



DIGESTIÓN ANAEROBIA DEL LACTOSUERO PURO Y EN CO-DIGESTIÓN.

Chicas, J., Hernández, D., Osegueda O.

Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas
osegueda@uca.edu.sv

Abstract- En este estudio se evalúa y compara la producción de metano a partir del lactosuero como sustrato puro y a partir de diferentes mezclas de co-digestión con estiércol bovino. El estudio se llevó a cabo empleando réplicas con pH natural y ajustado, con el fin de observar un aumento en el rendimiento del proceso al realizar dicho ajuste.

Se realizaron ensayos de potencial de bio-metano, conocidas como “BMP”, empleando frascos de vidrio y tapones de hule como reactores, los cuales se mantenían a 38°C. Durante 50 días se cuantificó el biogás y metano producido. En los primeros 15 días de operación, ninguna mezcla pudo superar la producción de metano obtenida mediante el lactosuero puro, no obstante, al cabo de 50 días se determinó que las mezclas que contenían hasta 44% de sólidos volátiles aportados por el lactosuero lograron superar la producción de metano por parte del lactosuero puro. Estas mezclas no requirieron del ajuste de pH, ya que el contenido de estiércol lograba ajustar el pH de la mezcla naturalmente.

Es importante mencionar que los ensayos con un contenido de sólidos volátiles mayor al 44% aportado por parte del lactosuero, sufrieron de acidificación, por lo cual se recomienda ajustar el pH de dichas mezclas durante el proceso de digestión anaerobia y no solo al inicio del proceso.

Palabras claves- Lactosuero, co-digestión, digestión anaerobia, metano, estiércol bovino, acidificación.

I. INTRODUCCIÓN

El lactosuero es el principal subproducto de la industria quesera, representando del 80% al 90% del volumen total de leche procesada en la elaboración de quesos. Contiene principalmente lactosa, proteínas, minerales, vitaminas y grasas. Su composición varía considerablemente dependiendo del tipo de leche empleada, tipo de queso elaborado y el proceso de producción [1]; [2].

El lactosuero se puede clasificar en base al nivel de acidez que contiene, como “lactosuero dulce” y “lactosuero ácido” [1]. La distinción entre ambos tipos de lactosuero se evidencia por la medición de su acidez en base a los grados Dornic (°D), clasificándose como “dulce” cuando posee un valor inferior de 18°D. Generalmente el pH del lactosuero dulce se encuentra en un rango de entre 6.02 y 6.58 y el lactosuero ácido posee un pH de entre 3.57 y 4.34 [3]

[3]. La composición química de ambos tipos de lactosuero es similar en cuanto al contenido de proteínas, minerales y carbohidratos, no obstante, se observan variaciones en el contenido de lactosa, ácido láctico y grasas. En la TABLA I se presenta la diferencia entre las composiciones de los dos tipos de lactosuero anteriormente mencionados.

TABLA I
DIFERENCIA ENTRE COMPOSICIONES ENTE LOS TIPOS
DE LACTOSUERO

Composición	Lactosuero dulce	Lactosuero ácido
Lactosa (%)	4.5 – 5.0	3.8 – 4.4
Ácido láctico (%)	0	0.8
Grasas (%)	0.2 – 0.7	0.04

Fuente: [4].

El lactosuero en general, se considera un residuo líquido industrial que podría tener un alto potencial de producción de biogás debido al alto volumen generado anualmente y a la

carga orgánica presente en dicho residuo, la cual depende principalmente del proceso de producción empleado. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del lactosuero oscila entre 30,000 mg/L y 60,000 mg/L, mientras que la demanda química de oxígeno (DQO) del mismo oscila entre 60,000 y 100,000 mg/L [5].

En la TABLA I-2 se enlistan las características del lactosuero que resultan relevantes para un proceso de digestión anaerobia y los potenciales de producción de biogás y metano a partir de lactosuero dulce.

Según las características de la TABLA II, el lactosuero es considerado como un residuo líquido que puede ser sometido a un proceso de digestión anaerobia, debido a que cumple satisfactoriamente con las características de los sustratos aprovechables en un proceso de biodigestión [6] y [7].

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DEL LACTOSUERO RELEVANTES PARA UN
PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Características	Valor
Contenido de sólidos totales (ST) (%)	1-5
Contenido de sólidos volátiles (SV) (%ST)	80 – 95
Producción de biogás (L/kg sv)	500 – 950
Porcentaje de CH ₄ en biogás	60 – 80
Problemas frecuentes en su digestión	Acidificación

Fuente: Adaptado de [8], [6], [9] y [7].



57 Digestión anaerobia del lactosuero puro y en co-digestión.

Es importante mencionar que el lactosuero dulce permite obtener mayores producciones de metano en comparación con el lactosuero ácido, debido a que los problemas de acidificación se ven intensificados en el segundo tipo de lactosuero mencionado.

Se han realizado diversos estudios a escala laboratorio y a escala industrial en los cuales el lactosuero es sometido a un proceso de digestión anaerobia en diferentes configuraciones de reactores. Además, con el fin de incrementar su potencial de producción de biogás, ha sido estudiada la co-digestión del lactosuero con la fracción líquida de estiércol bovino.

El término co-digestión hace referencia al proceso de digestión anaerobia mediante el cual se da tratamiento en conjunto a dos o más sustratos de distinta naturaleza. Esta variante tecnológica tiene la ventaja principal que permite aprovechar la complementariedad de las características de los sustratos empleados, de forma que mediante este proceso es posible compensar las carencias de cada sustrato por separado para obtener una mayor eficiencia en el proceso de digestión anaerobia [6].

