

PROCESOS BIOQUÍMICOS UTILIZADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL, BIODIÉSEL Y BIOGÁS Y SU ESTADO EN COLOMBIA

BIOCHEMICAL PROCESSES USED FOR THE PRODUCTION OF BIOETHANOL, BIODIÉSEL, BIOGAS AND ITS STATE IN COLOMBIA

Carolina Andrade*
Andrea Corredor**
Laura Buitrago***
Andrea Lache Muñoz****

Recibido: 4 de septiembre de 2017

Aceptado: 10 de noviembre de 2017

Resumen

En la actualidad existe un creciente interés por mitigar el impacto ambiental que han generado los combustibles fósiles, por lo que biocombustibles como bioetanol, biodiésel y biogás han cobrado un papel relevante como alternativas derivadas de energías renovables con menor generación de emisiones atmosféricas, especialmente asociadas con el transporte. Es por esto que en este artículo se abordan temáticas claves para el entendimiento y conceptualización de la biomasa utilizada, los procesos bioquímicos, las etapas de producción y las ventajas y desventajas de los biocombustibles mencionados. De igual forma, se hace un acercamiento al progreso de la implementación de dichos biocombustibles en Colombia y a las investigaciones realizadas para la producción de bioetanol y biodiésel a partir de materias primas que no comprometan el área de cultivos para alimentación, así como a los desafíos que tiene el país para lograr la producción de biogás a gran escala. Finalmente, se establece que los biocombustibles analizados tienen un alto potencial de fabricación en Colombia, y su producción es acorde con las metas propuestas en el protocolo de Kyoto. Asimismo, la producción de dichos biocombustibles a partir de residuos permite su valorización, lo que puede generar al país un impacto positivo a nivel económico, social y ambiental.

Palabras claves: biocombustibles, bioetanol, biodiésel, biogás, biomasa, procesos bioquímicos.

* Estudiante de Ingeniería Química. Grupo de investigación Energías Alternativas, línea de Investigación Producción de Energía a partir de Fuentes Renovables y su Implementación, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. angie.andrade@estudiantes.uamerica.edu.co

** Estudiante de Ingeniería Química. Grupo de investigación Energías Alternativas, línea de Investigación Producción de Energía a partir de Fuentes Renovables y su Implementación, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. andrea.corredor@estudiantes.uamerica.edu.co

*** Estudiante de Ingeniería Química. Grupo de investigación Energías Alternativas, línea de Investigación Producción de Energía a partir de Fuentes Renovables y su Implementación, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. Laura.buitrago4@estudiantes.uamerica.edu.co

**** Ingeniera Química. Directora del Grupo de investigación Energías Alternativas, línea de Investigación Producción de Energía a partir de Fuentes Renovables y su Implementación, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. andrea.lache@investigadores.uamerica.edu.co

Abstract

At present, there is a growing interest in mitigating the negative environmental impact generated by fossil fuels, so biofuels such as bioethanol, biodiésel and biogas have gained a significant role as alternatives from renewable energy sources with less impact on generation of atmospheric emissions, especially in transport uses. This is why the present article addresses key topics for the understanding and conceptualization of the biomass used, biochemical processes, stages of production, advantages and disadvantages of the biofuels mentioned. In the same way, it is made an approach to the progress of the implementation of these biofuels in Colombia and the researches carried out for the production of bioethanol and biodiésel from raw materials that do not compromise the area of crops for food, as well as the challenges that the biogas to achieve its production on a large scale. Finally, it is inferred that the exposed biofuels have a high manufacturing potential in Colombia, since these constitute an interesting potential to reach the goals proposed in the Kyoto protocol. Likewise, the production of these biofuels from waste allows the valorization of these, which can generate a positive economic, social and environmental impacts to the country.

Key words: biofuels, bioethanol, biodiésel, biogas, biomass, biochemical processes.

INTRODUCCIÓN

Las fuentes fósiles representan el 80.3 % de la energía primaria consumida en el mundo; de este porcentaje, el 57.7 % es empleado en el sector de transporte. Debido a la contaminación (atmosférica, hídrica y en suelos) que genera el uso de los combustibles derivados de dichas fuentes y a su carácter no renovable, se hace necesario el desarrollo de procesos de aprovechamiento de otras fuentes que suplan las necesidades actuales y que al mismo tiempo sean renovables y menos nocivas con el medio ambiente; motivos por los que se hace necesario la producción de biocombustibles (Aguilar, 2011). Estos combustibles son elaborados a partir de biomasa, es decir, se utilizan materias primas orgánicas para su fabricación y, por lo tanto, su impacto ambiental es menor en comparación con el generado por los combustibles fósiles. Adicionalmente, los biocombustibles emiten gases de efecto invernadero (CH_4 y CO_2) en menor proporción que los combustibles tradicionales (Camps y Marcos, 2008).

Los biocombustibles líquidos o gaseosos se obtienen mediante procesos bioquímicos o termoquímicos. Este artículo tiene como objetivo describir los procesos bioquímicos más utilizados en la obtención de bioetanol, biodiésel y biogás, así como su estado actual en Colombia. Los procesos bioquímicos emplean microorganismos que realizan una ruta catabólica basada en la degradación de compuestos orgánicos complejos para la obtención de sustancias más sencillas y de energía, la cual se genera con el rompimiento de los enlaces de las moléculas de gran tamaño. Las rutas para la fabricación de estos dos biocombustibles son la fermentación alcohólica y digestión anaeróbica, respectivamente (Camps y Marcos, 2008). En cuanto a la síntesis del biodiésel, aquí se tratarán las rutas más usadas hoy en día a nivel industrial, como la transesterificación y la esterificación, procesos que no implican el uso de microorganismos.

El bioetanol es el biocombustible líquido más importante producido en el mundo mediante fermentación alcohólica. Este puede ser implementado como aditivo de la gasolina o usado en su estado puro (Cardona, Montoya y Quintero, 2004; Camps y Marcos, 2008). A nivel comercial, se encuentra de la siguiente manera:

- *E5*. Mezcla de 5 % de etanol y 95 % de gasolina. Este es el porcentaje de mezcla permitido por la regulación europea.
- *E10*. Mezcla de 10 % de bioetanol y 90 % de gasolina corriente. El E10 es el más implementado en EE. UU., pues no requiere modificación en los vehículos y evita en mayor proporción la emisión de gases de efecto invernadero.
- *E85*. Compuesto por 85 % de bioetanol y 15 % de gasolina. Es implementado en autos con motores especiales, comercializados en países como EE. UU., Brasil y Suecia.
- *E95 y E100*. Estas mezclas que alcanzan un contenido de 95 y 100 % de etanol, respectivamente. Se utilizan en automóviles con motores especiales (Escalante y Fuentes, 2013).

