

Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras

J. Luis Magaña R.* , Ernestina Torres R.** , Martín T. Martínez G.** , Carmen Sandoval Juárez*** y Rosalía Hernández Cantero*

RESUMEN

Se aplicó el proceso de digestión anaerobia para la obtención de biogás a partir de estiércol de cabras. Para ello se implementaron dos tipos de experimentos: El primero se efectuó mediante dos lotes utilizando matraces kitazato de cristal con una capacidad de 1 litro como depósito de la mezcla agua-excremento. Los matraces kitazato se introdujeron dentro de una tina con agua calentada por una resistencia eléctrica para mantener la temperatura adecuada para el crecimiento de las bacterias metanogénicas. El objetivo de esta experimentación fue determinar la producción diaria de biogás al utilizar estiércol de cabras. El segundo se efectuó mediante un biodigestor a escala de laboratorio. Para ello se procedió primero a pesar las bolitas de estiércol de cabras. En seguida se pasaron a un recipiente en donde se les agregó agua. Luego se procedió a deshacer las bolitas hasta alcanzar una mezcla homogénea y en estas condiciones cargar el biodigestor. El objetivo de esta experimentación fue determinar la cantidad de metano del biogás mediante análisis cromatográfico.

ABSTRACT

The anaerobic digestion process was applied in order to get biogas from goat's manure. Two experiments were implemented. The first one was carried out by means of two lots, using matraces kitazatos of crystal with a capacity of 1 liter, as deposit of the mixture water - excrement. The kitazatos were put inside a tub with water warmed by an electrical resistance in order to supply the adapted temperature for the growth of the methanogenic bacteriums. The aim of this experimentation was to determine the daily production of biogas when goats' manure is used. The second one was carried out by means of a biodigestor at laboratory scale. The small balls of goats' manure were weighted and immediately were passed to a container where water was added. Then, these were dissolved in order to obtain a homogeneous mixture that could be loaded into the biodigestor. The aim of this experimentation was to determine the methane's amount of biogas by means of chromatographic analyses.

Recibido: 17 de Noviembre de 2005
Aceptado: 6 de Agosto de 2006

INTRODUCCIÓN

El gas natural, cuyo componente principal es metano, fue utilizado por los pueblos chinos y persas hace miles de años como generador de temperatura; ellos lo utilizaban para calentar los baños de agua (Brakel 1980); sin embargo, tuvieron que pasar muchos años para darse cuenta que el metano no sólo se encuentra en el gas natural proveniente de fósiles, sino que este se producía constantemente. En el año 1776 el científico italiano Volta descubrió que el gas producido de manera natural en los pantanos era inflamable (Stafford *et al.*, 1980), y hasta cien años después, en el año 1887 el científico Hoppe-Seyler pudo comprobar la formación de metano a partir de acetato. La misma observación hizo Omelianski en 1886 con guano de vacas. En 1888, Gayon obtuvo gas al mezclar guano y agua, a una temperatura de 35 °C. Soehngen descubrió en 1906 la formación de metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono. A su vez, describió los primeros dos organismos que participaban en la formación de metano. La participación de microorganismos involucrados en este proceso, fue demostrada hasta finales del siglo XIX (Barrer, 1956).

Palabras clave:

Anaerobio; Metano; Biogás; Relación Carbono/Nitrógeno; Energía alternativa

Keywords:

Anaerobic; Methane; Biogas; C/N ratio; Alternative energy.

* Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Guanajuato. magalu@dulcinea.ugto.mx

** Instituto de Investigaciones Científicas de la Universidad de Guanajuato. torrere@quijote.ugto.mx, garciamt@quijote.ugto.mx.

*** Centro de Investigación en Química Inorgánica de la Universidad de Guanajuato. sandcar@quijote.ugto.mx.

La primera planta de digestión fue construida en una colonia de leprosos, en Bombay, India 1859 (Meynell., 1976). Los digestores anaerobios se extendieron en Inglaterra en 1895, cuando el biogás fue recuperado en un "Proyecto Cuidadoso", y usado como combustible en las lámparas externas de las calles (McCabe J., 1957). Uno de los países que mayor interés ha mostrado por las fuentes de energía no convencionales, y en especial por la producción de biogás, ha sido Alemania (Hohlfeld *et al.*, 1986). En 1920, Imhoff instaló el primer biodigestor en Alemania, este consistía en un estanque hermético, el cual era alimentado con material fermentable para la obtención de "biogás".

Después de la Segunda Guerra Mundial se construyeron cerca de 40 biodigestores, pero su desarrollo se frenó por los bajos precios de los combustibles fósiles. La siguiente ola de construcción de biodigestores se produjo en los años 70's por la crisis del petróleo, pero por problemas técnicos, baja producción de gas y alta inversión, este desarrollo se frenó bruscamente a fines de los años 80's. Con la nueva legislación eléctrica del año 1991 en Alemania, los agricultores que producían electricidad recibieron un pago por kWh producido y entregado a las empresas de distribución, lo cual produjo una segunda ola de construcción de biodigestores que aún no termina. Una nueva ley de energía renovable mejora en un 30 % el precio de compra a los pequeños productores.

