de estrategias para comercializar a los biocombustibles.

La producción de materias primas para la generación energéticas se comparte con otras industrias, además los residuos no se utilizan y son ellos los que pueden emplearse para tal fin. En la Unión Europea se busca implementar el “Plan de Acción sobre Biomasa”, el cual propone utilizar “certificados verdes” para los cultivos destinados a la producción de energía (biocultivos), con el fin de exportar e importar el biocombustible siempre

CUADRO III. ESPECIFICACIONES DEL BIOETANOL COMO CARBURANTE

Característica	Unidades	Metodologías y especificaciones		
		ASTM	ANP	EN
Aspecto	-	Limpio y claro	Limpio y ausente de impurezas	Limpio y claro
Color	-	Pigmento permitido	Pigmento obligatorio	Pigmento permitido
Contenido de etanol	%vol.	92.1 mín.	99.6 mín.	96.8 mín.
Etanol y alcoholes de c3-c5	%vol.	-	-	98.8 mín.
Total de alcoholes	%vol.	-	99.6 mín.	99.76 mín.
Alcoholes c3-c5	%vol.	-	-	2.0 máx.
Contenido de agua	%vol.	1 máx.	0.4 máx.	0.24 máx.
Densidad a 20°C	kg/m ³	-	791.5 máx.	-
Contenido de metanol	vol.	0.5 máx.	-	1 máx.
Desnaturalizante	vol.	1.95/5.0 mín./máx.	-	Difiere según el país 0/1.3 mín./máx.
Hidrocarburos	%vol.	-	3 máx.	-
Goma lavada	mg/100 mL	5 máx.	-	-
Goma o residuo de evaporación.	mg/100 mL	5 máx.	-	10 máx. goma no lavada
Conductividad eléctrica	μs/m	-	500	-
Contenido de sulfato	mg/kg	4 máx.	-	A definir
Contenido de cloruro inorgánico	mg/kg	40 máx.	-	25 máx.
Contenido de cobre	mg/kg	0.1 máx.	0.07 máx.	0.1 máx.
Contenido de sodio	mg/kg	-	-	-
Contenido de hierro	mg/kg	-	-	-
Acidez, masa	% (mg/L)	0.007 (56) máx.	0.0038 (30) máx.	0.007 máx.
pH		6.5-9	-	Salió
Contenido de fósforo	mg/L	-	-	0.5 máx.
Contenido de azufre	mg/kg	30 máx.	-	10 máx.

y cuando sea de origen sustentable. Este plan también tiene fines sociales, pues busca prevenir que los productores de biocultivos que no pertenezcan a la Unión Europea destruyan sus campos e implementar un sistema de buenas prácticas ambientales y sociales para comercializar y producir biocombustibles (Dufey 2006).

Las barreras relacionadas con el ambiente y la sustentabilidad se fundamentan en las posibles consecuencias ambientales por el empleo de los biocombustibles y la sustentabilidad de la producción a partir de biomasa. Sin embargo, existen claros beneficios, por ejemplo, en el campo pueden incrementarse las oportunidades de desarrollo rural por la creación de nuevos empleos, mejorar la calidad de vida de los campesinos y reducirse la pobreza al incentivar el mercado de los pequeños productores (Dufey 2006).

Existen diferentes sustratos para la síntesis de bioetanol algunos de ellos son los que se muestran en la **figura 3**, cada uno de ellos da diferentes rendimientos (L/ha).

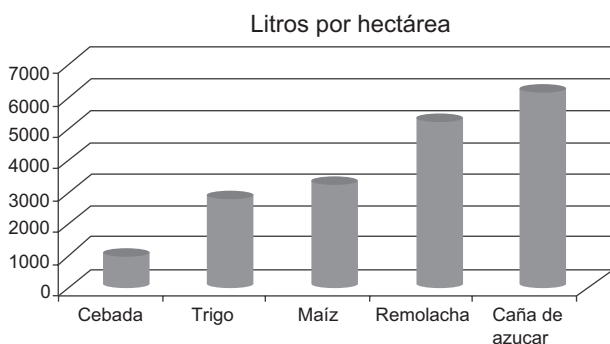


Fig. 3. Litros producidos de bioetanol por hectárea de diversos cultivos, (CIECO, 2008 cita a Fulton *et al.* 2004)

Los cultivos con más productividad se presentan en las siguientes figuras, los sustratos más eficientes son maíz, caña de azúcar, pulpa de yuca, sorgo, vaina de algarrobo y bagazo de manzana y su uso es común. Brasil produjo más de 27 mil millones de litros de bioetanol entre los años 2010-2011 (ICDCA 2013), Utilizan como materia prima principalmente cultivos de caña de azúcar donde se obtienen entre 6 y 8 mil litros de bioetanol por hectárea de materia prima cultivada. Los Estados Unidos, hasta 2006 producían más de 350 litros de bioetanol por tonelada de maíz, lo que representó poco más del 20 % (54.6 millones de toneladas) de su producción de maíz (ARPEL 2009).

