

Artículo Original

**DIGESTIÓN ANAEROBIA DE SUERO DE QUESO UTILIZANDO
INÓCULO DE ESTIÉRCOL PORCINO A DIFERENTES
RELACIONES INÓCULO-SUSTRATO**

**ANAEROBIC DIGESTION OF CHEESE WHEY USING SWINE MANURE
ANAEROBIC SLUDGE AT DIFFERENT INOCULUM-SUBSTRATE RATIOS**

Jorge Enrique González-Herrera ¹ <https://orcid.org/0000-0002-3188-5679>

Yaima Hernández-Beltrán ² <https://orcid.org/0000-0002-7390-986X>

Lisbet Mailín López González ¹ <https://orcid.org/0000-0002-2362-5703>

Janet Jiménez Hernández ^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-1631-6539>

¹ Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI). Universidad de Sancti Spiritus “José Martí Pérez” (UNISS). Avenida de los Mártires 360, CP 60100, Sancti Spiritus, Cuba.

² Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Sancti Spiritus “José Martí Pérez” (UNISS). Avenida de los Mártires 360, CP 60100, Sancti Spiritus, Cuba.

Recibido: Julio 22, 2020; Revisado: Noviembre 12, 2020; Aceptado: Enero 8, 2021

RESUMEN

Introducción:

La digestión anaerobia del suero de queso es una tecnología muy atractiva y ampliamente utilizada, aunque se necesitan estrategias que contrarresten la rápida acidificación del suero, que provoca la caída del pH y posteriores fallas.

Objetivo:

Evaluar la digestión anaerobia del suero de queso utilizando lodo anaerobio de estiércol porcino como inóculo, así como la influencia de diferentes relaciones de inóculo-sustrato y la cinética de reacción en cada caso.

Materiales y Métodos:

La caracterización del inóculo y suero se realizó en los laboratorios de la Universidad de Sancti Spiritus “José Martí Pérez” (UNISS) según métodos estándares; se utilizó ensayo de forma discontinua en reactores de 2 L, para la determinación del rendimiento de metano a tres relaciones inóculo-sustrato (1:1, 2:1 y 3:1).

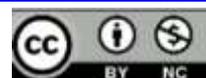
Resultados y Discusión:

Se demostró que es posible degradar este suero con el inóculo de estiércol porcino en las primeras 24-48 horas, aunque no se alcanza el potencial de metano contenido, dada



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Janet Jiménez, Email: janet@uniss.edu.cu



la necesaria adaptación previa del inóculo y la inhibición que implica la acidez del sustrato. Los reactores con proporción inóculo sustrato 3:1 manifestaron el mayor rendimiento de metano ($191 \text{ L}_N\text{CH}_4\text{kgSV}^{-1}$). El análisis cinético reveló que el modelo Hill fue el que más se ajustó, aunque el ajuste de todos los modelos experimentados permite predecir el potencial de metano.

Conclusiones:

Este trabajo demuestra que es posible utilizar lodo anaerobio de estiércol porcino para el arranque de biorreactores que traten suero de queso, y se puede utilizar el modelo de Hill para predecir la formación de metano.

Palabras clave: digestión anaerobia; inóculo de estiércol porcino; suero de queso.

ABSTRACT

Introduction:

Anaerobic digestion of cheese whey is a very attractive and widely used technology, although strategies are needed to counteract the rapid whey acidification, which causes a pH dismiss and subsequent failures.

Objective:

To evaluate cheese whey anaerobic digestion using anaerobic pig manure sludge as inoculum, as well as the influence of different inoculum-substrate relationships and the reaction kinetics in each case.

Materials and Methods:

Inoculum and serum characterization was carried out in the UNISS laboratories according to standard methods; 2 L batch reactors were used to determine methane yield at three inoculum-substrate ratios (1:1, 2:1 y 3:1).

Results and Discussion:

It is possible to degrade this serum with the pig manure inoculum in the first 24-48 hours, although the potential of contained methane is not reached, due to the necessary prior inoculum adaptation and the inhibition implied by the substrate acidity. Reactors with a 3:1 substrate- inoculum ratio showed the highest methane yield ($191 \text{ L}_N\text{CH}_4\text{kgVS}^{-1}$). Kinetic analysis revealed that the Hill model was the best fit, although the fit of all the experimented models allows predicting the methane yield.

