

Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan

ESPINAL-ARELLANO, Juan*†, OLVERA-GARCÍA, Omar, HERNANDEZ-GÓMEZ, Víctor y MORILLÓN-GÁLVEZ, David.

Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, Ciudad de México, CDMX, México

Recibido Julio 18, 2016; Aceptado Septiembre 23, 2016

Resumen

El artículo describe la metodología y los resultados obtenidos a partir de pruebas experimentales de producción de biogás a partir de las excretas del ganado de un rancho ubicado en San Bartolo Cuautlalpan, municipio de Zumpango. Se incluye la puesta en marcha de los biodigestores, una descripción de la instrumentación empleada en la toma de los datos, los resultados obtenidos en las pruebas experimentales realizadas con desechos orgánicos de ganado bovino y porcino, en diferentes relaciones de materia orgánica – agua, durante el periodo comprendido entre marzo y agosto de 2016 y la estimación de la producción total de biogás y metano que se puede obtener con los desechos de los animales del rancho con su equivalente en kWh.

Abstract

The article describes the methodology and results obtained from experimental tests of biogas production from livestock excreta from a ranch located in San Bartolo Cuautlalpan, municipality of Zumpango. the implementation of biodigesters, a description of the instrumentation used in making data, the results obtained in the experimental tests with organic waste from cattle and pigs in different ratios of organic matter is included - water for the period between March and August 2016 and the estimated total production of biogas and methane that can be obtained with animal waste ranch with its equivalent in KWH.

Organic matter, digester, biogas and methane

Materia orgánica, biodigestor, biogás y metano

Citación: ESPINAL-ARELLANO, Juan, OLVERA-GARCÍA, Omar, HERNANDEZ-GÓMEZ, Víctor y MORILLÓN-GÁLVEZ, David. Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan. Revista de Sistemas Experimentales 2016, 3-8: 36-52

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: vichugo@unam.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Los ranchos dedicados a la ganadería y a la siembra, emplean los desechos orgánicos del ganado como abono para sus tierras, esto lo hacen depositando dicha materia orgánica directamente sobre la tierra, lo que ocasiona que el viento arrastre parte de esos desechos y emita mal olor en las zonas cercanas. Al ser un rancho ganadero, la producción de desechos orgánicos es más alta de la que se puede emplear como abono, por lo cual, la mayoría lo almacena a cielo abierto hasta su utilización generando también problemas de contaminación al medio ambiente. Esta problemática lleva a la necesidad de buscar alternativas para su correcto manejo y también para su aprovechamiento, los biodigestores son dispositivos que pueden solventar esta problemática, dado que además de recuperar el biogás obtenido por la descomposición de la materia orgánica, el residuo resultante sirve como un excelente fertilizante. El biogás que se produce está compuesto por una mezcla de gases tales como metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, hidrógeno y nitrógeno. Sin embargo, el metano representa entre un 50 – 60% del biogás, mientras el dióxido de carbono equivale a un 30 – 40%, de la mezcla. Según el análisis sectorial de desechos sólidos en la Zona Metropolitana del Valle de México, aproximadamente el 53% de los desechos generados pueden emplearse para la producción de biogás en México y la SEDESOL reporta 25,000 ton/día que se depositan en tiraderos a cielo abierto, barrancas o bien, en cualquier otro sitio sin control (incluye sitios clandestinos).

En la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan, Zumpango, Estado de México, se encuentra ubicado el rancho Los dos hermanos, esta propiedad se dedica principalmente a la siembra de maíz y obtiene ingresos adicionales a través de la compra, cría y venta de ganado bovino y porcino.

En el rancho Los dos hermanos también se crían ganado ovino y cunícola, así como aves para autoconsumo.

La demanda de energía eléctrica del rancho es abastecido a través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y es utilizada para realizar actividades como la preparación de alimentos y el alumbrado, ya que las labores de ganadería y agricultura se realizan de manera manual y con ayuda de un tractor, de modo que la demanda eléctrica del rancho es de aproximadamente 80 kWh bimestrales.

Este proyecto consiste en analizar la factibilidad de emplear los desechos orgánicos del rancho, para generar la energía eléctrica requerida para la preparación de alimentos e iluminación del mismo, y abonar sus cultivos con el abono generado por el biodigestor, lo cual provocaría un ahorro en la facturación energética y la reducción de la contaminación ambiental del lugar. Para ello se le solicitó al Laboratorio de Investigación en Energías Renovables (LIER) de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, que realizara el estudio correspondiente, ya que cuenta con 12 biodigestores del tipo discontinuo, con capacidad de 33 litros cada uno, para llevar a cabo pruebas simultáneas con diferentes sustratos.

Antecedentes

En la actualidad se han realizado estudios para observar el comportamiento de la generación de biogás bajo distintas características como:

Amarely Santana y B. Pound [1] observaron que la variación en la alimentación de dos novillos (hierba/melaza o caña de azúcar picada) puede influenciar en la generación de metano.

Encontraron que la dieta a base de melaza/hierba produce mayor cantidad de metano y sugieren que esto es debido a que se tiene una mayor relación carbono - nitrógeno que la dieta a base de caña de azúcar.

San Thy y et al [2] observaron la producción de biogás, mediante la descomposición de materia fecal de cerdo, con tiempos de retención de 10, 20 o 30 días en biodigestores continuos de 510 litros. En el primer experimento, la cantidad de materia fecal fue de 5.1 kg/día, mezclado con 46, 20 o 12 litros de agua con tiempos de retención de 10, 20 o 30 días respectivamente. En un segundo experimento las proporciones de materia fecal y agua se mantuvieron constantes para dar un contenido de sólidos totales de 60 g/litro. Obtuvieron una producción de 1.04, 1.20 y 1.12 m³ de biogás por un m³ de efluente y que el tiempo de retención óptimo está entre 10 y 20 días.

Chae y et al [3] observaron el comportamiento de la generación de biogás al variar la temperatura del estiércol de cerdo en el proceso de degradación. Tomaron valores de 25 °C, 30 °C y 35 °C con cuatro cargas de alimentación al 5 %, 10 %, 20 % y 40 %. Observaron una reducción en la concentración de metano del 3% entre el de la temperatura de 35 °C y la de 30 °C y una diferencia del 17.4 % entre la de 35 °C y el de 25 °C. Obtuvieron valores de 327, 389 y 403 ml de CH₄/g de sustrato respectivamente.

