

Evaluación de la generación de metano y la estabilidad del proceso de codigestión de lodos residuales y fracción orgánica provenientes de un centro comercial

LAGUNES-PAREDES, Yolanda*†, MONTES-CARMONA, Ma. Estela, VÁSQUEZ-MÁRQUEZ, Alejandra y CÁRDENAS-GUEVARA, Gabriela Estrella

Recibido Julio 20, 2016; Septiembre 26, 2016

Resumen

La digestión anaerobia es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno, lo que a su vez genera diversos gases, entre los cuales el dióxido de carbono y el metano son los más abundantes. La intensidad y duración del proceso anaerobio varían dependiendo de diversos factores: la temperatura y el pH del sustrato biodegradado. En este trabajo de investigación se evaluó un sistema de codigestión anaerobia en fases operado en rango mesofílico, en donde se monitorearon durante 47 días parámetros como pH, Temperatura, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, Demanda Química de Oxígeno y la relación Ácidos Grasos Volátiles-Alcalinidad, en donde se obtuvieron los siguientes porcentajes de eliminación en promedio: ST=30.27%, SV=46.21% y DQO=60%. Con estos porcentajes de eliminación en promedio se produjo 17.33 l/d de biogás, por cada kg de DQO eliminada se produjeron 0.44 m³ de biogás y por cada kg de SV 1.40 m³ y una riqueza de metano del 53%. Con la aplicación de este proceso controlado de digestión anaerobia se contribuye a la estabilización de la materia orgánica, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados.

Codigestión, lodos residuales, fracción orgánica, biogás

Abstract

Anaerobic digestion is the process in which microorganisms break down biodegradable material in the absence of oxygen, which in turn generates various gases, including carbon dioxide and methane are the most abundant. The intensity and duration of the anaerobic process vary depending on various factors: the temperature and pH of the substrate biodegraded. In this research a system of co-digestion anaerobic phases operated in the mesophilic range, where they were monitored for 47 parameters days as pH, temperature, Total Solids, Volatile Solids, Chemical Oxygen Demand and the relationship was evaluated Fatty Acids Volatile-Alkalinity wherein the following average removal rates were obtained: TS = 30.27%, 46.21% and VS = COD = 60%. With these percentages elimination occurred on average 17.33 l/d of biogas per kg of COD removed were produced 0.44 m³ of biogas per kg of VS 1.40 m³ and a wealth of 60% methane. With the application of this process is controlled anaerobic digestion contributes to the stabilization of organic matter, the energy use of organic waste and maintaining and improving the fertilizer value of the treated products.

Codigestión, sewage sludge, organic fraction, biogas

Citación: LAGUNES-PAREDES, Yolanda, MONTES-CARMONA, Ma. Estela, VÁSQUEZ-MÁRQUEZ, Alejandra y CÁRDENAS-GUEVARA, Gabriela Estrella. Evaluación de la generación de metano y la estabilidad del proceso de codigestión de lodos residuales y fracción orgánica provenientes de un centro comercial. Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales 2016, 2-5: 26-35

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: lagunes@uv.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (CH_4 y CO_2), conocida como “biogás” y una suspensión acuosa o “lodo” que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. El proceso controlado de digestión anaerobia es uno de los más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados.

La materia prima preferentemente utilizada para ser sometida a este tratamiento es cualquier biomasa residual que posea un alto contenido en humedad, como restos de comida, restos de hoja, hiervas al limpiar un jardín o un huerto, residuos ganaderos, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas residuales domésticas e industriales. Según el tipo de microorganismos y los sustratos que estos degradan, la digestión anaerobia se encuentra dividida en cuatro etapas diferenciadas: hidrólisis, fermentación o acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

La digestión anaerobia se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las únicas premisas de que sean líquidos, contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable. La codigestión es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un residuo, si son compensadas por las características de otro. Así tenemos también que los diseños utilizados para digestión anaerobia pueden clasificarse en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor, siguiendo diferentes métodos.