El biodiésel es un biocombustible líquido obtenido a partir de aceites vegetales, grasas animales o aceite usado; su composición química consiste en una combinación de cadenas largas de ácidos grasos, conocidos como ésteres monoalquílicos o metil ésteres de ácidos grasos (Gevorkian, 2010). Su distribución a nivel comercial se hace en mezclas con el diésel, la proporción depende de la legislación de cada país; las características de cada mezcla varían según el porcentaje de diésel. Peyton (2016) señala las mezclas más usadas y sus principales características:

- *B5*. Contiene 5 % de biodiésel y 95 % de diésel. Esta adición puede traer beneficios al motor, como una mejor lubricación interna sin ningún problema en la operación.
- *B20*. Contiene 20 % de biodiésel y 90 % de diésel. Es el más común, ya que aparte de mejorar las propiedades del combustible, requiere de muy pocas adaptaciones en los motores diésel convencionales.
- *B100*. Es 100 % biodiésel, no es una mezcla y no es muy usual encontrar su uso directo en un sistema, ya que es demasiado sensible a climas fríos, por lo que se necesitaría tomar medidas para evitar la gelificación del producto.

El biogás es un biocombustible gaseoso, producto de la digestión anaerobia (Varnero, 2011); su composición suele estar entre: 55 y 65 % de metano, 35 y 45 % de dióxido de carbono, 0 y 3 % de nitrógeno y 0 y 1 % de hidrógeno u oxígeno; además, contiene trazas de sulfuro de hidrógeno (Camps y Marcos, 2008). El biogás es utilizado como sustituto del gas natural (o integrado en la red de este), combustible para vehículos, materia prima en procesos de la industria química, pilas de combustible y generación de calor y electricidad (cocina, calefacción e iluminación) (Camps y Marcos, 2008).

PROCESOS DE PRODUCCIÓN

La biomasa se puede emplear como materia prima para la fabricación de bioetanol, biodiésel y biogás. El uso de residuos orgánicos de origen doméstico, agropecuario o incluso de determinadas industrias permite la valorización de una fracción considerable de estos, razón por la cual son una fuente renovable de energía, así como contribuyen al modelo de economía circular que se ha establecido como una vía para garantizar el desarrollo sostenible (Andersen, 2007).

En la tabla 1 se enuncia la fuente generadora de biomasa, el tipo de residuos que produce y la humedad relativa (principal característica física de los procesos bioquímicos). Además, da a conocer la biomasa que generalmente se utiliza para la producción de cada tipo de biocombustible (Camps y Marcos, 2008).

Tabla 1. Biomasa empleada para la obtención de bioetanol, biodiésel y biogás

Fuente generadora de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas	Biocombustible
Residuos forestales	Ramas, cortezas y raíces	Sólido, HR >55 %	Biogás Bioetanol
	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido muy húmedo	Bioetanol
Residuos agropecuarios	Estiércol	Sólido muy húmedo	Biogás
	Tallos, hojas, cáscaras, maleza, pastura	Sólido HR <55 %	Biogás Bioetanol
	Pulpa y cáscara de frutas	Sólido moderadamente húmedo	Bioetanol
Residuos industriales	Aguas de lavado de carnes y vegetales	Líquido	Biogás
	Grasas y aceites vegetales	Líquido grasoso	Biodiésel
Residuos urbanos	Aguas negras	Líquido	Biogás
	Desechos orgánicos	Sólido muy húmedo	Biogás

Fuente: adaptado de UPME (2010, p. 122).

Bioetanol

Para llevar a cabo la producción de bioetanol se siguen cuatro etapas: 1) digestión enzimática, en la que la biomasa es degradada por enzimas (generalmente celulasas) para la obtención de azúcares (Sánchez, 2005); 2) fermentación de azúcares, los cuales están presentes en mayor proporción en la caña de azúcar (utilizada principalmente en Brasil e India), el almidón del maíz, los cereales y la remolacha azucarera (productos utilizados en Norte América y Europa) (Madson y Monceaux, 1995), así como en la celulosa y la hemicelulosa de los vegetales (Camps y Marcos, 2008); 3) la destilación, y 4) el secado del producto de interés (García y Calderón, 2012). La figura 1 esquematiza el proceso de fermentación para la producción de bioetanol a partir de diferentes materias primas:

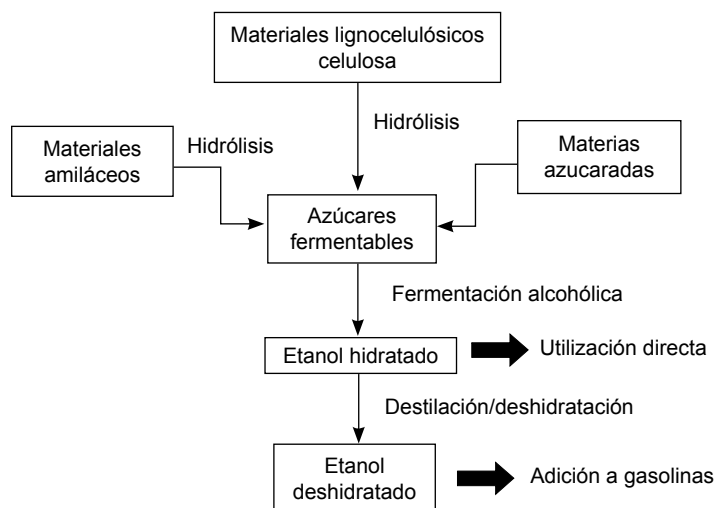


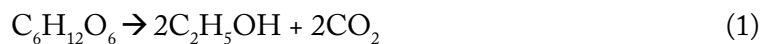
Figura 1. Diagrama de flujo de la obtención de bioetanol a partir de diferentes materias primas.

Fuente: Camps y Marcos (2008).

Hay que tener en cuenta que se puede obtener etanol a partir de diferentes tipos de biomasa. Por esto, si se desea producir este biocombustible a partir de la caña de azúcar, al momento de realizar la fermentación alcohólica se obtienen azúcares solubles en agua (jugo de la caña) y lignina insoluble (bagazo), la que luego de ser degradada puede ser implementada como combustible sólido. Cabe recalcar que se deben implementar operaciones unitarias para eliminar el agua presente en el producto de la fermentación, el cual tendrá un uso posterior como un aditivo oxigenante (Camps y Marcos, 2008).