Dentro de las características que pueden complementarse mediante una co-digestión es el aprovechamiento de nutrientes contenido en alguno de los sustratos, mejoramiento de la relación C/N (carbono/nitrógeno), facilitar

la capacidad tampón y el contenido de materia orgánica biodegradable [6].

La co-digestión del lactosuero con la fracción líquida del estiércol bovino fue investigada por [9]. En ese estudio se afirma que dichos sustratos tienen características complementarias, entre las cuales resaltan principalmente la mayor alcalinidad y cantidad de nutrientes que posee la fracción líquida del estiércol en comparación con el lactosuero. La mayor alcalinidad de la fracción líquida de estiércol bovino debería permitir mantener el pH del sistema en un valor cercano a la neutralidad.

Para identificar una relación óptima de la proporción de sustratos al realizar una co-digestión, resulta conveniente la realización de pruebas de laboratorio de potencial de producción de metano, lo cual permite estudiar distintas mezclas para observar el rendimiento del proceso a partir de mezclas distintas.

En el estudio [9] se determinó que el potencial de producción de biogás del lactosuero puro es de 17.9 LCH₄/kgsustrato, que corresponde aproximadamente a 300 LCH₄/kgSV. Al hacer co-digestión del lactosuero con la fracción líquida de estiércol bovino dicho potencial se elevó a 18.2 y 18.4 LCH₄/kgsustrato empleando mezclas de 10% y 20% en peso de lactosuero.



Por otro lado, en dicho estudio se obtuvieron rendimientos menores que el lactosuero puro al emplear mezclas con más de 20% en peso de lactosuero, debido a que estas mezclas sufrieron de inhibición por acidificación, ya que no se empleó ninguna sustancia química para el ajuste del pH. En dichos ensayos, el contenido de estiércol no fue suficiente como para mantener el pH en valores deseables.

En este estudio se pretende evaluar el rendimiento de producción de metano de distintas mezclas de lactosuero y estiércol bovino, mediante pruebas batch, para identificar la mezcla que permita potencializar la producción de metano y además comparar los rendimientos de las mezclas con pH natural y con pH ajustado mediante bicarbonato de sodio. Asimismo, se pretende evaluar el rendimiento del lactosuero y el estiércol bovino como sustratos puros, con el fin de observar los rendimientos individuales, a modo de comparar los rendimientos como sustratos individuales y en mezclas distintas.

II. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este estudio se realizaron ensayos de potencial de bio-metano, llamadas comúnmente como “BMP” por sus siglas en inglés: Bio-Methane Potential Tests. Mediante estas pruebas es posible determinar el valor experimental de la máxima cantidad de metano producido por gramo de sólido volátil de un sustrato, empleando condiciones de operación seleccionadas. El

procedimiento empleado para la realización de dichas pruebas está basado en adaptaciones a las metodologías propuestas por [10], [11] y [12].

A. Metodología de preparación de reactores

En el caso de este estudio, se empleó lactosuero proveniente de una quesería artesanal y estiércol bovino procedente del ganado perteneciente a la Escuela Nacional de Agricultura (ENA). Además, como fuente de bacterias intervinientes en el proceso de digestión anaerobia se utilizó el lodo proveniente de los biodigestores anaerobios de Industrias La Constancia (ILC), el cual es parte de la planta de tratamiento de las aguas residuales generadas en el proceso de elaboración de cerveza. Para estas tres sustancias se realizaron distintos análisis del contenido de sólidos totales y volátiles con el fin de caracterizar cada uno, empleando una adaptación de la metodología propuesta por [13].

Las pruebas BMP se llevaron a cabo en botellas de vidrio de 160 mL con tapones de hule, funcionando éstas como reactores. Las mezclas a introducir dentro de los reactores se prepararían teniendo en cuenta que cada una debía contener 2 gramos de sólidos volátiles en total, aportados por diferentes proporciones de lactosuero y estiércol bovino, por lo cual fue necesario conocer el contenido de sólidos volátiles de cada uno.



Las cantidades agregadas de cada sustrato a las mezclas realizadas fueron seleccionadas con el objetivo de que cada una tuviera un valor diferente de aporte de sólidos volátiles por parte del lactosuero en la solución final; dichos aportes varían desde 0% hasta 100%. La mezcla de 0% estaría compuesta solamente de estiércol bovino, mientras que la del 100% únicamente de lactosuero. En la TABLA III se muestran las cantidades de lactosuero y estiércol bovino agregada a cada mezcla, así como también el aporte de sólidos volátiles por parte del lactosuero en cada una de éstas.

TABLA III
CANTIDADES DE LACTOSUERO Y ESTIÉRCOL AGREGADOS A CADA MEZCLA

Mezcla	Contenido de lactosuero (mL)	Contenido de estiércol (g)	Aportes de sólidos volátiles por parte del lactosuero
BMP1	0.0	15.5	0%
BMP2	10.0	11.0	29%
BMP3	15.0	8.8	44%
BMP4	20.0	6.5	58%
BMP5	25.0	4.2	73%
BMP6	30.0	2.0	87%
BMP7	34.4	0.0	100%

Fuente: Elaboración propia

Para cada mezcla de sustratos enlistada anteriormente en la TABLA III, se midió el pH de las soluciones obtenidas después de añadir 50 mL de inóculo. Para las mezclas que tenían un pH relativamente cercano a la neutralidad (pH de entre 6.7 y 7.2) sólo se realizaron dos réplicas sin ajustar el pH, mientras que

para las demás se realizaron cuatro réplicas: dos con el pH natural y dos ajustándoles el pH, empleando una solución de bicarbonato de sodio 1 M o ácido cítrico 1 M según fuera el caso.