Conclusions:

This work demonstrates that it is possible to use anaerobic pig manure sludge to start bioreactors that treat cheese whey, and the Hill model can be used to predict methane formation.

Keywords: anaerobic digestion; pig manure inoculum; cheese whey.

1. INTRODUCCIÓN

Los efluentes de la industria láctea se caracterizan por su alta carga contaminante debido al contenido de materia orgánica en forma de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5). La presencia de aceites y grasas, las variaciones del pH (2-11), las variaciones de temperatura, los niveles elevados de

nitrógeno y fósforo (por productos de limpieza), y la conductividad elevada (por el cloruro sódico del salado de quesos) (Escalante et al., 2018), hacen de estos efluentes residuos difíciles de tratar. Dentro de estos, el suero de queso se destaca como alto contaminante de la industria alimentaria (Cury et al., 2014); por cada kilogramo de queso, se producen aproximadamente nueve litros de suero (85-90% del volumen de la leche), cuya DQO varía entre 65 y 140 gL⁻¹ (Escalante et al., 2018).

A pesar de los compuestos de interés que contiene el suero (Prazeres et al., 2012) y su posible aprovechamiento como alimento animal, en Cuba aún persiste el vertimiento de grandes volúmenes al medio, donde los procesos de tratamiento aeróbico como el proceso de lodos activados han resultado ineficientes.

La digestión anaerobia (DA) constituye una solución atractiva para tratar este efluente porque ofrece solución a tres problemáticas a la vez: reducción de la DQO, obtención de energía y recuperación de nutrientes (Kataki et al., 2016). Sin embargo, el éxito de esta tecnología para tratar el suero depende de: a) la composición fisicoquímica (materia orgánica, alcalinidad y acidez), b) inóculo (alta capacidad de tampón), y c) configuración del reactor (recirculación de efluentes) (Escalante et al., 2018). La mayoría de las dificultades del proceso se deben al bajo contenido de alcalinidad y a la rápida acidificación del suero que puede agotar la capacidad buffer del sistema, provocando una caída en el pH, acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y posteriores fallas del reactor. Teniendo en cuenta lo anterior y basado en la demostrada capacidad tampón del lodo anaerobio de estiércol porcino (Jiménez et al., 2014), el objetivo de este trabajo fue evaluar la DA del suero de queso cuando se utiliza lodo anaerobio de estiércol porcino como inóculo, así como, la influencia de diferentes relaciones de inóculo-sustrato sobre la producción de metano y la cinética de la reacción.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Procedencia y características del suero de queso y el inóculo de estiércol porcino

El suero de queso fue suministrado por la UEB “Mérida” de la Empresa de Productos Lácteos Río Zaza, Yaguajay, Sancti Spíritus, Cuba. Las muestras de suero se tomaron durante un ciclo productivo de 8 horas a intervalos de 1h (muestra compuesta) a diferentes puntos de la salida del residual durante la producción de queso. Este fue transportado al laboratorio de la UNISS rápidamente y almacenado a 4°C antes de su uso. El lodo anaerobio de estiércol porcino utilizado como inóculo, se colectó en un biodigestor anaerobio tipo chino de 42 m³, que trata estiércol porcino en una granja familiar de la Cooperativa de Producción Agropecuaria “Juan González”, Cabaiguán, Sancti Spíritus. La caracterización, tanto del inóculo como del suero de queso, se realizó según los métodos estándares (APHA, 2012). El lodo anaerobio se caracterizó según su composición de: sólidos volátiles (SV) de 27,77 ± 1,4 gL⁻¹, DQO de 133,54 ± 9,2 gL⁻¹, alcalinidad de 3,30 ± 0,6 gkg⁻¹ y AGV de 0,26 ± 0,1 gkg⁻¹. Las características del suero se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización del suero de queso objeto de estudio