Otra alternativa para producir etanol es el almidón de maíz, para ello se incluye una etapa de producción, que consiste en la hidrólisis o degradación de la amilosa y la amilopectina del almidón (dicha hidrólisis se realiza bajo temperaturas altas, aproximadamente entre 90 y 110 °C), con lo que se obtiene una solución de dextrinas que debe ser sacarificada de glucoamilasa a glucosa para su posterior fermentación (Nigam y Singh, 1995).

Adicionalmente, en la producción de bioetanol también se puede utilizar biomasa residual lignocelulósica, proveniente de procesos agrícolas, forestales e industriales. Dicha biomasa contiene carbohidratos como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina; pero para su extracción es necesario realizar hidrólisis con ácidos concentrados o diluidos, o hidrólisis enzimática (Camps y Marcos, 2008). Sin embargo, se pueden generar algunos compuestos que inhiben la fermentación; es por esto que se debe realizar una detoxificación para degradar la celulosa hasta glucosa (Sánchez, 2005) y poder llevar a cabo la fermentación anaeróbica (reacción 1) (Camps y Marcos, 2008).



Los microorganismos que permiten la transformación de azúcares en alcohol junto con dióxido de carbono son las levaduras y algunas bacterias. La levadura más usada es *Saccharomyces cerevisiae*, la cual transforma hexosas en etanol de forma anaerobia, obteniendo dos moles de ATP (adenosín trifosfato) y dos moles del producto deseado (etanol) a partir de una mol de hexosa (Claassen et ál., 1999). Cabe recalcar que estos microorganismos son capaces de soportar concentraciones de aproximadamente 159 g/L de etanol. Sin embargo, debido a que la levadura se reproduce por efecto de la glucosa y los nutrientes que hacen parte de la producción, la eficiencia del proceso disminuye (Vázquez y Dacosta, 2007). Por otro lado, una de las bacterias que se puede usar es *Zymomonas mobilis*; por cada mol de hexosa, esta bacteria produce una mol de etanol y libera una mol de ATP, de forma que se obtienen altos rendimientos y a su vez soporta concentraciones de etanol cercanas a 100 g/L; sin embargo, *Zymomonas mobilis* solo puede fermentar algunos azúcares como la glucosa, la fructosa y la sacarosa (Claassen et ál., 1999; Hawgood Evans y Greenfield, 1985). Debido a la inhibición que se puede presentar al utilizar biomasa lignocelulósica, se ha estudiado la posibilidad de implementar otras levaduras capaces de hidrolizar celulosa para la producción de etanol, como *Pichia stipitis*, *Candida shehatae* y *Pachysolen tannophylus*, las cuales permitirían que se lleve a cabo el proceso en menos etapas; no obstante, cuando se produce etanol a partir de glucosa, estas levaduras presentan un rendimiento menor al obtenido con *Saccharomyces Serevisiae* (Claassen et ál., 1999)

Tabla 2. Ventajas y desventajas del bioetanol

Ventajas	Desventajas
Mayor proporción de octano para reducir emisiones de monóxido de carbono.	Altos costos para su producción.
Tiene un calor de combustión alto y menor calor de vaporización.	Formación de dos fases líquidas: la primera, con cierta cantidad de etanol, y la segunda, que contiene hidrocarburos de la gasolina.
Disminuye la lluvia ácida, permite tener mejor calidad del aire en zonas urbanas y no es un contaminante del agua.	Altamente corrosivo.
Permite aprovechar recursos renovables como la yuca, la caña de azúcar, entre otros.	Mayor volatilidad que puede desembocar en la producción de smog al mezclar con gasolina.

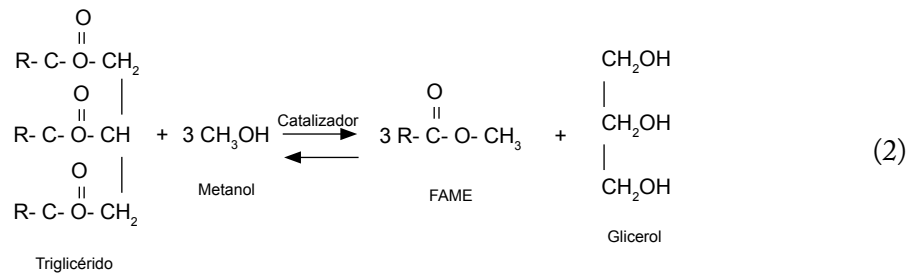
Fuente: elaboración propia, basada en Cardona (2009) y Acevedo (2006).

Biodiésel

La producción de biodiésel se realiza a partir de aceites vegetales; el tipo de aceite usado depende de factores como geografía, clima y economía de la región en la que se produce. En Estados Unidos, por ejemplo, es muy común usar aceite de soya, mientras que en la mayoría de países de Europa se emplea aceite de canola, y en países que hacen parte de la zona intertropical se suele usar el aceite de palma (Gerhard, 2001); incluso, hay muchas más opciones, como los aceites de oliva virgen, colza, mostaza, lino, girasol, entre otros. Las investigaciones más recientes apuntan a una producción de biodiésel que no limite ni atente contra la seguridad alimentaria; igualmente, han mostrado que algunas algas son fuentes prometedoras de aceites útiles para este fin. También se ha encontrado un gran potencial en el aceite vegetal usado y las grasas animales, incluyendo el sebo, la manteca de cerdo, la grasa de pollo y los subproductos de la producción de ácidos grasos omega-3 del aceite del pescado (Speight, 2008).

El proceso del biodiésel ha sido muy estudiado. Se ha establecido la transesterificación como la ruta más usada a nivel industrial, independientemente del tipo de aceite a usar. Este proceso emplea un catalizador básico como el hidróxido de sodio o de potasio para la mayoría de los casos y se lleva a cabo a bajas temperaturas y presiones ($\pm 65^{\circ}\text{C}$, 20psi) (Korytkowska, Barszczewska-Rybarek y Gibas, 2001); además, requiere una etapa posterior donde se busca separar el biodiésel como producto deseado del subproducto y el exceso de alcohol. Otra manera de seguir esta misma ruta es usando un catalizador de carácter ácido, que es muy útil cuando el aceite empleado es rico en ácidos grasos libres; en estos casos se suele utilizar ácido sulfúrico o clorhídrico como catalizador, conservando las temperaturas y presiones mencionadas; sin embargo, cuando el catalizador es ácido, se recomienda emplear un exceso de alcohol de hasta 50:1 molar respecto al aceite para obligar al equilibrio a favorecer los productos (Macedo et ál., 2006).

