



NUEVO MODELO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO para tratamiento eficiente de residuos agropecuarios de pequeña escala

Fase 1: resultados experimentales del prototipo de laboratorio

- **Francisco Stegmaier**
Ingeniero en Biotecnología
- **Juan Merchan**
Doctor en Química
- **Juan Carlos Cuchácvovich**
Mágister en Gobernanza de Riesgos y Recursos
- **Hernan Olmi**
Doctor en Ciencias de la Ingeniería
- **Jadille Mussa**
Mágister en Políticas Internacionales del Trabajo y Derecho Ambiental
- **Bruno Montedónico**
Mágister en Educación Mención en Investigación
- **Sergio Cárdenas**
Doctor en Bioquímica

Los residuos agropecuarios, son excelente sustrato para tratar con digestión anaeróbica y obtener en este tratamiento, productos valorizables como biogás y digestato que tiene excelentes características fertilizantes. El gran problema de este tratamiento es el alto costo de instalación y operación de los biodigestores eficientes. Por otro lado, hay biodigestores artesanales de bajo costo, pero que no controlan parámetros claves como temperatura y no tienen agitación, por lo que no han demostrado un funcionamiento adecuado con las condiciones climáticas del país, sobre todo en invierno. Todo lo anterior implica que la mediana y gran empresa ganadera puede permitirse la digestión anaeróbica eficiente, logrando productos con valor agregado desde los purines y excrementos de los animales, pero la micro y pequeña industria ganadera, no pueden gozar de estos beneficios. Debido a lo anterior, se propuso diseñar y construir un nuevo modelo de biodigestor que funcione de forma óptima todo el año, pero que se construya de materiales económicos para que esté al alcance de la micro y pequeña ganadería.

Este proyecto se está financiando por el Gobierno Regional Metropolitano con un Fondo de Innovación a la Competitividad regional (FIC-R). El proyecto consiste en la construcción de tres biodigestores multicámara modular con biofiltros en la comuna de María Pinto de esta región y evaluar el funcionamiento de forma técnica y económica. En este trabajo se muestran los resultados de la primera etapa, es decir, el análisis del funcionamiento de un biodigestor a escala de laboratorio con este nuevo diseño, pero cargado diariamente con purín de una de las granjas de la comuna de María Pinto. Después de operación por 6 meses y algunos cambios en el diseño original, se observa que este biodigestor puede separar el purín en una fase líquida, logrando una disminución del 86% de la DBO con un tiempo de retención hídrica de 12 días. También logró separar una fase sólida que luego de un tratamiento por 35 días, logró una disminución de la DQO de 68%. Finalmente, se logra en este biodigestor una producción del 90% del biogás máximo esperado. Esto nos impulsa a continuar con la segunda parte del proyecto FIC-R

Palabras clave: Digestión anaeróbica, residuos agropecuarios, nuevo prototipo, económico, eficiente

Introducción

Como cualquier proceso humano, la actividad agropecuaria genera grandes volúmenes de residuos orgánicos que si no son tratados adecuadamente, pueden liberar gases con efecto de invernadero, producir contaminación de suelos, de aguas superficiales y subterráneas, atracción de vectores infecciosos, malos olores y problemas con el entorno social, entre otros.

Un aspecto muy interesante de estos residuos, es que pueden ser transformados a productos de valor, que pueden ser reutilizados en los mismos procesos agropecuarios y agroindustriales o incluso comercializados. Uno de los métodos más utilizados para transformar residuos agropecuarios [1] en productos de valor es la digestión anaeróbica.

Esta, consiste en una descomposición y transformación biológica de los residuos orgánicos, pero manteniendo medioambientes controlados y en ausencia de oxígeno. La materia orgánica, sufre una serie de transformaciones en secuencia: Hidrólisis o desintegración de macromoléculas, fermentación y acidogénesis donde las moléculas desintegradas fermentan y se transforman en ácidos grasos volátiles (AGV), acetogénesis donde los AGV son principalmente transformados en acetato, y finalmente, la metanogénesis donde el acetato es transformado en metano, y este se libera junto a otros gases en un combustible gaseoso llamado biogás. En esta transformación de los residuos, no solo se genera biogás, sino que se libera nitrógeno y fósforo inorgánico que puede ser aplicado a los suelos como fertilizante, y otras sustancias de uso agrícola como potasio [1-2].

A pesar de los beneficios del tratamiento de residuos con esta tecnología, las debilidades son importantes. Es un método muy lento y la transformación de residuos sólidos y semisólidos puede tomar hasta 40 días, esto significa que si la generación de residuos es diaria, se debe construir una planta de tratamiento cuya capacidad, sea igual al volumen diario del residuo generado multiplicado por los 40 días. Una planta de gran volumen, implica mayores costos de construcción, implementación y operación del sistema.