En base a lo anterior, se prepararon 4 réplicas de las mezclas 1, 5, 6 y 7, mientras que de las restantes sólo se prepararon dos réplicas. A dos de las réplicas de la mezcla 1 se le ajustó el pH con ácido cítrico según sus requerimientos, mientras que a dos réplicas de las mezclas 5, 6 y 7 se les ajustó el pH con bicarbonato de sodio. Para identificar cada reactor se empleó la nomenclatura mostrada en la TABLA IV.

TABLA IV
NOMENCLATURA PARA IDENTIFICACIÓN DE MEZCLAS DE SUSTRATOS PARA PRUEBAS BMP

Tipo de mezcla	Identificación
Réplicas con pH natural	BMP A.B
Réplicas con pH ajustado	BMP A.B pH

Fuente: Elaboración propia

La letra “A” de las identificaciones mostradas en la TABLA IV representa al tipo de mezcla, dicho número puede variar entre 1 y 7, según las mezclas de la TABLA III. La letra “B” representa al número de réplica, la cual puede ser 1 o 2.

Es importante mencionar que a cada reactor se le añadió 50 mL de inóculo. Los volúmenes de sustancias agregadas a los reactores permitían dejar un espacio dentro de los

reactores, en el cual se acumulaba el biogás producido. Luego de realizar el llenado con las cantidades específicas, se tapó cada botella con tapones de hule, verificando que éstos no tuvieran agujeros. Posteriormente se extrajo el oxígeno contenido en las botellas, burbujando dentro de cada reactor la mezcla de O₂ y N₂ durante aproximadamente tres minutos, colocando una aguja extra para permitir la salida del oxígeno contenido en cada reactor. Al haber terminado de burbujear todos los reactores, éstos fueron introducidos en la incubadora y se mantuvieron a una temperatura de 38°C.

B. Metodología de monitoreo de reactores

La producción de metano fue monitoreada diariamente durante los primeros nueve días y luego semanalmente. La verificación de la producción de biogás y metano dentro de cada reactor requirió del empleo de una jeringa graduada de 50 mL y botellas de 100 mL con tapones de hule similares a los reactores, a las cuales se les añadió 70mL de una solución de hidróxido de sodio 0.02 M y tres gotas de fenolftaleína.

Con el fin de conocer el volumen de biogás producido, cada reactor se agitaba manualmente durante unos segundos y luego el tapón de hule se perforaba con la aguja de la jeringa de 50 mL. El pistón de la jeringa era desplazado acorde al volumen de biogás recolectado dentro de la misma.

Luego de recolectar el biogás producido, se inyectaba una cantidad máxima de 30 mL de éste a la botella contenedora de la solución de hidróxido de sodio 0.02 M. Se agitaba la botella durante aproximadamente 30 segundos y se observaba el cambio de color de la solución de una tonalidad rosada a incolora. Finalmente se pinchaba nuevamente el tapón de la botella que contenía a solución de hidróxido de sodio, y se cuantificaba el volumen de gas recolectado en la jeringa. Este volumen representa el metano obtenido.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar los análisis de laboratorio para la caracterización del lactosuero, estiércol e inóculo a emplear, se obtuvieron los resultados que se muestran en la TABLA V.

TABLA V
CARACTERÍSTICAS DEL LACTOSUERO DETERMINADAS
EXPERIMENTALMENTE

Características	Lactosuero	Estiércol	Inóculo
Sólidos totales (%)	6.37%	15.21%	1.82%
Sólidos volátiles (%ST)	89.94%	84.59%	31.85%
pH	4.3	--	8.18

Fuente: Elaboración propia

En la TABLA VI y la TABLA VII se muestran los valores de pH promedio de cada una de las mezclas de sustratos antes de agregar el inóculo, así como también luego de haberlo añadido a cada una. Además se muestran los valores de pH obtenidos al finalizar las pruebas BMP.



TABLA VI
MEDICIONES DE PH DE MEZCLAS AL INICIAR Y FINALIZAR
LOS ENSAYOS

Ensayo	Promedio de pH de mezclas sin inóculo	Promedio de pH inicial de mezclas con inóculo	Promedio de pH al finalizar pruebas
BMP1	7.60	7.94	6.84
BMP2	6.16	7.20	7.08
BMP3	5.59	6.96	7.26
BMP4	5.03	6.74	5.57
BMP5	4.56	6.57	5.43
BMP6	4.27	6.40	5.33
BMP7	4.10	6.24	5.16

Fuente: Elaboración propia

Según los valores de pH finales reportados en la TABLA VI y TABLA VII, se puede concluir que los ensayos: 4, 5, 6, 7, 5 pH, 6 pH y 7 pH sufrieron de acidificación debido a que los valores finales reportados se encuentran por debajo del rango de operación propuesto de 6.7 y 7.02.