La reacción de transesterificación se muestra de forma general en la reacción 2 (Dufour, 2009). Esta reacción se lleva a cabo en tres etapas: 1) los triglicéridos (TAG) de los aceites vegetales se convierten en un diglicérido (DAG) y un éster de ácido graso; 2) los DAG se transforman en monoglicéridos (MAG), liberando un éster de ácido graso adicional, y 3) el MAG se convierte en glicerol, liberando el metil éster de ácido graso (FAME), que se conoce como biodiésel (Drapcho, Nhuan y Walker, 2008).



Otra forma, menos común, pero aún usada, es la esterificación; esta ruta es muy usada cuando el aceite tiene un alto contenido de ácidos grasos libres, como en el caso de los aceites de cocina. Aquí se lleva a cabo una reacción reversible en la que no se parte de los triglicéridos del aceite, sino de sus ácidos grasos libres (FFA); estos se convierten en metil éster de ácido graso mediante catálisis ácida usando un mecanismo de reacción similar al de la transesterificación (Drapcho et ál., 2008). En este proceso, a diferencia de la transesterificación, se obtiene agua en vez de glicerol (reacción 3).

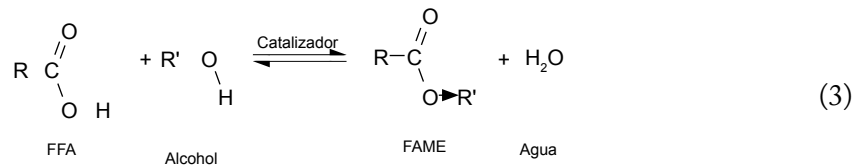


Tabla 3. Ventajas y desventajas del biodiésel

Ventajas	Desventajas
Bajo contenido de azufre, libre de compuestos aromáticos.	Desmejora la estabilidad y turbidez cuando es mezclado con diésel, debido a su gran capacidad higroscópica.
Tiene alrededor de 10.5 % de oxígeno en su composición, lo que ayuda a mejorar su proceso de combustión reduciendo las emisiones de escape, en especial las de monóxido de carbono.	El alto contenido de alquilésteres saturados (±50 % peso) del biodiésel hace que sea un producto de difícil manejo, almacenamiento y transporte cuando se encuentra a temperaturas muy bajas, esto debido a que a menor temperatura las moléculas más saturadas empiezan a cristalizarse.
Mejora la lubricidad y el índice de cetano al ser mezclado con diésel.	
Reduce las emisiones de CO alrededor del 50 % y del CO ₂ en un 78 % respecto a la base neta del ciclo de vida del carbono.	

Fuente: elaboración propia basada en Peyton (2016), Gevorkian (2010) y European Automobile, Alliance of Automobile Manufacturers, Engine Manufacturers Association y Japan Automobile Manufacturers Association (2006).

Recientemente, las investigaciones han hecho una apuesta por los biocombustibles de segunda generación, es decir, combustibles producidos a partir de materias primas que no son fuentes alimenticias (Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, 2017). Para el caso del biodiésel, una de las principales propuestas es emplear el aceite vegetal usado como fuente de materia prima; cada litro de aceite comestible que es tirado al drenaje contamina 1 000 000 de litros de agua, por lo que se considera que la principal ventaja de esta nueva forma de producción es el aprovechamiento de un residuo altamente contaminante (Ramos, Sepúlveda y Villalobos, 2002).

En la bibliografía al respecto, los diferentes autores tratan temas como condiciones de reacción y ruta más conveniente; pero en general todos coinciden en que tanto la esterificación como la transesterificación son viables para el uso de esta materia prima y que además existe una necesidad de pretratamiento del aceite que minimice o evite problemas en las posteriores etapas de producción (Benítez, Bravo y Cortés, 2011).

Otra alternativa es la *Jatropha*, un arbusto de origen mexicano que puede crecer en suelos pedregosos, arenosos o con bajo contenido de nutrientes. El porcentaje de aceite en sus semillas está entre el 20 y el 40 % y sigue patrones de ácidos grasos muy similares a los de los aceites comestibles. Lo reportado en la literatura indica que todas estas características hacen de esta semilla una buena opción para la producción de biodiésel (Parawira, 2010).

De igual forma se ha estudiado el uso de lípidos microalgales para la producción de biodiésel (Arredondo y Vázquez, 1991), siendo esta una alternativa prometedora en contraste con las plantas oleaginosas, pues ofrece múltiples ventajas, como: alta eficiencia fotosintética (Dismukes et ál., 2008), producción sostenible durante todo el año (no afectada por estaciones climáticas) e independencia de la fertilidad del suelo y de los cultivos agrícolas, además de rendimientos lipídicos por unidad de área considerablemente superiores a los obtenidos con plantas oleaginosas (Rittmann, 2008).

Aunque este tipo de producción aún no se lleva a cabo a escala industrial, la Federación Nacional de Biocombustibles señala que, si bien las tecnologías aún están en investigación, no se descarta un pronto avance que permita llevar este tipo de procesos a nivel industrial.

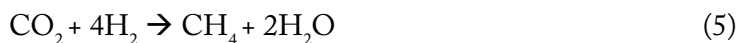
Biogás

La digestión anaerobia es el proceso utilizado para la obtención de biogás. Las materias primas (es decir, los compuestos orgánicos complejos) se alimentan a un biodigestor (Camps y Marcos, 2008), el cual, debido a factores ambientales (alta concentración de nutrientes disponibles, temperatura, pH, presión, cantidades de agua y oxígeno adecuadas) (Stanier, Ingraham, Wheelis y Painter, 1992), favorece el crecimiento de bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas, las que llevan a cabo la digestión anaerobia en las cuatro etapas definidas en la tabla 4 (Camps y Marcos, 2008).

