



## Estabilización de suero de quesería mediante digestión anaeróbica y determinación de su rendimiento en biogás

Cheese whey stabilization by anaerobic digestion and determination of its biogas performance

Marisol Carmen Zambrano Diaz<sup>1,\*</sup> ; Víctor Juan Meza Contreras<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Industrias Alimentarias, Filial La Merced, Chanchamayo, Perú.

<sup>2</sup> Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias, Lima, Perú.

### RESUMEN

La investigación evaluó la estabilización del suero de quesería a través de un proceso de digestión anaeróbica y producción de biogás, a partir de diferentes proporciones entre estiércol de vacuno y suero en biodigestores con carga fija a una temperatura constante de 26 °C ( $\pm 1$  °C) y a pH regulado con hidróxido de calcio. La estabilización de las mezclas se realizó en dos fases: la primera aeróbica y la segunda anaeróbica. Se evaluaron las mezclas entre estiércol de vacuno y suero de quesería en las proporciones de 1:3, 1:5 y 1:7; de las cuales se obtuvieron mejores resultados en la proporción 1:7, generando un volumen de biogás de aproximadamente 8 veces su mezcla inicial durante la primera semana de biodigestión con un contenido de metano del 27,67%. Al cabo de 60 días de biodigestión no se obtuvo más biogás. Para verificar la estabilización del biol de la mezcla estiércol/suero proporción 1:7, se realizaron pruebas fisicoquímicas y microbiológicas a los 15 y 60 días de digestión. Además, se pudo analizar la influencia de la concentración de amonio sobre el crecimiento de la carga microbiana involucrada: metanogénica, acetogénica y ácido láctico con el pH involucrado, a lo largo de los procesos de biodigestión.

**Palabras clave:** biodigestores de carga fija; suero de quesería; biogás; biol.

### ABSTRACT

The investigation evaluated the stabilization of the cheese whey through an anaerobic digestion process and biogas production, from different proportions between cattle manure and cheese whey in biodigesters with a fixed charge at a constant temperature of 26 °C ( $\pm 1$  °C) and at pH regulated with calcium hydroxide. The stabilization of the mixtures was carried out in two phases: the first aerobic and the second anaerobic. The mixtures between beef manure and cheese whey were evaluated in the proportions of 1: 3, 1: 5 and 1: 7; of which better results were obtained in the 1: 7 ratio, generating a biogas volume of approximately 8 times its initial mixture during the first week of biodigestion with a methane content of 27.67%. After 60 days of biodigestion, no more biogas was obtained. To verify the stabilization of the biol of the manure / serum mixture 1: 7 ratio, physical, chemical and microbiological tests were performed at 15 and 60 days of digestion. Furthermore, it was possible to analyze the influence of the ammonium concentration on the growth of the microbial load involved: methanogenic, acetogenic, and lactic acid with the pH involved, throughout the biodigestion processes.

**Keywords:** fixed charge biodigesters; cheese whey; biogas; biol.

### 1. Introducción

La generación de suero de quesería dentro de las industrias lácteas ha venido generando problemas ambientales. Aproximadamente el 47% de los 115 millones de toneladas de suero producidos en todo el mundo son eliminados cada año al medio ambiente (considerando que para la producción de un kilo de queso fresco se generan

de 8 a 9 litros de suero). El suero es un efluente contaminante de especial cuidado por contener un DBO<sub>5</sub> (Demanda Biológica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno) con valores de 30000 a 50000 mg/l y 60000 a 80000 mg/l respectivamente (Araujo, 2013).

La digestión anaerobia del suero de quesería, ofrece una solución en términos de ahorro

energético y control de la contaminación. Las principales ventajas de este proceso son la eficiencia energética, el bajo costo, y la simplicidad del proceso. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, la digestión anaerobia no está muy extendida en la industria láctea, en gran parte debido a los problemas relacionados a una pobre estabilidad y una acidificación rápida del suero (Saddoud *et al.*, 2007). Se han realizado trabajos de investigación relacionados a la biodigestión del suero de quesería por Ghaly y Kamal (2004) y Saddoud *et al.* (2007). No obstante, en ambas experiencias el efluente producido (Biol de suero de quesería), aún mantiene niveles moderados de toxicidad, donde el DQO del biol obtenido, sigue con niveles por encima de lo recomendado. Por lo que el presente trabajo de investigación evaluó trabajar con aditivos de regulación de acidez diferentes y una secuencia de procesos de biodigestión modificada para poder lograr un biol de suero de quesería más favorable en relación con sus características fisicoquímicas.

