

## Estudio de la co-digestión anaeróbica de desechos orgánicos agroindustriales

Daniela Almeida<sup>1\*</sup>, Diego A. Regalado<sup>2</sup>, María J. Ampudia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Ciencias e Ingeniería - El Politécnico, Universidad San Francisco de Quito  
Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador

<sup>2</sup>Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad San Francisco de Quito  
Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador

\*Autor principal/Corresponding author; e-mail: dalmeida@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: A. Hidrobo, Dr.

Recibido/Received: 01/29/2010. Aceptado/Accepted: 02/25/2010.

Publicado en línea/Published on Web: 05/21/2010. Impreso/Printed: 06/01/2010.

### Abstract

The results of the study of anaerobic co-digestion of agro-industrial organic waste and animal manure are presented in this work. The experiments are divided in two stages. In the first stage the optimal ratio between vegetable waste and animal manure is studied in batch reactors. Once the results of the optimal mixture are obtained, the research of the anaerobic co-digestion continues in semi-continuous operating reactor. In this reactor, the main operating parameters can be controlled. The daily biogas production and the consumption of the buffering solution are monitored in function of the hydraulic residence time (TRH) and the daily organic load in the feed. It can be observed that the reactor operation is stable at TRH greater than 10 days and organic loads up to 4,0 kg<sub>DQO</sub>/m<sup>3</sup>d. A yield of 100 kg<sub>DQO</sub>/m<sup>3</sup>reactor is achieved, while the specific biogas production obtained is of 0,31 m<sup>3</sup>biogas/kg<sub>DQO,feed</sub>. When the TRH is reduced below 10 days and the organic load is increased simultaneously, the digester enters an unstable operation regime and it tends to acidify. This indicates that the methanogenesis is the limiting step in the process.

**Keywords.** biogas, anaerobic digestion, co-digestion, agro-industrial waste.

### Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de la co-digestión anaeróbica de desechos orgánicos agroindustriales y animales. Para esto se han realizado experimentos en dos etapas. En la primera etapa se estudia la mezcla óptima entre desecho vegetal y animal en reactores discontinuos. Obtenidos los resultados de la mezcla óptima, se prosigue con la investigación de la co-digestión en un reactor de régimen semi-continuo. En este reactor se controlan los principales parámetros operativos y se monitorean la producción de biogás y el consumo de solución amortiguadora de pH, en función del tiempo de residencia hidráulico (TRH) y de la carga orgánica diaria en la alimentación. Se puede observar que el biodigestor opera en condiciones estables a TRH mayores a 10 días y cargas orgánicas de hasta 4,0 kg<sub>DQO</sub>/m<sup>3</sup>d. El rendimiento alcanzado es de 100 kg<sub>DQO</sub>/m<sup>3</sup>reactor. La producción específica de biogás es de 0,31 m<sup>3</sup>biogás/kg<sub>DQO,alimentado</sub>. Al reducir el TRH por debajo de los 10 días y simultáneamente aumentar la carga orgánica diaria, la operación del biodigestor es inestable y tiende a acidificarse, lo cual indica que bajo estas condiciones, la metanogénesis es el paso limitante en el proceso de digestión.

**Palabras Clave.** biogás, biodigestión anaeróbica, co-digestión, desechos agroindustriales.

### Introducción

El manejo adecuado de los desechos orgánicos agroindustriales es uno de los retos tecnológicos en la actualidad. Debido a su naturaleza, la descomposición de los desechos orgánicos conlleva la formación de lixiviados, líquidos que en caso de entrar en contacto pueden contaminar aguas subterráneas, y gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono y metano [1, 2]. Por esta

razón es de suma importancia que la disposición final de desechos orgánicos considere los procesos de degradación de los mismos.