Stephanie y et al [4] al estudiar siete biodigestores de bajo costo en Costa Rica empleando como sustrato al agua residual de los animales, encontraron que se podía obtener biogás con una concentración del 66% de metano mejorando la calidad de las aguas residuales para ganado.

Atem y et al [5] llenó 20 biodigestores discontinuos de PET con capacidad de 4 litros con residuos de tomate de la industria local y fluido ruminal como inóculo. Después de mantener la temperatura constante durante 118 días inició la medición del biogás generado durante otros 34 días obteniendo 0.10 m³ de biogás por kg con un 50% de metano.

Ivet Ferrer y et al [6] estudiaron la producción de biogás en digestores domésticos ubicados a gran altura, operando bajo condiciones psicofílicas. Utilizaron un volumen útil de estiércol de vaca entre 2.4 m³ y 7.5 m³ en pruebas de 60 y 90 días. Obtuvieron temperaturas entre 20°C y 25°C y una producción de 0.35 m³ por kg, con una concentración del 65% de CH₄.

Sung-Mok y et al [7] encontraron que se incrementaba la generación de biogás, a partir de la fermentación de Laminaria japónica, al emplear un cultivo mixto de Clostridium butyricum y Erwinia tasmaniensis, llegando a tener niveles de hidrógeno y metano de 327,47% y 354,99% respectivamente.

M.S. Ak y et al [8] realizaron un estudio en el cual duplicaron la producción de biogás que se genera por la degradación del lodo activado producido durante el tratamiento biológico de residuos líquidos y sólidos, empleando al ozono (1.33 mg O₃/g).

González y et al [9] realizaron un estudio para determinar la capacidad de una planta de generación de energía eléctrica empleando metano generado por la degradación de residuos de cerdo y una planta fotovoltaica. Realizaron experimentos con tres biodigestores continuos alimentándolos con 150, 200 y 250 ml de sustrato al día, durante 40, 30 y 24 días respectivamente. Encontraron una producción máxima de 22.53 m³ de biogás por un m³ de sustrato, con un contenido de metano del 75%.

Iván Vera y et al [10] estimaron la cantidad de biogás obtenible a partir de las excretas de ganado bovino y porcino de la región de Ciénega de Chapala, Michoacán.

Basándose en censos del INEGI y valores promedio calcularon la cantidad total de estiércol y de biogás obtenibles, así como la energía eléctrica generable a partir de la misma. Los resultados suponen un ahorro de energía eléctrica del 4.3%, equivalente para 2013 a \$MX 18,300,000 tomando como base un costo de \$MX 2.236/kWh.

Iván Vera y et al [11] estimaron la cantidad de biogás obtenible a partir de la descomposición anaeróbica de residuos sólidos urbanos que permita generar energía eléctrica para la región de Ciénega de Chapala, Michoacán.

Jesús R. González y Luis R. González [12] realizaron pruebas de producción de biogás con diversos sustratos, cuyos resultados resaltan que los desechos orgánicos del conejo alcanzan concentraciones de metano superiores al 70%, en tanto que la poda de pasto y desechos de comida la producción fue mínima. Adicionalmente, los investigadores señalan que los desechos de conejo lograron producir 0.708 litros de biogás por cada kilogramo de excremento, en tanto que los desechos de vaca alcanzaron una producción de 0.26 L/kg, con porcentajes de metano similares a los alcanzados por el biogás producido por los desechos cunícolas.

Peyman Abdesahian y et al [13] determinaron que en el año 2012 el potencial de generación de biogás a partir de estiércol, sangre y contenido de rumen obtenidos de granjas y mataderos de Malasia era de 4589.49 millones de metros cúbicos por año, con lo cual se podría generar 8.27 X 10⁹ kWh por año.

Basak K. Taseli y Birol Kilkis [14] propusieron dos escenarios (uno de ellos con tres niveles) para generar energía eléctrica y reducir las desventajas ambientales de un hospital universitario con 900 camas. Con la intención de obtener suficiente biogás se propuso emplear los desechos del hospital y crear un establo para 6000 cabezas de ganado lechero; lo cual permitiría que los alumnos del departamento de agricultura cuenten con una granja didáctica. El escenario base contempla tres máquinas para trigeneración cuya capacidad combinada sería de 5.65 MW.

E. Chan y et al [15] realizaron una investigación cuyos resultados indican que el biogás producido a partir del estiércol líquido de cerdo en México tiene potencial para producir 21 X 10¹⁵ Joules anualmente. Se agregó pasto elefante (*pennisetum purpureum*) para mejorar el rendimiento de las excretas de cerdo. Los investigadores sostienen que el precio de la energía eléctrica generada in – situ sería de \$US 0.129/kWh.

W. Uddin y et al [16] estimaron que el estiércol ganadero de Pakistán puede producir 35.625 millones de kWh diarios, con lo cual se podría superar la crisis energética de dicho país, en el cual la indisponibilidad de energía eléctrica puede durar entre 14 y 20 horas al día. El Consejo Pakistání de Tecnologías Renovables, PCRET por sus siglas en inglés (Pakistan Council of Renewable Technologies), ya ha instalado 4109 plantas de biogás a lo largo del país, con lo cual se logran ahorros mensuales promedio de 37.925 millones de rupias pakistaníes en términos de queroseno, madera, gas l.p. y biofertilizante.

M. Ríos y M. Kaltschmitt [17] sugieren que México tiene un potencial considerable para usar biogás de desechos orgánicos como una fuente renovable para generar electricidad.

Los resultados de su investigación muestran un potencial teórico promedio de 167.9 TWh/año, un potencial técnico promedio de 10.2 TWh/año y un potencial económico promedio de 6.4 TWh/año.