El reactor más simple es el de mezcla completa y también se puede efectuar la separación de fases, es decir, mantener dos reactores en serie, en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis, y su objetivo es conseguir un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa. La separación es de tipo cinético, controlando el tiempo de retención de cada reactor, el cual será inferior en el primero, debido a las más altas tasas de crecimiento de las bacterias acidogénicas

En el año 2012 a nivel nacional la generación promedio anual de residuos sólidos urbanos fue de 36.4 millones de toneladas anuales, con una composición aproximada de un 53% de residuos orgánicos lo que implica que son biodegradables (INEGI, 2012). Sin embargo, si estos residuos no son bien gestionados, pueden producir contaminación ambiental biológica, transmitiendo todo tipo de enfermedades.

Otra problemática a la que se enfrenta el país es la contaminación por lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales. En el año 2010, las 2,186 plantas en operación en el país trataron 93.6 metros cúbicos por segundo, es decir el 44.76% de los 209.1 metros cúbicos por segundo recolectados en los sistemas de alcantarillado generando 3,201 toneladas al día de lodos residuales que por su alta carga orgánica representan un riesgo ambiental y biológico. (CONAGUA, 2010)

Estos residuos son susceptibles de tratamiento biológico mediante compostaje aeróbico o mediante digestión anaeróbica, prácticas comúnmente implementadas para el manejo de los residuos, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. La disposición de los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales también puede ser procesada de la misma manera.

La digestión anaerobia ofrece una alternativa factible para el tratamiento de estos residuos ya que además de disminuir la carga orgánica por medio de la degradación ofrece la posibilidad de generar una energía renovable además de que la masa resultante biodegradada puede utilizarse como abono para la fertilización de suelos.

En este trabajo de investigación se implementa un sistema de codigestión en fases en rango mesofílico para evaluar su eficiencia en el tratamiento de residuos municipales, mediante monitoreo y análisis de los parámetros operacionales y de control. Con la hipótesis planteada de que estos residuos provenientes de un centro comercial, mediante la aplicación de una codigestión anaeróbica se elimina al menos un 50% de materia orgánica medido como Demanda Química de Oxígeno (DQO). Además se propone aprovechar el biogás obtenido en las cocinas de los restaurantes de comida rápida que existen en este lugar.

Descripción del método

En este trabajo de investigación se realizó la evaluación de la generación de metano y la estabilidad del proceso de codigestión de lodos residuales provenientes de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (foRSU) provenientes de un centro comercial ubicado en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río.

Descripción de la planta piloto

La planta piloto está situada en una PTAR que se localiza en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río, perteneciente al sistema metropolitano SAS. El sistema en fases cuenta con dos biodigestores ambos de acero inoxidable y con un volumen de trabajo de 30 litros, cuentan con un sistema de calentamiento a base de aceite térmico calentado mediante una resistencia eléctrica y la temperatura se registra mediante un pt100.

Como medio de agitación se utilizan bombas centrífugas de ½ hp. En la Figura 1 se muestran los biodigestores ensamblados con su sistema de calentamiento y agitación.

Parámetro	Valor	
	Fase ácida	Fase metanogénica
Temperatura	Ambiente	35 ± 2
pH	<5.0	7.4 > pH > 7.0
Volumen de trabajo	20 litros	30 litros
Carga volumétrica	1.5 litros/día	1.5 litros/día
TRH	13 días	20 días

Tabla 1 Parámetros de control del sistema en fases



Figura 1 Sistema de digestores anaerobios en fases

Con base en las grandes diferencias de las condiciones medioambientales óptimas para el crecimiento y la actividad de cada grupo de microorganismos, el sistema consiste en el desarrollo bifásico, en dos digestores separados. El primer digestor se limita el proceso de hidrólisis y acidificación del sustrato. El efluente del digestor constituye la alimentación del segundo digestor, donde se produce la gasificación de los ácidos volátiles, por acción de los organismos metanogénicos (Hernández, 2001). En la Tabla 1 se muestran las condiciones de operación de ambas fases.

Determinación de los parámetros fisicoquímicos para la caracterización y operación del sistema

En este apartado se expondrán los parámetros fisicoquímicos evaluados durante la etapa experimental. En las Tablas 2, 3 y 4 se muestran los parámetros y métodos utilizados para la caracterización de los sustratos: lodo, foRSU y lodo-foRSU, respectivamente.