<i>Parámetro</i>	<i>Valor*</i>
pH	5,37 ± 0,02
Sólidos totales (ST) (%)	10,62 ± 1,35
Sólidos volátiles (SV) (%)	5,97 ± 1,35
SV (%ST)	55,75 ± 5,42
Sólidos Fijos (SF) (%)	4,65 ± 0,01
Concentración de Ca ²⁺ y Mg ²⁺ (ppm)	470,00 ± 3,1
Concentración de Ca ²⁺ (ppm)	42,10 ± 1,4
Concentración de Mg ²⁺ (ppm)	88,60 ± 0,8
Concentración de Na (µgmL ⁻¹)	4,40 ± 0,10
Concentración de K (µgmL ⁻¹)	0,10 ± 0,02
DQO (gLI ⁻¹)	123,16 ± 2,56

*Valor promedio ± desviación estándar.

2.2 Digestión anaerobia de suero de queso en discontinuo

El ensayo se realizó en reactores de polietileno de 2 L de capacidad, sellados con tapón de goma. El experimento constó de tres diferentes relaciones inóculo-sustrato (1:1, 2:1, y 3:1). Así, el volumen total de digestión contenía 800 mL de inóculo en cada reactor y 180,55; 90,27; y 60,18 mL de suero de queso respectivamente, en función de los sólidos volátiles del inóculo respecto a la DQO del suero de queso. Cada experimento se realizó por triplicado, además se utilizaron dos reactores controles que contenían inóculo y agua. Los reactores se mantuvieron a una temperatura controlada de 37±2°C en baño de María durante los 35 días de experimentación y se agitaban manualmente una vez al día.

2.2.1 Determinación del potencial bioquímico de metano

La producción de metano se determinó diariamente mediante el método de desplazamiento de líquido (NaOH al 2,5%). Para referir el volumen de metano producido diariamente en el laboratorio (L CH₄), a condiciones estándar como volumen normalizado (L_NCH₄), se utilizó la ecuación 1, según los métodos estándares alemanes (VDI 4630, 2006). Antes de normalizar el volumen de metano se le restó el volumen producido en el reactor de control (inóculo sin sustrato).

$$V_N = V_a \cdot \frac{(p_a - p_w) \cdot T_N}{p_N \cdot T_a} \quad (1)$$

Donde:

V_N: Volumen de metano normalizado (L_NCH₄)

V_a: Volumen de metano medido a T_a y p_a (LCH₄)

p_a: Presión a la que se midió el volumen de metano (mbar)

p_w: Presión de vapor del agua a la temperatura T_a (mbar)

T_a: Temperatura ambiente a la que se midió el volumen de metano (K)

p_N: Presión normal (1013,25 mbar)

T_N: Temperatura normal (273,15 K)

Luego se calculó el Potencial Bioquímico de Metano (*BMP*, por sus siglas en inglés) como el volumen de metano acumulado durante el tiempo de digestión (V_{CH_4}) por la masa de suero añadido en términos de SV (SVs), según la ecuación 2, y se expresó en $m^3 CH_4 kg SV^{-1}$.

$$BMP = \frac{\sum_0^{35} V_{CH_4}}{SV_s} \cdot \frac{1}{1000} \quad (2)$$

2.3 Análisis de los parámetros cinéticos

Para la estimación de los parámetros cinéticos en cada condición analizada, se utilizaron los siguientes modelos de primer orden (ecuaciones 3-9):

Modelo de Roediger:

$$y(t) = y_{\max} [1 - \exp(-kt)] \quad (3)$$

Modelo de Gompertz modificado:

$$y(t) = y_{\max} \exp \left[-\exp \left(\frac{R_m e}{y_{\max}} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \quad (4)$$

Modelo de Función Transferencial:

$$y(t) = y_{\max} \left[1 - \exp \left(\frac{-R_m (t-\lambda)}{y_{\max}} \right) \right] \quad (5)$$

