

Investigación

Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación

Biogas from Organic Waste and its Commitment as a Second Generation Fuels

Recibido:25 de febrero de 2013
Aprobado:28 de febrero de 2013

Carlos Alberto Severiche Sierra*, Rosa Leonor Acevedo Barrios**

Resumen

La búsqueda de alternativas energéticas de origen renovable y la disminución de gases de efecto invernadero provenientes de la descomposición de desechos orgánicos hacen del biogás una prometedora alternativa para la sustitución de combustibles fósiles y para la valorización energética de residuos orgánicos en zonas urbanas, rurales y agroindustriales. El biogás es una fuente de energía alternativa atractiva debido a que presenta una disponibilidad energética descentralizada, en tanto que su producción es posible siempre que existan fuentes de origen orgánico. En este trabajo se analiza de manera detallada la conveniencia de la producción de biocombustibles de segunda generación a partir de residuos sólidos orgánicos.

Palabras clave

Biogás, combustibles, residuos orgánicos.

* M. Sc. Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Químico, especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, docente catedrático de la Universidad de Cartagena, especialista Grado Superior del Laboratorio de Calidad de Aguas de la Empresa Aguas de Cartagena SA ESP, docente investigador del Grupo de Investigaciones en Sistemas Ambientales y Materiales GISAM de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena, Colombia. E-mail: cseveriches@gmail.com

** Ph. D. Toxicología Ambiental. Bióloga, M. Sc. Microbiología. Docente de tiempo completo e investigadora del Grupo de Investigaciones en Sistemas Ambientales y Materiales GISAM de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena, Colombia. E-mail: racevedo@unitecnologica.edu.co

Abstract

The search for alternative energy from renewable sources and reducing greenhouse gases from the decomposition of organic waste biogas made a promising alternative to fossil fuel substitution and energy recovery of organic waste in urban, rural and agribusiness. The biogas is an attractive alternative energy source because it presents a decentralized energy supply, while production is possible whenever there sources of organic origin. In this paper we analyze in detail the suitability of the production of second generation biofuels from organic solid waste.

Keywords

Biogas fuels, organic waste.

I. Introducción

Las necesidades energéticas de nuestro planeta son satisfechas hasta en un 90% con la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gas licuado de petróleo, carbón), todos ellos extinguidos en un futuro cercano, fuertemente contaminantes y utilizados en forma ineficiente (Barrena et ál., 2010). De igual manera, los apuros de energía en las zonas rurales de los países en vías de desarrollo, obliga a los pobladores a utilizar a gran escala leña (para lo cual deforesta) y desperdicios agrícolas secos (estiércol y residuos de cosecha) (Liriano, 2005).

Es así que esta problemática, plantea la necesidad de encontrar una tecnología apropiada, utilizando recursos locales disponibles como son los residuos orgánicos (heces humanas, estiércoles, basura orgánica y plantas), los cuales pueden ser usados como medio para producir energía (biogás) y biofertilizantes mediante biodigestores (Barrena et ál., 2010); (Liriano, 2005). De esta manera se mejorará la vida de los campesinos, se incrementará la producción agrícola y se preservará el medio ambiente (Barrena et ál., 2010).

La libre disposición de estiércol de ganado en el campo o su tratamiento inadecuado lo convierte en una fuente de contaminación ambiental y en un foco infeccioso para seres humanos, puesto que propicia el desarrollo de vectores de enfermedades (Liriano, 2005). La aplicación del estiércol fresco o seco como fertilizante no es bueno para la agricultura, porque se debe descomponer primero antes que las plantas lo aprovechen; además, esta práctica no es recomendable por el peligro de contaminación que puede significar la infiltración de materia orgánica sin digerir para el manto freático o los cursos de agua (Vásquez et ál., 1997).

En vista de las limitaciones actuales concernientes a la disponibilidad de combustibles de origen fósil y al cambio climático ocasionado por el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, las investigaciones en el campo de los combustibles alternativos, los cuales son neutrales en las emisiones de CO₂, se han incrementado en los últimos años (Cacua et ál., 2011).