Adicionalmente, la digestión anaeróbica es muy delicada en su funcionamiento, debido a que depende de las actividades de comunidades de microorganismos que conviven dentro de los reactores que forman parte de esta planta de tratamiento. La acción de las bacterias y arqueas que forman parte del proceso, dependen del control de factores como temperatura, pH, balance de nutrientes, entre otros. Esto implica que la operación de estas plantas, deben ser realizadas por personal altamente capacitado y un control de parámetros que encarecen este proceso.

Todo lo anterior, ha hecho dirigir los esfuerzos al tratamiento de residuos agropecuarios de grandes empresas del área. La tecnología existente hace factible este proceso solo a grandes volúmenes de residuos, ya que a pequeña escala el proceso no es rentable y tampoco existe la posibilidad de inversión para el desarrollo de esta tecnología.

Hay mucho esfuerzo para implementar la digestión anaeróbica en sistemas de bajo costo, con un funcionamiento simple y sin control de factores para optimizar la actividad de las bacterias. Estos sistemas que en muchos casos son a nivel artesanal, han demostrado una baja eficiencia del proceso, lo que se observa en la generación de bajos volúmenes de gases combustibles y bajo porcentaje de transformación de residuos. A lo anterior, se suma que estos sistemas más artesanales, son estacionales y solo operan cuando las temperaturas del medio ambiente son elevadas. A bajas temperaturas diarias, el sistema se apaga y la digestión se detiene completamente, y por lo tanto, se deja de producir biogás lo que decepciona a los propietarios de

estos sistemas artesanales y crea un mal prestigio al método de digestión anaeróbica de residuos agropecuarios.

Existe entonces, la oportunidad de desarrollar un sistema de tratamiento anaeróbico para residuos agropecuarios de pequeña escala, pero que opere con parámetros de control y optimización de procesos microbiológicos. Además, de bajo costo de instalación y que requiera operación por parte de personal con baja capacitación en el tema. Es decir, un sistema de bajo costo pero de operación eficiente, y que adicionalmente, no dependa de las estaciones del año.

En el laboratorio de Energía y Aguas de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Central de Chile, se ha estado trabajando en un nuevo modelo de biodigestor anaeróbico para residuos líquidos y semi-sólidos de alta concentración orgánica [3,4]. Este biodigestor anaeróbico incluye: a) Un sistema multicámara, donde se logra separar diferentes etapas de la digestión anaeróbica en cámaras independientes, y por lo tanto, permite que cada una funcione con condiciones como pH, temperatura y concentraciones internas completamente diferentes. b) Sistema de biofiltros, donde en cada cámara se incluyen diferentes partículas con gran superficie para adhesión de las distintas bacterias del proceso. Estos biofiltros permiten mayor interacción bacteria con el residuo y se elimina el proceso de agitación. c) Sistema modular, lo que implica que cada cámara puede intercambiarse en caso de falla, o incluirse una nueva que refuerce cada etapa si es necesario, y además, permite construcción de cada cámara en un taller especialista y luego solo instalar el biodigestor en el lugar requerido

Estas modificaciones permiten: i. Separación del residuo en una fase líquida y una fase sólida y de esta forma darle un tiempo de tratamiento diferente a cada fase, disminuyendo el tamaño del biodigestor debido a que la fase líquida solo requiere entre 10-15 días para su estabilización. ii. Menor requerimiento de energía ya que no requiere agitación. iii. Evita la pérdida de gran cantidad de bacterias metanogénicas desde la última etapa, debido a que estas se encuentran adheridas a los biofiltros, y de esta manera aumenta la eficiencia del proceso

En este artículo, se presentan los avances del estudio en laboratorio de un proyecto de innovación de fase 2, "Transformación de residuos agropecuarios a productos de mayor valor agregado mediante biodigestor de alta eficiencia". Este proyecto está financiado por el Gobierno Regional Metropolitano de Chile a través de un Fondo de Innovación a la Productividad (FIC-R). Este consiste en la instalación de tres prototipos a escala comercial para tratar residuos pecuarios de productores de animales de micro y pequeña escala y analizar eficiencia del proceso y una evaluación económica para probar factibilidad a esta escala de producción.