En la Tabla 5, se pueden observar los parámetros utilizados para la operación y control del sistema

Perímetros	Unidad	Método	Frecuencia
Materia orgánica, Humedad, Volátiles y cenizas	%	Técnicas analíticas (Miguel A. Gómez Nieto y Ernesto Hontoria García)	Una vez por semana (1 por lote)

Tabla 2 Parámetros utilizados para la caracterización de la foRSU

Parámetro	Unidad	Método	Frecuencia
Sólidos totales, Sólidos volátiles, Demanda Química de Oxígeno	kg/m ³ , kg/m ³ y kg o ₂ /m ³ , respectivamente	Standard methods (APHA-AWWA-WPCF)	Una vez por semana (1 por lote)

Tabla 3 Parámetros utilizados para la caracterización del lodo

Parámetro	Unidad	Método	Frecuencia
Sólidos totales, sólidos volátiles, Demanda Química de Oxígeno	kg/m ³ , kg/m ³ y kg o ₂ /m ³ , respectivamente	Standard methods (APHA-AWWA-WPCF)	

Tabla 4 Parámetros utilizados para la caracterización de la mezcla lodo-foRSU

En la Tabla 5, se pueden observar los parámetros utilizados para la operación y control del sistema.

Sistema de codigestión anaerobio			
Parámetro	Unidad	Método	Frecuencia
Temperatura	°C	Termómetro	Diario
pH	-	pH metro	Diario
Sólidos Totales	Kg/m ³	Standard methods (APHA-AWWA-WPCF)	Tres veces por semana
Sólidos Volátiles	Kg/m ³	Standard methods (APHA-AWWA-WPCF)	
Demanda Química de Oxígeno	Kg O ₂ /m ³	Standard methods (APHA-AWWA-WPCF)	
Ácidos Grasos Volátiles	-	Noyola/Jenkins 1998	Tres veces por semana
Biogás	Litros/día	Desplazamiento de agua	Diario

Tabla 5 Parámetros de operacionales y de control del sistema

Obtención, acondicionamiento y caracterización de los sustratos a codigerir

Lodo residual

El lodo residual se obtuvo de una PTAR ubicado dentro de las instalaciones de un centro comercial, localizado en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río. El punto de muestreo fue el cárcamo de lodos en donde se depositaban los lodos primarios y secundarios resultantes proceso de tratamiento de aguas residuales, mismo que se muestra en la figura 2. Este sustrato se recolectaba una vez a la semana, la cantidad de 80 a 100 litros.



Figura 2 Punto de muestreo del cárcamo de lodos. Sustrato.

Acondicionamiento y caracterización

La concentración de sólidos totales en digestores anaerobios debe estar entre 22-28 kg/m³, para ser considerados de Alta Carga, valor dado por Tchobanoglous. La concentración de lodos recolectados, los cuales se observan en la figura 3, oscilaba entre un 1.5 y 2 % según ciertas variantes del proceso, puesto que debía de ser acondicionado a 2.5 %, el lodo se sometía a un proceso de filtrado para aumentar la concentración de sólidos a la requerida.



Figura 3 Acondicionamiento del lodo crudo

Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (foRSU)

La foRSU se recolectaba 1 vez a la semana, en un restaurante ubicado dentro de las instalaciones un centro comercial ubicada en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río. Estos eran residuos de comida del restaurante como carnes, verduras, frutas, postres, etc.

Acondicionamiento y caracterización

La foRSU también fue acondicionada a una concentración de 2.5 %. Para lograrlo se siguieron los siguientes puntos:

Selección

Primeramente, se retiraron residuos como huesos, espinas, papel o plásticos, solo se dejaron residuos de comida. Cuando se contaba con una cantidad considerable de comida también se elegían elementos que cumplieran con ciertas características como por ejemplo bajo porcentaje en agua, ricos en carbohidratos, lípidos, etc.

Reducción de tamaño

Se cortaron los pedazos de comida de mayor tamaño para hacer más fácil su licuado, como se muestra en la figura 4. Una vez reducido el tamaño de los residuos seleccionados se licuaron con una pequeña cantidad agua para lograr una consistencia de papilla.