Por otra parte, se conoce que los estiércoles son caldos de cultivo con una flora digestiva variada y completa. Valores que han sido desestimados, al punto de ser estas excretas despreciadas y mal empleadas. Se ha venido realizando esfuerzos para la instalación de sistemas de digestión anaeróbica mediante el uso de geomembranas por ONG's, como es el caso de la ONG "Soluciones Prácticas", que ha instalado estos sistemas en la Zona de Cajamarca-Perú, los cuales usan mezclas de excretas con agua e incluso con suero de quesería; no obstante, existe un desconocimiento de las proporciones adecuadas entre el estiércol y el suero para una generación óptima de metano, así como del manejo adecuado del pH y temperatura durante este ciclo digestivo. En nuestro país existen 5 millones 156 mil cabezas de ganado vacuno, teniendo Cajamarca el mayor porcentaje de ganado con un 14% seguido por Puno con 12% y Ayacucho con 8% del IV CENAGRO, 2012. Donde el consumo anual de leche en Perú es de 70 L/persona, en el cual el 40% del acopio de la leche se deriva a la producción de queso. La presente investigación plantea una alternativa para el tratamiento de estos residuos en las zonas rurales del Perú, donde se elaboran manualmente quesos frescos con la leche proveniente de su propio ganado vacuno, teniendo como objetivo general el determinar el rendimiento de biogás a partir de mezclas entre estiércol de vacuno y suero de quesería mediante digestión anaeróbica, obtenido artesanalmente.

De Padua (2019) menciona que desde 1990 al 2015 se ha generado un incremento del uso de biogás como combustible renovable en un 12,8%, No obstante, este incremento solo representa el 0,3% del total de energía utilizada en el mundo como combustible; lo que propicia a generar esfuerzos para fortalecer la tecnología de la biodigestión de materias orgánicas.

## 2. Material y métodos

### 2.1 Descripción de los sustratos y aditivos usados

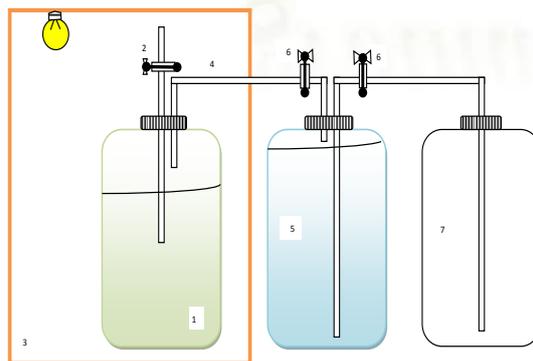
**Estiércol de vacuno:** Se trabajó con estiércol de vacas de alta producción, refrigeradas a 5 °C antes de su uso.

**Suero de quesería:** Se trabajó con muestras obtenidas a partir del procesamiento sin preservantes de queso fresco, almacenado a una temperatura de refrigeración de 5 °C antes de su uso.

**Inóculo:** Se trabajó con el filtrado de rumen de vaca, almacenado a una temperatura de refrigeración de 5 °C antes de su uso.

**Agua:** Se trabajó con agua destilada a un pH entre 6,5 a 6,8.

**2.2 Instalación de los biodigestores.** Se instalaron biodigestores anaerobios diseñados a escala piloto con carga fija.



**Figura 1.** Partes de un Biodigestor con carga fija a escala piloto. 1. Recipiente de plástico oscuro, que contiene la muestra a analizar 2. Conducto de salida para muestreo y regulación del pH (del biol) 3. Cámara de incubación con foco, aislada térmicamente 4. Conducto de salida del biogás 5. Gasómetro (Depósito con agua que contiene un circuito para el desplazamiento del agua) 6. Válvula de seguridad 7. Recipiente para recolección de agua desplazada.

### 2.3 Procedimiento sobre el uso de los biodigestores.

-Materia Prima: se recibió los sustratos a utilizar (suero, estiércol y rumen).

Acondicionamiento de las muestras: incluyó operaciones de almacenamiento en frío, filtrado, pesado, pre-acidificación aerobia, neutralización y mezcla, según correspondió cada prueba experimental.

Envasado: se cargó las muestras acondicionadas dentro de los biodigestores debidamente codificadas en envases oscuros.

-Incubación: se colocó los biodigestores dentro de la cámara de incubación aislada térmicamente a una temperatura constante.

Agitado y Regulación de pH: se procedió a regular periódicamente el pH con Hidróxido de Calcio (Cal) a un rango entre 5,0 – 6,5, con su respectiva agitación, según correspondió cada prueba experimental.

Producción de biogás: debido a las condiciones generadas sobre el sustrato, tales como una temperatura mesofílica constante y pH ligeramente neutro, se empezó a producir biogás, el cual por diferencia de presión fue conducido del biodigestor hacia el gasómetro (Figura 1), el biogás conducido desplazó el agua contenida en el gasómetro hacia un recipiente contiguo; generándose un mayor desplazamiento del agua a medida que el biogás se fue incrementando progresivamente.

**2.4 Método estadístico.** Las muestras evaluadas constaron de tres repeticiones por ensayo, para medir el grado similitud entre las unidades experimentales asociadas, se usó como indicadores estadísticos la desviación estándar y el coeficiente de variación obtenidos mediante la aplicación del programa estadístico MINITAB 16, con un grado de incertidumbre del 5%.

**2.5 Diseño Experimental.** El diseño experimental o plan de investigación se realizó en dos etapas, y fue como sigue:

**Primera Etapa.** Caracterización y acondicionamiento de la materia prima (suero de quesería y estiércol de vacuno).

1° Recepción de la Materia Prima.

2° Caracterización de la Materia Prima.