Materiales y métodos

El diseño de este biodigestor, está basado en el biodigestor multicámara modular con biofiltros desarrollado por nuestro grupo, y que ya fue presentado en el XXII congreso de la Asociación Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental capítulo chileno (AIDIS Chile) [3]. Este biodigestor a escala de laboratorio, consistió en cuatro cámaras independientes de polietileno, la primera de 1,6 litros y las demás de 0,9 litros. El volumen real de carga, fue de 1,4 litros para la primera cámara y 0,75 litros para las otras 3 cámaras. Todas las cámaras fueron conectadas en serie con mangueras de silicona de 1 cm de diámetro. Cada cámara incluyó una entrada del afluente en la parte inferior y la salida del efluente por la parte superior (Figura 1). Las primeras dos cámaras, donde ocurrió decantación de sólidos sedimentables, ocuparon como soporte bacteriano, tubos de PVC sanitarios de entre 5 y 10 cm de largo cortados y lijados. Las últimas cámaras utilizaron

como soporte de bacterias, gravilla o piedras de entre 0,6-0,8 cm de diámetro en la parte inferior hasta una altura de 5 cm, y luego piedras de entre 0,2-0,4 cm de diámetro desde los 5 cm de altura hasta los 15 cm de altura correspondiente al 80% del volumen de las cámaras. Cada una de las cuatro cámaras, mantuvo dos conexiones a través de un tapon de goma. La primera permitió colección del biogás en los gasómetros, los que se construyeron manteniendo un recipiente de 2 litros invertido y sumergido en agua. Esto permitió medir volumen de biogás generado por desplazamiento de agua. La segunda conexión sirvió para toma de muestras para análisis y toma de temperatura diaria al interior de cada cámara.

El biodigestor, fue cargado diariamente de lunes a viernes con 30 g de excremento mezclado con 15 ml de agua del lavado de recipientes de recepción de leche, que incluyó detergente y cloro gel diluidos, 15 ml de agua de enjuague de recipientes con leche, y finalmente, agua potable hasta un volumen de 250 ml totales diarios (purín) y se mantuvo con temperatura constante entre 35-36°C. Luego de cada carga, se tomo el eluido (o efluente desde cámara 4) de 250 ml para análisis cuantitativo.

Diariamente, se evaluó pH, olor y color del contenido de cada cámara, y volumen de gas generado por estas. Tanto el purín de entrada, el eluido y el lodo tratado (fase sólida tratada por 35 días y extraída desde cámara 1), fueron analizados con respecto al sólido seco total (SST), sólido volátil (SV), demanda química de oxígeno (DQO) y concentración de potasio tal como se describe en el manual de análisis estandarizados de aguas y desechos de aguas de la APHA [5]. La demanda química de oxígeno (DBO) fue analizada tal como se describe en el manual del equipo de análisis DBO Velp scientific. Las mediciones de nitrógeno total fueron realizadas por el método kjendahl con el equipo semiautomático de digestion DK6 y equipo de destilación, ambos de Velp scientific.



Figura 1

Biodigestor multicámara modular con biofiltros diseñada a escala de laboratorio

Resultados y discusión

Para definir el contenido, concentración y volumen de la carga diaria de purín en el biodigestor de laboratorio, se analizó el purín diario generado en una de las granjas que se usarán en el proyecto. En la tabla 1, se muestran los análisis de la producción diaria de purín en corral de ordeña y zona de espera. En el análisis se tomó el volumen de estiércol que se generó durante la noche y en la espera a la ordeña, observándose que este correspondió a 50-60 kg para 15 vacas. Adicionalmente, se midió el volumen de agua gastado en limpieza del suelo y piezas del equipo de ordeña y contenedores de leche que en promedio correspondieron a 200 litros. Adicionalmente, se observó que en se incluyó cierta cantidad de detergente y cloro gel que debió incluirse en el purín que se utilizó en el laboratorio. Luego de este análisis, se escaló para un biodigestor de laboratorio, determinando que las cargas diarias serían de 30 g de estiércol, 15 ml de agua para lavado de piezas de ordeña que incluyó cloro gel y detergente lavalozas, y 15 ml de agua de enjuague de recipientes. A esto se agrega agua hasta completar 250 ml y se mezcla completamente con una máquina de cocina mini-pimer.

Granja de las Mercedes, en María Pinto	Cantidad de animales	Densidad del excremento bovino	Excremento total de bovino por proceso ordeña	Agua total utilizada en limpieza de corral de ordeña	Agua total utilizada en limpieza de corral espera
	15 vacas en ordeña	0,9 kg/litro	56-60 litros/jornada	100 litros	100 litros

Tabla 1

Análisis de volúmenes de residuos generados en una granja en la zona de las Mercedes de la comuna de María Pinto. En esta granja la crianza de vacas es por pastoreo y se midió el volumen de los líquidos y sólidos que se generan diariamente luego del proceso de ordeña.

Para calcular el contenido orgánico y mineral de la carga diaria, se analizó los sólidos secos totales (SST) en estufa por 24 horas a 105°C, las cenizas (o contenido inorgánico) se obtuvieron manteniendo el SST por 2 horas a 550°C. Los Sólidos volátiles (SV) se calcularon restando la masa de cenizas a los SST.