Tabla 4. Etapas de la digestión anaerobia

Hidrólisis	Acidogénesis	Acetogénesis	Metanogénesis
Microorganismos hidrolíticos a través de enzimas transforman las macromoléculas de los nutrientes (carbohidratos, lípidos, proteínas) en sus respectivos monómeros (monosacáridos y oligosacáridos, ácidos grasos, aminoácidos y polipéptidos).	Posteriormente, bacterias acidogénicas degradan los monómeros obtenidos previamente en compuestos solubles, que son ácidos grasos volátiles (ácidos grasos de cadena corta que tienen entre uno y seis átomos de carbono saturados y un solo grupo carboxílico).	Los ácidos grasos volátiles son tomados por bacterias acetogénicas, quienes los transforman en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno.	Finalmente, mientras que el dióxido de carbono e hidrógeno son convertidos a metano y agua por acción de bacterias metanogénicas (reacción 4), el ácido acético es transformado por estas mismas bacterias a metano y dióxido de carbono (reacción 5).

Fuente: elaboración propia basada en de Varnero (2011), Camps y Marcos (2008) y Holum (1971).



La hidrólisis y la acidogénesis forman parte de la fase no metanogénica (Madigan, Martinko y Parker, 1999), es decir, que emplean microorganismos anaerobios facultativos que pueden sobrevivir en ambientes que contengan o no oxígeno (Stanier et ál., 1992), mientras que la acetogénesis y la metanogénesis son etapas que pertenecen a la fase metanogénica (Madigan et ál., 1999), o sea, requieren microorganismos anaerobios estrictos que no pueden sobrevivir a ambientes donde esté presente el oxígeno (Stanier et ál., 1992). Cabe resaltar que la biomasa empleada en la digestión anaerobia no debe tener un porcentaje de sólidos superior al 10 % (Acosta y Obaya, 2005), ya que esto incrementa el tiempo de residencia y demanda biodigestores de mayor tamaño (Varnero, 2011). De igual forma, la biomasa no debe reportar altas cantidades de nitrógeno que resulten en la formación de amonio y amoníaco, ni de azufre que den lugar a disulfuro de hidrógeno por la acción de bacterias sulfatoreductoras; tampoco es conveniente un alto contenido de metales pesados, fenoles, tiosulfatos, tiocianatos, cianuros, agentes oxidantes fuertes, tensoactivos aniónicos, antibióticos, pesticidas o sales (Acosta y Obaya, 2005). Después de obtener el biogás es necesario un proceso de refinación, el cual depende de la procedencia y aplicación final; esto se realiza con el objetivo de eliminar contaminantes presentes en el biocombustible como el dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoníaco, agua, partículas sólidas, entre otros (Camps y Marcos, 2008).

La digestión anaerobia es afectada por factores como: temperatura, pH, relación de nutrientes, agitación y presencia de inhibidores.

Temperatura

Se emplean temperaturas que favorecen el crecimiento de microorganismos mesófilos y termófilos (Acosta y Obaya, 2005).

Tabla 5. Temperatura de la digestión anaerobia

Tipo de microorganismo	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Temperatura óptima
Mesófilo	10 °C	< 45 °C	20–40 °C
Termófilo	> 45 °C	< 70 °C	40–80 °C

Fuente: elaboración propia basada de Stanier et ál. (1992).

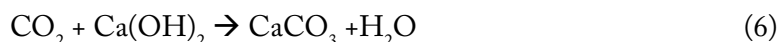
En la tabla 5 se puede observar que los microorganismos mesófilos pueden reproducirse entre 10 y 45 °C, y los termófilos entre los 45 y los 70 °C. Sin embargo, la temperatura óptima en la que se produce el mayor crecimiento está entre 20 y 40 °C para mesófilos, así como 40 y 80 °C para termófilos (Karp, 2005). Generalmente, son más utilizadas las condiciones para el desarrollo de microorganismos mesófilos en la producción de biogás, debido a que los termófilos son vulnerables a cambios bruscos de temperatura y, por lo tanto, si son empleados requieren de un cuidado especial para mantenerla lo más estable posible. De igual manera, se puede decir que la temperatura óptima del proceso es 35 °C (Acosta y Obaya, 2005).

pH**Tabla 6.** pH de la digestión anaerobia

pH mínimo	pH máximo	pH óptimo
6.5	7.5	7

Fuente: elaboración propia basada en Parra et ál. (2012).

Como se describió en la tabla 6, el proceso se puede desarrollar a un pH entre 6.6 y 7.6 unidades; sin embargo, el pH óptimo para que se produzca la mayor cantidad de biogás es de 7 unidades (Parra et ál., 2012). Para aproximarse a este valor se deben variar las condiciones del proceso, como disminuir la carga orgánica al biodigestor o adicionar nutrientes que tengan sustancias alcalis, ácidas, agua o ácidos grasos volátiles; aunque esta última opción requiere que el ácido graso adicionado tenga una cadena estructural pequeña para evitar la generación de inhibidores en el proceso. En la digestión anaerobia es común que se deba elevar el pH (Acosta y Obaya, 2005), debido a que la biomasa empleada es ácida (Parra et ál., 2012); para ello, la sustancia más utilizada es la cal; sin embargo, esta no es la más recomendable puesto que puede solidificarse si no se encuentra mezclada de forma homogénea; adicionalmente, disminuye la producción de biogás porque emplea dióxido de carbono para su formación (reacción 6). El dióxido de carbono es necesario para que junto con el hidrógeno se obtenga metano, como se observa en la metanogénesis (reacción 5), siendo este último el componente principal del biogás (Acosta y Obaya, 2005).

**Relación de nutrientes**

Debe existir una relación entre el carbono, el nitrógeno y el fósforo, que corresponde a 100, 1.75 y 0.25, respectivamente (Acosta y Obaya, 2005).

Agitación

Este factor permite que exista uniformidad, genera una mayor transferencia de materia gas-líquido, evita la sedimentación de los microorganismos y la formación de espumas (Camps y Marcos, 2008) y reduce los espacios del reactor que no se utilizan, además de permitir mayor contacto entre los microorganismos y su respectivo sustrato (Varnero, 2011). Sin embargo, aunque la agitación es un factor que hace más eficiente el proceso, es un proceso opcional (reactores como el *plug flow* que no la necesitan). De igual forma, cabe resaltar que la velocidad de agitación debe ser lo suficientemente fuerte para homogenizar el reactor, pero sin generar ruptura de la torta de sustrato que contiene la comunidad de microorganismos (Bolívar y Ramírez, 2012).