En México, Los cultivos potenciales para la producción de bioetanol son:

- Caña de azúcar, 4313 hectáreas cultivadas en 22 estados de la república.
- Remolacha azucarera, 2008 hectáreas cultivadas en los 32 estados de la república.
- Sorgo dulce, 2200 hectáreas cultivadas en 22 estados de la república (SENER 2013).

Precios internacionales

Los costos en centavos de dólar por litro de bioetanol desde 2009 y hasta 2012 (**Cuadro IV**), se establecieron después de llevar a cabo estudios y se relacionan con el mercado de caña de azúcar, sorgo y maíz, debido a que son los materiales lignocelulósicos más utilizados para la producción de bioetanol (SAGARPA 2012).

CUADRO IV. PRECIOS INTERNACIONALES DEL BIOETANOL, CENTAVO DE DÓLAR POR LITROS DE COMBUSTIBLE (SAGARPA 2012)

Mes/año	Precios			
	2009	2010	2011	2012
Enero	0.42	0.47	0.60	0.56
Febrero	0.40	0.45	0.67	0.59
Marzo	0.41	0.41	0.65	0.62
Abril	0.41	0.41	0.69	0.58
Mayo	0.45	0.42	0.70	0.55
Junio	0.44	0.40	0.70	0.55
Julio	0.41	0.42	0.77	0.72
Agosto	0.42	0.50	0.74	0.69
Septiembre	0.44	0.53	0.69	0.64
Octubre	0.52	0.58	0.72	0.63
Noviembre	0.56	0.56	0.64	0.63
Diciembre	0.49	0.60	0.57	

CONCLUSIONES

La obtención de etanol de primera generación en México no está desarrollada actualmente y se debe a problemas de legislación más que de índole técnico, pues se cuenta con área de cultivos y profesionales que pueden potenciar su generación y generar desarrollo en el sector.

La producción de etanol a partir de desechos agroindustriales parece perfilarse hacia una realidad en tanto se logre reducir costos de traslado de la materia prima, se mejoren los procesos de fermentación, en particular los rendimientos producto/sustrato, y se diseñen microorganismos con mejores capacidades fermentativas.

En cuanto a las legislaciones es necesario buscar los mecanismos legales que regulen la producción de este combustible usando desechos agroindustriales.

Finalmente, el desarrollo de bioprocesos para la producción de biocombustibles puede cambiar las perspectivas para el bioetanol sin dejar de lado la opinión social sobre el uso de estos desechos para generar energía.

Otras materias primas atractivas, la jatrofa y el sorgo dulce, por ejemplo, permanecen en las etapas tempranas de desarrollo.

Existen métodos físicos, fisicoquímicos, químicos y biológicos para pretratar los sustratos para producir bioetanol, la decisión de cual usar está en función de la disponibilidad de suelos, agua requerida para su cultivo, EROI y beneficios a la comunidad entre otros.

A nivel mundial existe una legislación sobre la producción de etanol que avanza y denota una ruta de mejora que en el mediano plazo podrá uniformar tipos y calidades de bioetanol, lo que se reflejará en una mayor certidumbre tanto en el lado de la producción como en el uso de este biocarburante.

Aun cuando la viabilidad económica se puede establecer, las inversiones en biocombustibles podrían peligrar si no se consideran también los impactos sociales y ambientales.