En los procesos de descomposición anaeróbica se obtienen compuestos altamente energéticos que pueden ser usados para la obtención de energía eléctrica y calorífica, a diferencia de la descomposición aeróbica, en que el producto final es dióxido de carbono y agua. Dentro de estos compuestos se encuentran (Orozco, 1989), entre otros, alcoholes como etanol y metanol y gas metano.

Estos compuestos son altamente combustibles, por lo cual con un manejo eficiente se pueden generar altas temperaturas para múltiples propósitos. En fechas recientes, y con base en la biotecnología, se han implementado técnicas para el procesamiento de materias primas de origen vegetal, que permiten disponer de nuevos agentes biocatalizadores como enzimas, levaduras y bacterias y que además amplían la capacidad de producción de energía a partir de la biomasa.

Por su parte, el avance tecnológico ha contribuido a abaratar sensiblemente los costos de producción de equipos de energías alternas ya conocidos, como son los generadores eólicos y las celdas fotovoltaicas y en fechas recientes las celdas de combustible que permiten la obtención directa de energía eléctrica a partir del hidrógeno. En los últimos 20 años, los costos de generación de energía eólica y solar han descendido de manera significativa. Las lámparas fluorescentes, capaces de funcionar con 1/4 de la energía de las lámparas incandescentes, se han complementado muy bien con los anteriores equipos logrando abatir considerablemente los costos y mejorar la eficiencia energética. Hoy, la producción de un kWh cuesta de 4 a 8 céntimos de dólar en una central de carbón, de 4 a 6 en los parques eólicos, de 5 a 10 en una de petróleo, de 12 a 15 en una central nuclear y de 25 a 40 céntimos utilizando celdas fotovoltaicas (Maycock, 2004).

En este contexto, el proceso de biodigestión anaerobia destaca por su importancia para la producción de biogás, rico en metano el cual puede utilizarse directamente en quemadores para hornos, estufas, alimentación de motores de combustión interna o indirectamente para la producción de electricidad. (Hiler *et al.*, 1985). El metano se puede obtener a partir de diferentes compuestos orgánicos, como proteínas, grasas y carbohidratos y se forma en conjunto con dióxido de carbono en una relación de 2:1. Los beneficios del biogás son numerosos (Sasse Ludwig, 1984). No daña el medio ambiente, mejora las condiciones higiénicas, y es una fuente de energía moderna.

La biodigestión, consiste en una fermentación anaeróbica que se efectúa dentro de un biodigestor; en el cual la materia orgánica se descompone sin el oxígeno atmosférico para dar como resultado agua, dióxido de carbono y metano. (Hiler *et al.*, 1985). Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada, se muestra en la Tabla 1. El metano constituye el componente económicamente más importante del biogás, ya que le confiere las características combustibles al mismo. Así, el valor

Tabla 1.
Composición del Biogás.

Metano CH ₄	40 - 70 % volumen
Dióxido de carbono CO ₂	30 - 60 % volumen
Sulfuro de hidrógeno H ₂ S	0 - 3 % volumen
Hidrógeno H ₂	0 - 1 % volumen

energético del biogás queda determinado por la concentración de metano que presenta un valor energético de $20 \text{ MJ/m}^3 - 25 \text{ MJ/m}^3$, en comparación con el gas natural que a su vez presenta $33 \text{ MJ/m}^3 - 38 \text{ MJ/m}^3$.

En la construcción de biodigestores se han probado muchos tipos de construcciones, buscando una mayor eficiencia en la producción y un menor costo de inversión. Entre los diseños más utilizados se encuentran los siguientes:

De alimentación continua: En este tipo de biodigestores la alimentación de la biomasa se efectúa en intervalos regulares; por razones prácticas, estos digestores son alimentados intermitentemente, esto se logra aprovechando la gravedad para la alimentación. Ejemplos de este tipo de digestores son el "Digestor Hindú" y el "Digestor Chino".

Digestor tipo plug flow: Diseñado por Reinhold y Noack en Darmstadt, Alemania, en la década de 1950. (Noack W., 1955) se construye en forma de canal horizontal con concreto reforzado en el que se depositan los residuos con alto contenido de sólidos. Cuenta con agitadores, que trabajan varias veces al día.

De balón de plástico: Está compuesto de una bolsa de plástico, caucho, polietileno o geomembrana de PVC, completamente sellada. La parte inferior de la bolsa (75 % de volumen) se rellena con la carga, mientras que la parte superior de la bolsa (25 %) se deja como espacio para captar el biogás que se produce, el cual posteriormente es enviado a un almacén de gas fabricado también con alguno de los materiales mencionados.

De tapón de flujo: Consiste en una zanja construida con concreto o con una membrana impermeable. El digestor se cubre con una cubierta flexible anclada al suelo, al concreto o al acero galvanizado. Estos tanques especiales son rectangulares y tratan residuos que contengan de 11 % a 13 % total de sólidos.

A nivel laboratorio o de planta piloto se han desarrollado biodigestores pequeños que permiten a investigadores analizar y evaluar con precisión el comportamiento de gran cantidad de variables involucradas en el proceso de biodigestión. Tal es el caso del biodigestor utilizado en algunos de los experimentos realizados en la Universidad de Guanajuato gracias al apoyo de la Dirección de Investigación y Posgrado en su Convocatoria 2002.