Tal como se observa en la tabla 2, el 17,21 % de la masa del estiércol es sólido seco, por lo que en 30 g diarios, tenemos 5,16 g de SST en los 250 ml totales. Con respecto a los SV se calculó que diariamente se cargó 4,14 g en 250 ml y llevándolo a un volumen de litro, dió una carga de 16,56 g de SV* litro-1 día-1 lo que corresponde a una carga 10 veces mayor a lo recomendado en la literatura [5,6]. En las publicaciones se analiza el comportamiento de biodigestores tradicionales, como los de mezcla completa, que es el modelo mas utilizado a nivel industrial, y en algunos casos los digestores de doble cámara. En ambos casos, han mostrado un buen comportamiento con cargas de hasta 1,5 g de SV/Lt*día y se observa una caída en la actividad al aumentar a 2,5 g SV /Lt*día. No hay en literatura, biodigestores que traten cargas de 16 g de SV/Lt*día como lo que se requiere para estos residuos, y la única posibilidad es diluir la muestra con mucha agua. Al encontrarnos con graves problemas de sequia a nivel nacional se dificulta el uso de mucha agua, ya que los productores tratan de ahorrar este recursos al máximo.

El primer análisis realizado, fue la disminución de materia sólida en la primera cámara. Se tomaron 3 muestras diferentes de purines de días de carga diferentes y al mismo tiempo se tomaron tres muestras del lodo tratado que se esta extrayendo desde la primera cámara luego de los 35 días de tratamiento. De todas las muestras, nos aseguramos de tomar la misma cantidad en masa inicial (tabla de Figura 2, primera columna de datos numéricos). A todas las muestras se las deshidrató y evaluó el peso seco total. Los datos obtenidos, fueron transformados a porcentaje con respecto a la masa inicial, y además, la tabla incluye la materia orgánica como sólidos volátiles (SV). Tal como se observa en la tabla y en el gráfico de la Figura 2, el lodo disminuyó en un 46,7% con respecto al purín que se incorpora al biodigestor luego de 35 días de tratamiento. También se observa una disminución de un 41,9% de SV lo que es coherente con la disminución del SST. Esta disminución podría ocurrir solo por el paso de macromoléculas en la fase sólida a la fase líquida, es decir, solo mostrando alta hidrólisis, pero como es en esta primera cámara donde se observó la mayor generación de biogás, lo que implica que parte importante de la disminución de SV ocurre por transformación en biogás. En este sólido se observa una disminución de ceniza en un 22,2%. La materia inorgánica no se transforma en biogas, pero si puede pasar a la fase líquida por disolución y esto indicaría que por hidrólisis, hay un 22% de los SV que están disminuyendo desde el lodo solo para pasar a la fase líquida, pero el 20% adicional es la cantidad de contenido orgánico que está siendo transformado en biogás en la cámara 1.

	Sólido total (g)	Sólido seco total (g)	Sólido Seco total (% con respecto al sólido total)	Ceniza (g) (Contenido de materia inorgánica)	Ceniza (% con respecto al sólido total)	Sólido Volatil (g) (Contenido de materia Orgánica)	Sólido Volatil (% con respecto al sólido total)
	53,22	9,141	17,18	1,762	3,311	7,379	13,87
	51,096	8,674	16,98	1,7998	3,522	6,874	13,45
	62,006	10,835	17,47	2,129	3,434	8,706	14,04
Promedio			17,21		3,422		13,787
Desv. Std			0,2464		0,106		0,304

Tabla 2

Análisis de sólido seco total (SST), sólidos volátiles (SV) y cenizas obtenidas de excremento de vaca criada por pastoreo. También se entregan los valores del porcentaje con respecto al sólido total, que corresponde a la masa del excremento recién tomado sin haberla secado.

	% SST		% SV		% ceniza	
	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.	Promedio	Desv. Std.
Lodo desde 1° cámara	1,133	0,032	1,522	0,042	0,386	0,012
Purin	2,126	0,32	2,621	0,32	0,496	0,015

	Purin	Sobrenad	Eluido
Promedio	25885,757	12725,1025	3282,1748
Desviación estandar	2329,04943	616,343516	1303,09103

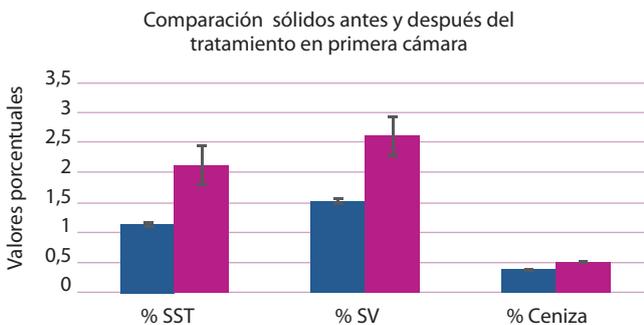


Figura 2

La tabla de arriba, muestra los mismos datos mostrados en el gráfico inmediatamente debajo de la tabla. Los primeros datos comparan con media y desviación estandar, las poblaciones de datos del porcentaje de sólidos secos totales de la muestra de purin, con respecto a los lodos luego de la digestión anaeróbica por 35 días. Los valores del medio, muestran la comparación de los sólidos volátiles de las muestras de purines y los lodos tomados luego de la digestión. Finalmente se comparan los valores de ceniza entre los dos grupos. Barra celeste corresponde a purin y barra naranja corresponde a lodo.