Bundhoo y et al [18] realizaron una investigación para determinar el potencial energético de la República de Mauricio a partir de la descomposición anaeróbica de biomasa y distintos desechos disponibles en la ya mencionada isla. Sus resultados indican que la energía neta disponible alcanza los 4685 TJ/año, de los cuales 2174 TJ/año corresponden a energía eléctrica y 2511 TJ/año a energía térmica, representando 12.6% del consumo energético final de la República de Mauricio. Los residuos de la caña de azúcar (3790 TJ/año) son la principal fuente de biogás a larga escala disponibles en dicho país.

Piwozar y et al [19] llevaron a cabo una investigación para mostrar el desarrollo actual del mercado de biogás agrícola en Polonia, en la cual indican que de 2011 a 2014, la producción de biogás aumentó 127.39 millones de metros cúbicos. Debido a la gran área de suelo agrícola, la relativamente alta población de ganado bovino y porcino y a la bien desarrollada industria alimenticia de Polonia, su mayor fuente de energía renovable es la biomasa agrícola. Actualmente, la capacidad total de las plantas de biogás en Polonia es 244,156,466 m³/año.

Silva dos Santos y et al [20] presentaron un método para analizar la viabilidad económica y energética de la generación de energía mediante biogás producido en plantas anaeróbicas de tratamiento de aguas residuales y desechos sólidos municipales en Brasil.

Los resultados indicaron viabilidad económica únicamente para ciudades cuya población supere los 300,000 habitantes y que el potencial energético pueda suministrar alrededor del 0.25% de los residuos fósiles, de acuerdo con el Ministerio Brasileño de Ciencia y Tecnología. Este potencial energético representa toda la energía que pueda ser producida a partir de desechos en Brasil para 2020.

A. Ware y N. Power [21] evaluaron el potencial de recuperación de energía de los subproductos orgánicos de un matadero de ganado bovino en Irlanda. Se analizó el potencial de producción de metano de distintos fluidos, así como el de la mezcla de ellos y se determinó que es viable combinar los desechos, ya que el rendimiento de metano no disminuye. Adicionalmente, la mezcla de desechos tiene potencial de recuperación de energía suficiente para subsidiar al 100% la demanda energética del matadero.

E. U. Khan y A. R. Martin [22] evaluaron el estatus actual de la tecnología de biodigestores en áreas rurales de Bangladesh, la cual abarca 75% de la población. Debido a la falta de conocimiento técnico, los altos costos de instalación y operación, disponibilidad de materia prima y las limitadas aplicaciones finales, sólo se obtiene el 1% del potencial total de biogás, estimado en 14.5 millones de m³/año.

Análisis de antecedentes

La generación de electricidad a partir de biogás es considerado alrededor del mundo como una solución para satisfacer las necesidades energéticas, así como para generar electricidad limpia, ya que el uso del biogás como combustible no da lugar a la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera.

Los países con economías emergentes poseen una gran cantidad de desechos orgánicos procedentes de distintas fuentes, sin embargo, no cuentan con la infraestructura necesaria para explotar al máximo su potencial energético, en gran medida debido a que los proyectos de esta índole suelen ser planeados a gran escala y a que los estudios realizados contemplan regiones considerablemente extensas o sumamente pobladas. No obstante, se debe tomar en cuenta que en muchas ocasiones los desechos orgánicos no se encuentran distribuidos uniformemente a lo largo y ancho de las áreas consideradas, lo cual dificulta las labores de recolección y tratamiento de los desechos y puede causar la exclusión de cierta cantidad de materia prima. Si bien los estudios realizados a gran escala muestran resultados alentadores, los pequeños proyectos para aprovechar el biogás y generar electricidad con él no han sido contemplados como una alternativa para el autoabasto energético.

Procedimiento experimental

El proyecto contempló el empleo de los biodigestores del LIER, por lo cual se les dio mantenimiento para verificar el correcto funcionamiento de los termopares, el de las válvulas de extracción del biogás y el sellado de los biodigestores.

Con el fin de determinar el rango adecuado de dilución para las mezclas del sustrato, se realizaron pruebas de masa seca y masa volátil de los excrementos de vaca y cerdo. Para ello se utilizó la metodología descrita por Jesús González y Luis González [12], la cual consiste en hornear las muestras de excremento durante 48 horas a 105 °C para hallar la masa seca, y posteriormente incinerar tales muestras durante 6 horas a 550 °C para obtener la masa volátil. En la figura 1 se ilustra el proceso de obtención de masa seca y masa volátil.



Figura 1 Materia orgánica antes y después del proceso.

La masa seca corresponde a la materia libre de humedad que compone el excremento, y se calcula empleando la ecuación (1):

$$m_s = \left[1 - \frac{m_h - m_d}{m_h} \right] \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

m_s = masa seca, g.

m_h = masa hidratada, g.

m_d = masa deshidratada, g.

La masa volátil es el porcentaje de materia orgánica presente en la biomasa, e indica qué fracción de la misma ha de producir biogás, de modo que un porcentaje alto es deseable. La ecuación (2) permite calcular la masa volátil.

$$m_v = \left[\frac{m_d - m_i}{m_d} \right] \times 100\% \quad (2)$$

Donde:

m_v = masa volátil, g.

m_d = masa deshidratada, g.

m_i = masa incinerada, g.

Tras determinar las concentraciones de los sustratos, se vació el agua y materia orgánica en cada biodigestor, revolviendo ambas partes hasta incorporarse homogéneamente. Tras culminar dicha fase se sellaron correctamente los biodigestores y se verificó la ausencia de fugas. En la figura 2 se aprecia el sustrato formado por agua y excremento de vaca dentro del biodigestor durante el llenado del mismo.



Figura 2 Sustrato formado por agua y excremento de vaca.

Durante las primeras 15 semanas de la fase experimental, se midió diariamente la presión de biogás generado y la temperatura del sustrato, mientras que el porcentaje de metano presente en el biogás y el pH del sustrato se cuantificaron semanalmente. Las primeras mediciones de porcentaje de metano en el biogás se realizaron entre las semanas 3 y 4, a partir de las cuales se tuvo suficiente biogás para realizar la prueba correspondiente.

Tras las 15 primeras semanas del experimento, la presión del biogás y la temperatura dentro del biodigestor se midieron cada tercer día, en tanto que los otros parámetros se midieron normalmente.