Por otro lado, con la co-digestión de los desechos orgánicos vegetales, éstos pueden ser transformados en una fuente de energía renovable: el biogás. La biomasa obtiene su valor energético de la energía solar [3, 4]. Mediante la fotosíntesis las plantas convierten CO<sub>2</sub> y agua

ISSN 1390-5384



en cadenas de carbono. Estas cadenas de carbono liberan la energía acumulada al momento de romperse los enlaces para volver a convertirse en moléculas más simples como  $\text{CO}_2$ , vapor de agua, metano u otras. Estas reacciones pueden llevarse a cabo por procesos físico-químicos como en una combustión rica en oxígeno o en una pirólisis, una reacción en ausencia de oxígeno. Estos procesos son comunes cuando la biomasa de la que se dispone es seca. Si la biomasa original contiene un alto porcentaje de humedad, los procesos biológicos son energéticamente más eficientes, ya que no se necesita eliminar el agua de los desechos antes de poder ser aprovechados energéticamente [3]. Al igual que en los procesos físico-químicos mencionados anteriormente, los procesos biológicos también se pueden diferenciar de acuerdo a la presencia o ausencia de oxígeno. Cuando la biomasa tiene contacto con oxígeno se habla de procesos aeróbicos y los productos principales son  $\text{CO}_2$  y materia orgánica no degradable, conocida como humus o compost. Si la degradación se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, el proceso se conoce como anaeróbico. Los principales productos en este caso son biogás, un gas combustible formado por una mezcla de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , y biol, un lodo constituido por materia orgánica no degradable anaeróbicamente y rico en nutrientes [5, 6].

Los desechos orgánicos vegetales son considerados materias primas secundarias, ya que no son cultivados o producidos específicamente para ser utilizados energéticamente, sino que son los residuos de otro proceso productivo. Debido al origen de la materia prima para este proceso, la utilización energética de esta biomasa no afecta a la seguridad alimentaria y no compite con los cultivos existentes. Por lo tanto, esta es una fuente de energía renovable de segunda generación [7, 8].

En este proyecto se investiga un posible tratamiento para los desechos orgánicos agroindustriales con un alto contenido de humedad. Por esta razón se decidió utilizar un proceso biológico anaeróbico para su degradación. Como productos se obtienen biogás y biol. El biogás tiene un alto contenido energético y es utilizado para producir energía térmica o eléctrica, y mejorar el balance energético del proceso en general. El biol es un fertilizante orgánico rico en nutrientes y microelementos, que puede ser recirculado al inicio de la cadena de producción de la materia prima orgánica.

Los resultados de la investigación de la co-digestión anaeróbica de desechos orgánicos agroindustriales con estiércol animal están divididos en dos etapas. En el primer paso se investiga la mezcla óptima entre el material orgánico vegetal y animal para la biodigestión. Estos experimentos se realizan en reactores por lotes. En el segundo paso se opera un biodigestor de régimen semi-continuo durante 120 días para maximizar la producción específica de biogás con respecto a la carga orgánica alimentada diariamente al reactor y el tiempo de residencia hidráulico.

## Metodología

### *Equipos para la biodigestión anaeróbica*

Los experimentos para determinar la mezcla óptima entre el material orgánico animal y vegetal se efectúan en régimen discontinuo. Los digestores utilizados durante estos ensayos son kitasatos dispuestos sobre una plancha de calentamiento (thermolyne nuova S18425), lo que permite mantener constante la temperatura de operación elegida de  $35 \pm 2$  °C. Las mantas cuentan además con un sistema de agitación magnética que induce la homogeneización de la mezcla a digerir.

Los reactores se encuentran cerrados en la parte superior con un tapón de goma con un orificio central, en el que se introduce un termómetro para el monitoreo de la temperatura. Una manguera plástica conecta la tubuladura lateral del digestor con la de un kitasato de igual capacidad, el cual funciona como dispositivo de almacenamiento del biogás. Este kitasato está conectado a su vez a una probeta graduada. Todo el sistema está herméticamente cerrado y contiene una solución ácida ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,05 M), que evita la absorción de  $\text{CO}_2$ . El gas generado durante el proceso se mide por desplazamiento de la solución del kitasato a la probeta.

Para los experimentos realizados en régimen semi-continuo se dispone de un reactor de 3 litros con control automático, modelo Cole Parmer Fermentation Systems KH-29207-00. Este modelo cuenta con sistemas de agitación continua; alimentación y muestreo semi-continuo, controladores de temperatura, pH y nivel, además de un sistema de medición volumétrica del biogás generado por desplazamiento de agua.