3° Evaluación de la producción de biogás a partir de estiércol de vacuno y suero de quesería por separado.

4° Pretratamiento del suero de quesería.

**Segunda etapa.** Producción de biogás de las mezclas entre estiércol de vacuno y suero de quesería.

1° Determinación de la proporción óptima entre estiércol de vacuno y suero de quesería para la producción de biogás.

2° Caracterización de la mezcla óptima de estiércol de vacuno/suero de quesería.

## 2.6 Condiciones de trabajo para las unidades experimentales

Para las muestras de estiércol de vacuno/agua en todas sus proporciones: Inóculo: 67 g, Número de repeticiones: 5, Peso total por unidad experimental: 1125 g.

Para las muestras de Suero de quesería: 1058 g, Inóculo: 67 g, Número de repeticiones: 5, Peso total por unidad experimental: 1125 g.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Primera Etapa

**3.1.1 Caracterización fisicoquímica del estiércol de vacuno y suero de quesería.** Del ensayo físico/químico del suero de quesería, se observó que el contenido de materia seca en el suero de quesería fue de 6,37 g/100 g de muestra y el contenido de Lactosa fue de 5,23 g/100 g de muestra, de lo cual se podría deducir que más del 80% de suero expresado como materia seca fue lactosa.

AMBIENTUM (2020) menciona que una relación C/N óptima al inicio del proceso de descomposición de residuos, es desde 30:1 hasta 15:1, si la relación C/N es más alta, la descomposición es más lenta, si la relación es menor se podría producir amoniaco gaseoso en procesos de descomposición, lo cual no solamente dañaría al medio ambiente sino también empeora la calidad del fertilizante orgánico obtenido. De los resultados analizados del suero de quesería se determinó que este presenta una relación de C/N igual a 28,8, mientras que la relación C/N del estiércol vacuno fue de 17,8, por lo que ambas muestras se encuentran dentro del rango sugerido por AMBIENTUM (2020).

### 3.1.2 Evaluación de la producción de biogás a partir de estiércol de vacuno y suero de quesería por separado

**Producción de biogás del estiércol de vacuno/agua proporción (1:3).** Los resultados de la medición de biogás generados indicaron una producción de 10,35 L de biogás al cabo de 10 días, dicha producción fue progresiva y continua, y el pH se mantuvo entre 6,8 a 7,3. El proceso se realizó con estiércol: 264,5 g, Agua: 794 g, Temperatura de Incubación: 34 °C ( $\pm 1$ ), Porcentaje promedio de Coeficiente de Variación (% PROM. C.V.) de 10,94, pH Inicial: 7, sin regulación de pH.

**Producción de biogás a partir del suero de quesería.** Los resultados de la medición de biogás indicaron una producción de 3,37 litros de biogás al cabo de 4 días. La producción inicial de biogás se elevó rápidamente, llegando a presentar 1,25 litros de biogás el primer día (pH 7), el segundo día se generó 1,19 litros (pH 5,42), el tercer día presentó 0,76 litros (pH 4,81) y el cuarto día presentó una última producción de biogás de 0,16 litros (pH 4,16). No obstante, se continuó controlando el pH por cinco días más y al cabo del décimo día la solución presentó un descenso de pH a 3,6, presentando además olores fétidos.

El proceso se realizó bajo las siguientes condiciones de trabajo: Temperatura de Incubación: 34 °C ( $\pm 1$ ), Porcentaje promedio de Coeficiente de Variación (% PROM. C.V.) de 4,67, pH Inicial: 7, sin regulación de pH.

Bajo los resultados presentados se puede observar que no existe problema en la producción de biogás utilizando estiércol de vacuno, bajo las condiciones indicadas.

No obstante, la producción de biogás a partir del suero de quesería generó deficiencias, bajo las mismas condiciones, a partir del cuarto día de digestión; donde el biol del suero de quesería se acidificó progresivamente durante los primeros 10 días a 34 °C ( $\pm 1$ ) hasta llegar a un pH de 3,6.

Ghaly y Kamal (2004) también determinaron un descenso de pH hasta 3,3 al biodigestar suero de quesería, en muestras a las que no se les reguló el pH, el cual además contuvo metano en bajas concentraciones. Los resultados evidenciaron la necesidad de realizar un pre-tratamiento al suero de quesería antes de su biodigestión, por lo que se procedió a evaluar los requisitos necesarios para un adecuado acondicionamiento del suero de quesería, tal como sigue a continuación.

**3.1.3 Pre tratamiento del suero de quesería**  
**Análisis comparativo de la producción de biogás de suero de quesería de muestras con y sin grasa.** Se propició la producción de biogás de muestras de suero de quesería con grasa, sin grasa y el patrón de referencia (suero de quesería sin regulación de pH).