La medición de la temperatura del sustrato se realizó con ayuda de un termómetro digital conectado a un termopar que forma parte de la tapa del biodigestor y cuyo extremo está en contacto con la mezcla de agua y materia orgánica. Por su parte, la presión dentro de los biodigestores se midió empleando un manómetro conectado a la válvula superior de los biodigestores. Debido a que los biodigestores tienen una resistencia máxima a presiones internas de 7 psi y no cuentan con válvulas de alivio de presión, siempre que la presión interna de un biodigestor sobrepasó los 6 psi se quemó cierta cantidad de biogás, de modo que se eliminara el riesgo de una explosión por exceso de presión. La figura 3 muestra la quema del biogás excedente.

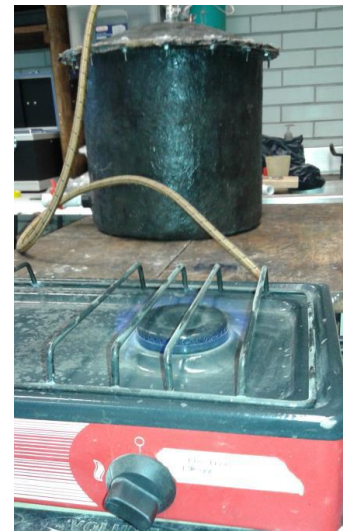


Figura 3 Quema de biogás excedente.

La medición del pH se realizó mediante la utilización de tiras reactivas, las cuales cambian de color tras sumergirse dentro del sustrato, permitiendo así su cotejo con una carta comparativa que indica el pH de la sustancia analizada.

Para obtener una muestra del sustrato dentro del biodigestor se abrió la válvula inferior del biodigestor y se permitió la salida de una cantidad mínima de la mezcla. Para cuantificar el metano presente en el biogás se empleó un analizador de gases Madur Ga-21 plus, cuya pantalla se presenta en la figura 4. Durante la totalidad del experimento se verificó regularmente la ausencia de fugas de biogás.

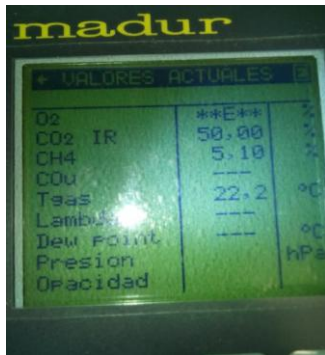


Figura 4 Pantalla del analizador de gases durante una medición de componentes del biogás.

Para cuantificar el biogás producido dentro de cada biodigestor se empleó el método desarrollado por Jesús R. González y Luis R. González [12], el cual consistente en relacionar variables tales como la presión acumulada de biogás dentro de cada biodigestor durante cierto periodo, así como el porcentaje de metano alcanzado en el mismo lapso, para así determinar la masa de biogás contenida dentro de cada biodigestor y posteriormente hallar los litros de biogás producidos semanalmente.

Tras cuantificar la presión acumulativa semanal y su respectivo porcentaje de metano, el siguiente paso del desarrollo experimental, consiste en determinar la masa molar del biogás, la cual equivale a la suma de la masa molar de cada compuesto que lo integra. Sin embargo, debido a que los principales componentes del biogás son metano y dióxido de carbono, en los cálculos siguientes se contemplará que la suma de la masa molar de dichos compuestos equivale a la totalidad de la masa molar del biogás, lo cual se expresa mediante la ecuación (3):

$$M = M_{CH_4} + M_{CO_2} \quad (3)$$

Donde:

M = masa molar del biogás, kg/mol

M_{CH_4} = masa molar del metano, kg/mol

M_{CO_2} = masa molar del dióxido de carbono, kg/mol

Dado que la masa molar del metano y dióxido de carbono son 0.01604 kg/mol y 0.04401 kg/mol, respectivamente, la masa molar de tales compuestos para una concentración particular está dada por las ecuaciones (4) y (5):

$$M_{CH_4} = 0.01604 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times \%CH_4 \quad (4)$$

$$M_{CO_2} = 0.04401 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times \%CO_2 \quad (5)$$

Donde:

$0.01604 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$ = peso molecular del metano, kg/mol

$\%CH_4$ = porcentaje de metano presente en la muestra, %

$0.04401 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$ = peso molecular del dióxido de carbono, kg/mol

$\%CO_2$ = porcentaje de metano presente en la muestra, %

Resultados y análisis

Con los resultados obtenidos se determinaron tanto la masa seca como la masa volátil, y considerando dichas variables se crearon dos diluciones distintas para excrementos de vaca y tres para desechos de cerdo. Los resultados de las pruebas de masa seca y volátil se presentan en la tabla 1 y los sustratos empleados durante las pruebas experimentales se señalan en la tabla 2.

Tipo de desecho	Masa hidratada [g]	Masa deshidratada [g]	Masa incinerada [g]	Masa seca [%]	Masa volátil [%]
Excremento de cerdo	144.2	32.4	3.1	22.47	90.43
Excremento de vaca	283	42.8	12.5	15.12	70.79

Tabla 1 Resultados de las pruebas de masa seca y volátil.

Biodigestor no.	Tipo de desecho	Porcentaje de materia [%]	Porcentaje de agua [%]
1	Excremento de cerdo	50	50
2	Excremento de cerdo	66.67	33.33
3	Excremento de cerdo	33.33	66.67
4	Excremento de vaca	50	50
5	Excremento de vaca	25	75

Tabla 2 Mezclas de los sustratos empleados durante las pruebas experimentales.

La figura 5 muestra la gráfica comparativa de las presiones acumuladas por semana de las muestras más representativas de biogás producido por vaca y cerdo.

Producción semanal de biogás

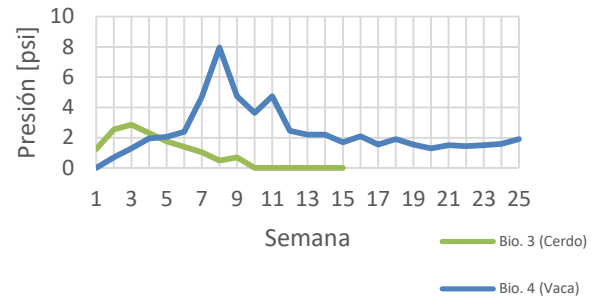


Figura 5 Presiones acumuladas por semana.