El sistema de agitación consta de agitador, motor eléctrico y controlador de revoluciones. El sistema de alimentación y muestreo consiste de un tubo de alimentación hacia la mezcla reactiva, una válvula de regulación de flujo y un pistón neumático. La mezcla a alimentarse se coloca en el pistón, y éste a su vez se adapta a la válvula de regulación. Una vez abierta la válvula, el pistón empuja la mezcla a través de la manguera y el tubo de alimentación. Este último deposita la alimentación dentro de la mezcla. Para la extracción de la muestra, se coloca el pistón vacío en la válvula de control y se succiona la muestra que pasa hacia la manguera, y finalmente se colecta en el pistón.

Los sistemas de control de temperatura, pH y nivel consisten en los respectivos sensores, elementos de control final y controlador automático. La temperatura se mide mediante un RTD y se controla con un sistema de control automático marca ThermoWorks. El calentamiento se realiza con una hornilla eléctrica en un baño de agua. El control de pH se realiza con un sensor de pH. El sistema de control marca Oaklon 800 series mantiene el pH entre los límites de 6,0 y 8,0. El elemento de control final está compuesto por bombas peristálticas conectadas a soluciones de hidróxido de sodio 1 M y ácido cítrico 1

M. Al registrar un parámetro inferior o superior, el controlador activa la bomba respectiva. Este tipo de bomba permite alimentar pequeñas cantidades de solución, la cual se mezcla en el reactor y provoca el incremento o disminución deseada en el pH. El nivel se controla por medio de un sensor de conductividad. Si el nivel del líquido o de las espumas alcanza el nivel máximo, se prende una alarma en el controlador marca Cole Parmer modelo 01973.

El gas generado se mide por desplazamiento de la solución ácida análogo a los reactores por lotes descritos anteriormente. El gas generado se extrae del reactor por un sistema de mangueras conectadas similar al de alimentación y muestreo.

### **Parámetros controlados durante la operación de los biodigestores**

Durante los experimentos se debe mantener un registro diario de la agitación, la temperatura en el reactor, el pH promedio, el consumo de soluciones reguladoras de pH, la carga orgánica alimentada, el tiempo de residencia y la producción de biogás. El control de estas variables permite mantener un ambiente apropiado para el desarrollo de bacterias metanogénicas, y su consecuente capacidad de generación de biogás [9, 10].

La agitación es proporcional a la capacidad de asimilación del reactor [11]. La agitación promueve el mezclado en el reactor, lo que facilita el acceso a los nutrientes por parte de los microorganismos. Además, es un factor primordial en el control del pH, pues evita la formación de microambientes dentro del reactor [9].

La temperatura y la tasa de generación de biogás son directamente proporcionales [10]. Esto quiere decir, que a mayor temperatura, mayor capacidad de generación. Como regla general, la tasa de generación de metano se duplica por cada 10 °C de incremento en la temperatura de operación [9]. Por motivos de requerimiento energético, este experimento se opera en rango mesofílico entre 30 y 40 °C, en lugar de un rango termofílico que ocurre entre 50 y 60 °C.

Debido a las bajas tasas de crecimiento de las bacterias metanogénicas, se requiere que el proceso anaeróbico opere en las condiciones más favorables para ellas. Para conseguir estas condiciones de operación se utiliza el sistema de control automático de pH para mantener el rango óptimo que se encuentra entre 6 y 8 [11].

La baja tasa de crecimiento de las bacterias anaeróbicas para una determinada cantidad de sustrato resulta en requerimientos nutricionales más bajos comparados con las bacterias aeróbicas [12]. Debido a esto, la cantidad de materia orgánica que se alimenta al reactor se convierte en un parámetro de control fundamental. Este parámetro, conocido como carga orgánica diaria, está expresado como la cantidad de demanda química de oxígeno (DQO) en la alimentación con respecto al volumen de reacción y día  $\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3\text{d}$ . Sin embargo, los

límites en la capacidad de asimilación de carga varían dependiendo del control que se mantenga de las otras variables de control.

El tiempo de residencia hidráulico (TRH) de la mezcla reactiva está estrechamente relacionado a la carga orgánica diaria. Durante la operación del biodigestor se reduce gradualmente el tiempo de residencia de la mezcla reactiva en el reactor.

Finalmente, la producción de biogás también se controla diariamente como el desplazamiento de agua generado por la acumulación de biogás en el sistema hermético.