TABLA VII
MEDICIONES DE PH DE MEZCLAS AL INICIO Y FINALIZACIÓN
DE LAS PRUEBAS CON AJUSTE DE PH

Ensayo sin inóculo	Promedio de pH mezclas NaHCO3	Promedio de pH mezclas + inóculo y pruebas	Promedio de pH al final
BMP1 pH	7.42	7.02	7.02
BMP5 pH	4.63	6.95	5.58
BMP6 pH	4.31	7.04	6.33
BMP7 pH	4.09	7.02	5.93

Control	6.64	--	7.01
Calidad			
Inóculo	8.18	--	7.39

Fuente: Elaboración propia

A. *Resultados de producción de metano y caracterización de biogás durante período completo*

Durante el período en que se llevaron a cabo las pruebas BMP se recolectaron datos sobre el volumen de biogás y metano producidos en días seleccionados. A partir de esos datos, se obtuvo la producción acumulada de metano en cada reactor por gramo de sólido volátil alimentado mediante las mezclas de sustratos. Esto se calculó para cada uno de los días de monitoreo, restando la producción acumulada obtenida mediante el ensayo de inóculo aislado. A continuación se describen los resultados obtenidos y posteriormente su análisis.

En la TABLA VIII se muestran datos correspondientes a las producciones totales de metano obtenidas en cada reactor al cabo de 50 días. Se observa que la mayor desviación corresponde a los datos de la mezcla 3 con pH natural, seguida de la mezcla 1 con pH ajustado, la mezcla 5 con pH ajustado y la mezcla 1 con pH natural.

TABLA VIII
PRODUCCIÓN TOTAL DE METANO OBTENIDA EN CADA
REACTOR

Ensayo	Producción total (mLch4/gsv)	Producción promedio (mLch4/gsv)	Desviación estándar	Diferencia entre cada réplica (ml)
1.1	329.3	313.3	16.0	32.0
1.2	297.3			
2.1	286.0	272.3	13.7	27.3
2.2	258.7			
3.1	239.2	220.0	19.2	38.3
3.2	200.0			
4.1	76.7	82.9	6.3	12.5
4.2	89.1			
5.1	73.2	71.6	1.6	3.1
5.2	70.1			
6.1	94.5	89.9	4.5	9.1
6.2	85.4			
7.1	105.1	102.9	2.2	4.4
7.2	100.8			
1.1 pH	333.56	350.7	17.2	34.4
1.2 pH	367.9			

5.1 pH	86.56	102.7	16.1	32.3
5.2 pH	118.8			
6.1 pH	163.7	156.2	7.5	15.0
6.2 pH	148.8			
7.1 pH	158.5	143.8	14.8	29.5
7.2 pH	129.0			

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 1 se observan las producciones acumuladas en los reactores conteniendo las réplicas del ensayo BMP 1 con pH natural y ajustado. Este ensayo se componía únicamente de estiércol bovino. Se muestra una tendencia creciente en la producción de metano en las cuatro réplicas, es decir que la digestión anaerobia en los cuatro ensayos aún podía continuar después de 50 días. Los datos de producción correspondientes a las réplicas que se operaron ajustando el pH, son mayores que los de las réplicas con pH natural.

En el caso de las mezclas 2 y 3 se tienen tendencias de producción similares entre las réplicas de cada ensayo. En ambas mezclas se observa una tendencia creciente, por lo cual la digestión anaerobia podía continuar por más de 50 días. Esto se observa en la Fig. 2

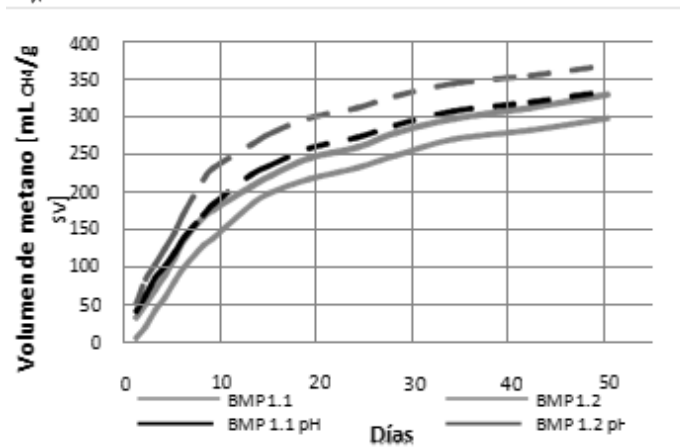


Fig. 1 Producción acumulada de metano en BMP 1

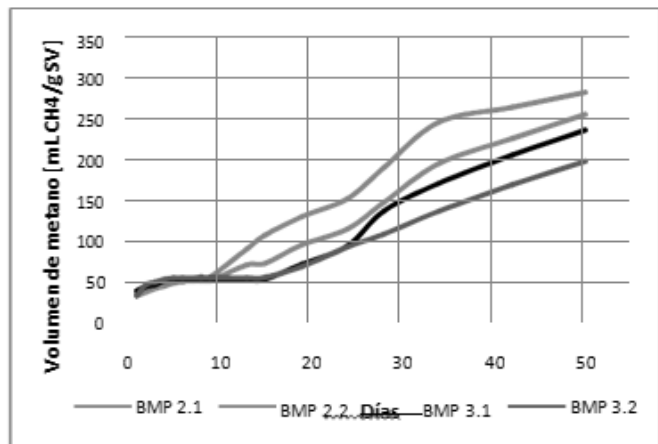


Fig. 2 Producción acumulada de metano en BMP 2

En la Fig. 3 se observa que en el ensayo 4 a partir del día 9 las producciones de metano son mínimas o nulas, debido a que las gráficas de producción acumulada no poseen tendencias crecientes.