REFERENCIAS

- Acosta F., Castron P. y Cortijo E. (2008). *Manual de Construcción y uso de reactor para producción de biodiésel a pequeña escala*. Soluciones Prácticas –ITDG. Lima, Perú. 54 pp.
- Aggarwall N., Nigam P., Singh D. y Yadav B. (2001). Process optimization for the production of sugar for the bioethanol industry from Tapioca, a non-conventional source of starch. *World. J. Microb. Biotech.* 17, 411-415.
- Angiolani A. (1960). *Introducción a la Química Industrial, Fundamentos Químicos y Tecnológicos*. Andres Bello, Santiago de Chile, Chile. 669 pp.
- ARPEL Y IICA. (2009). *Manual de Biocombustibles*. ARPEL, Montevideo, Uruguay. 207 pp.
- Ask M., Bettiga M., Mapelli V. y Olsson L. (2013). The influence of HMF and furfural on redox-balance and energy-state of xylose-utilizing *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnol. Biofuels*. 6, 1-13.
- Barroso M. (2010). Pretratamiento de biomasa celulósica [en línea]. http://oa.upm.es/10559/1/MIGUEL_BARROSO_CASILLAS.pdf 06/03/2013.
- Becerra L. (2010) La industria del etanol en México. *Economía UNAM* 16. 82-98.
- Beck J.M., Johnson R.D. y Baker Ch. (1990). Comparison of three commercial cellulases for production of glucose from acid-treated hardwood. *Applied Bioch. Biotech.* 25, 407-414.
- Ben-Ghedalia D. y Miron J. (1981). The effect of combined chemical and enzyme treatment on the saccharification and in vitro digestion rate of wheat straw. *Biotech. Bioeng.* 23, 823-831.
- Bourbonnais R. y Paice M. (1996). Enzymatic delignification of kraft pulp using laccase and a mediator. *Tap. J.* 79, 199-204.
- Cai Y. H., Liang Z. X., Li S., y Zhu M. J. (2012). Bioethanol from fermentation of cassava pulp in a fibrous-bed biorreactor using immobilized Δ ldh, a genetically engineered *Thermoanaerobacterium aotearoense*. *Biotech. Biopro.* 17, 1270-1277.
- Gutiérrez C. y Gutiérrez C. C. (2009). *La actuación frente al cambio climático*. EDITUM. Murcia, España. 331 pp.
- Cámara de Diputados LX Legislatura (2009). Biocombustibles. Cámara de Diputados, LX Legislatura. Estudio Teórico. México. 58 pp.
- Canazar V., Soares C.R., Vieira F.J. y Lopes F.M. (2012). Kinetics of growth and ethanol formation from a mix of glucose/xylose substrate by *Kluyveromyces marxianus* UFV-3. *Anton. van Leeuwenh.* 103, 153-161.
- CIECO (2008). Análisis integrado de las tecnologías, el ciclo de vida y la sustentabilidad de las opciones y escenarios para el aprovechamiento de la bioenergía en México. Centro de investigaciones en Ecosistemas [en línea]. http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/e2008e_bioenergia.pdf.
- Duarte V. (2006). Especificaciones de la calidad del etanol carburante y del gashol (mezcla de gasolina y etanol) y normas técnicas para la infraestructura [en línea]. <http://www.eclac.cl/cgibin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/6/26436/P26436.xml&xsl=/mexico/tpl/p9f.xsl>.
- Dufey A. (2006) Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas. Instituto Internacional para el Medio Ambiente y Desarrollo. Londres.
- ECURED. (2013). Fermentación Alcohólica [en línea]. http://www.ecured.cu/index.php/Fermentaci%C3%B3n_alcoh%C3%B3lica 03/04/2013.
- Fernández T., Martín C. y Taherzadeh M. (2009). Evaluación de cepas industriales de *Saccharomyces cerevisiae* para la obtención de etanol a partir de fuentes que no afectan la producción de alimentos. Memorias. 6a Conferencia Internacional Medio Ambiente Siglo XXI. Cuba, 3 al 6 de noviembre, 2009.
- Fulton L., Howes T. y Hardy J. (2004). Biofuels for transport: An international perspective. Memorias. International Energy Agency. París Francia. 29 de Marzo, 2005.
- García C. y Manzini F. (2011) Environmental and economic feasibility of sugarcane ethanol for the Mexican transport sector. *Solar Energy* 86, 1063-1069.