Durante la operación del biodigestor se desea mantener constante a los parámetros operativos como son agitación, temperatura y pH. Mientras tanto las variables que se desean optimizar varían a lo largo de los experimentos, como son maximizar la carga orgánica diaria y minimizar el tiempo de residencia hidráulico. La respuesta del sistema frente a estos cambios se expresa en forma de producción de biogás y consumo de NaOH, variables que deben ser registradas diariamente para evaluar el rendimiento y la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica.

### **Métodos de caracterización**

Los métodos de caracterización que se realizan para analizar la mezcla reactiva y de la alimentación son la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (TS), y sólidos orgánicos totales (oTS).

La DQO se determina por dos métodos diferentes: el método analítico 5220 de acuerdo al libro de *Standard Methods* [13], y el método colorimétrico con viales *Test 'n Tube*, de acuerdo al procedimiento de Hach [14]. Con estos análisis, se calculan los valores de carga orgánica a ser alimentados diariamente y se determina la capacidad de degradación de la materia orgánica en el reactor.

Los análisis de TS y oTS se realizan diariamente a las muestras extraídas del reactor según los métodos descritos en [13]. Esto permite mantener un registro de la acumulación de sólidos y la capacidad de los microorganismos para transformar la materia orgánica en biogás.

## **Resultados y Discusión**

### **Resultados de la biodigestión anaeróbica en el proceso discontinuo**

Para la determinación de la mezcla óptima entre materia orgánica vegetal y animal se utilizan los reactores en lotes. La mezcla a digerir contiene agua y el material orgánico animal y vegetal. Como inóculo se utilizan lodos provenientes de otros reactores anaeróbicos en funcionamiento. La variación de la proporción entre la materia orgánica vegetal y animal permite establecer la mezcla más adecuada para la biodigestión anaeróbica, tomando en cuenta la cantidad de biogás generada en

un tiempo de residencia de 21 días de acuerdo al método GB<sub>21</sub> (DIN 38414 Teil 8) [15]. La cantidad de agua y de inóculo utilizados se mantienen constantes en todos los ensayos.

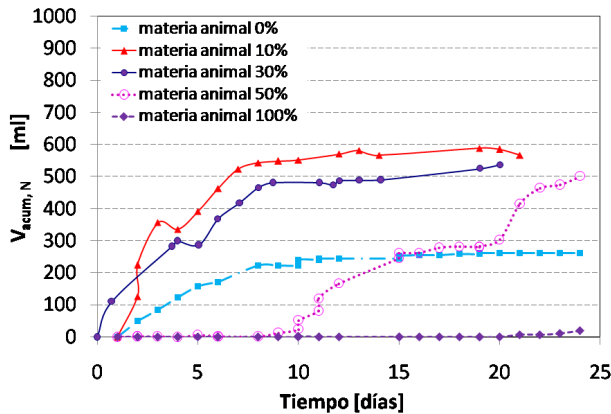


Figura 1: Volumen normalizado de biogás producido a distintas concentraciones de desecho animal y vegetal.

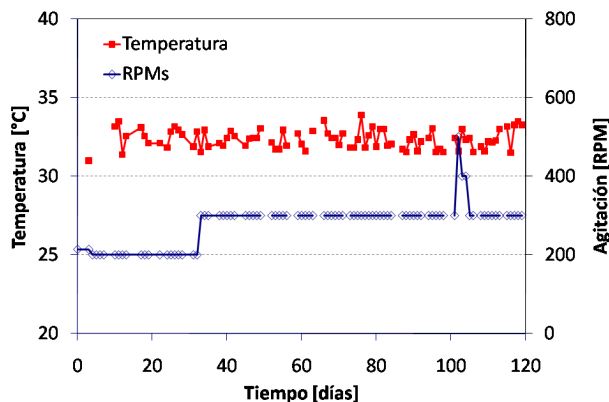


Figura 2: Transcurso de la temperatura y la agitación durante los 120 días de operación del reactor semi-continuo.