MATERIALES Y MÉTODOS

Todos los residuos orgánicos (basura de cocina, restos vegetales y animales, excrementos, entre otros) son adecuados para ser fermentados anaerómicamente (en ausencia de oxígeno). Las bacterias van consumiendo así el carbono y el nitrógeno y como resultado se produce una combinación de gases formado por un 70 % de metano, 20 % de anhídrido carbónico, un poco de monóxido de carbono y anhídrido sulfuroso. La materia prima se mezcla en partes iguales con agua, se carga el biodigestor con la mezcla y de esta manera comienza el proceso. Al pasar un tiempo determinado, empiezan a producirse gases como producto de la digestión. Estos gases se van acumulando en el digestor, y su presencia y presión se registran mediante un manómetro.

Un factor importante para la eficiencia de la digestión es la relación C/N, es decir la cantidad de carbono dividida entre la cantidad de nitrógeno. Los alimentos principales de las bacterias anaeróbicas son el carbono (en la forma de carbohidratos) y el nitrógeno (en proteínas, nitratos, amoníaco, etc.). El carbono se utiliza para obtener energía y el nitrógeno para la construcción de estructuras celulares. Esas bacterias utilizan carbono con una rapidez unas treinta veces mayor que su uso de nitrógeno. La digestión anaeróbica, se lleva mejor a cabo cuando las materias primas suministradas a las bacterias contienen ciertas cantidades de carbono y de nitrógeno al mismo tiempo. La razón de carbono a nitrógeno (C/N), representa la proporción de los dos elementos. Una razón C/N de 30 (30 veces más carbono que nitrógeno) permitirá que la digestión se lleve a cabo a un ritmo óptimo, considerando que las otras condiciones sean favorables.

Hay diferentes grupos de bacterias productoras de ácidos y metano, a las activas en la gama más alta se les llama bacterias termofílicas. Con relación al pH, durante la fase inicial ácida, que puede durar 2 semanas, el pH puede bajar a 6 o menos, mientras que se produce una gran cantidad de CO_2 . Conforme prosigue la digestión se produce menos CO_2 y más metano y el pH se eleva lentamente hasta llegar a un valor entre 7 y 8 (básico).

Experimentación con matraces

Para la experimentación con matraces se procedió de la siguiente manera:

- **Recolección de muestras:** Se hizo de dos corrales de cabras localizados dentro de la comunidad del Copal, en Irapuato, Gto. La frescura del excremento fue variable, ya que dentro de los corrales, se encuentra mezclado el recién evacuado con el seco, así como los orines que tienen un alto contenido de nitrógeno. Cada vez que se hacía una experimentación, se recolectaban 4 porciones de estiércol en cada corral, los cuales se mezclaban para formar la materia prima de la experimentación cuidando que fuera fresca y homogénea. De esa manera se obtenía la materia prima para las 8 muestras.
- **Determinación de sólidos totales:** Se introdujeron 4 pequeñas cápsulas de porcelana en una estufa a una temperatura de 100 °C. durante 24 horas para eliminar la humedad contenida en las mismas. En seguida se pasaron a un desecador para secarlas y enfriarlas a temperatura ambiente, posteriormente se transfirieron a la balanza analítica y se pesaron una por una para evaluar la tara. Se agregó la muestra de estiércol a las cápsulas y se introdujeron así en la estufa nuevamente durante 24 horas, al término de las cuales se pesaron obteniéndose los resultados mostrados en Tabla 2.
- **Porcentaje de humedad:** El porcentaje de humedad (Tabla 3) se determinó utilizando la siguiente fórmula: $\text{Porcentaje de humedad} = \frac{\text{Peso Muestra Fresca} - \text{Peso Muestra Seca}}{\text{Peso Muestra Fresca}}(100)$
- **Grado de acidez:** La determinación del pH se hizo mediante una dilución con una relación de 1:5 de excremento de agua en agua destilada y se hicieron las mediciones correspondientes. Los resultados se muestran en la Tabla 4.
- **Rango de temperatura:** Se eligió una temperatura de operación dentro del rango mesofílico para asegurar, de acuerdo a la biblio-

grafía consultada, valores óptimos de eficiencia de producción, economía y tiempo de residencia. Así, las experimentaciones se realizaron a una temperatura promedio de 35 °C, tomando en cuenta otros trabajos publicados en relación a este tema. (Sasse Ludwig, 1984).

- **Concentración:** De acuerdo con las muestras tomadas los resultados de las experimentaciones dan un 47 % de humedad y por lo tanto, el resto un 53 % corresponde a sólidos totales. El pH promedio de las muestras tomadas es de 7,81. En base a estos resultados, se determinó la concentración que se utilizaría en cada uno de los matraces haciendo diversas diluciones para obtener la concentración óptima de 10 % de sólidos. La dilución adecuada fue de 1,0:2,5 para obtener una concentración al 10,6 % de sólidos.

Tabla 2.
Pesos de las muestras de estiércol húmedas y secas.