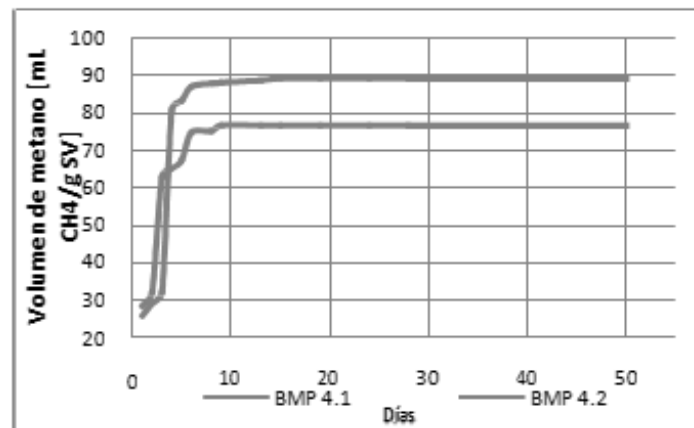


Fig. 3 Producción acumulada de metano en BMP 4

La Fig. 4 muestra que en las BMP 5, al igual que las BMP 4, las producciones de metano son mínimas o nulas a partir del día 15 en las mezclas con pH natural y en el día 9 en las mezclas con pH ajustado. En la Fig. 5 se observa que la producción de metano en la BMP 6 con pH natural se vuelve despreciable a partir del día 24; lo mismo sucede en el caso de las réplicas con pH ajustado entre los días 8 y 28. No obstante, a partir del día 34 se observa una tendencia creciente en la gráfica de producción acumulada, lo que indica que se produjo metano a partir del día 34 luego de un período de producción nula.

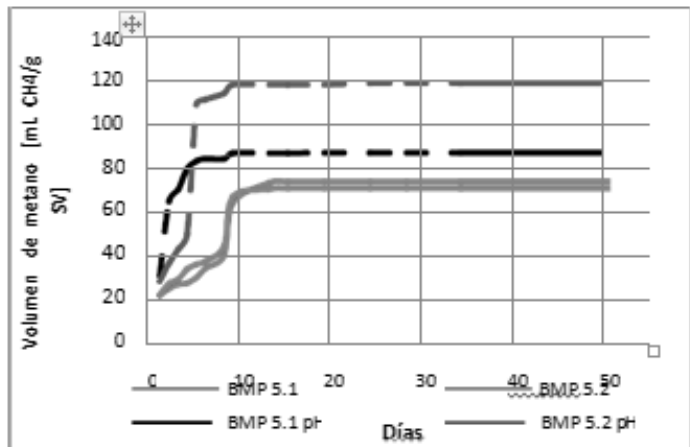


Fig. 4 Producción acumulada de metano en BMP 5

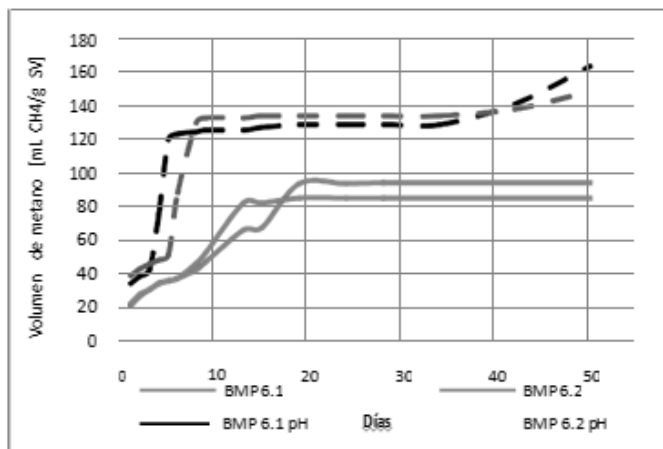


Fig. 5 Producción acumulada de metano en BMP 6

En la Fig. 6 se observa que el ensayo BMP 7 presenta el mismo comportamiento que las mezclas 4 y 5 mencionadas anteriormente, ya que a partir de los días 28 y 8, para las réplicas del ensayo 7 con pH natural y ajustado respectivamente, se observan producciones mínimas.

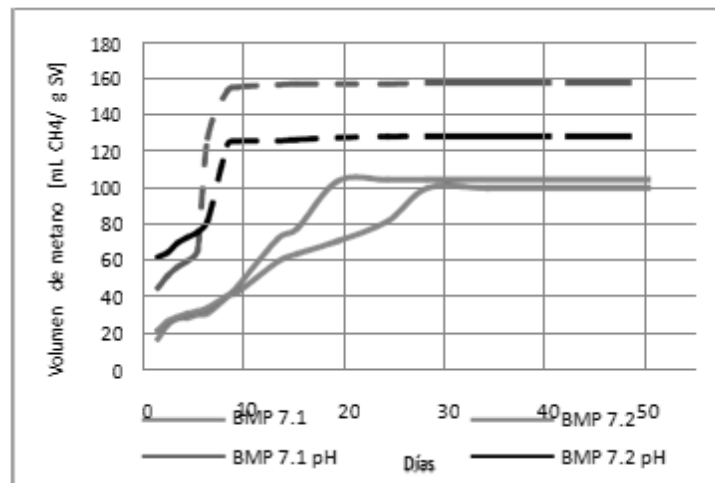


Fig. 6 Producción acumulada de metano en BMP 7

Al relacionar las gráficas de producción acumulada de metano de los ensayos BMP 4, 5,6 y 7 con el fenómeno de acidificación evidenciado en los valores de pH mostrados en la TABLA VI y TABLA VII, se puede determinar aproximadamente el momento en el cual el pH cayó por debajo de los valores tolerables por las bacterias acetogénicas y metanogénicas, ya que en todas las gráficas de producción acumulada de metano de los ensayos



mencionados, dejan de aumentar, lo que indica que las producciones fueron despreciables a partir de los días mencionados en cada caso.