Figura 4 Acondicionamiento de la foRSU

Preparación de la alimentación

Posteriormente con los sustratos ya acondicionados, se preparó la mezcla lodo-foRSU en una relación volumétrica 1:1, a esta mezcla se le determinó: ST, SV y DQO, con la finalidad de establecer las condiciones del sustrato de alimentación, su preparación se indica en la figura 5, así como la concentración deseada que era del 2.5 % de ST aproximadamente. Este procedimiento se llevó a cabo una vez por semana.

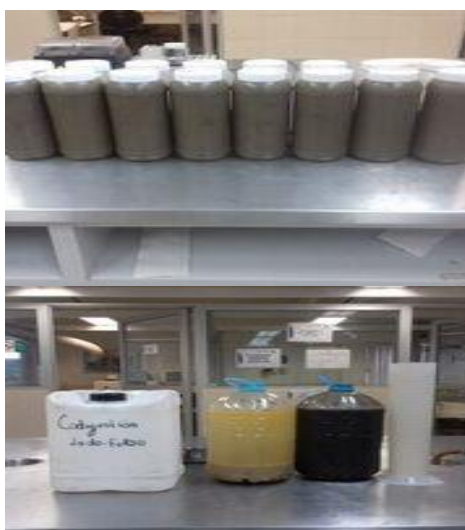


Figura 5 Preparación mezcla lodo-foRSU

Arranque del sistema: inoculación y estabilización

Inoculación y estabilización acidogénica

El inóculo que se utilizó fue lodo crudo que se obtuvo de una planta de tratamiento de aguas residuales, ubicada en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río, perteneciente a la Dirección General del Sistema de Agua y Saneamiento de Boca del Río, tomándose como punto de muestreo la caja de distribución, perteneciente a los reactores biológicos.

Se ensambló e inoculó el biodigestor acidogénico, se conectó la bomba y se programó para que recirculará 3 veces al día. La inoculación inició adicionándole al biodigestor 20 litros de lodo crudo, al inocular se midieron pH y T al igual que se determinaron las características fisicoquímicas del inóculo.

Estabilización

Después de la inoculación el sistema entro a un periodo de aclimatación esperando que los microorganismos de adaptaran al sistema. Se inició con una alimentación de 1.5 litros/d de lodo-foRSU con una carga de alimentación promedio de $2.47 \text{ kg DQO m}^3 \cdot \text{d}$, se analizaron del influente y efluente pH, T, ST, SV, y DQO, durante una semana y, en base a los resultados obtenidos, se determinó que el sistema se encontraba estabilizado.

Inoculación y estabilización metanogénica

Obtención y caracterización del inóculo

El inóculo fue traído de Xalmimilulco, localidad de Huejotzingo, Puebla, específicamente del campo orgánico "Natura". En éste se llevan a cabo actividades como, elaboración de composta y empleo de la misma, digestión anaerobia y empleo del biogás y biol obtenido que además de comercializarse también da paso a trabajos de investigación para alumnos de diversas universidades.

El inóculo se adquirió de un sistema en monoetapa que utiliza como sustrato estiércol vacuno.

La inoculación de la fase metanogénica inició con el ensamble del biodigestor asignado para dicha fase, se dio mantenimiento al sistema de calentamiento con el cambio de aceite térmico. Al igual que en la fase acidogénica se programó el sistema de recirculación para trabajar 3 veces al día.

Debido a que el inóculo tenía gran contenido de restos de paja, se acondicionó para evitar obstrucciones en las bombas. Para eliminar ese exceso de sólidos se optó por filtrar el inóculo haciéndolo pasar a través de tela de manta, quedando separada la fase sólida de la líquida esto se trató de hacer en el menor tiempo posible para que el inóculo no estuviera largos periodos de tiempo expuesto a condiciones aerobias. Una vez filtrado el inóculo se procedió a inocular con 30 litros, a dicho inóculo se le hicieron las siguientes pruebas de caracterización: ST, SV, DQO y AGV'S/Alc.

Durante siete días se monitoreó diariamente la temperatura y el pH del sistema esperando la adaptación de los microorganismos.

Estabilización

Se inició con la alimentación de 1.5 l/d de la fase ácida con una carga de alimentación promedio de $1.65 \text{ kg DQO m}^3 \cdot \text{d}$, durante el periodo de estabilización se analizaron por dos semanas pH, Temperatura, DQO, ST, SV y la relación AGV'S/Alcalinidad al efluente, cuando estos parámetros ya no tuvieron alguna variación se determinó que el sistema se había estabilizado.