Se puede apreciar que durante las primeras cuatro semanas las excretas de cerdo produjeron una cantidad mayor de biogás que las excretas de vaca, sin embargo, estas últimas

Produjeron una cantidad mucho mayor durante las semanas posteriores, e incluso durante más tiempo. Cabe mencionar que las excretas de cerdo sólo produjeron biogás durante 10 semanas, alcanzando su mayor producción en la tercera semana, mientras que las excretas de vaca alcanzaron su mayor producción de biogás en la semana 8 y al momento de la captura de datos para el presente artículo (semana 25) aún no finalizaba su producción.

La posible causa de la gran diferencia en la duración de la producción de biogás de ambas muestras es la solubilidad de las excretas, pues mientras los desechos ovinos formaron una mezcla con escasa presencia de partículas no disueltas, los desechos porcinos continuaron presentando una elevada cantidad de gránulos tras mezclarse con agua, los cuales se sedimentaron al fondo del biodigestor. Esta situación podría haber causado que una gran parte de la materia no se degradara o lo hiciera de manera sumamente lenta.

La figura 6 presenta el sustrato del biodigestor 3 antes y después de vaciarlo tras finalizar su producción de biogás, el cual contenía una mezcla compuesta por 33.33% de excremento de cerdo y 66.66% de agua. Además de la espuma presente en la superficie de la mezcla, se puede apreciar que ningún gránulo es visible en la misma.



Figura 6 Sustrato del biodigestor 3.

En la figura 5 también se puede observar que durante las semanas 9 y 10, la producción de biogás en el biodigestor 4 disminuyó drásticamente, sin embargo, en la semana 11 volvió a incrementarse, lo anterior podría ser atribuible a las variaciones de temperatura que tuvieron lugar durante dicho periodo y que se muestran en la figura 7.

Efecto de la temperatura en la producción de biogás
Semana

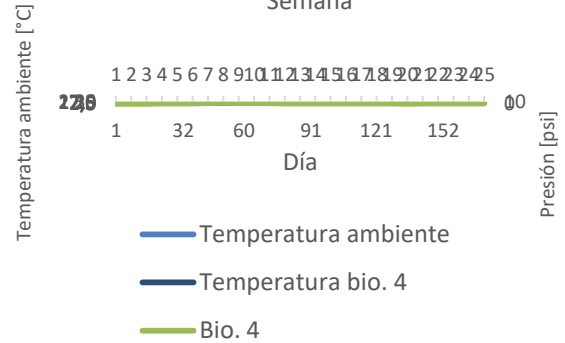


Figura 7 Efecto de la temperatura en la producción de biogás.

Se observa que al principio de la semana 8 hubo una disminución en la temperatura ambiental de alrededor de 3.5 °C en dos días, mientras que la temperatura del sustrato disminuyó 4 °C en el mismo periodo. Estos cambios en la temperatura se pueden considerar drásticos, si se toma en cuenta que regularmente la temperatura cambia 1.8 °C en lapsos de tiempo similares. Vale la pena mencionar que en semanas como la 16, 18, 21 y 24 se aprecian un ligero aumento en la producción de biogás con respecto a las semanas inmediatas anteriores, dichos fenómenos coinciden en tiempo con incrementos en la temperatura ambiente e interna del biodigestor.

El pH del sustrato se midió semanalmente y cuyos resultados para los biodigestores 3 y 4 se ilustran en la figura 8.

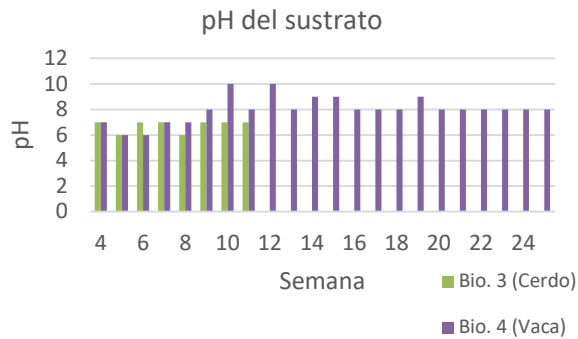


Figura 8 pH de los sustratos.

El pH del sustrato de excretas de cerdo y agua fue predominantemente neutro, aunque con cierta tendencia a ser ácido, ya que en la escala del pH un valor de 7 corresponde a una sustancia neutra, valores mayores a 7 indican pH alcalinos y menores de 7 revelan que la sustancia analizada es ácida. Por su parte, el pH del sustrato de excretas de vaca y agua es predominantemente alcalino, ya que desde la semana 9 y hasta la 25 se encontró con valores mayores a 7, obteniendo en dos ocasiones un pH de 10 y en tres ocasiones su pH fue 9.

De las 22 mediciones, sólo tres arrojaron un pH de 7 y tan sólo dos veces, en las semanas cinco y seis, el pH fue de 6. Estos resultados sugieren que el pH no fue un factor decisivo en la cantidad de biogás producido, pues en las semanas 11 y 12 se tuvo el pH más alcalino, pero la cantidad de biogás producido no fue el mayor. En cuanto a la calidad del biogás, es deseable que este cuente con el mayor porcentaje de metano posible, pues tal componente es el encargado de arder durante la quema del biogás. La figura 9 muestra el porcentaje de metano presente en el biogás de los biodigestores 1, 3 y 4 medido semanalmente.

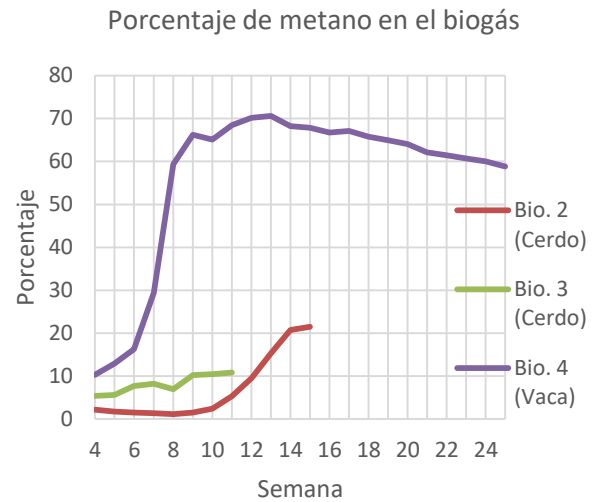


Figura 9 Porcentaje de metano presente en el biogás.