Muestra No.	Peso Cápsula (g)	Cápsula + Muestra Fresca (g)	Cápsula + Muestra Seca (g)	Peso Muestra Sin Humedad (g)
Muestra Seca 1	81.0640	90.4736	85.7453	4.7283
Muestra Seca 2	66.105	76.6108	71.6743	4.9365
Muestra Fresca 1	64.5327	74.5364	68.8887	5.6477
Muestra Fresca 2	63.0385	73.6713	67.4751	6.1962

Tabla 3.
Resultados de la determinación de Humedad.

Muestra	Desarrollo de la Fórmula	Porcentaje de Humedad en Muestra	Promedios	Humedad
Seca 1	$(9.4096 - 4.7283 / 9.4096)(100)$	49.75 %	51.38 %	47 %
Seca 2	$(10.5058 - 4.9365 / 10.5058)(100)$	53.011 %		
Fresca 1	$(10.0037 - 5.6477 / 10.0037)(100)$	43.543 %	42.63 %	
Fresca 2	$(10.6328 - 6.1962 / 10.6328)(100)$	41.725 %		

Tabla 4.
Determinación de pH

Muestra	Primera Lectura	Segunda Lectura	Promedios	Promedios	Ph
Seca 1	8.09	8.35	8.22	8.17	7.81
Seca 2	8.05	8.22	8.135		
Fresca 1	7.14	7.33	7.235	7.45	
Fresca 2	7.57	7.76	7.665		



Figura 1. Sistema de experimentación con matraces.

A continuación se prepararon dos lotes de tres repeticiones cada uno, utilizando kitazatos de cristal (Figura 1) con una capacidad de 1 litro como depósito de la mezcla agua-excremento. Los kitazatos se introdujeron dentro de una tina con agua calentada por una resistencia a fin de mantener la temperatura apropiada (35 °C- 37 °C) para el crecimiento de las bacterias metanogénicas.

La dilución más adecuada de acuerdo a referen-

Tabla 5. Cuadro de Lotes mostrando las condiciones iniciales.

Lote	Diferencias	Factores Promedios	
1	<i>Se dejaron las bolitas del excremento enteras, y en el codo de un matraz se puso un globo.</i>	Dilución	1:2.5
		Temp.	36 °C
		pH	7.3
		Sólidos	10.6 %
2	<i>Se dejaron la bolitas de excremento enteras, el codo de cada matraz tenía una manguera</i>	Dilución	1:2.5
		Temp.	36 °C
		pH	7.3
		Sólidos	10.6 %

cias bibliográficas y determinaciones de Sólidos Totales, Humedad, pH y relación Carbono/Nitrógeno de 12 (Marchaim U., 1992) fue de una parte de excremento por 2.5 de agua. En el caso de esta experimentación con matraces el volumen del gas producido se detectaba por desplazamiento del volumen del líquido. Las condiciones iniciales de esta experimentación se muestran en la Tabla 5.

Experimentación con el biodigestor

El biodigestor a escala utilizado (Figura 2) presenta las siguientes características:

- Escala adecuada para aplicaciones a nivel laboratorio. Para tal efecto se fabricó con una capacidad volumétrica neta de 9 litros.
- Fabricación en acero inoxidable a fin de evitar la acelerada oxidación y corrosión originada por la naturaleza de los mismos materiales utilizados como materia prima.
- Adaptación de dispositivos y accesorios como los siguientes: tapa con sello hermético, válvula de seguridad y válvula de paso para extracción del biogás.
- Sistema de calentamiento a base de una parrilla eléctrica como fuente de calor, instalada en la parte inferior del biodigestor.
- Instalación de los siguientes instrumentos: termómetro de carátula, manómetro del tipo Bourdon y control de temperatura automático.
- Cubierta exterior.
- Depósito interior para material biológico.
- Agitador manual.
- Orificio de alimentación de agua de calentamiento.
- Orificio para instalación de termómetro.
- Orificio de descarga y toma de muestras.



Fuente: U. de Gto.

Figura 2. Biodigestor a escala de laboratorio.

- Orificio de descarga de agua de calentamiento.

Para las experimentaciones con el biodigestor se procedió de la siguiente manera:

- Se procuró que las características de la materia prima utilizada en el biodigestor fueran similares a la utilizada en la experimentación con matraces.

Preparación de la carga para el biodigestor: Se pesó el estiércol de cabra, utilizándose 1400 gramos en total; de acuerdo con las diluciones anteriores se hizo esta experimentación agregando 3 litros de agua.

- Carga del biodigestor: En seguida se procedió a deshacer las bolitas hasta alcanzar una mezcla homogénea; se tomó lectura del pH 6,5 y en estas condiciones se cargó el biodigestor, el cual se tapó herméticamente.
- Monitoreo de la producción de biogás: Se dejó que las bacterias trabajaran en el proceso anaerobio a una temperatura controlada de 35 °C por medio de la resistencia eléctrica conectada a un termostato que medía la temperatura de la dilución. La producción del biogás se obtuvo a partir del primer día de digestión anaerobia, ésta se detectó con el desplazamiento de la aguja del manómetro ocasionado por el incremento de la presión y por su olor característico en los primeros cinco días. El proceso de digestión anaerobia se mantuvo por espacio de 34 días, durante los cuales se aplicó agitación manual una vez al día.