En el mundo se producen aproximadamente 1600 millones de toneladas por año de residuos sólidos, los cuales generan graves problemas, no solo por el deterioro progresivo del medio ambiente, sino también desde el punto de vista económico puesto que los costos de recolección, transporte y disposición final son cada vez mayores. Se estima que los servicios de disposición, tratamiento y aprovechamiento de los residuos sólidos mueven mundialmente un mercado anual de 100 000 millones de dólares, de los cuales 43 000 millones corresponden a Norteamérica,

42 000 millones a la Unión Europea y solo 6000 millones a Suramérica, siendo la producción de residuos de 250, 200 y 150 millones de toneladas por año respectivamente (Tejeda et ál., 2010).

En el caso de Colombia, las cifras del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial indican que en un día el país produce 27 300 toneladas de basura de las cuales el 65% son residuos orgánicos y el 35% inorgánicos. Los componentes que constituyen la fracción orgánica de las basuras colombianas son residuos de alimentos, papel, cartón, madera y residuos de jardín. Solo el 40% de los residuos sólidos municipales tiene un manejo adecuado, el 50% es manejado de forma indebida y el 10% es recuperado gracias al reciclaje (Cardona et ál., 2004); (Cuervo et ál., 2007).

La mayor parte del comercio mayorista de productos agrícolas de consumo humano, y gran parte del minorista, se lleva a cabo en las centrales de abasto de las ciudades colombianas. Los residuos sólidos que se producen diariamente en este sector son sobre todo de origen vegetal y están constituidos por frutas y verduras que no alcanzan la calidad necesaria para su comercialización debido, por ejemplo, a su alto estado de madurez; igualmente estos residuos están constituidos por diferentes estructuras vegetales de desecho (cáscaras, tallos, semillas, etc.) (Lara et ál., 2010); (Cardona et ál., 2004). Los polisacáridos contenidos en este tipo de materiales pueden ser aprovechados por medio de la transformación enzimática de los complejos amiláceos y celulósicos en azúcares que posteriormente son fermentados hasta alcohol u otros productos de valor agregado (Lara et ál., 2010).

Uno de los procesos de investigación e innovación tecnológica que más se estudia está relacionado con la producción de biogás y bioabonos, a partir de los efluentes de biodigestores en el contexto de las fincas donde se producen alimentos y energía, de forma integrada.

En este trabajo se analiza de manera detallada la conveniencia de la producción de biocombustibles de segunda generación a partir de residuos sólidos orgánicos. Se analiza la conveniencia de la producción de biocombustibles de segunda generación a partir de residuos sólidos orgánicos, revisando el estado del arte de los biocombustibles de segunda generación especialmente los que se generan a partir de residuos sólidos orgánicos. Se clasifican los impactos por factores sociales, ambientales, económicos, técnicos y culturales de la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos orgánicos.

II. Materiales y métodos

El biogás es una mezcla de diferentes gases producidos por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, como el estiércol y las basuras orgánicas. La composición química del biogás indica que el componente más abundante es el metano (CH_4); este es el primer hidrocarburo de la serie de los alcanos y un gas de efecto invernadero (Escalante et ál., 2007). La mezcla de CH_4 con el aire es combustible y arde con llama azul. Es un combustible ecológico, ya que se obtiene en biodigestores por fermentación anaeróbica del estiércol de herbívoros; luego, cuando se quema el biogás, se produce CO_2 y agua; el CO_2 sale a la atmósfera, de donde es captado por las plantas para producir carbohidratos mediante la fotosíntesis, que los utilizarán para su crecimiento; estas plantas servirán de alimento a los herbívoros, cuyo estiércol se alimentará al biodigestor, de esta manera se completa el ciclo del CO_2 (Amell & Copete, 2006). La aplicación de este bioproceso contribuye a reducir la emisión de gases de efecto invernadero y por ende del calentamiento global, teniendo en cuenta que una molécula de metano capta aproximadamente 25 veces más calor que la molécula de CO_2 (Dussan, 2009).

Los residuos sólidos urbanos son comúnmente dispuestos en rellenos sanitarios o ilegalmente en tiraderos al aire libre. La fracción orgánica de estos es la mayor con 40 a 65%, la cual bajo digestión anaerobia genera biogás y lixiviados con un riesgo potencialmente alto de contaminación ambiental (Nuevo Relleno Sanitario, 2013).