En la Fig. 7 se observa una comparación entre los promedios de las producciones totales obtenidas en cada tipo de ensayo. Las mayores producciones de metano corresponden al ensayo BMP 1, compuesto solamente de estiércol bovino. La mezcla de lactosuero y estiércol que produjo un volumen de metano mayor es la mezcla 2, seguida de la 3, la 6 con pH ajustado y en cuarto lugar se encuentra el lactosuero con pH ajustado (BMP 7 pH). La mezcla que produjo una menor cantidad de metano es la 5 con pH natural.

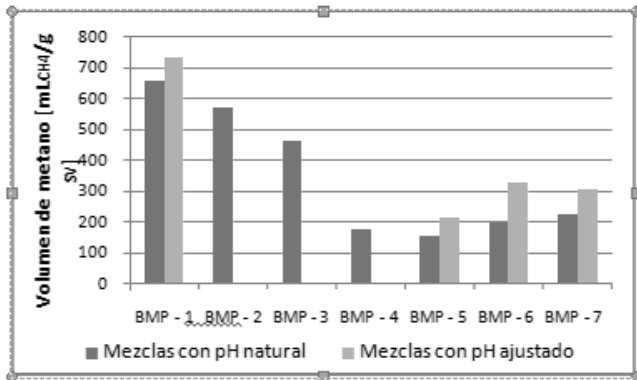


Fig. 7 Producción de metano total obtenida en cada tipo de ensayo

Al comparar las producciones mostradas en la Fig. 7 de los ensayos 1, 5, 6 y 7 con pH natural y ajustado, se observa que en todos los casos, el volumen de metano producido es considerablemente mayor en las réplicas con el ajuste de pH. En la TABLA IX se comparan las producciones de estos ensayos.

TABLA IX
COMPARACIÓN ENTRE METANO OBTENIDO EN MEZCLAS DE PH NATURAL Y AJUSTADO (DÍA 50)

Tipo de mezcla	Producción con pH natural (mL CH ₄ /Gsv)	Producción con pH ajustado (mL CH ₄ /gSV)	% diferencia
BMP1	313.30	350.73	12%
BMP5	71.67	102.70	43%
BMP6	89.96	156.24	73%
BMP7	102.93	143.76	39%

Fuente: Elaboración propia

Los datos de la TABLA IX muestran que el volumen extra producido en las réplicas con ajuste de pH representa entre el 12% y el 73% de los volúmenes producidos con pH natural. La mayor diferencia se obtiene en el caso de la mezcla BMP 6 y la mínima en la BMP1.

Los valores máximos de producción de metano obtenidos en este estudio, fueron los obtenidos a partir de los ensayos 2, 3, 6 pH y 7 pH, no obstante, teniendo en cuenta el dato teórico del potencial de producción de metano del lactosuero dulce, el cual varía desde 300 a

440 L CH₄/kg SV, se observa que mediante estos ensayos no fue posible alcanzar dicho valor.

Los mayores volúmenes de metano obtenidos mediante el lactosuero puro (BMP 7) con pH natural y ajustado se obtuvieron con las réplicas 1 de cada ensayo; estos valores se muestran en la TABLA X. Al compararlos con los valores reportados en la bibliografía consultada se observa que el porcentaje de desviación con respecto al dato teórico es menor en el ensayo con pH ajustado.

TABLA X
COMPARACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN DE METANO TEÓRICA Y EXPERIMENTAL A PARTIR DE LACTOSUERO

Ensayo	Mayor producción de metano obtenida (Mlch ₄ /gSV)	Desviación respecto al dato teórico
BMP7: Lactosuero con pH natural	105.11	64%
BMP7 pH: Lactosuero con pH ajustado al inicio del proceso	158.51	47%

Fuente: Elaboración propia

En el artículo [8], se menciona que para obtener producciones mayores de metano por unidad de sólidos volátiles del lactosuero, se debe ajustar periódicamente el pH del sustrato durante todo el proceso de digestión anaerobia. En dicho artículo se menciona haber alcanzado producciones entre 300 y

500 L CH₄/kg SV, al ajustar el pH, separar la fase de hidrólisis del resto del proceso y emplear cargas orgánicas bajas.

Según los resultados mostrados en la TABLA X, se observa que al ajustar el pH solamente al inicio del proceso, el porcentaje de desviación respecto al dato teórico se disminuye en un 17%, por lo tanto, si se hubiera ajustado el pH durante el proceso de digestión anaerobia y no sólo al inicio del mismo, se hubiera alcanzado una producción de metano más cercana al valor teórico para el lactosuero dulce. Asimismo, el ajuste de pH durante el proceso de digestión anaerobia hubiera favorecido la producción de metano en las mezclas de lactosuero y estiércol que presentaron el fenómeno de acidificación.

Teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos, se concluye que la mezcla de lactosuero y estiércol que resulta recomendable emplear en un proceso de digestión anaerobia es la mezcla 2, la cual posee un 30% y 70% en contribución de SV de lactosuero y estiércol respectivamente. En la Fig. 7 se evidencia que este ensayo produjo un mayor volumen de metano por unidad de sólidos volátiles alimentados al reactor en comparación con todas las demás pruebas de co-digestión y que el lactosuero puro.