La influencia de los parámetros involucrados se determinó a través de mediciones de pH cuyo valor disminuyó inicialmente al valor de 6,4, para luego subir y mantenerse en el valor de 7,0. La presión máxima alcanzada en este período fue de 4.5 psi. La tem-

Tabla 6.

Parámetros de operación en el biodigestor.

Parámetro	Unidades	Valor
Estiércol	%	15
Volumen total de líquidos	m ³	9.1
Tiempo de retención	Días	34
Sólidos totales	%	4
Inicio producción de biogás	Días	15
Producción diaria biogás	m ³	1.5
Temperatura ambiente	°C	21.5
Temperatura del digestor	°C	35
Grado de acidez	PH	7

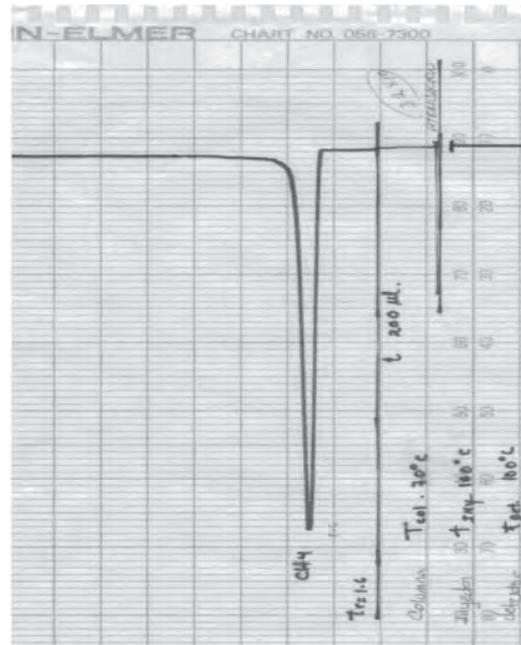


Figura 3. Gráfica típica del metano usado como estándar. (97 % de metano).

peratura se mantuvo a un valor de 35 ± 1 °C. Los parámetros de monitoreo en la presente investigación se muestran en la Tabla 6.

En el caso de la experimentación con el biodigestor el volumen del gas producido se detectaba utilizando una cámara de balón.

Análisis cromatográficos

La cromatografía agrupa un conjunto importante y diverso de métodos, que permite separar componentes estrechamente relacionados en mezclas complejas, lo que en muchas ocasiones resulta imposible por otros medios. En todas las separaciones cromatográficas la muestra se desplaza con una fase móvil que puede ser un gas, un líquido o un fluido supercrítico. En el caso de la experimentación que nos ocupa se utilizó como patrón o estándar metano (Figura 3) proporcionado por PEMEX al 97 % de pureza. En las experimentaciones orientadas a la obtención de biogás mediante el uso del biodigestor a escala de laboratorio se utilizaron también los siguientes equipos y accesorios:

- Cromatógrafo de gases marca Perkin – Elmer, modelo 3920B.
- Fase tamiz molecular 5A.

Tabla 7. Volumen acumulado para el Lote No. 2 de la experimentación con matraces.

	Matraz #1	Matraz #2	Matraz #3	Promedios	
DÍA	VOL(ml)	VOL(ml)	VOL(ml)	VOL(ml)	TEMP °C
1	0	0	0	0	36.0
2	280	300	300	293.33	35.7
3	280	450	280	336.67	35.7
4	280	450	270	333.33	35.7
5	370	510	395	425.00	35.7
6	375	520	500	465.00	39.3
7	410	550	565	508.33	34.7
8	410	550	565	508.33	36.3
9	430	555	625	536.67	37.0
10	430	650	635	571.67	35.0
11	430	740	665	611.67	36.0
12	440	775	730	648.33	35.0
13	440	775	765	660.00	36.2
14	445	790	840	691.67	36.2
15	450	810	910	723.33	36.0
16	450	820	960	743.33	36.0
17	460	830	990	760.00	36.3
18	460	830	1000	763.33	36.0
19	460	840	1000	766.67	36.0
20	465	840	1015	773.33	36.0
21	470	840	970	760.00	37.0
22	470	840	950	753.33	36.7
23	470	840	920	743.33	36.0
24	475	840	940	751.67	36.0
25	480	835	935	750.00	36.0
26	480	835	935	750.00	36.0
27	490	830	930	750.00	36.0
28	490	820	930	746.67	36.0
29	490	820	940	750.00	36.0
30	495	820	940	751.67	36.0
31	510	830	950	763.33	36.0
32	510	835	960	768.33	36.0
33	520	840	970	776.67	36.0
34	540	860	980	793.33	36.0
35	540	860	990	796.67	36.0
36	540	860	990	796.67	36.0

- Indicadores de pH marca Merck.
- Recipientes sellados para muestreo de biogás.
- Báscula de precisión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la experimentación con matraces

De acuerdo a los objetivos planeados, ha sido posible obtener biogás utilizando estiércol de cabras así como determinar la producción diaria de biogás a nivel laboratorio mediante un control adecuado de las variables involucradas durante el proceso de la digestión anaerobia. En la Tabla 7 y en las Figuras 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos en las experimentaciones para el Lote 2 con matraces; en el caso del Lote 1 la producción de biogás es similar como se puede observar en la Figura 6. Se observa también que cuando la temperatura aumenta y el pH de la mezcla se mantiene constante la producción de gas tiende a aumentar.