Como se observa, las excretas de vaca producen un porcentaje mayor de metano que las excretas de cerdo, cuyo biogás apenas alcanzó el 21.49% de contenido de metano en el mejor de los casos. Cabe mencionar que en el caso del biodigestor dos, el porcentaje de metano mantuvo una tendencia a la alza durante 6 de las 7 semanas en las que se monitoreó dicho parámetro, mientras que el biogás del biodigestor tres presentó un porcentaje de metano relativamente constante hasta la semana 9. En contraste, la muestra más representativa del biogás producido por excretas de vaca alcanzó su mayor porcentaje de carbono en la semana 13, obteniendo 70.58% de metano. A partir de ese momento el porcentaje de metano se redujo gradualmente en aproximadamente 0.8% cada semana.

Para determinar la cantidad de biogás generado, como un ejemplo del cálculo se tomarán como base los datos recopilados para el biodigestor 4 durante la semana 13, la cual abarca del 20 al 27 de mayo de 2016, cuyo porcentaje de metano es 70.58%, la presión acumulada es 2.2 psi y la temperatura es 23.5 °C. Las masas molares del metano, dióxido de carbono y biogás producido esa semana serán:

$$M_{CH_4} = 0.01604 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times 0.7058 = 0.01132 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$M_{CO_2} = 0.04401 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times 0.29420 =$$

$$0.01295 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$M = 0.01132 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} + 0.01295 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$M = 0.02427 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

A continuación, la masa molar del biogás se utiliza en la ecuación (6) para calcular la constante particular del biogás de la semana 13, sabiendo que la constante universal de los gases es $R_u = 8.314 \text{ Nm/mol} \cdot \text{K}$.

$$R_p = \frac{R_u}{M} \quad (6)$$

Donde:

R_p = constante particular del biogás, Nm/kgK

R_u = constante universal de los gases, Nm/molK

Por lo tanto, la constante particular del biogás es:

$$R_p = \frac{8.314 \text{ Nm/mol} \cdot \text{K}}{0.02427 \text{ kg/mol}}$$

$$R_p = 342.56283 \text{ Nm/kg} \cdot \text{K}$$

A continuación se determinó la densidad del biogás contenido dentro del biodigestor con ayuda de la ecuación (7) de los gases ideales:

$$PV = mR_p T \quad (7)$$

Donde:

P = presión absoluta del gas, Pa

V = volumen del gas, m^3

m = masa del gas, kg

R_p = constante particular del gas, Nm/kg · K

T = temperatura, K

Despejando de (7) se obtiene la ecuación (8) para determinar la densidad del gas:

$$\frac{m}{V} = \frac{P}{R_p T} \quad (8)$$

Antes de proceder a calcular la densidad del biogás es necesario realizar las conversiones de presión manométrica en psi a absoluta en Pa y de temperatura en °C a °K.

$$P = 2.2 \text{ psi} \times \frac{6894.76 \text{ Pa}}{1 \text{ psi}} + 101.325 \text{ Pa}$$

$$P = 15269.797 \text{ Pa}$$

$$T = 23.5 \text{ }^\circ\text{C} + 273.15 = 296.65 \text{ K}$$

$$\frac{m}{V} = \frac{15269.797 \text{ Pa}}{(342.56283 \frac{\text{Nm}}{\text{kg} \cdot \text{K}}) (296.65 \text{ K})}$$

$$\frac{m}{V} = 0.15026 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Para calcular la masa del biogás basta con emplear la ecuación (9), tomando en cuenta que el volumen ocupado por el biogás es 23 L, ya que el volumen total del biodigestor es de 33 L y la mezcla ocupa 10 L.

$$m = V \cdot \rho \quad (9)$$

Donde:

ρ = densidad, kg/m^3

$$m = 23 \text{ L} \times 0.15026 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}$$

$$m = 3.45602 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

El último paso para conocer la cantidad de litros de biogás generados consiste en emplear una variante de la ecuación (9), que será denominada (10) y que contempla la densidad del biogás a presión atmosférica como 1.25 kg/m^3 :

$$V = \frac{m}{\rho} \tag{10}$$

$$V = \frac{3.45602 \times 10^{-3} \text{ kg}}{1.25 \text{ kg/m}^3}$$

$$= 4.17073 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V = 2.76482 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

Por lo tanto, en la semana 13 el sustrato de excretas de vaca al 50% y agua al 50% produjo:

$$V = 2.76482 \text{ L}$$

El método de cuantificación de biogás de Jesús R. González y Luis R. González se aplicó para el resto de semanas y biodigestores, a modo de obtener la producción de biogás de cada semana. En la figura 10 se muestran los litros de biogás producidos cada semana por los biodigestores 1, 3 y 4.

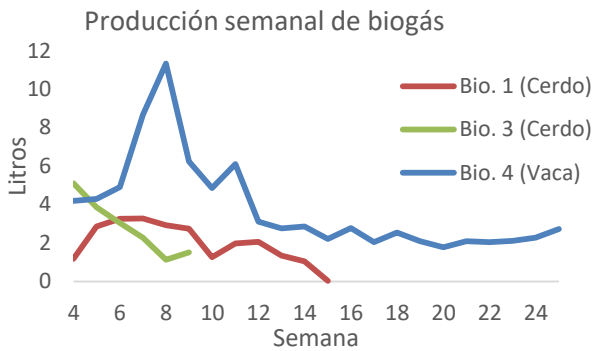


Figura 10 Litros de biogás producido.

Se observa que el sustrato del biodigestor 1 nunca superó los 3.5 litros producidos de biogás, en tanto que el sustrato correspondiente al biodigestor 3 tuvo una producción máxima de 5 litros por semana, aunque sólo ocurrió una ocasión y posteriormente su producción decreció drásticamente, en tanto que el sustrato del biodigestor 4 alcanzó una producción máxima de 11.3 litros por semana.