- GAIA (2008). BioEtanol. Grupo de Aviación, Ingeniería y Arquitectura [en línea]. http://www.grupogaia.com/Dossier_BIOetanol_ESP.pdf 20/01/2013.
- Hall C., Lambert J., y Balogh S. (2014). EROI of different fuels and the implications for society, *Energ. Pol.* 64, 141-152.
- Han M., Moon S. K., Kim Y., Chung B. y Choi G. W. (2009). Bioethanol production from ammonia percolated wheat straw. *Biotech. Bioresour.* 14, 606-611.
- Hernández J.M., Villa M.S., Veloz J.S., Rivera K.N., Gonzalez R.A., Plascencia M. A. y Trejo S.R. (2009). Comparative hydrolysis and fermentation of sugarcane bagasse. *Bioresour. Technol.* 100, 1238-1245.
- Horváth I. S., Sjöde A., Nilvebrant N. O., Zagorodni A. y Jönsson L. J. (2004). Selection of anion exchangers for detoxification of dilute-acid hydrolysates from spruce. *App. Biochem. Biotech.* 114, 525-538.
- Hu Z. y Wen Z. (2008). Enhancing enzymatic digestibility of switchgrass by microwave-assisted alkali pretreatment. *Biochem Eng J.* 38, 369-378.
- ICIDCA (2013). Comunicación sobre la industria de etanol. *notiEtanol* 7, 1-5. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar.
- Jeffries T.W. (1994). Biodegradation of lignin and hemicelluloses. *Ratledge C- Kluwer, Dordrecht*, pp. 233-277.
- Jiménez D., Abreu A., López V., Tellez A. y Gracida J. (2012). Obtención de azúcares fermentables mediante hidrólisis ácida de *Beta vulgaris* L. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28, 151-158.
- Johnson T., Alatorre C., Romo Z. y Liu F. (2009). Low-carbon development for México. *Memorias. World Bank Conference. Mexico*, 11 de Agosto de 2009. Jönsson L. J., Palmqvist E., Nilvebrant N. O. y Hahn-Hägerdal B. (1998). Detoxification of wood hydrolysates with laccase and peroxidase from the white-rot fungus *Trametes versicolor*. *Appl. Microbiol. Biot.* 49, 691-697.
- Kumar S., Gupta R., Lee Y.Y. y Gupta R. B. (2010). Cellulose pretreatment in subcritical water: Effect of temperature on molecular structure and enzymatic reactivity. *Bioresour. Technol.* 101, 1337-1347.
- López J., Soto N., Rutiaga O., Medrano H. y Arévalo K. (2007). Optimización del proceso de obtención enzimática de azúcares fermentables a partir de aserrín de pino. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 25, 95-102.
- Lynd L., Weimer P., Van Zyl W. y Pretorius I. (2002). Microbial cellulase utilization: Fundamentals and biotechnology. *Microbiol. Mol. Biol. R.* 66, 506-577.
- Mateus L. (2001). Evaluación de los pretratamientos con ácido sulfúrico diluido y AFEX en la biomasa lignocelulósica del tipo pasto gigante *Pennisetum* sp. Tesis de Magister en Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia, 83 pp.
- Mazaheri D., Shojaosadati S.A., Heja P., Mousavi S.M. y Saharkhiz S. (2012). Bioethanol production from carob pods by solid-state fermentation with *Zymomonas mobilis*. *Appl. Energ.* 99, 372-378.
- Moreira J. R. (2007). Water use and impacts due to ethanol production in Brazil. *Memorias. International Conference on Linkages between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries. India*, 29 al 30 de Enero de 2007.
- Mutis D. (2009). Deslignificación de residuos de la caña de azúcar (hojas y cogollos) con procesos químicos. Tesis de grado. Ingeniería Química. Universidad del Valle, Colombia.
- Nogués F.S., García D. y Rezeau A. (2010). *Energías renovables, Energía de la Biomasa*. Prensas Universitarias de Zaragoza, Zaragoza, España. 557 pp.
- Noriega L.E. (2009). Estimado del potencial de cogeneración. En: *Estudio sobre la cogeneración en el sector industrial en México*. CONUEE/CRE/GTZ. D.F., México, pp. 29-65.
- Ortiz A. (2008). Pretratamiento de la biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles: Aspectos técnicos y económicos [en línea]. <http://www.icq.ua.mx/webicq/pdf/irmene.pdf> 24/02/2013.
- Ortiz C., Torres R. y Pinilla L. (2011). Bioethanol production in batch mode by a native strain of *Zymomonas mobilis*. *World J. Microbiol. Biotech.* 27, 2512-2528.
- Ovando S.L. y Waliszewski K.N. (2005) Preparativos de celulasas comerciales y aplicaciones en procesos extractivos. *Uciencia* 21, 111-120.
- Palmqvist E., Almeida J.S. y Hahn-Hägerdal B. (1999). Influence of furfural on anaerobic glycolytic kinetics of *Saccharomyces cerevisiae* in batch culture. *Biotech. Bioeng.* 62, 447-54.
- Peña A., Arroyo A., Gómez A. y Tapia R. (1988). *Bioquímica*. 2ª ed. Limusa, D.F. México, 427 pp.
- Pérez LL.C., Chaves M. y Galperin C. (2007). Desarrollo de los biocombustibles: ¿cuál es el lugar de la política comercial?. *Revista del CEI*. 9, 81-99.
- Pippo A., Garzone P. y Cornacchia G. (2007). Agro-industry sugarcane residues disposal: The trends of their conversion into energy carriers in Cuba. *Waste Manage.* 27, 869-885.
- Ponte M.V., Soares T.H., Ribeiro G. y Gonçalves L. (2009). Enzymatic hydrolysis and fermentation of pretreated cashew apple bagasse with alkali and diluted sulfuric acid for bioethanol production. *Appl. Biochem. Biotech.* 155, 407-417.
- Quintanar G.S., Arana C.A., Mercado F.Y., Gracida R.J. y Téllez J.A. (2012). Effect of particle size and aeration on the biological delignification of corn straw using *Trametes* sp. *BioResour.* 7, 327-344.