Cabe indicar que previamente se agregó al flujo de proceso la operación adicional de "pre acidificación aerobia del suero", que consiste en hacer reposar el suero por 24 horas hasta llegar a un pH entre 5,0 a 5,5 a temperatura ambiente (entre 20 y 23 °C), tal como lo manejó en pruebas similares Saddoud *et al.* (2007). Luego de la pre acidificación, las muestras de suero de quesería fueron reguladas a un pH hasta 8,12, antes de

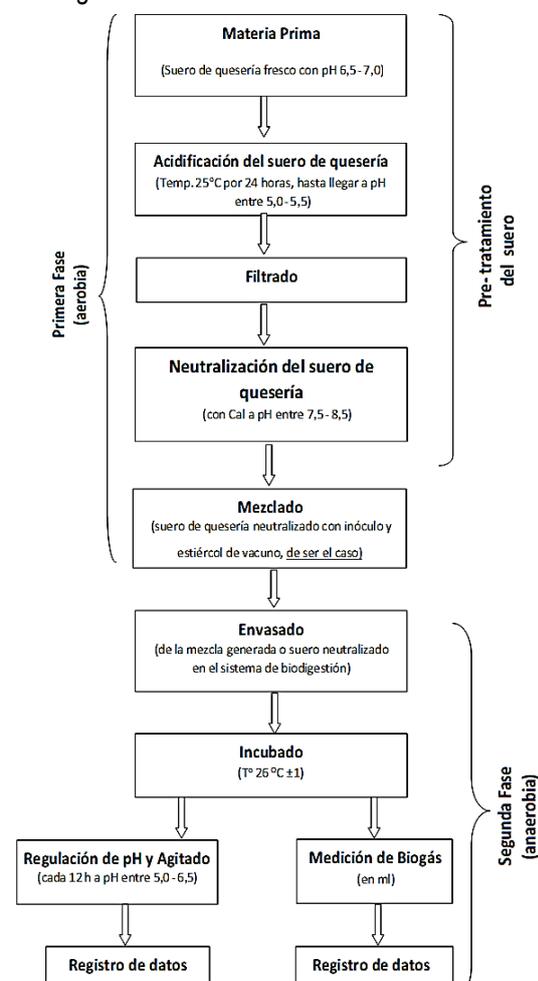
biodigestarlas en la cámara de incubación. La regulación del pH fue cada 8 horas a una temperatura de incubación de 34 °C ( $\pm 1$ ).

Al cabo de 15 días se pudo observar que las muestras biodigestadas de suero de quesería con grasa con regulación de pH, generaron 13,3 litros de biogás, mientras que las muestras de suero sin grasa generaron 7,5 litros de biogás, por lo que se concluyó que la biogestión de suero de quesería debiera ser con grasa. El proceso de pre acidificación añadido y el uso de suero con grasa para procesos de biodigestión propuestos, coinciden con Sage *et al.* (2007) que determinaron que la presencia de ácidos grasos saturados perjudica la degradación de la grasa láctea y la generación de biogás, por lo que un tratamiento de pre acidificación aeróbica (reposo), ayuda a generar bajos niveles de este componente en la grasa láctea y mejoran la producción de biogás. Además, la poca influencia que ejerce la grasa en el suero de quesería, para inhibir la producción de biogás en el presente trabajo de investigación, podría sustentarse por la adición periódica de Cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) como regulador de pH ya que, al contener Calcio, este disminuye el efecto tóxico de los ácidos grasos de cadena larga, debido a su precipitación como sales cálcicas. Por lo que su uso resultaría más eficaz que al trabajar con otros reguladores de pH como el Hidróxido de Sodio o Bisulfito de Sodio (Ghaly y Kamal, 2004), que elevan los niveles de DQO en muestras de suero de quesería biodigestadas, promoviendo así su toxicidad. Como la regulación del pH se realizó cada 8 horas a 34 °C ( $\pm 1$ ), lo que resultó tedioso de controlar manualmente, y a fin de conseguir un biol lo más establemente posible a ser regulado cada 12 horas, se procedió a evaluar un análisis comparativo del comportamiento del pH del suero de quesería, a una temperatura de 26 °C ( $\pm 1$ ) y de 34 °C ( $\pm 1$ ), como sigue a continuación.

**Análisis del pH del suero de quesería en función a la temperatura.** Para evaluar en comportamiento de pH del suero de quesería, se sometió a dos grupos de muestra a 26 °C ( $\pm 1$ ) y 34 °C ( $\pm 1$ ) respectivamente, por un periodo de 33 horas; con el objetivo de evaluar el comportamiento de pH durante el tiempo estipulado.

Nota: se observó que la primera neutralización con cal sobre el suero de quesería en un proceso de biodigestión debe estar siempre en el rango entre 7,5 a 8,5, debido a que en pruebas realizadas (no mostradas en el presente trabajo), indicaron que si se realiza una primera neutralización por debajo de 7,5, el suero empezará a

acidificarse rápidamente, teniendo que regularse antes de las 12 horas. Mientras que, si se regula el pH por encima de 8,5, el biol del suero se desestabiliza, llegando a producir colores y olores no característicos y desagradables con ausencia de biogás.



**Figura 2.** Diagrama de flujo para biodigestión del suero de quesería con o sin estiércol de vacuno.

A partir del cual se pudo observar que a una temperatura de 26 °C ( $\pm 1$ ), el suero de quesería alcanzó un pH de 6,60 a 5,46, en 33 horas de biodigestión; por otro lado, a 34 °C ( $\pm 1$ ), el suero de quesería alcanzó un pH de 6,60 a 3,86, en el mismo tiempo.