Modelo modificado de Hill:

$$y(t) = y_{\max} \frac{t^b}{(c^b + t^b)} \quad (6)$$

Para ello se tomó en consideración los siguientes términos: la producción acumulada de metano $y(t)$ ($L_N CH_4 \text{ kg SV}^{-1}$) en un tiempo dado t (d); el valor del máximo rendimiento de metano (y_{\max}); la constante cinética de velocidad aparente k (d^{-1}); la duración del desfase inicial λ (d) en la producción de metano; la máxima producción específica de metano R_m ($L_N CH_4 \text{ kg SV}^{-1} d^{-1}$); el tiempo al cual la mitad del rendimiento de metano es alcanzado (c); b es un parámetro propio del modelo Hill modificado, el cual se introduce con el valor inicial 1, para la posterior iteración del sistema y el cálculo de su valor real. El ajuste a los modelos se realizó mediante el análisis de regresión no lineal por medio del paquete estadístico *STATGRAPHICS Centurión XVI.II*. Las curvas de producción de metano obtenidas se compararon utilizando la “Comparación multi-muestras” que ofrece el software *Statgraphics* para una $p < 0,05$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De manera general, las características del suero de queso utilizado en este estudio (Tabla 1) fueron muy similares a las informadas por otros autores, independientemente de la variabilidad esperada en los parámetros físico-químicos debido a las diferencias tecnológicas durante el manejo de la leche y la producción quesera (Escalante et al., 2018). Los valores de sólidos totales, volátiles y fijos, están dentro del rango reportado por otros autores (Cury et al., 2014; Escalante et al., 2018). Todo lo cual permitió inferir que la digestión anaerobia del suero no estaría limitada por nutrientes, pero su bajo pH y la concentración de ácidos orgánicos volátiles pudieran inhibir el proceso. Es por ello que un inóculo a partir de lodo anaerobio de estiércol porcino, cuya capacidad tampón es conocida pudiera contrarrestar este efecto.

3.1 Digestión anaerobia del suero de queso utilizando inóculo de estiércol porcino

La rápida formación de metano durante la digestión anaerobia del suero de queso comenzó en las primeras 24 horas, a las tres condiciones de relación inóculo-sustrato ensayadas. Esto indicó que, a pesar de esa variabilidad en las características, varios de los componentes del suero de queso, son de fácil degradación (Figura 1). La fase de latencia fue de menos de 8 horas, lo que sugiere que la concentración de ácidos orgánicos de cadena corta, que caracteriza la composición del suero, fueron sustratos directos de las archaeas metanógenas del inóculo favoreciendo la biometanización. En adición es de notar que las bacterias del inóculo fueron capaces de hidrolizar las macromoléculas del sustrato y comenzar la fermentación de los azúcares obtenidos, puesto que no hubo caída en la formación de metano sino que esta fue continua y creciente durante las 72 horas restantes, esto es diferente a lo informado por otros autores utilizando inóculo de estiércol porcino donde sí se observa una leve caída de la formación de metano durante la inflexión de la curva acumulada (Jiménez et al., 2014).

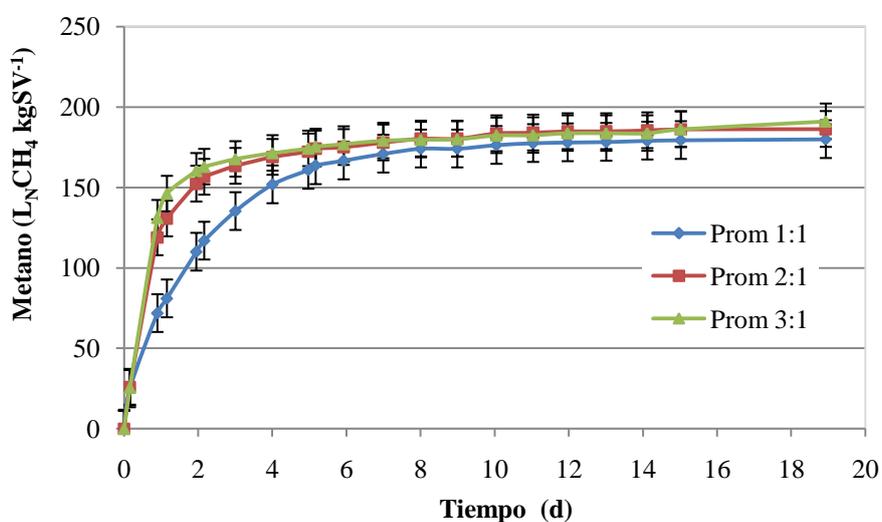


Figura 1. Producción acumulada de metano en cada condición de relación inóculo sustrato evaluada (1:1, 2:1 y 3:1). Cada curva representa la media de tres reactores

