ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN DIGESTOR PARA TRATAR LOS RESIDUOS DE BOVINOS Y APROVECHAR EL BIOGÁS

Technical and economic analysis of a digester to treat cattle manure and harness the biogas

Everardo Vergara Angel [1]
Constantino Gutiérrez Palacios [2]

Circuito exterior, Ciudad Universitaria UNAM, Distrito Federal, Código Postal 04510, México, Tel.: 5622-3020 Fax.: 5622-3000. e-mail: vergara_a23@yahoo.com.mx, gupc@unam.mx

ABSTRACT

This work included the design of a digester for treating manure from cattle and generates biogas considering as a case study the "Centro de Ensenanza Practica e Investigacion en Production y Salud Animal" (CEPIPSA) that belongs to Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
Was done an investigation of the production and classification of the manure, generation was obtained average 2,377 kg/day of manure with total solids 22%, volatile total solids 76%, ph 8.01 and volumetric weight 830 kg/m^3. Were loaded with manure 3 plug-flow digesters at psychrophilic conditions to make tests of the biogas production, the digester 3 was operated with initial conditions of inoculum exhibit better efficiency of operation unlike the others. In this order was taken the decision of using the organic loading rate of digester 3 to design the biogas generation at CEPIPSA. But was calculated an increase of the organic loading rate because laboratory tests were carried psychrophilic conditions and the proposed design operating temperature would mesophilic. With a hydraulic retention time of 26 days and according o the literature, was the production rate of 0.51 m3 biogas/m3 reactor-days. Under these circumstances intended to generate 115 m3/day of biogas that can completely cover the gas LP of CEPIPSA, while excess biogas can be used to generate 108 kWh / day of electricity. The proposed plant anaerobic degradation would be worth cost capital approximately $ 508.259 pesos the investment will be recouped in eight years. The study reveals that a small farm using a plug flow digester produces enough biogas to meet most of the energy needs of the farm, is economically feasible, reduce: odors, greenhouse gases and pollution water

Keywords: Biogas, Cattle manure, Digester, Livestock

[1] Departamento de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UNAM. Obtuvo el título de Ingeniería Ambiental en el ITESO de Guadalajara y Maestro en Ingeniería Ambiental en la UNAM. Ha trabajado en la industria plástica, y automotriz como asesor y responsable a los aspectos ambientales. Su último trabajo fue como ingeniero de campo en la elaboración de plan de manejo de residuos peligrosos en las refinerías de PEMEX. e-mail: vergara_a23@yahoo.com.mx

[2] Departamento de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UNAM. Circuito exterior, Ciudad Universitaria, Código Postal 04510, México, D.F.

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN DIGESTOR PARA TRATAR LOS RESIDUOS DE BOVINOS Y APROVECHAR EL BIOGÁS

Resumen

El presente trabajo consistió en el diseño de un digestor para tratar el estiércol de bovinos y aprovechar el biogás generado, considerando como caso de estudio el Centro de Enseñanza Práctica e Investigación en Producción y Salud Animal (CEPIPSA) de la Universidad Nacional Autónoma de México.
Se realizó un estudio de generación y caracterización del estiércol, se obtuvo una generación de 2,377 kg/día de estiércol con una concentración de sólidos totales de 22%, sólidos totales volátiles del 76%, pH de 8.01 y peso volumétrico de 830 kg/m^3. Se alimentaron tres digestores de flujo pistón en condiciones psicrófilas para hacer pruebas de producción de biogás. El digestor 3 que operó con condiciones iniciales de inóculo presentó la mejor eficiencia. Se decidió utilizar la carga orgánica volumétrica del digestor 3 como referencia para el diseño, pero se calculó un aumento en la carga orgánica ya que se propuso operar la planta de degradación anaerobia (DA) a 35 °C, con un tiempo de retención hidráulico de 26 días. Con base éstos parámetros de operación y de acuerdo a la literatura consultada, resultó la tasa de producción de biogás de 0.51 m3 biogás/m3 reactor-día Bajo estas circunstancias se planeó generar 115 m3/día de biogás capaz de cubrir completamente la demanda de gas LP de CEPIPSA, mientras que el excedente de biogás se puede usar para generar 108 kWh/día de energía eléctrica. El proyecto de la planta tendría un valor aproximado de costo de capital de $508,259 pesos con un periodo de recuperación de ocho años.
El estudio revela que una pequeña granja usando un digestor flujo pistón es factible técnica, económica y ambientalmente reduce: los malos olores, contaminación del agua y gases de efecto invernadero.