Evaluación del rendimiento del sistema

La evaluación del rendimiento del sistema de codigestión anaerobia en fases se realizó con un TRH de 33 días, alimentando al sistema con una carga volumétrica de 1.5 l/d de la mezcla lodo-foRSU con una carga de alimentación promedio de $1.37 \text{ kg DQO m}^3 \cdot \text{d}$. Con el fin de conocer el comportamiento del sistema bajo las condiciones antes mencionadas se le realizaron análisis al influente y efluente con una frecuencia de 3 veces a la semana. Los parámetros analizados fueron: ST, SV, DQO, relación AGV'S/Alcalinidad, volumen del biogás y riqueza de metano.

La riqueza del metano, se realizó mediante cromatografía de gases usando un equipo PERKIN-ELMER Autosystem XL con detector FID y una columna Elite-Plot Q 30 m, 0.32 mm, los parámetros de operación empleados fueron: temperatura de inyector de 220°C, temperatura del horno de 50°C, temperatura del detector de 250°C, tiempo de corrida de 4 min., volumen de retención esperado de 1.6 min. Y un volumen de inyección de 600 μ l. Como gas estándar se empleó gas metano con un 99.8% de pureza.

Resultados

Se presentan a continuación los resultados obtenidos durante la etapa experimental de un sistema de codigestión en fases utilizando como sustrato la mezcla lodo-foRSU, obtenidos de un centro comercial, con una relación volumétrica 1:1 y un TRH=33 días.

Evaluación del rendimiento del sistema

La evaluación del sistema se hizo mediante el análisis y monitoreo de los siguientes parámetros de control y operación: ST, SV, DQO, relación AGV'S/Alcalinidad, volumen de biogás, riqueza de metano, pH y temperatura.

El proceso de digestión anaerobia se llevó a cabo durante 47 días, de donde se obtuvieron 21 datos correspondientes a los parámetros de operación, control y alimentación.

En la Tabla 6 se presentan los valores promedios obtenidos durante la evaluación del sistema de codigestión anaerobia en fases.

Parámetros	Entrada			Salida		
	Promedio	Máx.	Min.	Promedio	Máx.	min
ST (Kg/m ³)	23.99	25.92	22.21	16.64	23.80	12.80
SV (Kg/m ³)	19.46	21.28	17.61	10.41	16.05	8.02
DQO (Kg/m ³)	45.78	56.96	36.99	18.67	29.73	6.67
pH				7.28	8.00	7.00
Temperatura (°C)				34.90	37.00	32.00
A (m ³ /d)	0.0015	0.0015	0.0015			
TRH (d)				33	33	33
% Elim. ST				30.27	48.14	1.83
% Elim. SV				46.21	59.43	20.60
% Elim. DQO				60.01	85.71	41.67
Carga alim. Kg. ST/m ³ .d	0.72	0.78	0.67			
Carga alim. Kg. SV/m ³ .d	0.58	0.64	0.53			
Carga alim. Kg. DQO/m ³ .d	1.37	1.71	1.11			
Flujo (L/d)				17.33	21.00	11.00
F (m ³) Kg DQO				0.44	0.63	0.18
F (m ³) Kg SV				1.40	3.20	0.77
AGV's/Alcal.				0.27	0.45	0.16

Tabla 6 Valores promedios obtenidos durante la evaluación

En el gráfico 1, se muestra el comportamiento del sistema de digestión en fases respecto al porcentaje de eliminación de sólidos volátiles, en donde se percibe una estabilidad del sistema.

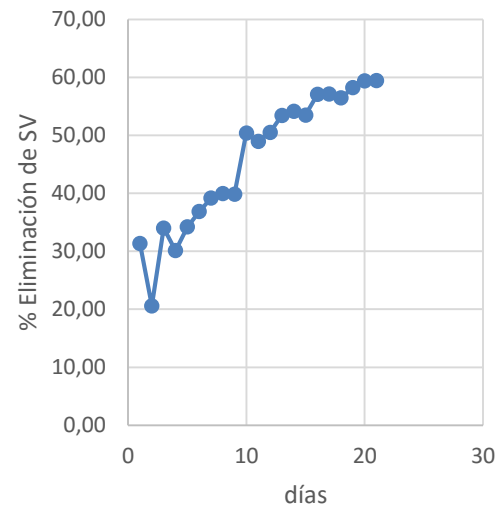


Gráfico 1 Evolución del porcentaje de eliminación de SV

Respecto al comportamiento del sistema de codigestión en fases de la eliminación de la Demanda Química de Oxígeno, se observa en la gráfica 2, que existen ligeras fluctuaciones, sin embargo se considera dentro de la normalidad de un sistema de este tipo.