Después de las primeras 48 horas se observaron diferencias, aunque no significativas entre los reactores con diferente relación inóculo-sustrato. En los reactores con relación 1:1 la menor pendiente indicó una producción menor y más lenta. Esto puede deberse a que contiene la mayor proporción de sustrato suero de queso y por tanto provoca la acidificación del sistema, afectando directamente la actividad metanogénica específica (Besson, 2018). En esta condición de inóculo sustrato 1:1 la producción se estabiliza a los ocho días, y alcanza un máximo promedio de $179,96 \text{ L}_N\text{CH}_4 \text{ kgSV}^{-1}$ a los diecinueve días. La relación 2:1 alcanza una mayor producción de metano que la relación 1:1 y menor que la 3:1, alcanzando su fase de producción estable a los siete días y su producción final promedio de $186,25 \text{ L}_N\text{CH}_4 \text{ kgSV}^{-1}$.

A la relación 3:1 corresponde la mayor producción de metano, y esto está relacionado con la menor proporción de sustrato, cuya cantidad de ácidos puede ser mejor asimilada por el sistema. La producción se estabiliza a los siete días y logra un máximo promedio de $191 \text{ L}_N\text{CH}_4 \text{ kgSV}^{-1}$. Lo anterior indica que altas concentraciones de sustrato reducen la posibilidad de la formación de metano dado a la influencia de la acidificación del

suero de queso sobre la microbiota anaerobia, incluso a la relación inóculo sustrato 2:1 que es la recomendada por las Normas Alemanas para los ensayos de biometanización (VDI 4630, 2006).

El BMP permite cuantificar la cantidad de metano contenida en un sustrato por unidad de biomasa y tiempo (Jiménez et al., 2015). Investigaciones previas han informado valores de BMP para el suero de queso entre 0,32 y 0,85 m³CH₄ kgSV⁻¹ (Dreschke et al., 2015; Escalante et al., 2018). En este estudio se obtuvo un BMP de 0,21 m³kgSV⁻¹. Este menor BMP alcanzado puede deberse a que el inóculo requiere una mejor adaptación, ya que no logra la completa degradación de la DQO (De Vrieze et al., 2015). El inóculo más utilizado para la DA del suero de queso ha sido el lodo anaerobio de estiércol bovino adaptado (Brown et al., 2016; Besson, 2018). Por otro lado, otra de las causas es la rápida acidificación dada por la formación de AGV durante la fermentación de la lactosa, lo cual influye en el lodo anaerobio de estiércol porcino (De Vrieze et al., 2015, Jiménez et al., 2015).

3.2 Análisis estadístico de los parámetros cinéticos

La comparación multi-muestras permitió determinar que las diferencias entre los valores de producción de metano acumulado de cada relación no fueron significativas, ya que el valor P fue siempre mayor de 0,05, lo que indica que los valores analizados tienen una distribución homogénea. Sin embargo, después de las 48 h y hasta las 96 h si se observan diferencias significativas entre los reactores. La relación 1:1 resultó significativamente menor que las demás. Los parámetros cinéticos obtenidos y sus estadísticos a partir del ajuste de los modelos de Roediger (MR), Hill modificado (MH), Gompertz modificado (MG) y Función Transferencial (MT) se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen de los parámetros de los modelos cinéticos para cada relación inóculo-sustrato

Reactor	Relación	Modelo	<i>y</i> _{max}	<i>k</i>	<i>R</i> _m	λ	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ² _{aj}	<i>ES</i>
1	1:1	MR	172,92	0,51					99,57	3,44
		MH	186,91				1,22	1,40	99,21	4,66
		MT	173,48		83,63	-0,09			99,74	2,68
		MG	170,81		48,38	-0,31			98,45	6,53
7	1:1	MR	170,79	0,56					99,59	3,29
		MH	183,63				1,22	1,26	99,26	4,41
		MT	171,28		90,60	-0,08			99,76	2,53
		MG	168,87		52,67	-0,27			98,44	6,38
12	1:1	MR	188,83	0,46					99,48	4,18
		MH	210,14				1,12	1,62	99,64	3,47
		MT	189,72		81,52	-0,11			99,68	3,28
		MG	186,24		46,71	-0,39			97,93	8,32
10	2:1	MR	195,65	0,87					97,34	9,25
		MH	211,64				1,06	0,77	99,48	4,10
		MT	195,93		164,50	-0,03			97,24	9,43
		MG	193,15		104,26	-0,09			94,85	12,87