Resultados con biodigestor a escala

En el caso de la experimentación (Tabla 8 y Figuras 7 y 8) con el biodigestor a escala de laboratorio, la producción de biogás se puso de manifiesto por el incremento de la presión en los primeros cinco días y por su olor característico. Después se mantuvo relativamente constante así como la temperatura y el pH. Para evaluar la producción de biogás obtenido durante el proceso de biodigestión anaerobia, se tomaron varias muestras las cuales se inyectaron al Cromatógrafo de gases. En las Figuras 9, 10 y 11, se muestran los cromatogramas obtenidos los días séptimo, decimocuarto y vigésimo primero posteriores al inicio de la experimentación.



Figura 4. Temperatura vs Volumen promedio de Biogás. Segundo lote.

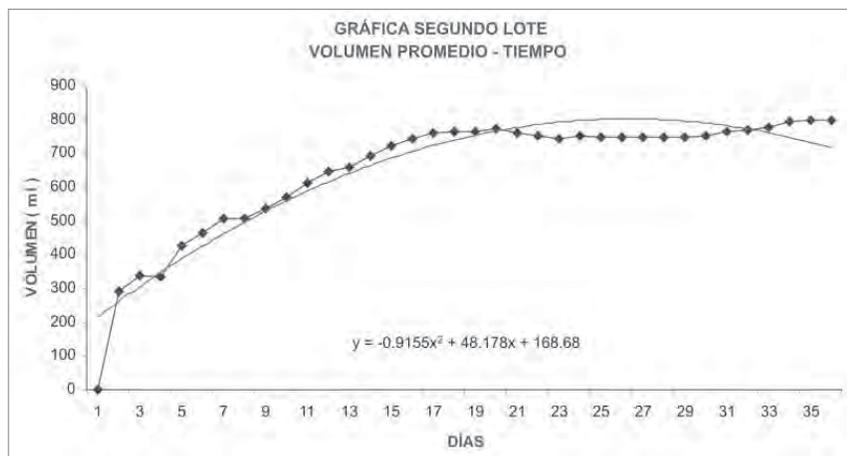


Figura 5. Volumen promedio de biogás vs Tiempo de retención. Segundo lote.

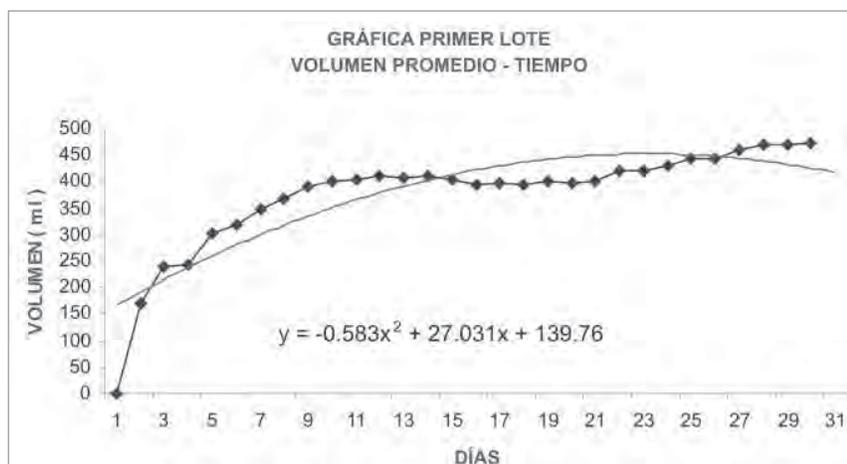


Figura 6. Volumen promedio de biogás vs Tiempo de retención. Primer lote.

Es de notar que tanto en las experimentaciones realizadas con matraces, como con el biodigestor, el objetivo principal fue el de obtener la producción de metano controlando las variables básicas como lo son el pH y la temperatura. Para evaluar el efecto de otras variables como la concentración de sólidos utilizada en ambos casos o los volúmenes de los gases producidos, será necesario realizar otras experimentaciones donde se involucren equipos adicionales y accesorios, como por ejemplo un gasómetro así como la instrumentación y control de estos.

Evaluación de lecturas obtenidas en cromatógrafo.

La evaluación aproximada de la cantidad de metano contenido en el biogás, se llevó a efecto por comparación entre los picos obtenidos de las muestras con el pico obtenido para el patrón o estándar, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 9.

Estos valores se obtuvieron como una medida del área bajo el pico mayor de la cromatografía del gas utilizado como patrón (metano al 97 % de pureza) y las áreas por debajo de los picos más pequeños (muestra de biogás en diferentes días) y deduciendo la concentración de éstos más pequeños estableciendo una relación proporcional.