Palabras Clave: Biogás, Degradación anaerobia, Digestor, Estiércol, Ganadería

Introducción

Una gestión integral de los residuos del sector ganadero es importante para favorecer una sustentabilidad de las granjas, de lo contrario existen impactos ambientales adversos que a lo largo del tiempo pueden poner en riesgo o desventaja la operación de las granjas. La gestión de los residuos de la ganadería en México, en particular el estiércol del ganado, se ha limitado casi exclusivamente a aplicarlos y disponerlos de manera directa en los terrenos de cultivo (Capulin *et al*., 2001) aprovechando su contenido de nutrientes, como nitrógeno y fósforo. Esta práctica, aunque es útil para los campesinos, es limitada considerando el potencial energético de este tipo de residuos, y la enorme generación de este tipo de residuos. Se estima que en el año 2011 en México se generaron 72 millones de toneladas de residuos de estiércol vacuno, ya que para ese año se tuvo una población de 32, 936,334 cabezas de bovinos (SIACON, 2011).
El agua residual de las actividades ganaderas puede contaminar los cursos de agua, producir hedores y liberación de metano, el cual es un gas de efecto invernadero 21 veces mayor que el dióxido de carbono en el potencial de calentamiento global. Cuando se aprovecha adecuadamente el agua residual en el digestor, los residuos ganaderos pueden ser transformados en beneficios económicos y ambientales. En México no se cuenta con suficiente investigación acerca del aprovechamiento de los residuos de la ganadería para la producción de energía eléctrica. Asimismo se tiene información muy limitada relativa a digestores de bajo costo como medio de tratamiento de los residuos. Por ello se hace necesaria una investigación al respecto.

Objetivo general

Diseñar conceptualmente un sistema de tratamiento anaerobio de estiércol de ganado vacuno para aprovechamiento del biogás, considerando los datos de producción y composición de esos residuos generados en el Centro de Enseñanza, Práctica e Investigación en Producción y Salud Animal (CEPIPSA) de la Facultad de Medicina y Veterinaria y Zootecnia de la UNAM

Metodología y actividades desarrolladas

Para abordar el diseño de tratamiento anaerobio de estiércol de ganado vacuno se siguieron las actividades que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Metodología general

Actividad	Se obtuvo
1. Se cuantificaron y caracterizaron únicamente los residuos de ganado vacuno generados en las instalaciones de CEPIPSA	• Las condiciones del manejo de estiércol en el centro • La cantidad de residuos disponibles • Las características del estiércol
2. Se construyó y configuro el reactor	• El reactor donde se llevó a cabo la degradación anaerobia (DA) • Los instrumentos para medir la generación de biogás, las características del influente y efluente
3. Se arrancó y operó el reactor por lotes	• El arranque del reactor • El tiempo de retención hidráulica • La composición de biogás
4. Se operó el reactor a flujo semicontinuo	• La estabilización del reactor • La tasa de producción de biogás (m^3 biogás/m^3 reactor*día) y producción especifica de biogás (m^3 biogás/kg sustrato alimentado *día)
5. Se desarrolló la ingeniería conceptual y financiera	• Los cálculos para posible escalamiento del reactor e infraestructura requerida
6. Se desarrolló la ingeniería financiera	• El análisis costo-beneficio de la propuesta