Presencia de inhibidores

El oxígeno es un inhibidor del proceso debido a la imposibilidad de sobrevivir de las bacterias acetogénicas y metanogénicas en presencia de este elemento. Otros inhibidores son el amoníaco, las sales minerales, los detergentes y los metales presentes en el residuo empleado como materia prima cuando se encuentran en elevadas concentraciones. No obstante, se ha concluido de forma experimental que es posible desarrollar el proceso con altas concentraciones de inhibidores siempre y cuando se realice la preparación de un inóculo adecuado, la climatización del biodigestor a estos

compuestos y la búsqueda de efectos sinérgicos que disminuyan la toxicidad de los inhibidores en el proceso (Acosta y Obaya, 2005).

Tabla 7. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia

Ventajas	Desventajas
No es necesaria la implantación de microorganismos en el biodigestor, debido a que estos se desarrollan por sí solos en condiciones adecuadas.	Tiene menor poder calorífico que los combustibles fósiles.
Requiere bajo consumo energético para el crecimiento microbiano, debido a que el 90 % de la energía disponible es transformada en metano.	Es un proceso afectado por diversos factores como biomasa empleada, temperatura, pH, relación de nutrientes, agitación, presencia de inhibidores, entre otros, lo que genera imprecisiones en cuanto a la predicción del volumen de biogás.
No se requiere la refinación del biogás cuando se le dan fines domésticos como cocinar.	
El compuesto de interés (metano) se obtiene en una proporción mayor que los demás componentes del biogás, lo que hace que el proceso sea eficiente en caso de requerir separación de gases.	
Es una alternativa para la generación de electricidad en zonas rurales que no cuentan con el servicio.	
Los subproductos del proceso son utilizados como bioabono.	

Fuente: elaboración propia basada en Acosta y Obaya (2005) y Varnero (2011).

ESTADO EN COLOMBIA

Entre 2001 y 2007 se presentó un aumento del 1.5 % en el uso de fuentes de energía renovables, siendo la biomasa una de las fuentes más significativas para llegar a este porcentaje (Mantilla, Duque y Galeano, 2007). Desde el 2001 se han implementado políticas para incentivar la producción de biocombustibles, principalmente para la obtención de bioetanol y biodiésel, con el objetivo de mejorar las condiciones del medio ambiente, proveer electricidad a zonas no interconectadas, diversificar la matriz energética y hacer que el país sea competitivo a nivel mundial (García y Calderón, 2012). Un claro ejemplo de estas nuevas políticas que nacen del compromiso del país con el protocolo de Kyoto es la Ley 1715 de 2014, cuyo propósito es promover la eficiencia energética y la utilización de fuentes no convencionales de energía renovables (Ortega, 2014).

En Colombia, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), entidad encargada de la fijación de los precios de los biocombustibles desde el año 2012, y el Ministerio de Minas y Energía son los encargados de fijar los porcentajes de mezclas a nivel nacional tanto para bioetanol como para biodiésel. Tal como lo establecen estas entidades, hoy en día se emplean las mezclas E8 y B7 en el centro-oriente del país para el bioetanol y el biodiésel, respectivamente, sin embargo, para la zona occidental se utilizan las mezclas E10 y B10 (Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, 2017).

La producción nacional de bioetanol cuenta con seis refinerías que producen en conjunto un aproximado de 1 200 000 litros por día, con lo que sería posible reemplazar 8.5 % de la gasolina que se consume en el país. La producción de biodiésel también cuenta con seis refinerías que producen en total un aproximado de 10 000 barriles diarios, con lo cual se podría sustituir el 9 % del diésel consumido en el país (Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, 2017). Por su parte, desde hace poco más de treinta años, la producción de biogás se hace a partir de residuos agropecuarios y forestales (Mantilla, Duque y Galeano, 2007).

En la tabla 8 se presentan las materias primas para la producción de biodiésel y bioetanol en Colombia; aquí se enumeran, por un lado, las materias primas convencionales y, por otro, las no convencionales que no compiten con el sector alimentario. Cabe resaltar que el biogás no es considerado en esta tabla debido a que la biomasa utilizada para su producción son residuos agropecuarios, industriales y domésticos, cuya reutilización no interfiere con cultivos destinados a alimentación.

Tabla 8. Materias primas convencionales y no convencionales para la producción de biocombustibles

Biocombustible	Materias primas convencionales	Materias primas no convencionales
Bioetanol	Caña de azúcar y almidón de maíz	Residuos agrícolas, forestales e industriales
Biodiésel	Aceite de palma	Aceite vegetal usado, grasas de animales, algas y jatropha

Fuente: elaboración propia según los datos obtenidos de Camps y Marcos (2008), UPME (2010), Cardona, Orrego y Gutiérrez (2009) y “Colombia intentará con la jatropha” (2010).

Actualmente, el bioetanol y el biodiésel son principalmente implementados en el sector transporte, teniendo en cuenta las mezclas establecidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, 2017). Por su parte, el biogás es utilizado para suplir necesidades básicas de cocina y de iluminación, con una generación de potencia menor a 180 kW en zonas rurales (Mantilla, Duque y Galeano, 2007); además, en industrias de alimentos y bebidas del sector nacional, el biogás es producido a partir de aguas residuales para obtener energía térmica; de igual forma, en estas empresas existen proyectos de cogeneración para aprovechar el vapor y la electricidad a un bajo costo (UPME, 2015). Sin embargo, no se ha logrado su masificación a gran escala debido a la falta de conocimiento e impedimentos de la normatividad colombiana, ya que esta exige una alta pureza del principal componente del biogás, estableciendo que el metano debe estar presente en un 95 % en el biocombustible, con el fin de evitar que este pueda contener elementos patógenos que afecten la salud humana, de animales y/o de plantas (Resolución 135, 2012). No obstante, cabe resaltar que los países de la Unión Europea y Norteamérica cuentan con políticas que favorecen la implementación de tecnología en el mercado energético; en estos países hay leyes según el biodigestor y tipo de residuo orgánico empleado para la obtención del biogás. Adicionalmente, se señala el proyecto Minnesota como un caso exitoso en la producción de energía renovable, el cual es capaz de vender su energía a la red eléctrica nacional (Mantilla, Duque y Galeano, 2007).