De acuerdo con el análisis de las muestras de biogás en el cromatógrafo de gases, la cantidad de metano que se tiene en los primeros siete días es de 21,83 %, a los catorce días tiene un 30,19 % y se tomó una última muestra a los veintiún días la cual mostraba un contenido del 62,71 % de metano; se utilizó como referencia gas metano al 97 %

Tabla 8.
Datos y variable de respuesta. (Experimentación con el biodigestor)

Día	Temp (°c)	Ph	Presión (Psi)	Presión Acumulada	% Ch4
1	35	6.5	1.25	1.25	
2	35	7.0	2.5	3.75	
3	35.5	7.5	3.5	7.25	
4	35.5	7.5	5.0	12.25	
5	35.5	7.5	4.5	16.75	
6	35.5	7.0	2.5	19.25	
7	36	7.0	1.5	20.75	22
8	36	7.0	1.5	22.25	
9	35	7.0	1.5	23.75	
10	35	7.0	1.5	25.25	
11	35	7.0	1.5	26.75	
12	36	7.0	1.5	28.25	
13	36	7.0	2.0	30.25	
14	36	7.0	2.0	32.25	30
15	36	7.0	2.0	34.25	
16	36	7.0	2.0	36.25	
17	36	7.0	2.0	38.25	
18	36	7.0	2.0	40.25	
19	36	7.0	2.0	42.25	
20	36	7.0	2.0	44.25	
21	36	7.0	2.0	46.25	61
22	36	7.0	2.0	48.25	
23	36	7.0	2.0	50.25	
24	36	7.0	2.0	52.25	
25	36	7.0	2.0	54.25	
26	36	7.0	2.0	56.25	
27	36	7.0	2.0	58.25	
28	36	7.0	2.0	60.25	
29	36	7.0	2.0	62.25	
30	36	7.0	1.5	63.75	
31	36	7.0	1.5	65.25	
32	36	7.0	1.5	66.75	
33	36	7.0	1.5	68.25	
34	36	7.0	1.5	69.75	

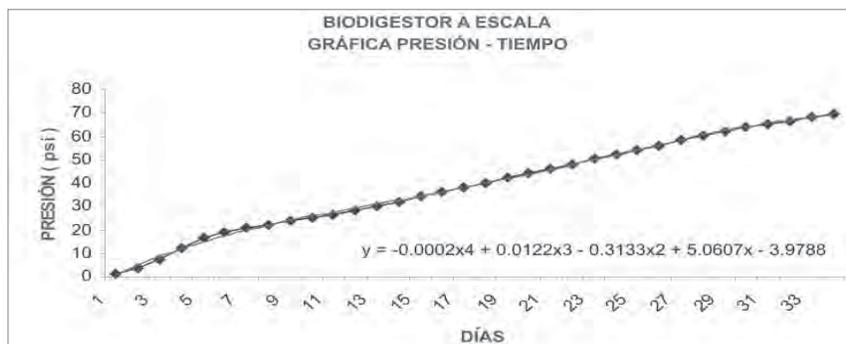


Figura 7. Presión dentro del biodigestor vs Tiempo de retención.

de pureza, esto indica que el proceso de biodigestión y el control de los parámetros involucrados tuvo un alto grado de eficiencia.

Se pudo comprobar que el gas generado dentro del biodigestor a escala es un gas flamable (Figura 12) y con olor característico de la mezcla del biogás. Por último, en la Figura 13 se presenta una de las fotografías tomadas al biodigestor en el momento en que se muestra una flama encendida para verificar la producción del metano contenido en el biogás, producto final de la digestión anaerobia del estiércol de cabra. El biodigestor utilizado en las experimentaciones descritas, diseñado y fabricado en la Universidad de Guanajuato, se ha comportado como un equipo confiable y seguro para efectuar pruebas de investigación y/o docencia en relación al proceso de digestión anaerobia.

CONCLUSIONES

- Por el momento se han identificado dos posibles variables de respuesta: la presión y la cantidad de metano producido.

- Tanto a nivel laboratorio con los matraces como en la experimentación con el biodigestor a escala, se obtuvieron mejores resultados en cuanto a la cantidad de biogás generado cuando se agitaba la mezcla dentro del biodigestor, o experimento montado.

- En base a las experimentaciones realizadas, se ha comprobado la necesidad de acoplar un gasómetro que permita tomar lecturas directamente del biodigestor, por lo tanto, habrá que diseñarlo y fabricarlo.

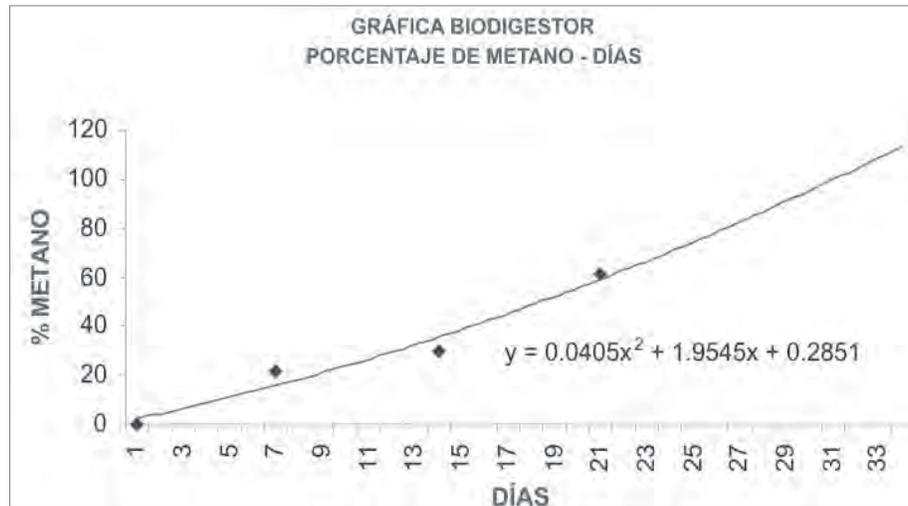


Figura 8. Porcentaje de metano contenido en el biogás vs Tiempo de retención.