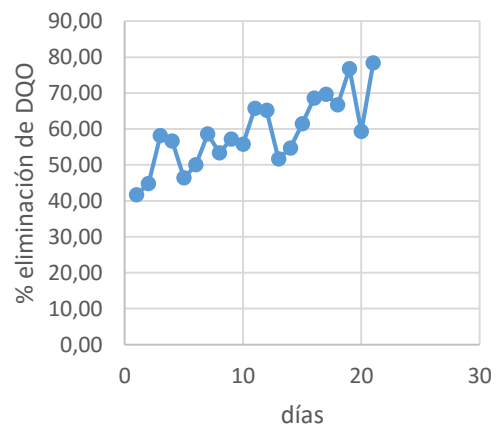


Gráfico 2 Evolución del porcentaje de eliminación de DQO

En cuanto a la producción de biogás medido como volumen en m³ en relación a los kg de los sólidos volátiles eliminados se indica en la gráfica 3 y se muestra que a partir del dato 13 el sistema se estabiliza, así como en la gráfica 4, se advierte una variación en el dato 11 debido a un problema en la recirculación del digestor metanogénico.

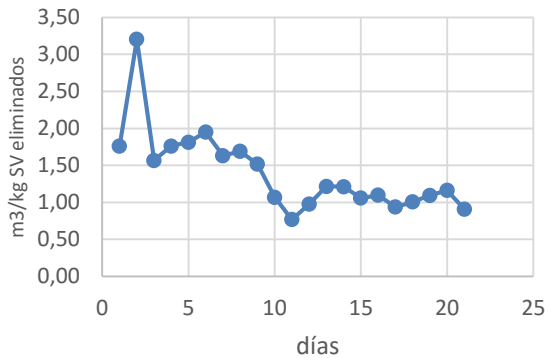


Gráfico 3 Comportamiento de la producción de biogás medido como m³/Kg SV. Eliminados

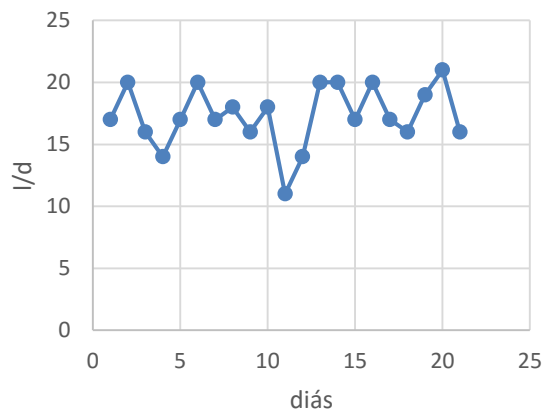


Gráfico 4 Comportamiento de la producción de biogás.

La medición de la riqueza de metano se advierte en la gráfica 5, solo se hicieron mediciones de siete días no consecutivos.

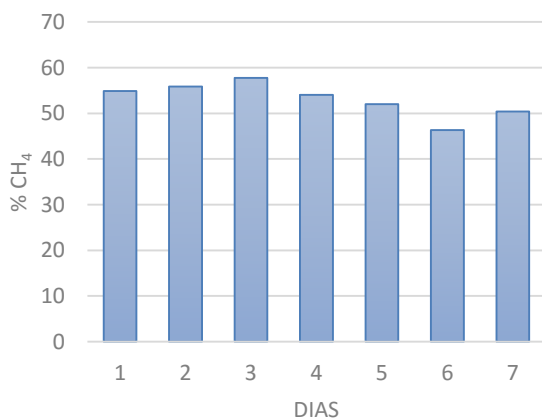


Gráfico 5 Evolución de la riqueza de CH₄

Agradecimiento

Estos resultados provienen de una investigación realizada que fue financiada por PRODEP en la convocatoria 2015, el cual se asigna el folio UV-PTC-794 mediante el oficio No. DSA/103.5/15/7127.