6	2:1	MR	172,81	1,15					99,46	3,54
		MH	178,11				1,34	0,56	99,98	0,67
		MT	195,93		164,50	-0,03			97,24	9,43
		MG	171,38		123,68	-0,01			98,23	6,45
11	2:1	MR	172,14	1,19					99,45	3,56
		MH	176,94				1,38	0,54	99,97	0,80
		MT	172,14		204,38	0,00			99,42	3,66
		MG	170,75		128,45	0,00			98,34	6,22
8	3:1	MR	184,75	1,12					96,45	9,94
		MH	195,13				1,15	0,59	98,47	6,53
		MT	184,78		205,96	0,00			96,25	10,21
		MG	182,57		137,19	0,01			94,64	12,21
5	3:1	MR	177,74	1,43					99,27	4,25
		MT	177,63		262,45	0,02			99,30	4,16
		MG	176,47		168,78	0,05			98,96	5,06
9	3:1	MR	177,78	1,38					99,41	3,82
		MH	180,70				1,54	0,48	99,90	1,55
		MT	177,70		249,34	0,01			99,41	3,82
		MG	176,52		158,33	0,04			98,87	5,27

R^2_{aj} : Coeficiente de determinación ajustado %, ES: Error estándar del estimado, y_{max} : rendimiento máximo de metano (L_NCH_4 kg SV^{-1}), k: constante cinética de velocidad aparente (d^{-1}), R_m : velocidad máxima de producción de metano (L_NCH_4 kg $SV^{-1}d^{-1}$), λ : fase de retardo (d).

Todos los modelos se ajustaron a los datos de producción de metano alcanzado en la experimentación (R^2_{aj} superior al 94 %). El modelo que más se ajustó fue el de Hill con todos sus R^2_{aj} superiores a 98 %. Los modelos describen mejor la relación 1:1, pues las curvas de estos reactores tienen una menor pendiente, por lo que tienen una producción de metano menos acelerada. Para cada relación el modelo con mayor error y menor ajuste fue el modelo Gompertz; esto se debió a que todas las curvas mostraron una gran pendiente, debido a que es un sustrato líquido cuya primera fase de hidrólisis es muy rápida, sumado a la biometanización directa de los AGV, por tanto, no puede ser explicada por este modelo. Los valores de y_{max} fueron muy similares para cada una de las relaciones, siendo ligeramente superior los valores de la relación 2:1, con una desviación estándar de 1.7. Los valores de R_m que solo están presente para los modelos MT y MG, y los valores de la constante de velocidad k, que solo están presente para el modelo MR e indican la velocidad de la producción de metano, fueron mayor para la relación 3:1, con una mayor proporción de inóculo. La fase de retardo (λ) fue despreciable para todos los modelos, siendo siempre menor de 0,4 por lo que indica la rápida biodegradabilidad del sustrato.

En resumen estos resultados, no solo demuestran la posibilidad del arranque de reactores anaerobio utilizando estiércol porcino como inóculo sino que además es posible predecir su rendimiento utilizando los modelos anteriormente descritos. Esto resulta de gran valor práctico teniendo en cuenta la posibilidad de la codigestión

anaerobia de estiércoles porcinos y residuales lácteos en general, en una misma área geográfica, que puede ser planificada y modelada energéticamente, en busca de incrementar la utilización de fuentes renovables de energía en sectores productivo clave.