Descripción de las actividades desarrolladas

1.- Para el estudio de generación de residuos se adaptó de la NMX-AA-61-1985 (SECOFI, 1985). No se aplicó un método de muestreo ya que se pesaron todos los residuos generados en cada corral de ganado bovino durante una semana. El primer día del estudio se hizo la "operación limpieza" que consistió en recoger los residuos generados y acumulados antes de ese día, esto sirve para asegurar que el residuo generado corresponda a un día. Para homogenizar los residuos generados por el ganado, los animales se clasificaron con base a una Unidad de Animal Equivalente (UAE) (Deublein y Steinhauser, 2008).
Se colectaron muestras de estiércol fresco de los corrales de ganado vacuno, las muestras fueron mezcladas y homogenizadas para obtener una muestra compuesta. Los parámetros analizados fueron: pH, peso volumétrico, sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV) y sólidos totales fijos (STF). Los análisis de estos parámetros se hicieron por duplicado durante siete días en dos etapas (la 1ra etapa en el arranque de los reactores, y la 2da etapa en la alimentación semi-continua de los digestores). Estos análisis se hicieron con los métodos correspondientes y estandarizados (SECOFI, 1984; SECOFI, 1985; APHA, 1995).
2.- Se utilizaron tres reactores anaerobios de flujo pistón diseñados siguiendo la norma 366 (NRCS, 2009). Las características del reactor son un volumen total de 4.5 L con un volumen de operación de 3.75 L (Figura 1 a), sin agitación. La medición del biogás se hizo mediante el desplazamiento de agua líquida a través de una probeta invertida graduada de 1 L mostrado en la Figura 1 b.

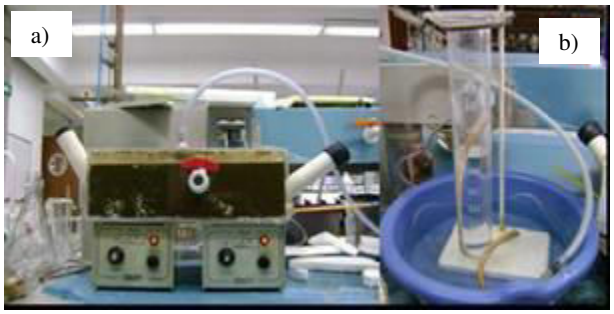

Figura 1: Imagen del sistema experimental. (a) Vista del reactor flujo pistón; (b) medidor de biogás

Para la composición de biogás se hizo de dos formas: 1) Medición aproximada del CO_2 en el biogás, que consistió en pasar muestras de biogás en una solución de hidróxido de potasio (KOH). La solución alcalina absorbe el CO_2 y por diferencia de volúmenes se obtuvo el porcentaje de CO_2. 2) Prueba de inflamabilidad: se colocó una fuente de ignición para observar si encendía el biogás así como su nivel de inflamabilidad. En el plan analítico los parámetros analizados en los reactores anaerobios fueron: temperatura, pH, conductividad, ST, STV, STF, Demanda Química de Oxígeno (DQO), alcalinidad y generación de biogás de acuerdo a las técnicas de APHA (1995), a excepción de los métodos que se especifiquen diferente.

3.- En el arranque de los tres digestores se alimentó con estiércol de vaca previamente cortado y diluido con agua hasta alcanzar entre 12% y 14% de sólidos totales (ST). De los tres digestores dos no utilizaron inóculo. El tercer digestor se mezcló con inóculo proveniente de un reactor anaerobio mesofiílico alimentado con estiércol porcino. Los digestores operaron a temperatura ambiente del laboratorio de posgrado de la facultad de ingeniería (entre 19 a 20 °C). Se graficó el biogás acumulado respecto al tiempo durante 49 días y terminó esta prueba cuando descendió la generación de biogás. El tiempo de retención hidráulico (TRH) óptimo es un punto máximo en la curva de producción de biogás posterior al cual la producción de biogás desciende.