COMENTARIOS

Es de suma importancia el desarrollo de biocombustibles a nivel mundial para reducir los agentes contaminantes producidos por el uso de combustibles fósiles. Una alternativa para cumplir este objetivo es emplear fuentes renovables que contribuyan a suplir la demanda de los combustibles tradicionales. De igual forma, se reconoce a Suramérica como la región más capacitada para la producción de bioetanol y biodiésel, debido a que de los 900 millones de hectáreas de tierras no cultivadas aptas para producción de cereales (cebada, trigo, avena, centeno y mijo), 320 millones se encuentran en Centroamérica y principalmente en el sur de América Latina (HLPE, 2013). Sin embargo, dado que las materias primas tradicionales utilizadas para la fabricación de estos dos biocombustibles son de consumo humano, se ha generado una discusión entre la comunidad científica y política con respecto a si los cultivos deben tener fines alimentarios o energéticos (Santo y Silva, 1987). No obstante, teniendo en cuenta factores como el crecimiento poblacional,

la elevación del costo de los alimentos y la falta de estos en países en vía de desarrollo, se establece que aunque Colombia tiene una alta capacidad para desarrollar bioetanol y biodiésel a partir de materias primas comestibles, se debe apoyar su generación empleando residuos o subproductos industriales. En el caso del bioetanol, para su fabricación se puede utilizar como biomasa residuos forestales (vegetales no alimenticios), de papel, de los alimentos y de sus derivados compostados (Patron y Rodríguez, 2014; (Montaño, 2014). Con respecto al biodiésel, se pueden emplear como materias primas residuos grasos animales generados en la explotación pecuaria (grasa de pollo, cerdo, y vacuna) (Rivera, Villanueva y Sandoval, 2009; Tejada, Tejada, Villabona y Monroy, 2013), aceites vegetales usados, o incluso incursionar en nuevas alternativas como la semilla de *jatropha* o la extracción de lípidos de las microalgas (Cardona et ál., 2009; “Colombia intentará con la *jatropha*”, 2010).

Con respecto al biogás, este es producido a partir de residuos vegetales, estiércoles y purines (vacunos, porcinos, equinos y avícolas), además de efluentes de la industria alimentaria, papelera, cervecera, piscícola, textil y láctea (Red Española de Compostaje, 2014; Rodríguez, 2012; Unidad de Planeación Minero Energética, 2003). Cabe resaltar que la producción de biogás tiene un mayor desarrollo cuando se lleva a cabo en fincas que recolectan residuos líquidos o semisólidos, para los cuales no se ha implementado ninguna estrategia de disposición final más allá de su vertimiento a fuentes hídricas o envío a rellenos sanitarios; esto permite que exista abundancia de materias primas, y por lo tanto se genera una producción continua de este biocombustible (Unidad de Planeación Minero Energética, 2003). Sin embargo, para lograr su desarrollo a gran escala es necesario establecer normas y estándares técnicos bajo los cuales esté regulada su incorporación a la red de distribución de gas natural, y/o su implementación como energía térmica o eléctrica con tarifas que beneficien la reforma tecnológica que se debe realizar para darle estas aplicaciones (Mantilla, Duque y Galeano, 2007).

Considerando la disponibilidad de las diferentes materias primas, la necesidad de producir combustibles diferentes a los provenientes de recursos fósiles, así como las ventajas que ofrece cada uno de los biocombustibles expuestos, se evidencia que el bioetanol, el biodiésel y el biogás tienen un alto potencial de desarrollo en Colombia, ya que estos hacen un aporte considerable para alcanzar las metas propuestas en el protocolo de Kyoto, que están encaminadas a la reducción de gases de efecto invernadero. Además, emplear subproductos industriales y residuos podría generar múltiples beneficios, como la disminución de costos de producción debido a la implementación de estas fuentes de biomasa, obtenidas diariamente como resultado tanto de la producción industrial, como de las actividades domésticas. De igual forma, el uso de estos biocombustibles disminuye la disposición de desechos al reutilizarlos con fines energéticos, reduciendo así niveles de contaminación (atmosférica, hídrica y de suelos), enfermedades y malos olores, lo que en consecuencia representa un beneficio medio ambiental. Adicionalmente, se logran progresos a nivel social en la medida en que se mejora la calidad de vida de personas que habitan en zonas no interconectadas con la provisión de electricidad producida a partir de biogás.

REFERENCIAS

- Acevedo, E. (2006). *Agroenergía. Un desafío para Chile*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Edmundo_Acevedo/publication/255971470_Agroenergía_Un_desafío_para_Chile/links/00b7d5212e66b44bdd000000/Agroenergía-Un-desafío-para-Chile.pdf
- Acosta, Y., y Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, X(1), 35-48.

- Aguilar, D. (2011). *Producción de etanol a partir de bagazo de caña panelera mediante un sistema híbrido de fermentación y pervaporación* (tesis de maestría). Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- Andersen, M. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, 2(1), 133-140.
- Arrgedondo B, y Vázquez, R. (1991). Aplicaciones biotecnológicas en el cultivo de microalgas. *Ciencia y Desarrollo*, 17(98), 99-111.
- Benítez, D., Bravo C., y Cortés, E. (2011). *Proyecto de generación de biodiésel a partir de aceites vegetales usados. Informe 3 Taller de Proyecto: Diseño de Procesos de Producción de Combustibles a Partir de Biomasa* (documento Word). Chile: Universidad de Chile. Recuperado de https://www.u-cursos.cl/usuario/.../mi_blog/r/informe3.docx
- Bolívar, H, y Ramírez, E. (2012). *Propuesta para el diseño de un biodigestor para el aprovechamiento de la materia orgánica generada en los frigoríficos de Bogotá* (tesis de grado). Ingeniería de Producción, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Camps, M., y Marcos, F. (2008). *Los biocombustibles* (2a ed.). Madrid: Mundi-Prensa.
- Cardona, C. (2009). Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: Contextos latinoamericano y mundial. *Revista de Ingeniería*, 29, 109-120.
- Cardona, C., Montoya, M., y Quintero, J. (2004). Selección de tecnologías apropiadas para la producción de etanol carburante. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 1(2), 48-55.
- Cardona, C., y Orrego, C. (2009). *Avances investigativos en la producción de biocombustibles*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- Claassen, P., van Lier, J., López, A., van Niel, E., Sijtsma, L., Stams, A., de Vries, S. Weusthuis, R. (1999). Utilisation of biomass for the supply of energy carriers. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, 52(6), 741-755.
- Dismukes, G., Carrieri, D., Bennette, N., Ananyev, G., y Posewitz, M. (2008). Aquatic phototrophs: efficient alternatives to land-based crops for biofuels. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 19(3), 235-240.
- Drapcho, C., Nhuan, N., y Walker, T. (2008). *Biofuels engineering process technology*. New York: McGraw-Hill.
- Dufour, J. (2009). *Reacción de transesterificación*. Recuperado de: <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2009/07/31/122559>
- Ortega, S. (2014, 6 de diciembre) ¿Muerte a las energías renovables en Colombia? *El Espectador*. Recuperado de <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/muerte-energias-renovables-colombia-articulo-531804>.
- Escalante, J. y Fuentes, H. (2013). *Estudio experimental de obtención de bioetanol a partir de residuos agrícolas de banano orgánico en Piura* (tesis de pregrado). Programa Académico de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Piura, Perú.
- European Automobile Manufacturers Association, Alliance of Automobile Manufacturers, Engine Manufacturers Association and Japan Automobile Manufacturers Association. (2006). *World*