Conclusiones

Se presentan las conclusiones que se obtuvieron a través del desarrollo del trabajo experimental realizado en un sistema de codigestión anaerobia en fases.

En un sistema de codigestión anaerobia en fases en rango mesofílico el cual, fue alimentado de una mezcla de lodo crudo y fracción orgánica de residuos sólidos urbanos con una relación volumétrica 1:1 y con un TRH de 33 días, durante 47 días. Se manejó una carga de alimentación promedio de 1.37 kg ST /m³.d y 0.90 kg DQO /m³.d, a una temperatura promedio de 34.71°C y un pH promedio de 7.28, se obtuvieron los siguientes rendimientos de eliminación:

Sólidos Totales

Promedio 30.66 %, con un valor máximo de 48.14 % y un valor mínimo de 7.42 %
 Sólidos Volátiles: Promedio 46.21 %, con un valor máximo de 59.43 % y un valor mínimo de 20.60 %.

Demanda Química de Oxígeno: promedio 58.10 %, con un valor máximo de 73.50 % y un valor mínimo de 41.67 %.

La producción de biogás que se obtuvo en promedio fue la siguiente: 0.46 m³ /kg DQO_{elim.} Y 1.44 m³/kg de SV_{elim.}, con un volumen diario de 17.86 l/d, y una producción mínima y máxima de 14 y 21 respectivamente. Riqueza de metano de un 60%.

Con estos resultados se puede confirmar que la hipótesis se cumplió, ya que en promedio el porcentaje de eliminación de materia orgánica expresada en DQO fue del 60%; además de que se confirma que el tratamiento anaerobio en fases cumple su finalidad, ya que el lodo digerido resultante de este tratamiento cumple con las especificaciones contenidas en la NOM-004SEMARNAT 2002.

Referencias

- Agua, C. N. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Comisión Nacional del Agua, México, D.F.
- Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública. (2012). Reporte CESOP No.51 "Residuos Sólidos Urbanos en México". México, D.F.
- García Amado, K. (2009). Co-digestión Anaeróbica de Estiércol y Lodos de Depuradora para la Producción de Biogás. (Tesis Maestría). Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Dpto. Tecnología del Medio Ambiente.
- Hernández Muñoz, A. (2001). Depuración y Desinfección de Aguas Residuales. Madrid: Thompson Learning Paraninfo.
- Hyun, M. J., Jeong, H. H., Mi-Sun, K., Jong-Oh, K., Young Mo, K., & Jong, M. P. (2016). Effect of increased load of high-strength food wastewater in thermophilic and mesophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge on bacterial community structure. *Water Research*, 99, págs. 140-148.
- Magnus, A., Astals, S., Amand, L., & J. Batstone, D. (2016). Modelling anaerobic co-digestion in Benchmark Simulation Model No.2: Parameter estimation, substrate characterisation and plant-wide. *Water Research*, 98, págs. 138-146.
- Montes Carmona, M. E. (2008). Estudio Técnico-Económico de la Digestión Anaerobia conjunta de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos y Lodos de Depuradora para la Obtención de Biogás. (Tesis Doctoral). Departamento de Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente, Madrid, España.
- Oropeza García, L. (2006). Lodos residuales: Estabilización y manejo. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos. México.
- Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil, S.A. "Gestión Integral de Residuos Sólidos. Mc Graw Hill. España. 2004
- Xingbao, G., Xiao, L., & Wei, W. (2016). Biodegradation of particulate organics and its enhancement during anaerobic co-digestion of municipal biowaste and waste activated sludge. *Renewable Energy*, 96, págs. 1086-1092.
- Zaidun, N. A., Zhiquan Hu, H., Na, S., Bo, X., Nagham, R., Cuixia, L., & Dabin, G. (2016). Batch anaerobic co-digestion of OFMSW (organic fraction of municipal solid waste), TWAS (thickened waste activated sludge) and RS (rice straw): Influence of TWAS and RS pretreatment and mixing ratio. *ENERGY*, 107, págs. 131-140.