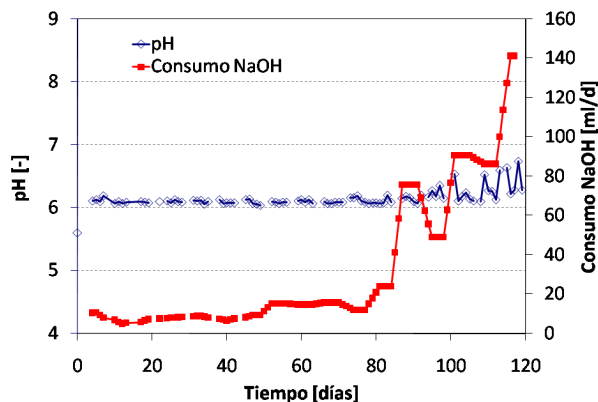


Figura 3: Valores de pH y consumo de NaOH durante los 120 días de operación del reactor semi-continuo.

El biogás producido depende del tipo de sustrato a digerir, así como de las condiciones de operación del proceso. Distintas cargas orgánicas y composiciones generan distintos volúmenes de biogás. Por ello se probaron diferentes relaciones del desecho animal y vegetal. Como se observa en la Figura 1, al utilizar solo el material animal, la producción de gas es casi nula, puesto que no existe materia orgánica fácilmente digerible, ya que por sí es un producto final del metabolismo biológico. Al usar el material vegetal en un 100 %, hay una producción considerable de gas pues el desecho vegetal proporciona una fuente importante de carga orgánica. Sin embargo, se puede observar un aumento significativo en la producción de biogás en los experimentos en los cuales se combinaron ambos sustratos. De estos ensayos se determina que la relación óptima entre el material animal y vegetal es de 1 a 9. Esto se debe a que el desecho vegetal aporta la carga orgánica necesaria para la digestión, mientras que el material animal proporciona alcalinidad al sistema, indispensable para controlar el pH del proceso, uno de los parámetros de operación más importantes. Puesto que durante estos experimentos no hay ningún control del pH, el aporte de ambos desechos define la capacidad *buffer* del sistema.

### Resultados de la biodigestión anaerobia en el proceso semi-continuo

Los resultados de la operación del biodigestor semi-continuo se dividen en tres conjuntos: parámetros de control operativos, variables de optimización y variables de respuesta del sistema. Los tres grupos de variables están estrechamente interrelacionados, como se presenta a continuación.

Como se observa en la Figura 2, durante el tiempo de operación del biodigestor, la temperatura se mantiene en un valor promedio de  $33 \pm 2$  °C. La agitación durante los primeros 30 días de operación es de 200 rpm. Posteriormente, se la incrementa a 300 rpm para combatir la formación de espumas.

En la Figura 3 se observa que el pH se mantiene en un promedio de 6,1 durante los primeros 100 días de operación. A partir de entonces, las medidas empiezan a desviarse de la media y alcanzan un máximo de 6,7 en el día 118. Este súbito incremento en la desviación del pH se debe al incremento en la cantidad de solución amortiguadora añadida al reactor. Se puede observar que durante los primeros 90 días de operación se mantienen valores inferiores a los 20 ml/día. Esta cantidad aumenta considerablemente durante los últimos 30 días de operación hasta alcanzar un valor máximo de 140 ml NaOH/día.

A su vez, el incremento en el consumo de solución amortiguadora se debe a la reducción del tiempo de residencia hidráulico (TRH) y al incremento de la carga orgánica alimentada, como se observa en la Figura 4. El TRH se mantiene por encima de los 10 días durante los primeros 80 días de operación. A partir de esta fecha, se

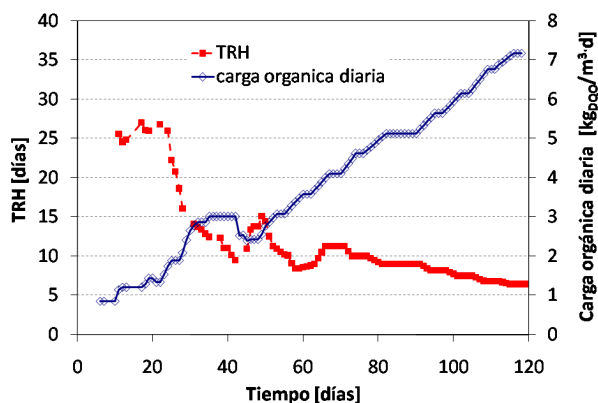


Figura 4: Tiempo de residencia hidráulico y carga orgánica diaria alimentada al reactor.