En la TABLA VI se observa que al finalizar el proceso de biodigestión, el pH de la mezcla se encontraba dentro del rango de operación óptimo, y no resultó necesario el ajuste



67 Digestión anaerobia del lactosuero puro y en co-digestión.

de pH al inicio de la prueba BMP, por lo tanto, las proporciones de estiércol bovino y lactosuero empleadas en la mezcla 2, evitan que ésta sufra de acidificación.

B. Resultados de producción de metano y caracterización de biogás durante período inicial

Según las gráficas de la Fig. 4 a la Fig. 8, se observa que en la mayoría de ensayos, la producción de metano se vuelve despreciable a partir del día 20 aproximadamente, por lo cual se consideró provechoso analizar la producción acumulada de metano hasta el día 15 en cada uno de los reactores.

En la Fig. 8 se muestra la producción acumulada de metano en los primeros quince días de monitoreo de las pruebas BMP. Luego de quince días de monitoreo, se observa que el ensayo que ha producido un mayor volumen de metano es el BMP-1. Entre los ensayos que contienen lactosuero, se observa que las mayores producciones corresponden a los ensayos de 7 pH, 6 pH y 5 pH. El lactosuero como sustrato puro con pH ajustado presenta los mejores resultados en comparación a todas las pruebas de co-digestión.

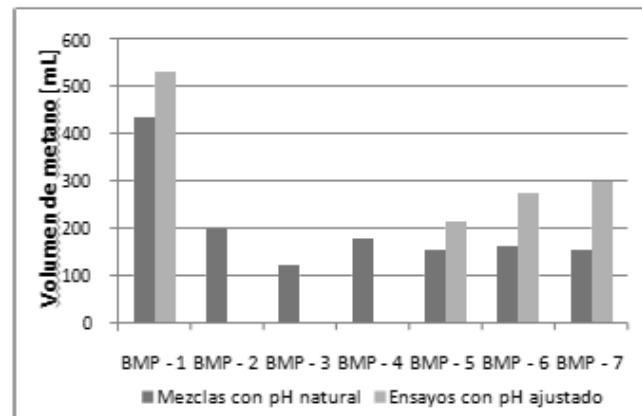


Fig. 8 Producción acumulada de metano en quince días

En la TABLA XI se compara el desempeño hasta el día quince entre las réplicas con pH natural y ajustado de los ensayos 1, 5, 6 y 7.

TABLA XI
COMPARACIÓN ENTRE PRODUCCIONES DE METANO EN
MEZCLAS DE PH NATURAL Y AJUSTADO (DÍA 15)

Tipo de mezcla	Producción de metano con pH natural (mLCH ₄ /gSV)	Producción de metano con pH ajustado (mLch ₄ /gSV)	% diferencia entre producciones
Mezcla 1	209.99	256.78	22%
Mezcla 5	71.67	102.19	42%
Mezcla 6	75.14	130.77	74%
Mezcla 7	71.35	142.44	99%

Fuente: Elaboración propia

Los datos mostrados en la TABLA XI muestran que la diferencia entre las producciones de metano con pH natural y ajustado oscila entre el 22% y el 99%.

Para darle seguimiento a la rapidez de biodegradabilidad de las mezclas, en la TABLA XII se muestra el porcentaje del metano producido en quince días de operación de los reactores, en comparación con la producción total de 50 días. Los datos mostrados muestran que todas las mezclas, a excepción de la 2 y 3, ya habían producido el 50% o más del metano total que llegarían a producir en 50 días.

Las mezclas 4, 5 y 5 pH ya habían producido aproximadamente el 100 % del volumen de metano recolectado en los 50 días de monitoreo. Lo anterior puede deberse a la influencia del nivel de acidez en dichos ensayos, imposibilitando la actividad de las bacterias y el estancamiento de la producción.

El ensayo BMP-7 pH también presenta un porcentaje de producción del 99% del metano generado en 50 días. Nuevamente este fenómeno se puede relacionar con la caída interna del pH en el reactor.

TABLA XII
VOLUMEN DE METANO ACUMULADO EN QUINCE DÍAS

Ensayo	Promedio de metano acumulado en 15 días (mL)	Porcentaje del metano producido en 50 días
BMP1	210.0	67%
BMP2	92.1	33%
BMP3	56.2	25%
BMP4	82.9	100%
BMP5	71.7	100%
BMP6	75.1	83%
BMP7	71.4	69%
BMP1pH	256.8	73%
BMP5pH	102.2	99%
BMP6pH	130.8	83%
BMP7pH	142.4	99%

Fuente: Elaboración propia

Ante los resultados obtenidos al cabo de quince días, se concluye que el proceso de digestión anaerobia en el ensayo 7 con el pH ajustado presenta los mejores índices de producción de metano en comparación con cualquier otro ensayo de co-digestión.

Lo anterior puede deberse a que la materia digerible o sólidos volátiles se encontraban de forma soluble, por lo que el proceso se realiza en forma más acelerada. Según la información propuesta por IDAE [2007, pág. 14] para sustratos de dicha naturaleza, se considera que para el lactosuero puro la fase determinante de la velocidad del proceso podría ser la metanogénesis, la cual se ve acelerada



debido a la adición de bacterias metanogénicas a través del inóculo, cuya actividad se ve favorecida en los primeros días debido al ajuste de pH realizado.

El ensayo BMP-7 con pH natural no presenta los mismos resultados que el ensayo BMP-7 pH a pesar de poseer toda la materia digerible en solución. Lo anterior puede deberse a que al no ajustar el pH natural de la mezcla se limita la actividad de las bacterias metanogénicas del inóculo agregado.