No fue posible cuantificar el biogás producido durante las tres primeras semanas, ya que las mediciones de porcentaje de biogás comenzaron hasta la cuarta semana de experimentación. En la figura 11 se presenta el total de litros de biogás producidos por los cinco sustratos evaluados.

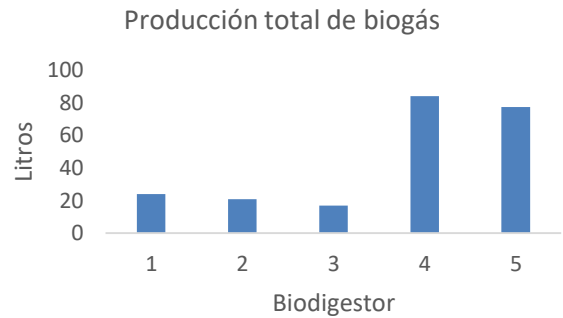


Figura 11 Producción total de biogás.

Es necesario discernir entre litros de biogás y litros de metano. El primer término hace referencia a los litros obtenidos de la mezcla de gases que conforman el biogás, en tanto que el segundo concepto se refiere únicamente a la parte aprovechable del biogás en forma de energía. La figura 12 ilustra lo antes comentado.

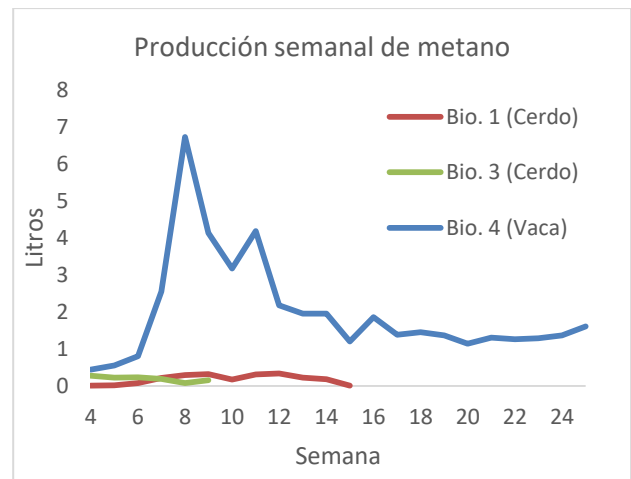


Figura 12 Litros de metano producido.

Se observa que los sustratos de excremento de cerdo y agua no produjeron una cantidad considerable de metano, posiblemente debido a los mismos factores que causaron las bajas presiones acumuladas representadas en la figura 7. En la tabla 3 se presenta la producción total de metano para cada sustrato analizado, así como el porcentaje máximo de metano alcanzado y en la tabla 4 se presenta la densidad del estiércol de vaca y cerdo empleados en la mezcla de los sustratos.

Biodigestor no.	Animal productor de excretas	% de excretas	% de agua	Metano producido [L]	% máximo de metano
1	Cerdo	50	50	2.1375	17.23
2	Cerdo	66.67	33.33	0.8165	21.49
3	Cerdo	33.33	66.67	1.1486	10.86
4	Vaca	50	50	43.8043	70.58
5	Vaca	25	75	36.6201	64.94

Tabla 3 Producción total de metano.

Animal productor de excretas	Masa de la excreta analizada [kg]	Volumen de la excreta analizada [m ³]	Densidad de la excreta analizada [kg/m ³]
Cerdo	0.1442	0.000155	930.3226
Vaca	0.283	0.0002972	952.2207

Tabla 4 Densidad de las excretas.

Conociendo la densidad de las excretas y el volumen empleado en la preparación de cada sustrato es posible determinar la masa de excremento presente en cada sustrato, y posteriormente el rendimiento de litros de metano por kilogramo de excreta. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.

Biodigestor no.	% de excretas	Volumen de excretas [L]	Masa de excretas [kg]	Metano producido [L]	Metano por kg de excreta [L]
1	50	5	4.6516	2.1375	0.4595
2	66.67	6.66	6.2025	0.8165	0.1316
3	33.33	3.33	3.1008	1.1486	0.3704
4	50	5	4.7611	43.8043	9.2005
5	25	2.5	2.3806	36.6201	15.3830

Tabla 5 Rendimiento de litros de biogás por kg de excreta.

Se observa que los sustratos a base de excremento ovino (biodigestores 4 y 5) tienen rendimientos ampliamente superiores a los sustratos a base de excreta porcina, las cuales no lograron superar los 0.5 L de metano/kg. En este rubro el sustrato más viable es el preparado con 25% de excretas de vaca y 75% de agua, el cual alcanzó los 15.3 L de metano/kg.

Según el Ministerio de Energía de Chile y et al [23], el poder calorífico del metano es de 10 kWh/m³, o bien:

$$C_p = 10 \frac{kWh}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 L} = 10 Wh/L$$

Donde:

C_p = poder calorífico del metano, kWh/m³, Wh/L.

Para plantas de generación de energía eléctrica pequeñas, con capacidades de generación menores a 150 kW, Wellinger y et al [24] proponen el uso de sistemas de generación que empleen motores Stirling, cuya eficiencia eléctrica se encuentra entre 30 y 40%, por lo cual se asumirá una eficiencia media del 35%.

Conociendo el valor calorífico del metano (10 Wh/L), estimando la cantidad de excrementos producidos diariamente y tomando en cuenta la recomendación de Wellinger y et al, es posible determinar la línea base de energía eléctrica generable en el rancho Los Dos hermanos a partir de los rendimientos de litros de metano/kg de excremento previamente estimados. Los resultados se presentan en la tabla 6.

Según la tabla 6, los sustratos a base de excretas de vaca y agua son los únicos que podrían satisfacer por completo la demanda eléctrica del rancho Los dos hermanos, la cual se estima en aproximadamente 80 kWh bimestrales.