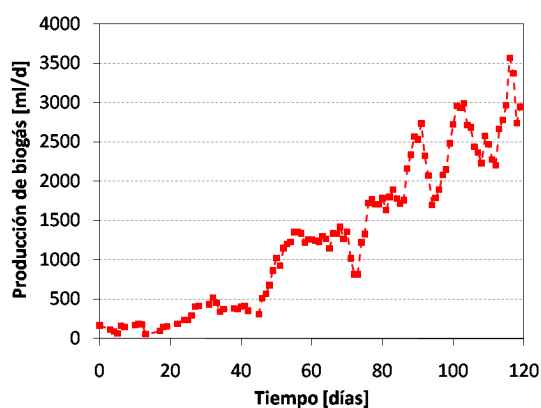


Figura 5: Producción diaria promedio de biogás.

reduce semanalmente hasta alcanzar un tiempo de 6,4 días en la última semana. Paralelamente a la reducción del TRH, se incrementa la carga orgánica alimentada. En la primera semana no se alimentó el reactor hasta que se establezcan condiciones anaeróbicas en el reactor. Luego se incrementa semanalmente la carga en  $0,68 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3\text{d}$  hasta alcanzar un valor de  $3,0 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3\text{d}$  alrededor del día 40. Después de una pequeña reducción en la carga por problemas operacionales, se continúa incrementando la carga orgánica alimentada en intervalos de  $0,48 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3\text{d}$  hasta alcanzar un máximo de  $7,0 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3\text{d}$ .

Como se observa en la Figura 5, durante los primeros 80 días de operación la generación de biogás mantiene promedios semanales inferiores a los 1500 ml/día. Esta capacidad incrementa de manera significativa durante los días posteriores, alcanzando promedios cercanos a los 3500 ml/día.

Al realizar el balance de masa durante la operación del digestor de operación semi-continua se obtiene la producción específica de biogás y la remoción específica de DQO en función de la carga orgánica diaria. En la Figura 6 se puede observar la remoción de DQO en función de la carga orgánica diaria, la cual alcanza un máximo de  $100 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$  para una carga orgánica de  $4 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3\text{d}$ .

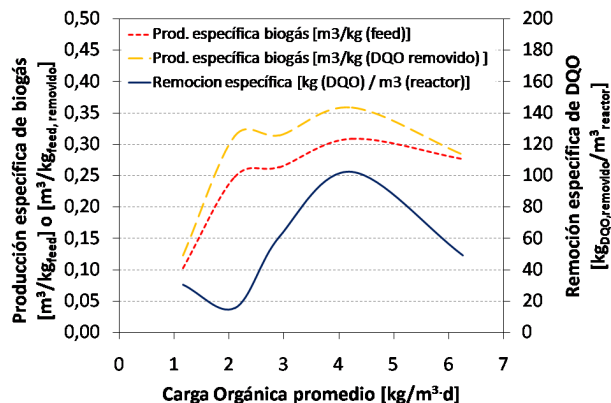


Figura 6: Producción específica de biogás y remoción de DQO en función de la carga orgánica diaria.

También podemos observar que en este mismo rango de carga orgánica se alcanza la máxima producción específica de biogás de  $0,31 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{DQO,alimentado}}$  ó  $0,38 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{DQO,removido}}$ . Con un contenido de metano en el biogás entre el 60 % y el 65 % se obtiene una producción de metano de  $0,23 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{DQO,removido}}$ . Este valor representa el 66 % del valor teórico de  $0,35 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{DQO,removido}}$ .