Si el pH aceptable para el crecimiento de los microorganismos acidogénicos es de 5,0 (Jiménez-Delgadillo *et al.*, 2018), se podría indicar que a 26 °C ( $\pm 1$ ) existe una mejor disposición del suero de quesería a ser regulado cada 12 horas durante procesos de biodigestión. De la evaluación obtenida en el pretratamiento de suero de quesería se obtuvo como resultado un diagrama de flujo para la biodigestión del suero de quesería con o sin estiércol de vacuno, y es como se observa en la Figura 2.

## 3.2 Segunda etapa

**3.2.1 Determinación de la proporción óptima entre estiércol de vacuno y suero de quesería para la producción de biogás.** Se prepararon para los procesos de biodigestión las siguientes muestras:

- Estiércol de vacuno y suero de quesería en las proporciones de 1:3
- Estiércol de vacuno y suero de quesería en las proporciones de 1:5
- Estiércol de vacuno y suero de quesería en las proporciones de 1:7
- Suero de quesería
- Estiércol/agua proporción 1:3

Nota: las dos últimas muestras, suero de quesería y Estiércol/agua proporción 1:3, fueron utilizadas como patrones de comparación.

Para que un proceso de biodigestión se desarrolle satisfactoriamente se requiere según Escalante *et al.* (2018), que el pH este en torno a la neutralidad, presentándose problemas si el pH baja de 6 o sube por encima de 8,3.

En el presente trabajo de investigación se reguló el pH entre 5,0 - 6,5 cada 12 horas mientras lo requirió el sistema, ya que después de una semana el pH, de las muestras biodigestadas con suero de quesería, fue elevándose por sí solo hasta llegar a un valor promedio de 6,85 en todas las muestras.

El comportamiento del pH del biol de las muestras con solo suero de quesería indicaron un pH mínimo de 5,3 y máximo de 7,70, después de su regulación por 15 días. Saddoud *et al.* (2007), en pruebas similares (sin adición de estiércol vacuno), obtuvo un pH mínimo de 6,0 y un máximo de 7,5 después de su regulación por 50 días; no obstante, el investigador no menciona cada que tiempo tuvo que regular el pH de las muestras y si hubo la necesidad de estar regulando el pH hasta el final del proceso de biodigestión. Todas las muestras generaron una recaída de pH fuera del rango establecido, entre el segundo y séptimo día de biodigestión.

Después de la segunda semana no se requirió regular más el pH, debido a que los bioles de las muestras presentaron un pH que se fue elevando hasta volverse más estable y moderadamente neutro a un valor promedio de 7,1.

A partir de la tercera semana el valor de pH decreció un poco a un valor promedio de 6,85, en todas las muestras. Esta elevación de pH podría deberse a la acumulación de nitrógeno amoniacal que se habría venido generando dentro del sistema, ya que la generación de nitrógeno amoniacal produce en incremento del pH.

La proporción 1:7 de la mezcla entre estiércol de vacuno y suero de quesería mostró menores fluctuaciones de variación de pH durante el proceso de biodigestión y mayor generación de biogás a partir del sexto al noveno día de biodigestión; mientras que las mezclas de estiércol/suero proporciones 1:3 y 1:5 tuvieron una producción diaria de biogás con tendencia parecida y moderadamente menor que la proporción 1:7.

En relación al análisis estadístico se puede observar que el contenido de biogás de las unidades experimentales guardó homogeneidad a lo largo del proceso de biodigestión, con un C.V. (%) de 4, 2, 4, 1 y 4 respectivamente, en las muestras de suero de quesería, mezclas de estiércol/suero proporción 1:3, 1:5 1:7 y la mezcla estiércol/agua prop. 1:3.

Por otra parte, la mezcla de estiércol/agua prop. 1:3 a los 15 días de tratamiento, no empieza una producción considerable de biogás a 26 °C ( $\pm 1$ ). La mezcla Estiércol/suero (1:7), la cual cuenta con menor carga orgánica, se sobrepone a las demás muestras en la producción de biogás, especialmente entre el sexto y noveno día de biodigestión (Figura 3); resultado que podría ampararse en lo manifestado por Ghaly y Kamal (2004), quienes mencionan que la inestabilidad en los reactores anaeróbicos aumenta a medida que se incrementa la carga orgánica en el sistema, especialmente en el caso de "sobrecargas" puntuales, que conllevan a la acumulación de ácidos grasos volátiles, y por ende la inhibición del biogás.

A continuación, en la Figura 3 se muestra la producción acumulada de biogás de las cinco muestras: estiércol de vacuno y suero de quesería en las proporciones de 1:3, 1:5 y 1:7, suero de quesería y estiércol/agua proporción 1:3.