Biodigestor no.	Masa de excretas [kg/día]	L / día de metano producidos	kWh / día generables	kWh / bimestre generables
1	9.4	4.3195	0.0151	0.9071
2	9.4	1.2374	0.0043	0.2599
3	9.4	3.4820	0.0122	0.7312
4	160	1472.07	5.1523	309.1351
5	160	2461.28	8.6145	516.8698

Tabla 6 Línea base de energía eléctrica generable en el rancho Los dos hermanos.

Conclusiones

Con base en los resultados experimentales de las pruebas de biogás realizadas a 3 mezclas de excretas de cerdo / agua y 2 mezclas de excretas de vaca / agua, se concluye que estas últimas son más apropiadas para implementar un sistema de generación de energía eléctrica para autoabastecimiento, ya que en ambos casos la cantidad de metano producido permiten satisfacer la demanda eléctrica del rancho Los dos hermanos.

Agradecimientos

Agradecemos a la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO por el apoyo recibido durante la realización de este proyecto a través del programa UNAM-DGAPA-PAPIME-PE102015.

Referencias

[1] Santana, A., & Pound, B. (1980). *The production of biogas from cattle slurry, the effects of concentration of total solids and animal diet*. Trop Anim Prod 5:2. 130 – 135.

[2] San Thy, Preston, T. R. & J Ly. (2003) *Effect of retention time on gas production and fertilizer value of biodigester effluent*. Livestock Research for Rural Development 15 (7).

[3] K.J. Chae Jang AM. , Yim S.K., In S. Kim. (2008). *The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure*. Bioresource Technology 99 1–6.

[4] Lansing S., Raul Botero Botero, Jay F. Martin. (2008) *Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters*. Bioresource Technology 99 5881–5890.

[5] Atem, A.D. & Indiveri, M.E. & Llamas, S. (2010) *Biomass storage for further energy use through biogas production*. International Journal of hydrogen energy 35. 6048 – 6051.

[6] Ferrer, I. & Garfi, M. & Uggetti, E. & Ferrer-Martí, L. & Calderon, A. & Velo, E. (2011). *Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes*. Biomass and bioenergy 35 1668 – 1674.

[7] Sung-Mok Lee, Geun Hyub Kim, Jae-Hwa Lee.(2012) *Bio-gas production by co-fermentation from the brown algae, Laminaria japonica*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 18. 1512–1514

[8] M.S. Ak, M. Muz, O.T. Komesli, C.F. Gökçay. (2013) *Enhancement of bio-gas production and xenobiotics degradation during anaerobic sludge digestion by ozone treated feed sludge*. Chemical Engineering Journal 230. 499–505.

- [9] González-González, A., et al. (2013), *Energy self-sufficiency through hybridization of biogas and photovoltaic solar energy: an application for an Iberian pig slaughterhouse*, Journal of Cleaner Production, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.021>
- [10] Vera, I. & Estrada, M. & Martínez, J. & Ortiz, A. (2012) *Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte I: excretas de ganado bovino y porcino*. Ingeniería, Investigación y Tecnología. Volume 15, Issue 3, July–September 2014, Pages 429–436.
- [11] Vera, I. & Estrada, M. & Martínez, J. & Ortiz, A. (2015) *Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos*. Ingeniería, Investigación y Tecnología. Volume 16, Issue 3, July–September 2015, Pages 471–478.
- [12] González, J. R. & González, L. R. (2014). *Diseño y construcción de un prototipo experimental que permita estudiar la generación de biogás mediante materia Orgánica*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista. FES Cuautitlán – UNAM. Julio 2014, Páginas 61-63, 135–176.
- [13] Abdeshahian, P. & Lim, J. S. & Ho, W. S. & Hashim, H. & Tin Lee, C. (2016) *Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 60, July 2016, Pages 714–723.
- [14] Taseli, B. K. & Kilkis, B. (2016) *Ecological sanitation, organic animal farm, and cogeneration: Closing the loop in achieving sustainable development – A concept study with on-site biogas fueled trigeneration retrofit in a 900 – bed university hospital*. Energy and Buildings. Available online 14 July 2016. In Press, Accepted Manuscript — Note to users.
- [15] Chan, E. & Xia, A. & Murphy, J. D. (2016) *Can slurry biogas systems be cost effective without subsidy in Mexico?* Renewable Energy. Volume 95, September 2016, Pages 22–30.
- [16] Uddin, W. & Khan, B. & Shaukat, N. & Majid, M. & Mujtaba, G. & Mehmood, A. & Ali, S. M. & Younas, U. & Anwar, M. & Almeshal, A. M. (2016) *Biogas potential for electric power generation in Pakistan: A survey*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 54, February 2016, Pages 25–33.
- [17] Ríos, M. & Kaltschmitt, M. (2016) *Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 54, February 2016, Pages 384–395.
- [18] Bundhoo, Z. & Mauthoor, S. & Mohee, R. (2016) *Potential of biogas production from biomass and waste materials in the Small Island Developing State of Mauritius*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 56, April 2016, Pages 1087–1100.
- [19] Piwowar, A. & Dzikuc, M. & Adamczyk, J. (2016) *Agricultural biogas plants in Poland – selected technological, market and environmental aspects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 58, May 2016, Pages 69–74.
- [20] Silva dos Santos, I. F. & Barros, R. M. & Tiago Filho, G. L. (2016) *Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential*. Journal of Cleaner Production. Volume 126, 10 July 2016, Pages 504–514.

[21] Ware, A. & Power, N. (2016) *Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland*. Renewable Energy. Volume 97, November 2016, Pages 541–549.

[22] Khan, E. U. & Martin, A. R. (2016) *Review of biogas digester technology in rural Bangladesh*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 62, September 2016, Pages 247–259.

[23] Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Manual de Biogás. 1ª edición, Chile, FAO, 2011, página 54.

[24] Wellinger, A. & Murphy, J. & Baxter, D. *The Biogas Handbook: Science, production and applications*. 1ª edición, Reino Unido, Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52, página 437.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. El biogás. Producción y utilización. 1ª edición, Italia, 1983.

Deublein, D. y Steinhauser, A. *Biogas from waste and renewable resources*. 1ª edición, Alemania, 2008.

T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk, y R. Janssen. *Biogas handbook*. 1ª edición, Dinamarca, University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.

Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Manual de Biogás. 1ª edición, Chile, FAO, 2011.