4.- Una vez obtenido el TRH se alimentó cada semana los digestores con una carga orgánica volumétrica entre 1.52 y 1.60 kg STV/m^3•día, con el propósito de estabilizarlos, obtener la producción específica de biogás (m^3 biogás/kg sustrato alimentado) y tasa de producción de biogás (m^3 biogás/m^3 reactor•día). Se registró la producción diaria de biogás por un periodo de 139 días y con los datos de carga orgánica volumétrica se calculó la producción específica de biogás y tasa de producción de biogás. Con los valores de influente y efluente de los digestores se analizó la diferencia en sólidos, DQO conductividad y alcalinidad.

5.- Se utilizaron los resultados de características del estiércol y tasa de producción de biogás para hacer el escalamiento de la planta de DA. Para elegir el tipo de digestor propuesto se tomó en cuenta la forma de recolección del estiércol, aspectos técnicos y económicos según el tipo de digestor. El digestor se diseñó en función de la carga orgánica volumétrica (COv). Como se planea aprovechar el biogás en un cogenerador y la energía térmica serviría para mantener la temperatura mesofílica en el digestor, se calculó un aumento de la COv obtenida en el laboratorio, con base en la ecuación de van´t Hoff-Arrhenius. Esta relación se muestra en la ecuación 1 (Safley, 1990):

$$CO_{v2} = CO_{V1} e^{\left(\frac{E(T_2 - T_1)}{RT_1T_2}\right)} \qquad \text{ecuación (1)}$$

donde:

COv_1, COv_2 = carga orgánica volumétrica a T_1, T_2; T_1, T_2, = temperatura (K)
E = constante de energía de activación (cal/mol); R = constante de gases ideales (1.987 cal /° K mol).

6.- Se llevó a cabo la evaluación de inversión del proyecto propuesto. Las herramientas de evaluación fueron el cálculo del valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), relación beneficio-costo y periodo de recuperación de la inversión. Los gastos fueron: el costo de capital, costos de operación y depreciación, aunque cabe mencionar que los precios se estimaron a grandes rasgos. Los ingresos económicos fueron: el ingreso generado por el ahorro de energía eléctrica y sustituir el gas LP por biogás.

Resultados obtenidos

Se contó en promedio 76 unidades de animal equivalente, los cuales permanecen todo el tiempo en los corrales, generando en promedio 2,377 kg/día de estiércol. El centro limpia los corrales del ganado mediante la pala del tractor y equipos manuales que depositan los residuos en un estercolero sin impermeabilizar. Las características del estiércol son 22% de ST, 76% de STV, pH de 8.01 y peso volumétrico de 830 kg/m^3, aunque estos valores son influenciados por el sistema de recolección y clima del lugar, (Figuras 2a, 2b y 2c). La generación y composición del estiércol es similar en cantidad y composición a las granjas de EE. UU. (ASAE, 2005; NC State University, 1994) en especial cuando se tiene el sistema de recolección por raspado.

Figura 2: Manejo del estiércol. (a) Recolección con tractor; estercolero en temporada de (b) estiaje y (c) lluvia

El comportamiento del pH en función del tiempo en los tres reactores se muestra en la Figura 3, se observa que disminuyó rápidamente al inicio de cada experimento por que la fracción fácilmente digerible de la materia orgánica se hidrolizó y convirtió en ácidos grasos. Para evitar la acidificación, el día 31 en los digestores 1 y 2 se agregó una sola vez $NaHCO_3$. El digestor 3 no requirió de $NaHCO_3$ porque tuvo mayores microorganismos metanogénicos al usar inoculo en su arranque, capaces de formar metano a partir de los productos de la acidogénesis. Después del ajuste con bicarbonato de sodio, el pH comenzó a aumentar gradualmente a medida que los ácidos grasos se transformaron a metano.