Estudios sobre la producción eléctrica a partir de los productos de combustión del biogás con aire enriquecido por medio de un generador de potencia de ciclo abierto MHD (magneto-hidrodinámico), hallando que al aumentar el oxígeno en el aire la temperatura y la conductividad eléctrica de los productos de combustión se incrementaban (Cacua et ál., 2011).

Aunque no se han hecho investigaciones que reporten el uso de esta técnica de enriquecimiento en aplicaciones de combustión convencionales del biogás, mientras la producción de oxígeno mediante técnicas criogénicas y membranas de separación comienza a bajar los costos y a estar disponible, no solo en grandes escalas, sino también en medianas y bajas escalas de producción, hace que la investigación de los fenómenos cinéticos, térmicos, difusivos y fluidodinámicos de la combustión del biogás con aire enriquecido tenga en la actualidad una gran pertinencia (Tejeda et ál., 2010); (Cacua et ál., 2011).

La mayoría de indagaciones sobre residuos orgánicos realizadas tanto en los países desarrollados como en Colombia, han concentrado sus esfuerzos en la transformación de estos residuos a biogás y compost. Igualmente, se han llevado a cabo saberes para el diseño de procesos de conversión de residuos sólidos municipales a alcohol, algunos de los cuales han sido patentados para su implementación a nivel comercial (Baltierra et ál., 2012).

Como anota Cacua et ál., (2011), las propiedades de combustión de una mezcla combustible comburente se determinan con el propósito de conocer la disponibilidad

energética por cantidad de combustible, las condiciones para que ocurra la combustión, los requerimientos de aire para una combustión completa y la cantidad y composición de los productos de combustión. A continuación se realiza una breve descripción de cada una de estas propiedades.

A. Volumen estequiométrico de aire (V_a)

Es el volumen normal o estándar de aire requerido para quemar estequiométricamente 1 m³ normal o estándar de gas combustible.

B. Volumen de humos húmedos (V_{hh})

Es el volumen total de humos, normal o estándar, producido por la combustión de un m³ normal o estándar de gas combustible; se expresa en m³ normales o estándar de humos húmedos/m³ normal o estándar de gas.

C. Volumen de humos secos (V_{hs})

Es el volumen de humos secos, normal o estándar, producido por la combustión estequiométrica de un m³ normal o estándar de gas combustible. No se tiene en cuenta el agua producida; se expresa en m³ normales o estándar de humos secos/m³ normal o estándar de gas.

D. Porcentaje máximo de CO₂

Es la relación entre el volumen de CO₂ y el volumen de humos secos en porcentaje; en condiciones de combustión estequiométrica este valor es máximo.

E. Temperatura de rocío (TR)

La combustión de hidrocarburos (C_xH_y) e hidrógeno produce vapor, el cual se encuentra como vapor en los productos de combustión. La temperatura a la cual se inicia la condensación del vapor de agua en los productos de combustión se denomina temperatura de rocío. Esta resulta importante en el estudio de la recuperación de la entalpía de vaporización del agua en los productos de combustión resultantes al quemar un combustible específico.

F. Temperatura adiabática de llama (T_{ad})

Es la máxima temperatura que alcanzan los productos de combustión cuando esta se realiza en condiciones estequiométrica y adiabática y no ocurren reacciones de disociación.

G. Velocidad de deflagración laminar (VL)

Conocida también como velocidad de llama, es la velocidad lineal a la cual viaja la llama a través de una mezcla gas-aire estática, la rapidez con la que avanza la combustión de la zona quemada a la zona sin quemar, o también como la rapidez con la que un combustible libera su energía. Este parámetro, igual mente, depende en gran forma del tipo de gas y la cantidad de aire con que este se mezcla.

H. Mínima energía de ignición (EMI)

La energía mínima de ignición es una de las propiedades de combustión más importantes a considerar en el estudio del comportamiento de la propagación de la combustión. Se define como la cantidad de energía que es necesario suministrar a una mezcla combustible-aire para que la combustión se inicie, autosostenga y propague. Los factores a tener en cuenta para su cálculo son la composición del comburente y la presión de la mezcla.