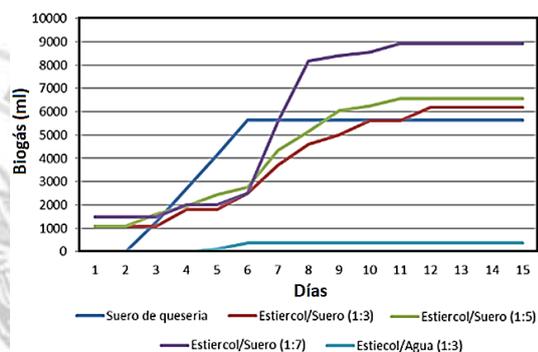


Figura 3. Producción acumulada de biogás de las mezclas en estudio.

Los resultados obtenidos en la Figura 3, indicaron que no existe una diferencia significativa en la producción acumulada de biogás entre las

mezclas estiércol/suero proporción 1:3 y 1:5, pero si existe entre estas dos mezclas y la mezcla con proporción 1:7. La mezcla 1:7 presentó un contenido de biogás de 793,78%, valor superior en comparación al obtenido en las proporciones 1:3 y 1:5, que fue de 550,22% y 583,11% respectivamente (datos no mostrados en el presente informe).

Debido a los resultados obtenidos de la Figura 3, se determinó que la mezcla óptima para la producción de biogás es de Estiércol/suero en la proporción 1:7, en un periodo de 15 días de biodigestión.

Para poder analizar a mayor detalle los procesos de biodigestión generados en las muestras de Estiércol/suero en la proporción 1:7, y de suero de quesería, se procedió a generar biodigestiones de dichas muestras por un periodo de 60 días, los resultados obtenidos se presentan en los siguientes sub títulos.

### 3.2.2 Producción de biogás de la mezcla óptima, en un tiempo de retención de 60 días.

Se evaluó la producción de biogás de la mezcla estiércol/suero proporción 1:7 utilizando al suero de quesería, como parámetro de comparación, los resultados se presentan en la Figura 4.

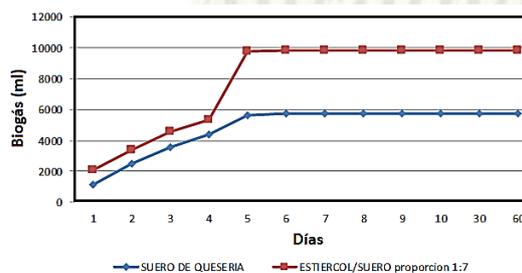


Figura 4. Producción acumulada de biogás de las mezclas en estudio a 60 días.

De los ensayos realizados, se obtuvo que a los 60 días de biodigestión se generó 510% de biogás, en el suero de quesería. Valor que fue superado por la mezcla Estiércol/suero proporción 1:7, que produjo 871 % de biogás. Ninguna de las dos muestras presento una mayor producción de biogás después de la primera semana (ver Figura 4), hecho que no coincide con lo obtenido por otros investigadores que también trabajaron en la biodigestión de suero de quesería como por ejemplo Ghaly y Kamal (2004), que obtuvieron una generación de biogás constante a lo largo de los 20 días de digestión, y Saddoud et al. (2007), que obtuvieron en 50 días de biodigestión una producción constante de biogás, con un empinamiento en la producción de biogás a partir

del día 25, donde se generó un volumen de biogás 10 veces mayor que su volumen inicial.

No obstante, estos investigadores realizaron el análisis experimental con biodigestores de carga continua y regulación del pH con Na(OH), donde Ghaly y Kamal (2004) regularon el pH entre 5,7 – 6,0 y Saddoud *et al.* (2007) que regularon el pH entre 7,9 – 8,5. Los resultados de la presente investigación mostraron discrepancias en la generación de biogás, pudiendo haber sido está afectada por el modo de carga (ya sea continua o fija), variación de la temperatura y aditivo usado para la regulación de los pH; utilizados distintamente.

**3.2.3 Comportamiento del pH del biol suero de quesería.** En la Figura 5 se puede destacar que, a lo largo de los 60 días de biodigestión, el pH se mantuvo entre 6,3 a 7,5.

Mientras que el pH del suero de quesería se mantuvo entre 6,3 a 7,1 (datos no presentados en este informe). Luego de 8 días de biodigestión casi no se requirió regular el pH en ambas muestras, las cuales se mantuvieron generalmente entre 6,5 y 6,9, donde el suero de quesería mostró una mejor estabilidad del pH, con una solo una regulación adicional el día 28. Mientras que la mezcla estiércol/suero proporción 1:7, reguló su pH por tres veces más, los días 14, 15 y 37 (Figura 5).

Jiménez-Delgadillo *et al.* (2018) mencionan que los microorganismos acidogénicos pueden trabajar a pH mayores de 5,0, en cambio los metanogénicos requieren un pH óptimo entre 6,6 – 7,6, pudiendo soportar rangos entre 6,4 – 7,8, donde por debajo de 6,2 de pH se inhibiría su crecimiento. En la primera semana de biodigestión, en todas las muestras analizadas de suero de quesería con o sin estiércol de vacuno, se obtuvo un valor promedio de pH de 5,5, valor que coincide dentro del rango óptimo para el

crecimiento de lactobacilos que está a un pH entre 5,5 y 6,2.