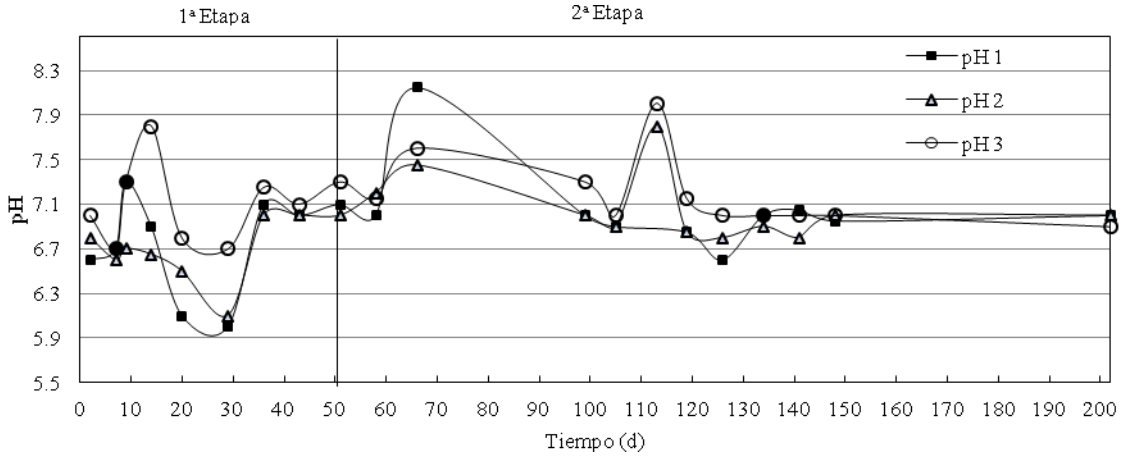

Figura 3: Comportamiento de pH en los tres digestores

El digestor 3 operó bajo las mejores condiciones, tuvo menor fluctuación de temperatura comparado con los otros dos digestores y utilizó lodos provenientes de un digestor porcino como inóculo en su arranque. En la figura 4 se muestra la cantidad de biogás acumulado en los 49 días que duró la primera etapa de los tres reactores. Se observa que hubo una tendencia a la baja desde el día 44 en el reactor 3. Mientras que en el digestor 1 y 2 continuó aumentando las gráficas de biogás acumulado, es decir todavía no alcanzaban el tiempo máximo de retención.

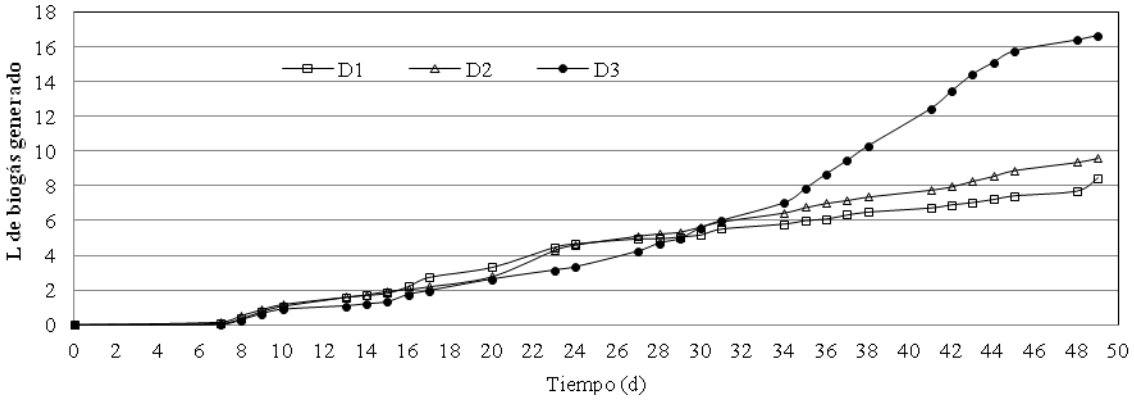

Figura 4: Producción de biogás en los tres digestores

Como es conocido la actividad metanogénica depende en gran medida de la temperatura, según se muestra en la Figura 5 de producción de biogás del digestor 3.