I. Propiedades de combustión del biogás con aire normal

Teniendo una idea conceptual de las propiedades de combustión y su aporte en la optimización del uso y manejo seguro de los combustibles gaseosos, es muy importante conocer cuáles son las propiedades de combustión que caracterizan al biogás con aire normal como comburente, las cuales sirven de base para el análisis comparativo del efecto del enriquecimiento con oxígeno del aire. El enriquecimiento del aire con oxígeno de la mezcla aire-biogás mejora algunas de sus propiedades de transporte como la conductividad térmica, e incrementa la velocidad de las reacciones de oxidación durante la combustión, atenuando los efectos negativos de la presencia del CO_2 en el biogás.

J. La digestión anaerobia, o biodigestión

Es una tecnología ampliamente difundida a escala familiar en países como China, India o Nepal. En estos sistemas los residuos orgánicos son convertidos en productos aprovechables como el biogás.

K. Biodigestores familiares de bajo costo

La digestión anaerobia, o biodigestión, es una tecnología que permite mejorar el aprovechamiento energético tradicional de la biomasa, tanto desde el punto de vista medioambiental, como social y económico. Al mismo tiempo, permite una gestión sostenible de los residuos orgánicos, convirtiéndolos en un recurso para generar biogás (energía renovable) y biol (fertilizante natural). La biodigestión a escala familiar ha sido ampliamente difundida en países como China o India desde el último cuarto del siglo pasado y más recientemente en Nepal (Biogas Support Programme), típicamente en digestores de cúpula fija (tipo chino) o de cúpula flotante (tipo indio). Sin embargo, la complejidad de su construcción y un coste relativamente elevado pueden ser limitantes para su implementación. Los biodigestores tubulares de plástico, de construcción simple y económica, permiten una mayor expansión de esta tecnología. Posibles materiales para su construcción son el polietileno y el PVC (geomembrana), siendo el último más resistente pero también más costoso.

L. Características de los biodigestores

La mayor parte son biodigestores de tipo tubular de plástico o geomembrana, En general se trata de biodigestores tubulares de polietileno con un volumen útil de 5 m^3 . Se diseñan para trabajar a un tiempo de retención de 90 días, y se alimentan diluyendo el estiércol con agua en una proporción 1/3 (v/v), ambos valores bastante conservadores. Los biodigestores familiares implementados funcionan a temperatura ambiente, por este motivo su ubicación dentro de pequeños invernaderos permite amortiguar las oscilaciones

térmicas día-noche y aumentar la temperatura del proceso. Para su puesta en marcha, los biodigestores se inocularon con estiércol y rumen de vaca y/u oveja. Diariamente se alimentan con estiércol diluido con agua/purines (1/2 - 1/3 v/v) para dar una proporción de sólidos máxima del 8% trabajando a un tiempo de retención de 60 días.

En general, las familias se muestran satisfechas con el uso de biodigestores, pero destacan que requiere un esfuerzo de trabajo importante, que el biogás producido es todavía insuficiente, y que la cocción con biogás es más lenta. Por estos motivos, sería necesario mejorar el rendimiento del proceso y el diseño de los quemadores y cocinas de biogás (Ferrer, 2009). La planta piloto implementada debería permitir mejorar estos aspectos. Una mayor integración del biodigestor en la granja, sistematizando el uso del biol como fertilizante (Paz & Cristóbal, 2008).

III. Análisis y discusión

El biogás se produce a partir de la fermentación anaerobia de 1-1.5% (H_2), 0.3-3% N_2 y varias impurezas, especialmente H_2S . Utilizado como combustible presenta una baja densidad de energía en base volumétrica, comparada con otros combustibles gaseosos debido al alto contenido de CO_2 . Su velocidad de deflagración es menor comparada con otros gases como gas licuado del petróleo y gas natural; así mismo, presenta una mayor temperatura de autoignición y un intervalo de inflamabilidad menor (Kondo, 2003). Estas diferencias se presentan debido a que la presencia de CO_2 en el biogás ocasiona efectos térmicos y cinéticos que afectan las propiedades de combustión del biogás con respecto a las del metano, ocasionando que se disminuyan las posibilidades de aplicación como combustible en diferentes tecnologías (Kondo, 2003).

No obstante, dado el potencial energético que tiene el biogás, este puede ser utilizado en aplicaciones tales como cocción, calentamiento y generación de energía eléctrica mediante motores de combustión interna y turbinas de gas, lo cual implica buscar alternativas para mejorar las propiedades de combustión del biogás (Barrena et ál., 2010); (Cacua et ál., 2011).