Adicionalmente, se analizó la disminución de la materia orgánica de la fase sólida por la técnica de DQO. Esta técnica mide el contenido de la materia orgánica por una reacción química de oxidación. Para el análisis de DQO, se tomaron muestras del lodo de 4 semanas diferentes del funcionamiento del biodigestor y se observó una disminución de entre el 47- 67 % lo que varió según la semana. Esto indicó no se ha logrado un funcionamiento completamente homogéneo.

El tercer análisis realizado fue para determinar la capacidad que tiene nuestro modelo de biodigestor de laboratorio, de bajar la carga orgánica de la fase líquida de los purines con solo 12 días de retención (eluido). La técnica mas usada para esto, es la DQO. Esta técnica busca medir la cantidad total de materia organica de forma indirecta, midiendo la cantidad de oxígeno que se ocupa en oxidar químicamente la materia orgánica.

Tal como se aprecia en la Figura 3, la carga orgánica total del purin por técnica de DQO es de 26000 mg de oxígeno por litro de muestra y la carga orgánica del eluido es solo 3000 mg de O₂/l muestra, logrando una disminución del 88,5%. Debido a que

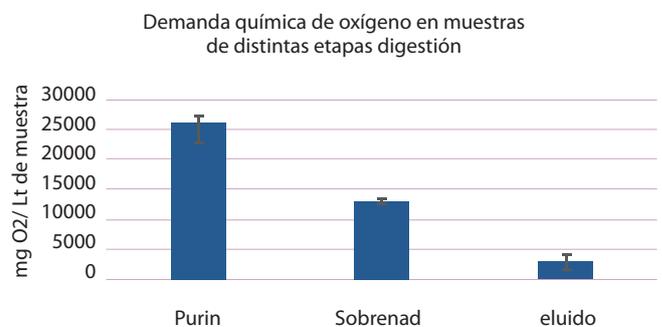


Figura 3

Datos que comparan la cantidad de materia orgánica determinada con técnica DQO. La medición se determina como miligramos de oxígeno ocupado por cada litro de muestra para muestras purin completo, del sobrenadante que queda luego de la decantación del sólido en la primera cámara y del eluido.

este purin incluye la fase sólida y la líquida, se tomó una muestra del sobrenadante de la cámara 1, lo que contiene la fase líquida luego de la decantación de la fase sólida. Este sobrenadante mostró una DQO de 12000-13000 mg de oxígeno /l muestra, que corresponde al 50% de la carga orgánica del purin completo. De esta fase líquida, el examen de DQO muestra una disminución del 77% de la materia orgánica en la fase líquida con solo 12 días de tratamiento.

La DQO es una muy buena técnica, pero no entrega los resultados reales de disminución de contenido orgánico degradable por bacterias. Por lo anterior, se realizó un ensayo de DBO ó demanda biológica de oxígeno, la cual mide el contenido orgánico biodegradable, es decir, la carga orgánica que realmente puede ser transformada por la digestión anaeróbica. El gráfico de la Figura 4 muestra los valores de DBO para el purin completo (PUR), el sobrenadante (SOB) y el eluido. Este ensayo fue realizado a 35 días y no DBO a 5 días que es lo tradicional, esto debido a que lo observado en resultados previos.

El ensayo de DBO, muestra el mismo comportamiento observado con la DQO, salvo que las concentraciones de materia orgánica son diferentes. Una gran diferencia de los ensayos de DQO con DBO, es el tipo de materia orgánica que pueden medir. La DQO, mide el total de la materia orgánica que tiene la muestra, incluso la NO biodegradable. Dentro de estas moléculas orgánicas, tenemos azúcares celulósicos y derivados de plantas lignificadas.