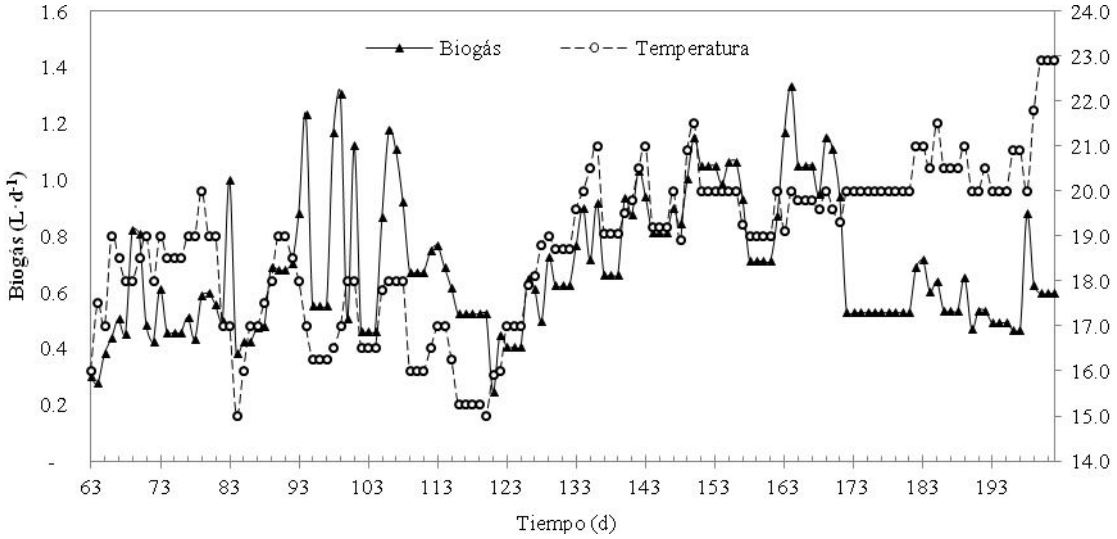

Figura 5: Producción de biogás diario y temperatura en el digestor 3

En la etapa estable los digestores D1, D2 y D3 presentaron una producción de biogás promedio de 0.53 ± 0.21 L/d, 0.47 ± 0.15 L/d y 0.70 ± 0.17 L/d, respectivamente. La mayor producción especifica de biogás fue 0.119 m^3 biogás TPN/kg $STV_{alimentado}$, 20.69 m^3 biogás/t sustrato y tasa de producción de biogás de 0.190 m^3 biogás TPN/m^3 digestor-día; estos valores se presentaron en el D3 atribuible a una mayor población microbiana debido al uso de inóculo en el arranque.

El material orgánico disminuyó durante la degradación anaerobia causado por la transformación de sólidos volátiles biodegradables a biogás. Se observó un aumento en la conductividad asociada al incremento de la alcalinidad. En la etapa estable los valores promedio de la segunda etapa de régimen semicontinuo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Caracterización química del sustrato antes y después de la digestión

	Antes del digestor	Después del digestor 1	Después del digestor 2	Después del digestor 3
DQO (g/L)	34.0 ± 12.3	24.7± 6.5	25.8 ± 7.2	19.4 ± 5.3
ST (g/L)	69.6 ± 31.2	62.1 ± 3.0	65.6 ± 6.2	63.0± 2.4
Conductividad (mS/cm)	3.3 ± 0.99	5.6 ± 0.60	6.2 ± 0.67	5.5 ± 0.55

Se emplearon los resultados del digestor 3 para hacer la propuesta de uso del biogás a energía térmica y eléctrica en CEPIPSA, considerando los parámetros de diseño siguientes: 1) Digestor a flujo pistón de membrana bajo tierra, 2) Temperatura de operación 35 °C, 3) TRH de 26 días, y 4) Carga orgánica de 3.22 kg STV/m^3. Para la producción de biogás se utilizó el modelo cinético presentado por Hashimoto (1982), presentado en la ecuación 2:

$$\gamma_v = (B_o\ CO_{v2})\left(1 - \frac{K}{\mu_m \mathrm{TRH} - 1 + K}\right) \qquad \text{ecuación (2)}$$

donde:

γ_V = es la tasa de producción de metano (m^3 CH_4/m^3 reactor•día); K = parámetro cinético adimensional
B_o = rendimiento último de metano (m^3 CH_4/kg SV alimentado) cuando el TRH tiende a infinito
S_o = concentración en el influente de SV (kg/m^3); TRH= tiempo de retención hidráulico (días)
μ_m = máxima tasa de crecimiento especifica de microorganismos (día^{-1})

Sustituyendo los valores en la ecuación 2 se tendría una producción de biogás de 0.509 m^3 biogás TPN/m^3 digestor-día, que multiplicado por el volumen de 226 m^3, que representan el volumen de dos digestores, la producción de biogás diaria resultaría 115 m^3/día. Las dimensiones de la planta de DA se obtuvieron tomando como referencia los autores Deublein y Steinhauser (2008) y DGS (2004), resultando las capacidades siguientes: tanque de mezclado de 17 m^3, 2 digestores de 141 m^3 cada uno al 80% de volumen útil, un tanque de lodo digerido de 60 m^3 y tres gasómetros de baja presión con un volumen total de 185 m^3. El método sugerido de remoción de humedad es por condensación en la tubería equipado con trampas de condensado en su punto más bajo. Para la remoción de ácido sulfhídrico (H_2S) se propone virutas de óxido de hierro que oxidan el H_2S a sulfuro de hierro.
Del biogás producido diariamente, 37 m^3 se utilizarían para sustituir la demanda de gas LP en la granja, los 78 m^3 de biogás restantes se utilizarían para el cogenerador de 14 kWh que cuenta con sistema de recuperación de calor a través de enchaquetado con agua y del escape de gas. Las tecnologías de energía renovables son caracterizadas por altos costos de capital, por lo tanto para aplicaciones en pequeñas y medianas granjas, lo económico y la simplicidad de las operaciones son usualmente los aspectos más importantes (Macias, 2007). En la tabla 3 se presentan los datos considerados en la realización de evaluación de inversión del proyecto planteado. Los criterios de aceptación o rechazo de la inversión del proyecto mostraron un VPN de $ 122,290 que es mayor a cero, la TIR de 12% siendo mayor que el 7% de la TREMA, la relación beneficio-costo de 1.2 que es mayor que 1 y el periodo de recuperación de la inversión en 8 años está dentro de la vida económica del proyecto que son 10 años.

Tabla 3: Datos básicos para evaluación económica

Concepto	Valor	Concepto	Valor
Inversión inicial	$ 508,259	Consumo promedio de gas LP (L/año)	10,344.00
Costos de operación y mantenimiento /año; aumento anual 5%	$ 60,000	Periodo del proyecto (años)	10
Tarifa gas LP ($/L); aumento anual 5%	$ 6.45	Valor de rescate	5%
Tarifa eléctrica; aumento anual 2% ($/kWh)	$ 2.13	Depreciación	Lineal
Producción energía eléctrica a partir del biogás(kWh/año)	39,303	Tasa de rendimiento mínimo aceptable (TREMA)	7%