Presentando luego en la segunda semana, un incremento de pH a un valor promedio de 7,1, para después obtener un ligero descenso de este a 6,85, en las semanas posteriores al proceso de biodigestión.

Estos valores obtenidos a partir de la segunda semana de biodigestión habrían provocado un descenso del crecimiento de lactobacilos, los cuales son afectados en medios neutros o ligeramente alcalinos.

Por otra parte, los valores de pH promedio de 7,1 obtenidos en la segunda semana de biodigestión, y los obtenidos en las posteriores semanas de 6,85, en las muestras de suero de quesería con o sin estiércol de vacuno. Coinciden dentro del rango óptimo para el crecimiento de bacterias acetogénicas, que según Escalante *et al.* (2018) estarían a un pH entre 6,8 y 7,2, dichos resultados se pueden visualizar gráficamente en la Figura 6.

**3.2.4 Caracterización de biogás.** Se caracterizó el biogás generado de la mezcla entre estiércol/suero, en la proporción 1:7, considerada como la mezcla óptima, en un tiempo de retención de 60 días, utilizando al suero de quesería como parámetro de comparación.

**3.2.4.1 Del biogás del suero de quesería.** Se tuvo un incremento de nitrógeno de 73,63 % al cuarto día de biodigestión, y de 99,86 % el sexto día de biodigestión, siendo el nitrógeno, el mayor componente generado durante los 60 días de biodigestión, ya que después del sexto día, no se volvió a generar más gas.

Donde las concentraciones de metano en el biogás del suero de quesería fueron de 0,01% al cuarto día de biodigestión, y de 0,06% el sexto día de biodigestión.

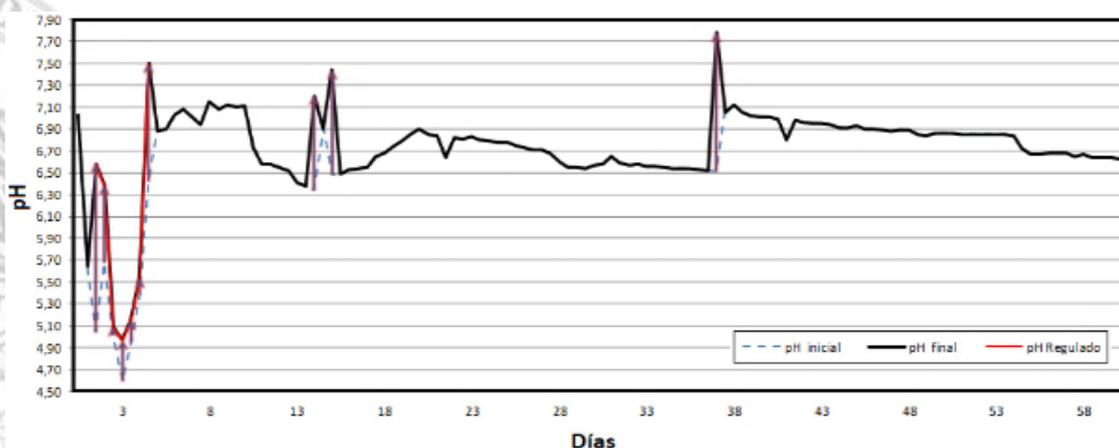


Figura 5. Comportamiento del pH del biol de Estiércol/suero en la proporción 1:7.

Mientras que, [Saddoud et al. \(2007\)](#) obtuvieron una producción de biogás con un contenido de metano del 70% a los 50 días de biodigestión.

Con relación a la producción de metano, [Ghaly y Kamal \(2004\)](#) mencionan que su incremento en procesos de biodigestión dependerá del tipo de sustrato y el aditivo utilizado para regular el pH.

Por lo que podríamos indicar en base a estas premisas, y en base a los resultados obtenidos; el uso de Cal para regular procesos de biodigestión en suero de quesería podría haber inhibido la producción de metano.

**3.2.4.2 Composición del biogás de la mezcla de estiércol/suero (proporción 1:7).** Se tuvo un incremento de nitrógeno de 25,67% al cuarto día de biodigestión, y de 66,38% el sexto día de biodigestión, siendo el nitrógeno, el mayor componente generado durante los 60 días de biodigestión, ya que después del sexto día, no se volvió a generar más biogás.

Donde las concentraciones de metano en esta mezcla, fueron de 0% al cuarto día y de 27,67% el sexto día de biodigestión.

Estos valores de metano pueden ser considerados bajos, no obstante, son superiores a los reportados en la biodigestión con suero de quesería, que alcanzó a su sexto día de biodigestión una concentración de metano el 0,06%, sin alguna producción de metano posteriormente.

**3.2.5 Comportamiento del pH del suero de quesería con o sin estiércol de vacuno y su influencia en el crecimiento de la flora microbiana.** En la biodigestión de suero de quesería con o sin estiércol, se dieron las condiciones para la generación de biogás, ya que se propició el crecimiento de bacterias metanogénicas, no obstante, también se propició el crecimiento de lactobacilos ([Marty 2006](#)), los cuales son menos sensibles a cambios en su entorno, como por ejemplo a las variaciones en la concentración de amonio, lo que habría inducido a una menor producción de metano.