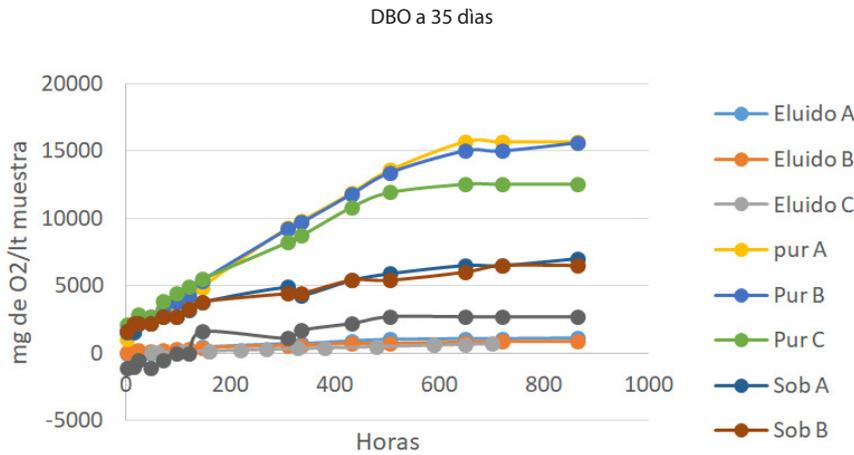


Figura 4

Ensayo de DBO35 para purín completo, sobrenadante de cámara 1 y eluido.

Debido a que los excrementos de las vacas tienen altas cantidades de residuos derivados de plantas que no podrían ser degradados en el biodigestor anaeróbico, se espera encontrar una gran diferencia entre los análisis de DBO y DQO.

El ensayo de DBO cuyos resultados se aprecian en la Figura 4, muestran que los purines totales tienen una cantidad de 15000 mg de oxígeno por litro de muestra (cantidad bastante menor que la DQO de 26000 mg O₂/l). Luego de la decantación de los sólidos del purín y liberación de materia orgánica a la fase líquida por hidrólisis se obtiene el sobrenadante, la que presenta una DBO de 7000 mg de oxígeno por litro de muestra. Al igual que con el ensayo de DQO, este sobrenadante contiene el 50% de la materia orgánica del purín completo. Los datos del eluido, que corresponden a la fase líquida que ha sido tratado por 12 días en el biodigestor anaeróbico, muestra valores de DBO de 900 mg de oxígeno por litro de muestra, esto indica una disminución del 86% en la materia orgánica digerible por bacterias en el biodigestor en la fase líquida. Es decir, por la técnica de DBO, se observa que luego de 12 días de tratamiento, se logró un 86% de disminución de la materia orgánica degradable, en cambio con la técnica DQO, se observa solo un 77% de la materia orgánica que incluye materia degradable como no degradable, como material lignocelulósico.

Finalmente, se evaluó la generación de biogás del biodigestor. Tal como se observa en la Figura 5, a la segunda semana hay una generación mayor de biogás que las semanas subsiguientes y este volumen comenzó a disminuir de forma regular hasta la semana hasta la semana 7. Esto ocurrió, debido a que al comenzar la operación del biodigestor de laboratorio y lograr un crecimiento microbiológico adecuado, se inoculó con bacterias provenientes de estiércol fresco de vaca, y se debió incluir una

alta concentración de carga orgánica inicial. Las primeras semanas muestran la estabilización del biodigestor. Solo dos meses después del inicio de operación, este logró estabilización. A la semana nueve y por dos semanas mostró una generación de 700 ml semanales de biogás, pero desde la semana del 22 de mayo el biodigestor comenzó a bajar la producción de biogás de forma constante hasta que esta se detuvo completamente. Este fenómeno, mostró un colapso del prototipo de laboratorio y se trabajó en su mejora. Luego del análisis en el laboratorio, nos dimos cuenta que el diseño de la primera cámara permitió el colapso por acumulación del sólido decantado. Fue necesario rediseñar un sistema diferente para extracción del lodo ya estabilizado por 35 días. En la Figura 5 se observa como esta mejora logró la recuperación de la producción de biogás en 700 ml semanales.

Tal como se observa en el gráfico de la Figura 5, se logró generación de 700 ml de biogás por 16 g de SV, lo que es

bastante menor a lo observado por otros investigadores [6-8]. En estas publicaciones se ensayan con cargas diarias 10 veces más diluidas y usan un modelo de biodigestor anaeróbico completamente diferente. Debido al bajo volumen semanal de biogás producido con respecto a lo esperado, se decidió realizar un último ensayo. En dos digestores tipo Batch, se cargó 190 g de excremento fresco y 500 ml de agua muy bien mezclados en el primer biodigestor Batch y 190 g de excremento viejo ó almacenado en refrigerados por más de una semana en el segundo digestor batch. En cada biodigestor, se eliminó el oxígeno llenando el biodigestor con agua y luego desplazando el agua con biogás almacenado previamente. Se cargó cada uno con la mezcla a incubar y se cerró, para mantenerlo por 60 días a 35°C y agitación diaria de 30 segundos cada vez. Cada biodigestor batch se conectó en un gasómetro que midió volumen por desplazamiento de agua. Tal como se observa en la figura 6, se pudo observar el volumen máximo de biogás generado por una cantidad fija de excremento de vaca. El excremento fresco, a los 5 días comenzó a producir biogás y se logró el volumen máximo a los 25 días. Con la misma cantidad de excremento viejo y almacenado en el refrigerador, comenzó a generar biogás desde el día 27 y llegó al volumen máximo al día 50. Ambos excrementos fueron tomados de la misma granja, es decir, vacas con la misma alimentación. A pesar de que ambos excrementos comenzaron generación de gas y terminaron en momentos diferentes, el volumen máximo de biogás generado es el mismo y ambos demoraron el mismo tiempo entre el comienzo de la generación y término de esta. La diferencia en el comienzo de la producción claramente se dió por las concentraciones de bacterias del proceso