- Ragauskas A. (2006). The Path Forward for Biofuels and Biomaterials. *Science* 311, 484-489.
- Rodríguez-Chong A., Ramírez J. Garrote G. y Vázquez M. (2004). Hydrolysis of sugarcane bagasse using nitric acid: a kinetic assessment. *J. Food Eng.* 61, 143-152.
- Saha B. y Cotta A. (2008). Lime pretreatment, enzymatic saccharification and fermentation of rice hulls to ethanol. *Biom. Bioenerg.* 32, 971-977.
- SAGARPA (2012). Precios Internacionales Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México [en línea]. <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/precios-internacionales.html>
- SENER (2013). Biocombustibles líquidos. Secretaría de Energía, México [en línea]. <http://www.renovables.gob.mx/>.
- Seonghun J. (2013). Ethanol production using whole plant biomass of Jerusalem artichoke by *Kluyveromyces marxianus* CBS1555. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 169, 1531-1545.
- Schmer M.R., Vogel K.P., Mitchel R.B. y Perrin R.K. (2008). Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *P. Natl. Acad. Sci. USA.* 105, 464-469.
- Silverstein R.A., Chen Y., Sharma-Shivappa R.R., Boyette M.D. y Osborne J. (2007). A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks. *Bioresour. Technol.* 98, 3000-3011.
- Soderstrom J., Pilcher L., Galbe M. y Zacchi G. (2003). Two-step pretreatment of softwood by dilute H₂SO₄ impregnation for ethanol production. *Biomass Bioenerg.* 24, 475-486.
- Sun Y. y Cheng J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresour. Technol.* 83, 1-11.
- RFA (2013). Annual ethanol industry outlook. Renewable Fuels Association [en línea]. <http://www.ethanolrfa.org/pages/rfa-publications>. 10/06/13.
- Taherzadeh M.J. y Karimi K. (2007). Acid-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. *BioResour.* 2, 472-499.
- Triana C.F. (2010). Producción de etanol a partir de residuos provenientes del cultivo de café. Tesis de Posgrado. Facultad de Ingenierías. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales, Colombia. 108 pp.
- UNAM (2013). Hojas de seguridad. Universidad Nacional Autónoma de México. Hoja de seguridad, Ciudad de México. 3 pp.
- UNC (2008). Producción Anual de Caña. Unión Nacional de Cañeros [en línea]. <http://www.caneros.org.mx/>. 20/12/13.
- Wang L. y Chen H. (2011). Acetone-butanol-ethanol fermentation and isoflavone extraction using Kudzu roots. *Biotechnol. Bioproc. E.* 16, 739-745.
- Wang X., Feng H. y Li Z. (2012). Pretreatment of switchgrass with electrolyzed water and a two-stage method for bioethanol production. *Biotechnol. Bioproc. E.* 17, 624-633.
- Wu M., Mintz M., Want M. y Arora S. (2009). ANL/ESD/09-1-Update. Argonne National Laboratory and Energy Systems Division. Consumptive Water Use in the Production of Ethanol and Petroleum Gasoline. Reporte. Chicago. 84 pp.
- Zaldivar J., Martínez A. e Ingram L.O. (1999). Effect of selected aldehydes on the growth and fermentation of ethanogenic *E. coli*. *Biotech. Bioeng.* 65, 24-33.