El enriquecimiento de aire con oxígeno es una prometedora técnica para mejorar las características de combustión de combustibles con baja densidad energética y baja velocidad de deflagración laminar. Durante la combustión el nitrógeno diluye el oxígeno reactivo y absorbe parte de la energía en los gases de escape debido a su alta capacidad calorífica, lo cual disminuye la eficiencia de combustión. Cuando el oxígeno es incrementado en el aire, el nitrógeno se reduce y la eficiencia de combustión se incrementa por lo que el consumo de combustible disminuye (Qiu & Hayden, 2009).

Varios investigadores han utilizado aire enriquecido con oxígeno para estudiar el proceso de combustión de varios combustibles, encontrando resultados benéficos tales como incrementos en la eficiencia de transferencia de energía, la temperatura de llama, el intervalo de inflamabilidad y la velocidad de deflagración, así como también la disminución de la energía de ignición.

Como en el biogás hay trazas de sulfuro de hidrógeno (H_2S) que le confieren un olor desagradable, a desagüe, es necesario eliminar este componente de su corriente antes de emplearlo como combustible; para ello se hace pasar el flujo de biogás a través de un filtro relleno con virutas de hierro tratadas, provenientes de los talleres de maquinado (Díaz et ál., 2008). El tratamiento previo parte de un lavado de las virutas, con detergente, para eliminar la grasas y otras suciedades, y se dejan secar. Posteriormente las virutas se sumergen en una solución de HCl al 5.0% durante 5-10 minutos, se extraen y se secan al aire; por último, son sumergidas en una solución de NaOH al 5.0%, por 5 a 10 minutos, y de nuevo se dejan secar al aire. Como resultado, las virutas se convierten en Fe_2O_3 , compuesto que reacciona rápidamente con el H_2S , cuyo límite de absorción en Fe_2O_3 es 56% (Kiss et ál., 2007); (Cepero et ál., 2012). En este sentido, se han desarrollado diversas variantes de estos filtros por absorción. Una de las razones por las que es necesaria la eliminación del H_2S es el carácter corrosivo de los equipos de metal, especialmente en las condiciones de alta temperatura y presión (por ejemplo, con acero el nivel erosivo de H_2S es 2.5 mm/año). El desgaste de H_2S tiene su origen en esta reacción: $Fe + H_2S \rightarrow FeS + 2H$ La otra razón es que, cuando se quema, el H_2S produce SO_2 , el cual también es un gas ácido fuerte con carácter corrosivo y tóxico para el sistema respiratorio; si tiene contacto con el agua forma el ácido H_2SO_3 , responsable de producir la lluvia ácida, de gran impacto ambiental y generadora de cambios climáticos (Kondo, 2003); (Díaz et ál., 2008).

A partir de efluentes de biodigestores y otros residuos, enriquecidos con microorganismos nativos, los cuales se utilizan en la sanidad animal y vegetal, la nutrición de cultivos, la eliminación de malos olores en instalaciones pecuarias y la biorremediación de lagunas contaminadas con residuales orgánicos, así como en filtros de biocerámicas. En la producción de bioproductos, el biogás es producido a partir de la fermentación anaerobia de la materia orgánica en rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos y en biodigestores anaerobios de desechos orgánicos animales y vegetales (Suarez et ál., 2011); (Miranda et ál., 2012).

El beneficio ambiental de la producción y uso de este combustible se nota profundamente en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la descomposición de la materia orgánica en desechos agropecuarios y en los rellenos sanitarios. Los principales componentes de este biogás son el metano y el dióxido de carbono junto a menores porcentajes de oxígeno, nitrógeno y trazas de otros compuestos volátiles orgánicos VOC por sus siglas en inglés. El biogás posee un bajo poder calorífico pero aun así, su energía es suficiente para mantener en operación un dispositivo de generación de potencia como turbinas, microturbinas, motores alternativos o sistemas de calentamiento y cocción de alimentos (Escalante et ál., 2007); (Díaz et ál., 2008); (Baltierra et ál., 2012).

En zonas rurales con disponibilidad de desechos orgánicos, la producción y uso del biogás en quemadores de premezcla para la cocción de alimentos tiene efectos significativos sobre la reducción de la tala de bosques y la disminución de las enfermedades respiratorias, originada por la emisión de partículas de la combustión de la leña en sistemas de combustión artesanales e ineficientes (Díaz et ál., 2008).