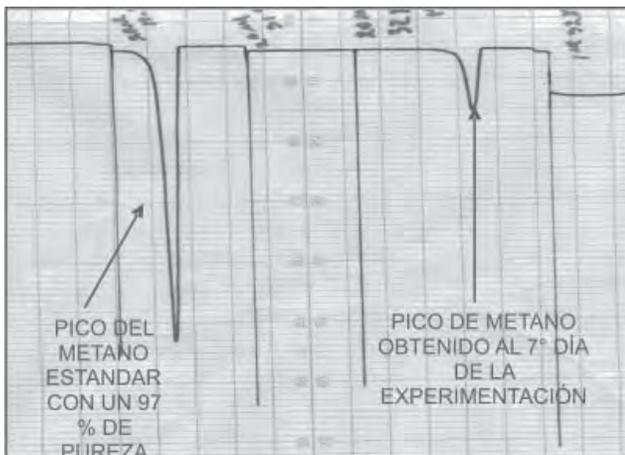


Figura 9. Cromatografía obtenida el día 7º de la experimentación.



Figura 10. Cromatografía obtenida el día 14º de la experimentación.

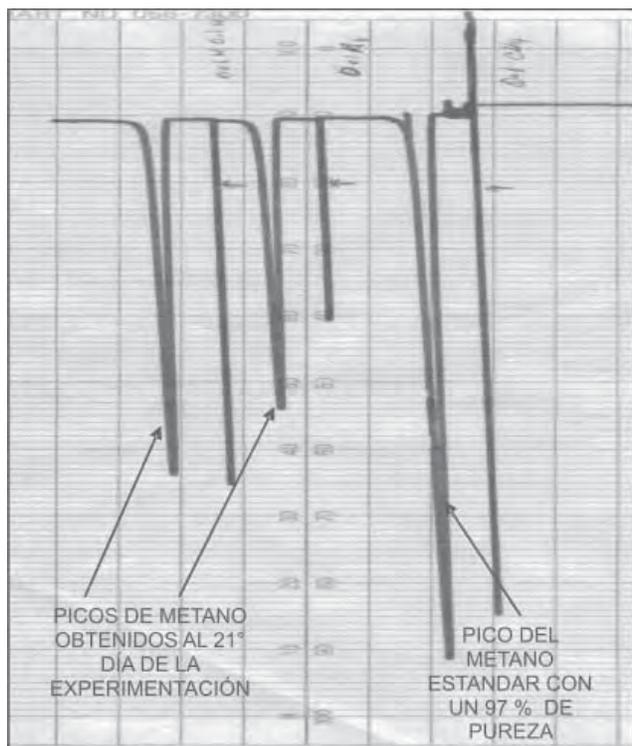


Figura 11. Cromatografía obtenida el día 21^{avo} de la experimentación.

Tabla 9.
Resultados de los análisis cromatográficos

De la cromatografía obtenida el día	Contenido de metano
7 ^o de la experimentación	21.83 %
14 ^{avo} de la experimentación	30.19 %
21 ^{avo} de la experimentación	62.71 %

REFERENCIAS

- Barrer H. A. (1956). Bacterial Fermentations. John Wiley & Sons, New York.
- Brakel, J. 1980. Small-Scale Anaerobic Digesters (Biogas Plants): A Critical Review of the Pre-1970 Literature Softback, Ex-Library. Delft University Press.
- Hiler Edward A., Stout Bill A. Biomass Energy. A Monograph. 1985. Texas A&M University Press. College Station.
- Hohlfeld J, Sasse L. (1986). Production and utilization of biogas in rural areas of industrialized and developing countries. GTZ. Eschborn, Alemania.
- Marchaim U. (1992). Biogas Processes for Sustainable Development. Bull F A O Agric Services, Rome. Italy.
- Maycock, P. (2004). Photovoltaic thecnology, perfomance, cost and market forecast. PV Energy systems, Casanova.
- Mc Cabe J., Eckenfelder W. (1957). Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes. New York. Reinhold Publishing.
- Meynell, P.J. (1976). Methane: Planning a Digester. New York: Schocken Books.
- Noack W., Biogas. (1955). Der Landwirtschafte, Elsner, Dormstadt.



Figura 12. Prueba de combustión del metano.



Figura 13. Una pequeña flama controlada producida por el metano.

- Orozco, A. (1989). Manual sobre Digestión Anaerobia. Presentado en "Seminario Internacional sobre Digestión Anaeróbica - Elementos de Diseño". Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Sasse Ludwig. (1984). La Planta de Biogás. Bosquejo y detalle de plantas Sencilas. Deutsches Centrum für Entwicklungstechnologian Gate.
- Stafford A. D. Hawkes L. D. (1980). Methane Production From Waste Organic Matter. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.