- Wide Fuel Charter* (4ª edición). Recuperado de <http://oica.net/wp-content/uploads/2007/06/wwfc-fourth-edition-sep-2006.pdf>
- Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. (2017). *Preguntas frecuentes de los biocombustibles*. Recuperado de: <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm>
- García, H., y Calderon, L. (2012). *Evaluación de la política de biocombustibles en Colombia*. Recuperado de <http://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/338>
- Gerhard Knothe. (2001) *Historical perspectives on vegetable oil-based diesel fuels*. Peoria, Illinois: 1103-1107
- Gevorkian, P. (2010). *Alternative energy systems in building design*. New York: McGraw-Hill Professional.
- Hawgood, N., Evans, S., y Greenfield, P. (1985) Enhanced ethanol production in multiple batch fermentations with an auto-flocculating yeast strain. *Biomass*, 7(4), 261-278.
- HLPE. (2013). *Los biocombustibles y la seguridad alimentaria. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i2952s.pdf>
- Holum, J. (1971). *Principios de fisicoquímica, química orgánica y bioquímica Introducción a las bases moleculares de la vida*. México: Centro regional de ayuda técnica, Agencia para el desarrollo internacional
- Karp, G. (2005). *Biología celular y molecular*. México: McGraw-Hill
- Korytkowska, A., Barszczewska-Rybarek, I., y Gibas, M. (2001). Side-Reactions in the Transesterification of Oligoethylene Glycols by Methacrylates. *Designed monomers and polymers*, 4(1), 27-37.
- Macedo, C., Abreu, F., Tavares, A., Alves, M., Zara, L., Rubim, J., y Suarez, P. (2006) New heterogeneous metal-oxides based catalyst for vegetable oil trans-esterification. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 17(7), 1291-1296.
- Madigan, M., Martinko, J. y Parker, J. (1999). *Biología de los microorganismos*. Illinois, EE. UU.: Pearson-Prentice Hall.
- Madson P., y Monceaux, D. (1995) Fuel ethanol production. En T. Lyons, D. Kelsall y J. Murtagh (Eds.), *The Alcohol Textbook* (pp. 257-268). Nottingham, Reino Unido: Nottingham University Press..
- Mantilla, J., Duque, C., y Galeano, C. (2007). Preliminary design and economical study of a biogas production-plant using cow manure. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 133-142.
- Montaño, H. (2014). *Producción de bioetanol a partir de material lignocelulósico de Moringa oleífera* (tesis de maestría). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Nigam, P., y Singh, D. (1995). Enzyme and microbial systems involved in starch processing. *Enzyme and Microbial Technology*, 17(9), 770-778.
- Parawira, W. (2010). Biodiésel production from *Jatropha curcas*: A review. *Scientific Research and Essays*, 5(14), 1796-1808.

- Parra, B., Torres, P., Rebellón, L., Cárdenas, L., Vásquez, F., Torres, W., y Ordóñez, J. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 11(4), 325-341. doi:10.1007/s11157-012-9277-8.
- Patron, A., y Rodríguez, A. (2014). *Diseño de un bioreactor para la producción de bioetanol a partir de desechos orgánicos a escala de laboratorio* (tesis de grado). Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia.
- Peyton, K. (2016). *Nalco Champion fuel field manual* (3ª edición). EE. UU.: McGraw-Hill.
- Colombia intentará con la jatropa, a pesar de que el fruto de este arbusto no es comestible. (2010, 19 de marzo). *Portafolio*. Recuperado de <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/colombia-intentara-jatropa-pesar-fruto-arbusto-comestible-337014>
- Química Orgánica. (2011). *Reacción de esterificación*. Recuperado de <http://quimicaorganica-far-grupo2.blogspot.com.co/2011/09/>
- Ramos, R., Sepúlveda, R., y Villalobos, F. (2002). *El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis*. México: Plaza y Valdes.
- Red Española de Compostaje. (2014). *De residuo a recurso, el camino hacia la sostenibilidad. Residuos agrícolas I.1*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Rittmann, B. (2008). Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. *Biotechnology and bioengineering*, 100(2), 203-212.
- Rivera, I., Villanueva, G., y Sandoval, G. (2009). Producción de biodiésel a partir de residuos grasos animales por vía enzimática. *Grasas y Aceites*, 60(5) 468-474. DOI:10.3989
- Resolucion 135 de 2012. *Por la cual se adoptan normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con Biogás*. Diario Oficial 48657 de diciembre 28 de 2012.
- Rodríguez, C. (2012). *Producción de biogás a partir del bagazo cervecero* (tesis de pregrado). Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Sánchez, Ó. (2005). Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas. *Interciencia*, 30(11), 671-679.
- Santos, T., y Silva, J. (1987). *Los factores de la paz*. Japón: Universidad de las Naciones Unidas.
- Speight, J. (2008). *Synthetic fuels handbook: Properties, process and performance*. EE. UU.: McGraw-Hill.
- Stanier, R., Ingraham, J., Wheelis, M., y Painter, P. (1992). *Microbiología*. Barcelona: Reverté S.A
- Tejada, C., Tejada, L., Villabona, Á., y Monroy, L. (2012). Obtención de biodiésel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. *Luna Azul*, 36, 10-27.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2003). *Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión*. Recuperado de http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/normalizacion/GUIA_DE_ESPECIFICACIONES_DE_SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS_PARA_LA_E.pdf
- UPME. (2010). *Atlas de biomasa en Colombia*. Recuperado de http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/article/1768/feuille/Atlas%20de%20Biomasa%20Residual%20Colombia__.pdf

- UPME. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Recuperado de http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf
- Vásquez, H., y Dacosta, O. (2007). Fermentación alcohólica: una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 8(4), 249-259.
- Varnero, M. (Ed.). (2011). *Manual del biogás*. Santiago de Chile: Gobierno de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, FAO y Global Environment Facility.