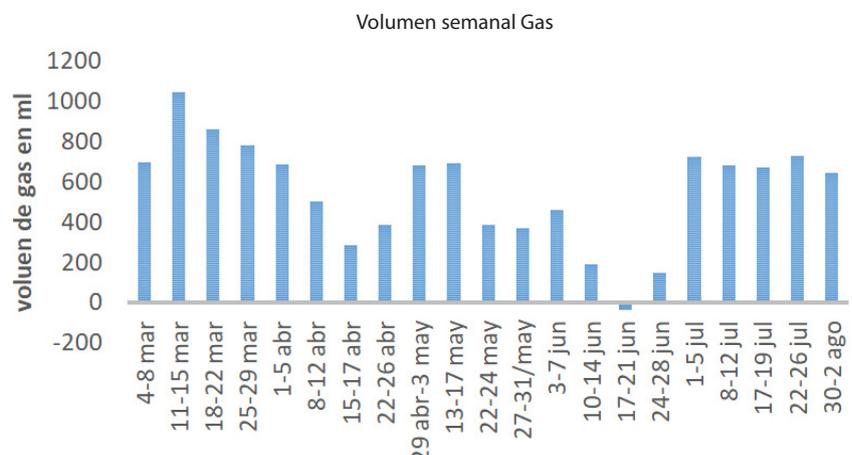


Figura 5

Volumenes semanales de biogás generado por el biodigestor carga. Al inicio el alto nivel de gas que comienza a bajar es por alta carga orgánica inicial del biodigestor, que muestra estabilización durante los primeros días de mayo. Posteriormente hay fallas de operación, que se resuelven y vuelve a operar establemente desde los primeros días de julio

anaeróbico. En el excremento fresco las bacterias estaban muy activas, pero en el excremento almacenado en refrigerador, las bacterias no solo estaban apagadas, sino que por el tiempo que demoró se deduce que la concentración microbiológica era baja, y en todo ese tiempo las bacterias tuvieron que multiplicarse para comenzar el proceso. Al analizar el volumen máximo de biogás, ambos ensayos produjeron 1000 ml totales a partir de 190 g húmedos de excremento. Esto implica 5,26 ml de gas por cada gramo de excremento húmedo. Si en el biodigestor multicámara modular con biofiltros, la carga diaria fue de 30 g de excremento húmedo y esto se realizó por 5 días a la semana, se debería esperar una generación máxima de biogás de 790 ml por semana, basados en los resultados de los digestores tipo batch mostrados en la figura 6. La Figura 5, muestra volúmenes de 700 ml semanales en un funcionamiento bastante regular por a lo menos 5 semanas. Esto implica casi un 90% de eficiencia en la generación de biogás de lo máximo esperado.

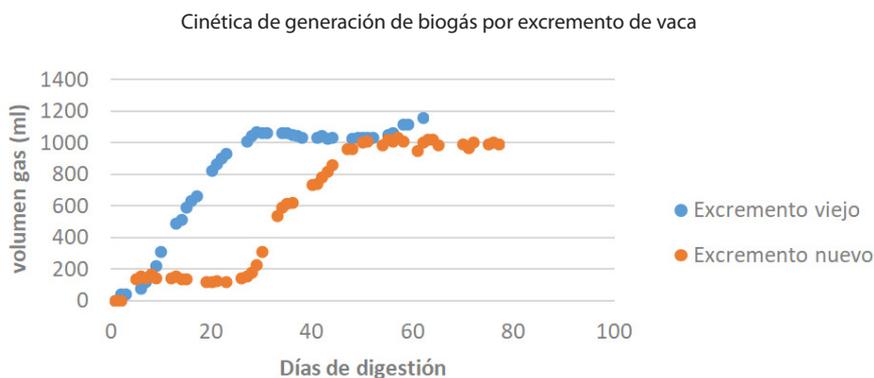


Figura 6

Generación total de gas a partir de 190 g de estiércol de vaca disuelto en 500 ml de agua. En dos muestras diferentes de estiércol, una muestra nueva con menos de 20 horas de antigüedad y otra muestra antigua de una semana de antigüedad guardada en refrigerador.