Las demás mezclas de lactosuero y estiércol posiblemente poseen a la hidrólisis como fase limitante, debido a que una parte de la materia digerible se encuentra en suspensión, la cual es aportada por la masa de estiércol añadida a cada mezcla.

IV. CONCLUSIONES

El lactosuero de tipo ácido utilizado en este estudio presentó un máximo de producción de 105.1 LCH₄/kgSV y 158.5 LCH₄/kgSV al ser empleado en los reactores de las pruebas BMP, operados con pH natural y pH-ajustado respectivamente. Lo anterior difiere con la producción promedio teórica obtenida con lactosuero de tipo dulce, ya que la alta concentración de ácido láctico contenido en el lactosuero de tipo ácido puede disminuir la eficiencia de las etapas de acetogénesis y metanogénesis. Además, a nivel teórico se conoce que el lactosuero ácido posee una menor cantidad de grasas que el de

tipo dulce, las cuales contribuyen a que un sustrato posea un potencial de producción de metano alto.

En los reactores de las pruebas BMP que contenían un porcentaje menor al 44% de sólidos volátiles (SV) aportado por el lactosuero, no se presentaron problemas de acidez, lo cual se evidencia en los valores de pH obtenidos al final del período de evaluación. El fenómeno anterior es atribuido a la capacidad tampón del estiércol bovino, por lo tanto, para el caso de las mezclas con más de 44% de SV aportados por el lactosuero, se recomienda realizar ajustes de pH no sólo al inicio de las pruebas, sino también durante el proceso de digestión anaerobia.

Las producciones de metano son mayores en el caso de las mezclas con un porcentaje menor al 44% de SV aportado por el lactosuero, en comparación con las demás mezclas de co-digestión, debido a las mayores cantidades de nutrientes que el estiércol aporta.

Debido a la rapidez de biodegradabilidad observada al analizar el rendimiento al cabo de 15 días, se recomienda emplear tiempos de retención menores.

V. REFERENCIAS

- [1] M. d. C. Almécija, «Obtención de lactoferrina bovina mediante ultrafiltración de lactosuero,» 2007. [En línea]. Available:



- <http://digibug.ugr.es/bitstream/10481/1721/1/17243518.pdf>. [Último acceso: 05 Junio 2014].
- [2] R. A. Parra, «Lactosuero: Importancia en la industria de alimentos,» *Revista Facultad Nacional de Agronomía de Medellín*, vol. 62, pp. 4967-4982, 2009.
- [3] A. K. Alsaed, R. Ahmad, H. Aldoomy, D. Saleh, S. Abd el qadr, H. Sakejha y L. Mustafa, «Characterization, Concentration and Utilization of Sweet and Acid Whey,» 2011.[En línea].Available <http://www.icef11.org/content/papers/fpe/FPE454.pdf>. [Último acceso: 5 Junio 2014].
- [4] F. Castellón, F. A. Hernández y L. G. Marroquín, «Elaboración de un producto alimenticio en El Salvador a partir del suero dulce lácteo utilizando el sistema de ultrafiltración,» 2009. [En línea]. Available:http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/123456789/361/1/44_758_tesis.pdf. [Último acceso: 09 Junio 2014].
- [5] A. A. Chatzipaschali y A. G. Stamatis, «Biotechnological Utilization with a Focus on Anaerobic Treatment of Cheese Whey: Current Status and Prospects,» *Energies*, vol. 5, pp. 3492-3595, 2012.
- [6] IDAE, Biomasa: Digestores anaerobios, Madrid: BESEL, S.A., 2007.
- [7] FIAB, «Energía renovable a partir de los residuos de la industria alimentaria: Biogás,» AINIA, Madrid, s.f..
- [8] M. Cebrián, M. Gutierrez, M. Orive, M. Rentería, D. San Martín y J. Zufía, «Aprovechamiento integral del lactosuero generado en el sector lácteo: proyecto Valorlact,» *Industrias Lácteas Españolas*, vol. 417, pp. 30-36, Diciembre 2013.
- [9] J. Fernández, N. Muñoz, C. Rico y J. L. Rico, «Anaerobic co- digestion of cheese whey and liquid dairy manure: Batch tests,» s.f.. [En línea]. Available:http://www.ramiran.net/doc13/Proceeding_2013/documents/S7.16..pdf. [Último acceso: 16 Junio 2014].
- [10] E. A. Navarro Chacón y M. R. Rodríguez Luna, «Evaluacion del potencial de generación de biogás de desechos agroindustriales de la bahía de Jiquilisco,» Antiguo Cuscatlán, 2012.
- [11] G. Esposito, L. Frunzo, L. Flavia, A. Panico y F. Pirozzi, «Bio- Methane Potential Tests to Measure the Biogas Production from the Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates,» *The Open ENvironmental Engineering Journal*, vol. 5, pp. 1-8, 2012.
- [12] I. Angelidaki y W. Sanders, «Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants,» *Reviews in Environmental Science and Bio|Technology*, vol. 3, pp. 117- 119, 2004.
- [13] American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Washington, D.C., 1999.
- [14] P. M. Guimarães, J. A. Teixeira y L. Domingues,«Fermentation of lactose to bio-ethanol by yeasts as part of integrated solutions for the valorisation of cheese whey,» 2010. [En línea Available:http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/10543/1/Guimaraes_BiotechnolAdv.pdf?origin=publication_detail. [Último acceso: 18 Junio 2014].