Problemas del sulfuro de hidrógeno asociados al biogás, el ácido sulfhídrico (H_2S) puede encontrarse en aguas estancadas, desagües y alcantarillados y es parte de la composición química de combustibles como el petróleo, gas natural e incluso del biogás, debido a que se produce por descomposición anaeróbica de restos orgánicos. La eliminación de este compuesto del biogás es relevante, pues este gas inflamable e incoloro, es altamente tóxico y corrosivo, lo que constituye una gran desventaja, pues dificulta el traslado del gas por tuberías, su almacenamiento en tanques y otras estructuras metálicas, como aquellas que participan en la generación y distribución de electricidad (Varnero, 2012).

El alto costo financiero y ambiental asociado al empleo de combustibles fósiles, junto con las limitaciones propias de la red de interconexión eléctrica colombiana, han incentivado paulatinamente la utilización de energías alternativas en diferentes sectores productivos del país, especialmente en el sector rural en donde se reúnen tanto la necesidad insatisfecha de suministro energético como el potencial para la generación de energía a partir de fuentes renovables. También se puede aportar con el aprovechamiento de este tipo de energía para solucionar parcialmente los problemas del hambre y la pobreza y a mejorar la salud (Mantilla et ál., 2007).

En Colombia el aumento en el uso de fuentes renovables de energía ha sido de 1.5% para los últimos seis años. Este potencial de generación de energía se encuentra representado en un alto porcentaje por la biomasa, y específicamente por los desechos forestales y agropecuarios. La producción de biogás a partir de esta materia prima es una práctica que tiene en el país cerca de treinta años. Inicia con la instalación masiva de digestores para procesar residuos orgánicos animales y vegetales con el fin de producir la energía necesaria para atender las necesidades básicas del sector rural como cocción de alimentos e iluminación.

IV. Conclusiones

La utilización de nuevas fuentes de energía renovables ha tenido especial interés en los últimos años buscando disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y el impacto ambiental que ellos generan. Los resultados de este trabajo constituyen una primera etapa de recolección de datos que sirve al diseño de una estrategia integral de aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos de origen vegetal por medios biotecnológicos y, por tanto, ecológicamente limpios. Se demuestra la posibilidad de implementar un esquema de biodegradación del cual, además del tratamiento y estabilización de una amplia gama de desechos, se pueden obtener valiosos insumos para otros sectores industriales como los azúcares y el etanol. Adicionalmente, el compost obtenido puede desempeñar un papel importante en el sector agrícola en calidad de un abono de bajo costo, y el biogás producido puede contribuir a disminuir los costos energéticos del proceso integral de biodegradación. Estos aspectos deben ser abordados en posteriores estudios. En el estudio se han probado varias metodologías para mediciones de campo y determinaciones en laboratorio de un amplio rango de parámetros, que serán útiles tanto para los encargados del manejo integral de los residuos y los propios operadores de los sitios de disposición final, como para los investigadores y responsables de políticas públicas en la materia, considerando

aspectos regionales y globales cada vez más importantes, como el cambio climático y calentamiento global del planeta.