## Conclusiones

En este trabajo se ha investigado la co-digestión anaeróbica de desechos orgánicos vegetales y animales. Para esto se trabaja en dos etapas. En la primera etapa se estudia la relación óptima entre desecho animal y vegetal con respecto al máximo potencial de producción de biogás en reactores por lotes. Estos resultados se aplican en la segunda etapa para investigar el comportamiento del proceso de biodigestión frente a un incremento continuo en la carga orgánica alimentada y una reducción simultánea del tiempo de residencia hidráulico. Se puede observar que para cargas orgánicas de  $4 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3\text{d}$  y tiempos de residencia mayores a 10 días, el proceso es estable, con una producción específica de biogás de  $0,38 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{DQO,removido}}$ . Al seguir aumentando la carga orgánica diaria y reducir el tiempo de residencia hidráulico, el biodigestor muestra un comportamiento inestable, el cual se refleja en un alto consumo de NaOH para mantener el pH en el rango deseado y una reducción en la producción específica de biogás, así como de la remoción específica de DQO. Esto indica que cargas orgánicas mayores a  $4 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3\text{d}$  ocasionan en este caso un desbalance entre la producción de ácidos volátiles en la etapa acetogénica, y la producción de metano en la etapa metanogénica. Adicionalmente, se observa que la producción específica de biogás se encontró por debajo del valor teórico con  $0,23 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{DQO,removido}}$ .

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad San Francisco de Quito por los fondos entregados al proyecto a través

de *Small Grants 2008* y a la Empresa EcoFroz por el interés en el estudio de factibilidad de la biodigestión anaeróbica de desechos orgánicos.

### Referencias

- [1] Sanderson, J., Hettiaratchi, P., Hunte, C., Hurtado, O., and Kerler, A. 2008. "Methane balance of a bioreactor landfill in latin america." *Journal of the Air & Waste Management Association*. 58, 620-628.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change; 2001. "Technical summary in climate change 2001: The scientific basis."
- [3] Edelman, W. 2007. "Die rolle von biogas in der zukünftigen energieverorgung." *DGE; Proceedings: Biomethan in Erdgasqualität, Dessau*.
- [4] Yokoyama, S., Jonouchi, K., and Imou, K. 2008. "Energy production from marine biomass: Fuel cell power generation driven by methane produced from seaweed." *International Journal of Applied Science, Engineering and Technology*. 4.3, Academic OneFile: 168-175.
- [5] Uemura, S., Ohashi, A., Harada, H., Tomozawa, T. H. T., Ohara, T., Ojima, R., and Ishida, T. 2008. "Production of biologically safe digested manure for land application by a full scale biogas plant with heat-inactivation." *Waste Management & Research*. 26, 256-260.
- [6] Möller, K. 2009. "Influence of different manuring systems with and without biogas digestion on soil organic matter and nitrogen inputs, flows and budgets in organic cropping systems." *Nutr. Cycl. Agroecosyst*. 84, 179-202.
- [7] Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussnug, J. H., Posten, C., Kruse, O., and Hankamer, B. 2008. "Second generation biofuels: High-efficiency microalgae." *Bioenerg. Res*. 1, 20-43.
- [8] Scharlemann, J. P. W. and Laurance, W. F. 2008. "How green are biofuels." *Science*. 319, 43-44.
- [9] Droste, R. L. 1997. "Anaerobic water treatment. Theory and practice of water and wastewater treatment", John Wiley & Sons.
- [10] Tchobanoglous, G., Burton, F., and Stensel, H. D. 2003. "Fundamentals of bio-logical treatment. Wastewater engineering. Treatment and reuse", Mc Graw Hill.
- [11] Zehnder, A. J., Ingvorsen, K., and Marti, T. 1982 "Microbiology of methanogen bacteria" In D. E. Hughes, D. A. Stafford, B. I. Wheatley, W. Baader, G. Lettinga, E. J. Nyns, and W. Verstraeten, (ed.), *Anaerobic Digestion*, 45-68.
- [12] Stefanie, J. W., Elferink, O., Visser, A., Hulshoff, L., and Stares, A. J. M. 1994. "Sulfate reduction in methanogenic reactors." *Federation of Europe and Microbiological Societies*.
- [13] American Public Health Association. 1998. "Standard methods for the examination of water and wastewater."
- [14] Hach 2007. "DR/890, datalogging colorimeter handbook." Procedures manual. Hach Company.
- [15] DEV S8., 1985. "Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser-, und Schlammuntersuchung." Schlamm und Sedimente (Gruppe S); DIN 38414 Teil 8: Bestimmung des Faulverhaltens (S8); Beuth Verlag GmbH; Berlin. Con modificaciones: AbfAblV, Anhang 4, Nr. 2.6.4-2.6.11.