4. CONCLUSIONES

1. En este trabajo se demostró que es posible degradar el suero de queso vía digestión anaerobia utilizando como inóculo lodo anaerobio de estiércol porcino, incluso en las 24-48 h, aunque el potencial de metano está limitado debido a la adaptación del inóculo y los problemas de inhibición por la acidez del sustrato.
2. Del análisis cinético se determinó que el modelo que más se ajustó fue el Hill, aunque todos los modelos ensayados permiten predecir el potencial de metano. Por tanto, será posible utilizar lodo anaerobio de estiércol porcino para el arranque de biorreactores que traten suero de queso teniendo en cuenta una relación inóculo sustrato de 3:1, criterios que pueden aplicarse también a la codigestión anaerobia de estiércoles porcino y suero de queso en aquellos escenarios que sea factible utilizarla.

REFERENCIAS

- APHA., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater., American Public Health Association, 22nd Edition, Washington D.C., American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012.
- Besson, A.M., Digestión anaerobia del lactosuero en un reactor tubular a temperatura ambiente., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Master en Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2018.
- Brown, N., Güttler, J., & Shilton, A., Overcoming the challenges of full scale anaerobic co-digestion of casein whey., *Renewable Energy*, Vol. 96, No. A, 2016, pp. 425-432. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.044>
- Cury, K., Arteaga, M., Martínez, G., Luján, D., & Durango, A., Evaluación de la fermentación del lactosuero ácido (entero y desproteinizado) utilizando *Lactobacillus casei*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, Vol. 16, No. 1, 2014, pp. 137-145.
- De Vrieze, J., Gildemyn, S., Vilchez-Vargas, R., Jáuregui, R., Pieper, D.H., Verstraete, W., & Boon, N., Inoculum selection is crucial to ensure operational stability in anaerobic digestion., *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 99, No. 1, 2015, pp. 189-199. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6046-3>
- Dreschke, G., Probst, M., Walter, A., Pümpel, T., Walde, J., & Insam, H., Lactic acid and methane: Improved exploitation of biowaste potential., *Bioresource Technology*, Vol. 176, 2015, pp. 47-55. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.136>
- Escalante, L., Castro, M.P., Amaya, L., & Jaimes-Estévez, J., Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries., *Waste Management*, Vol. 71, 2018, pp. 711-718. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.026>
- Jiménez, J., Cisneros-Ortiz, M.E., Morgan-Sagastume, J.M., Guardia-Puebla, Y., Guerra-Rivera, G., & Noyola, A., Optimization of the thermophilic anaerobic co-digestion of

pig manure, agriculture waste and inorganic additive through Specific Methanogenic activity., *Water Science & Technology*, Vol. 69, No. 12, 2014, pp. 2381-2388. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2014.109>

Jiménez, J., Cisneros-Ortiz, ME., Morgan-Sagastume, JM., Guardia-Puebla, Y., Guerra-Rivera, G., & Noyola, A., Optimization of the specific methanogenic activity from anaerobic co-digestion of manure and straw, using industrial clay residues as inorganic additive., *Chemical Engineering Journal*, Vol. 259, 2015, pp. 703-714. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.08.031>

Kataki, S., West, H., Clarke, M., & Baruah, D.C., Phosphorus recovery as struvite from farm, municipal and industrial waste: Feedstock suitability, methods and pre-treatments., *Waste Management*, Vol. 49, 2016, pp. 437-454. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.003>

Prazeres, A.R., Carvalho, F., & Rivas, J., Cheese whey management: A review., *Journal of Environmental Management*, Vol. 110, 2012, pp. 48-68. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>

VDI 4630., Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche., 2006, pp. 44-59. Disponible en: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4630-vergaerung-organischer-stoffe-substratcharakterisierung-probenahme-stoffdatenerhebung-gaerversuche>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Jorge Enrique González Herrera. Realizó el experimento, la corrida en el Software *STATGRAPHICS* y colaboró en la escritura del artículo.
- M.Sc. Yaima Hernández-Beltrán. Realizó el muestreo del sustrato suero de queso, realizó el experimento y colaboró en la escritura del artículo.
- Dra.C. Lisbet Mailín López-González. Participó en el diseño del experimento, participó en el análisis cinético y en la escritura del artículo.
- Dra.C. Janet Jiménez-Hernández. Coordinadora del trabajo y proyecto, participó en el diseño del experimento, el muestreo de suero de queso, la discusión de resultados y en la escritura del artículo.