Conclusiones

A partir del estudio de generación y caracterización de ganado bovino se obtuvo: que las características del estiércol son 22% de ST, 76% de STV, pH de 8.01 y peso volumétrico de 830 kg/m^3. La generación y composición del estiércol es similar en cantidad y composición a las granjas de EE. UU. cuando se tienen el mismo sistema de recolección de raspado. De las pruebas de biodegradabilidad y producción de biogás del estiércol bovino, se operaron tres digestores de flujo pistón a escala laboratorio, uno de ellos (D3) utilizó inoculo en su arranque, los otros dos (D1 y D2) se mezclaron solamente con agua potable, bajo condiciones de temperatura ambiente de laboratorio. De lo cual se puede concluir: a) Cuando no se utiliza inóculo en el arranque de los digestores se requiere productos químicos para elevar el pH y evitar la acidificación de los digestores; b) En la etapa estable con una carga de 1.52 kg STV/m^3.d en D1, 1.60 kg STV/m^3.d en D2 y 1.55 kg STV/m^3.d en D3 con un TRH de 36 días y temperatura promedio de 19°C, se presentó una producción de biogás en D1, D2 y D3 de 0.089 m^3 biogás TPN/kg $STV_{alimentado}$, 0.077 m^3 biogás TPN/kg $STV_{alimentado}$ y 0.119 m^3 biogás TPN/kg $STV_{alimentado}$ respectivamente.
En la parte técnico-económico se propone: aprovechar el biogás en un cogenerador de 14 kW que utilice el calor recuperado para calentar el sustrato y mantener la temperatura del digestor a 35 °C. Se calculó un aumento en la carga orgánica volumétrica con base a la ecuación de Arrhenius y usando el modelo cinético de Hashimoto (1982) se obtiene la tasa de producción de biogás de 0.509 m^3 biogás TPN/m^3 reactor-día, alcanzando una producción de biogás de 115 m^3/día. El biogás producido es capaz de sustituir el gas LP consumido en CEPIPSA al 100%, y cubrir 49% de la energía eléctrica que demanda la granja. De acuerdo al objetivo planteado en este trabajo se concluye que el diseño y operación de un sistema de DA para tratar el estiércol de ganado vacuno y aprovechar el biogás es completamente factible técnico, económico y ambientalmente para una pequeña a mediana granja como CEPIPSA.

Agradecimientos a la UNAM, CONACYT, a la Dra. Alejandra Castro González y M. Constantino Gutiérrez Palacios por su apoyo y asesoría.

Referencias

APHA (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.* 19th ed., Washington, DC. EE. UU.

ASAE (2005). Standard ASAE D384.2 Manure Production and Characteristics. Publicado en *American Society of Agricultural Engineers*. EE. UU.

Capulin, J., Núñez, R., Etchevers, J., Baca, G. (2001). Evaluación del extracto líquido de estiércol bovino como insumo de nutrición vegetal en hidroponía, *Agrociencia,* **35**(3), 287-299.

Deublein, D., Steinhauser A. (2008). Biogas from Waste and Renewable Resources An Introduction. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Deutsche Gesellschaft fur Sonnenenergie (DGS) (2004). Planning and Installing Bioenergy Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers. Earthscan Canada.

Hashimoto, A. G. (1982). Methane from Cattle Waste: Effects of Temperature, Hydraulic Retention Time, and Influent Substrate Concentration on Kinetic Parameter, *Biotechnology and Bioengineering*, **24**(9), 2039-2052.

Macias Corral, M. A. (2007). Biogas Production Via Anaerobic Digestion of High-Solids Livestock Manure. Thesis Doctor of Philosophy. Las Cruces, New Mexico: New Mexico State University

NC State University. (1994). Dairy Paved Surface Scraped Manure Characteristics. Publicado en North Carolina State University. EE. UU.

NRCS (2009) Conservation Practice Standard Anaerobic Digester Code 366. Publicado en Natural Resources Conservation Service. EE. UU.

Safley, L. M., y Westerman, P.W. (1990). Psychrophilic Anaerobic Digestion of Animal Manure: Proposed Design Methodology, *Biological Wastes*, **34**(2), 113-148.

SECOFI (1984) NMX-AA-25-1984 Determinación del pH-Método Potenciométrico. Publicación de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.

SECOFI (1985) Relación de Normas Oficiales Mexicanas Aprobadas por el Comité de Protección al Ambiente. Contaminación del Suelo. Publicación de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.

SIACON (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta) (2011). Publicación de la Secretaría de Agricultura, ganadería, desarrollo rural pesca y alimentación. México.