Referencias

- Amell, A. A., Copete, L. H., «Análisis de los parámetros para el diseño y la optimización de un tubo radiante». *Revista Facultad de Ingeniería*, Universidad de Antioquia, n.º 38, 2006.
- Baltierra, E., Márquez, L., Sánchez, J. «Modelo experimental de difusión de biogás en raíces vegetales». *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, n.º 1, 2012, pp. 133-139.
- Barrena, M., Gamarra, O., Maicelo, J. «Producción de biogás en laboratorio a partir de residuos domésticos y ganaderos y su escalamiento». *Revista Aporte Santiaguino*, n.º 1, 2010, pp. 86-92.
- Cacua, K., Amell, A., Olmos, L. «Estudio comparativo entre las propiedades de combustión de la mezcla biogás-aire normal y biogás-aire enriquecido con oxígeno». *Revista Ingeniería e Investigación*, n.º 1, 2011, pp. 233-241.
- Cardona, C., Sánchez, O., Ramírez, J., Alzate, L. «Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado». *Revista Colombiana de Biotecnología*, n.º 2, 2004, pp. 78-89.
- Cepero, L., Blanco, D., Díaz, R., Suárez, J., Palacios, A. «Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores». *Revista Pastos y Forrajes*, n.º 2, 2012, pp. 219-226.
- Cuervo, A., Cardozo, R., & Piñeros N. 2007. Dimensionamiento de un biodigestor para el manejo de los residuos sólidos orgánicos generados en la central de mercado Plaza Kennedy en Bogotá. Trabajo de grado Ingeniería Ambiental. Bogotá: Universidad Manuela Beltrán. Facultad de Ingeniería.
- Díaz, C., Amell, A., Cardona, L. «Estudio experimental de la estabilidad de llama de biogás en un sistema de premezcla». *Revista Energética*, n.º 39, 2008, pp. 35-42.
- Dussan, J. «Aproximaciones biológicas y fisicoquímicas en el tratamiento de contaminantes: un resumen del aporte de la Universidad de los Andes». *Revista de Ingeniería*, n.º 30, 2009, pp. 100-111.
- Fernández, J., Escalante, J. & Saavedra, C. «Obtención de biogás a partir del bagazo de caña y estiércol. Liceo Bolivariano Libertador. Mérida». *Revista Científica Juvenil*. Vol. VI, 2007, pp. 105-118
- Ferrer, I., Gamiz, M., Almeida, M., Ruiz, A. «Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru)». *Waste Management* 29 (1), 2009, pp.168-173.
- Kiss, G., Flores, S., Encarnación, G., Solórzano, G «Caracterización del biogás generado en trece sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México». *Revista Gaceta Ecológica*, n.º. 82, 2007, pp. 25-35.
- Kondo, S., Takahashi, A., Tokuhashi, K. «Calculation of minimum ignition energy of premixed gases». *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 103 n.º 1-2, 2003, pp. 11-23.
- Lara, C., Garcia, L. & Oviedo, L. 2010. «Using a solid waste culture medium for growing a native strain having biofertiliser potential». *Rev. Colomb. Biotecnol.* Vol.12, n.º 1, 2010, pp.103-112.
- Liriano, R. Aplicación de biofertilizantes como alternativa nutricional, ambiental y económica en la agricultura urbana. Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias Agrícolas. Doctorado de cooperación en «Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible». Universidad de Girona. España. 2005, 157 p.
- Mantilla, J., Duque, C., Galeano, C. «Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno». *Revista Ingeniería e Investigación*, n.º 3, 2007, pp. 133-142.
- Miranda, T. La innovación y la transferencia de tecnologías en la Estación Experimental «Indio Hatuey»: 50 años propiciando el desarrollo del sector rural cubano (Parte II). *Pastos y Forrajes*, Vol.35, n.º 1, 2012.
- Paz, A. y Cristóbal, S. Estudio de biogás en biodigestores tubulares unifamiliares de bajo costo en el departamento de Cajamarca, Proceedings III Taller de Biodigestores, ITDG-Soluciones Prácticas, Cajamarca, Perú, 2008.
- Qiu, K., Hayden, A. C. S. «Increasing the efficiency of radiant burners by using polymer membranes». *Applied Energy*, Vol. 86, n.º 3, 2009, pp. 349-354.
- Suárez, G. «Experiencias del proyecto BIOMAS-CUBA. Alternativas energéticas a partir de la biomasa en el medio rural cubano». *Pastos y Forrajes*, Vol.34, n.º 4, 2011.
- Tejeda, L., Tejeda, C., Villabona, A., Tarón, A. «Producción de bioetanol a partir de la fermentación acohólica de jarabes glucosados derivados de cáscaras de naranja y piña». *Revista Educación en Ingeniería*. Vol 5, n.º 10, 2010. pp. 120-125.
- Varnero, M., Caru, M., Galleguillos, K., Achondo, P. «Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica». *Revista Información Tecnológica*, n.º 2, 2012, pp. 31-40.
- Vázquez, D. O., Fernández, S., M., Manzote, R. D., Abrahantes, H. R. «Plantas de biogás de pequeñas dimensiones para fincas lecheras Agrotecnia de Cuba (Cuba)». Vol. 27 (2-3) 1997. pp. 185-190. Biogás; explotaciones agrarias; producción lechera; Cuba.