Todos los resultados anteriores, demuestran que este biodigestor logró digerir la materia orgánica generando biogás. Este proceso pudo hacerse sobre concentraciones mucho más elevadas que lo que se observa en otros modelos de biodigestores observados en la literatura. Esto tiene el potencial de poder tratar residuos muy concentrado sin necesidad de diluir, y por lo tanto, logra generación de biogás con menor contenido de agua, lo que es un gran avance en los tiempos de sequía que tenemos en el mundo.

Por otro lado, el hecho de separar una fase sólida de la fase líquida, permite en un mismo biodigestor tener tiempos de retención completamente diferentes para ambas fases. En este trabajo se observa como se logró tratar la fase sólida con 35 días y la fase líquida con solo 12 días. Este hecho, permite disminuir considerablemente el volumen del biodigestor para residuos semisólidos. Residuos como los purines o residuos agropecuarios, a veces tienen altos volúmenes de agua que al no tener materia orgánica, normalmente baja considerablemente la generación de biogás desde biodigestores tradicionales. Debido a que los sólidos vienen completamente mezclados con agua en todo el proceso, el agua disminuye la concentración del contenido orgánico y, por lo tanto, el biogás generado disminuye por día. Adicionalmente, en pequeñas granjas los volúmenes de agua diarios pueden cambiar, lo que puede generar grandes variaciones diarias en la generación de biogás. Este biodigestor, muestra que la digestión del excremento no depende del volumen de agua. Es decir, a una carga diaria regular de excremento, se lograrían generaciones regulares de biogás.

Lo otro interesante, es el bajo tiempo de retención que se logra en el tratamiento de la fase líquida. A pesar de tener concentraciones muy altas, con DBO de 7000 mg de O₂/lt, con solo 12 días se observó una disminución del 86% en esta. En ensayos anteriores con este modelo de biodigestor [3], se lograron mejores eficiencias en generación de biogás y en la disminución de materia orgánica desde un residuo de alta concentración de materia orgánica, pero los ensayos se realizaron sin contenido lignocelulósico. Los resultados observados en este trabajo, mostraron una baja generación de biogás con respecto a la masa de sólidos volátiles cargados en el biodigestor. Sin embargo, cuando se ensayó en un biodigestor tipo batch se encontró que el biogás generado estaba muy cercano al máximo posible. Esto quiere decir que la baja generación no es por problemas de eficiencia del biodigestor, sino que probablemente la cantidad

de sólidos volátiles considerados en la carga están sobreestimados. Se realizó un nuevo ensayo cuantificando SST, SV y ceniza por triplicado del excremento que se estaba usando como carga de los biodigestores. Pero en esta ocasión, se separó el material lignocelulósico del resto del residuo sólido y luego de eso, se determinó SST, SV y ceniza para cada fracción. Los resultados dieron un 45% de material lignocelulósico en el excremento y 40% de cenizas en la fracción que no tenía material lignocelulósico y solo entre 15% de material orgánico degradable. Esto explicaría los bajos volúmenes de biogás generados en el biodigestor, ya que significaría que los 700 ml no se generan por 16 g de SV, sino que solo a partir de 2-3 g de SV que son volúmenes similares a lo publicado.

Referencias

- [1] Varnero, M. T. (2011) Manual del Biogás. Santiago, Ministerio de Energía y FAO.
- [2] Ávila M., Erlwein A., Sotomayor E. y Cerda F. (2016) Biogás de residuos agropecuarios en la región de los ríos: aspectos generales, experiencias y potencial de producción. Valdivia, INDAP y gobierno regional de los lagos.
- [3] Cárdenas S.P. (Octubre, 2017). Diseño y confección de un nuevo biodigestor anaeróbico multicámara modular, para tratamiento de residuos líquidos y semisólidos agropecuarios. Presentado en el XXII congreso Chileno de ingeniería sanitaria y ambiental AIDIS Chile. Iquique, Chile.
- [4] Muñoz K., Kanzua K., Montedónico B., Díaz B y Cárdenas S.P. (2016). Eliminando lo orgánico de tu basura. Ingeniería al día. 1-2, 40-45
- [5] APHA, (1998) Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. American Public Health Assoc., Washington DC.
- [6] Regueiro L., Lema J.M. y Carballa M. (2015) Key microbial communities steering the functioning of anaerobic digesters during hydraulic and organic overloading shocks. Bioresource technology 197, 208-216
- [7] Guo X., Wang C., Sun F., Zhu W. y Wu W. (2014). A comparison of microbial characteristics between the thermophilic and mesophilic anaerobic digesters exposed to elevated food waste loadings. Bioresource technology 152, 420-428
- [8] Misale G., Neelgund S.E., Singh V. y Patil S.V. (2019) Anaerobic Digestion Process for the Treatment of High Brix Distillery Spent Wash. International journal of fermented food. 8, 79-83.