Por otro lado, todas las muestras biodigestadas, presentaron un olor característico al generado por el ácido sulfhídrico a partir del día 15, que fue intensificándose hasta el día 60, indicarían la presencia de bacterias sulfato reductoras, las cuales compiten con las bacterias metanogénicas por el sustrato disponible; presentando las bacterias sulfo reductoras ventajas termodinámicas y cinéticas en comparación a las bacterias metanogénicas. Donde a una mayor carga de bacterias

sulfato reductoras se propiciará una mayor producción de ácido sulfhídrico en vez de metano, en el biogás producido ([Marti, 2006](#)).

**3.2.4.3 Poder calorífico del biogás de mezcla de estiércol/suero (proporción 1:7):** Al sexto día de biodigestión, se obtuvo biogás de la mezcla estiércol/suero (1:7), la cual presentó un poder calorífico superior de 10,4423 MJ/m<sup>3</sup> y poder calorífico inferior de 9,401 MJ/m<sup>3</sup>.

Si consideramos que el poder calorífico del biogás convencional se encuentra en promedio a 28,1 MJ/m<sup>3</sup>, podemos concluir que el poder calorífico del biogás de la mezcla estiércol/suero (1:7) es bajo.

**3.2.4.4 Contenido de nitrógeno orgánico y amoniacal (del biol de suero de quesería y de mezcla de estiércol/suero, proporción 1:7).** Se observó un decremento del nitrógeno orgánico del biol de suero de quesería de 959 mg/L a 28 mg/L, en 15 días de biodigestión; al mismo tiempo se generó en la misma muestra un incremento de nitrógeno amoniacal de 273 mg/L a 485 mg/L.

Del mismo modo se pudo observar un decremento del nitrógeno orgánico del biol de la mezcla estiércol/suero de la proporción (1:7), de 1155 mg/L a 9,3 mg/L, en 15 días de biodigestión; al mismo tiempo se generó en la misma muestra un incremento de nitrógeno amoniacal de 301 mg/L a 569,3 mg/L. Existe una moderada discrepancia en relación con la concentración de nitrógeno amoniacal capaz de inhibir la producción de biogás. Mientras que otros autores encontraron una inhibición de biogás a una concentración de 20 mg/L de nitrógeno amoniacal en el rango mesofílico; [Escalante et al. \(2018\)](#) indicó una inhibición de biogás a una concentración de 80 mg/L de nitrógeno amoniacal.

No obstante, considerando los rangos de inhibición por nitrógeno amoniacal, establecidos por [Escalante et al. \(2018\)](#), se podría deducir que las muestras de suero de quesería con o sin estiércol de vacuno, no presentan potencial para la producción de biogás, debido a su alto contenido de nitrógeno amoniacal, siendo este elemento un importante inhibidor de la fase metanogénica, donde los principales microorganismos afectados a altas concentraciones de amonio son los metanogénicos, disminuyendo su velocidad de crecimiento a cambios bruscos de la concentración de amonio, mientras que la tasa de crecimiento de los microorganismos acidogénicos y acetogénicos en estas variaciones de amonio, no se ven afectadas ([Escalante et al., 2018](#)).

### 3.2.4.5 Carga microbiana producida

**a. Carga microbiana del biol del suero de quesería.** El contenido de *Lactobacillus sp.* se mantuvo moderadamente constante durante los procesos de biodigestión, a partir del día 15, se obtuvieron  $41 \times 10^5$  UFC/ml y al día 60 se llegó a contabilizar  $3 \times 10^5$  UFC/ml.

En consecuencia, debido a la permanencia del contenido de *Lactobacillus* a través del tiempo, podría considerarse a este parámetro como indicador para establecer la vida útil del biol de suero de quesería.

**b. Carga microbiana del biol de la mezcla estiércol/suero (proporción 1:7).** El contenido de *Lactobacillus sp.* al día 15, fue de  $19 \times 10^4$  UFC/ml y al día 60 de su biodigestión, se llegó a contabilizar  $1,04 \times 10^4$  UFC/ml.

Por lo tanto, se podría concluir que el biol de suero de quesería mantiene una mayor carga microbiana de *Lactobacillus sp.* a lo largo del proceso de digestión.

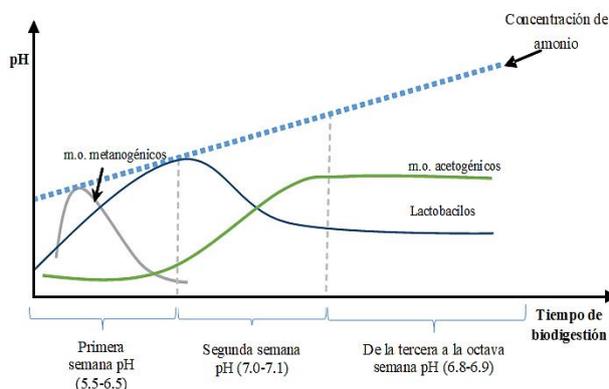
En la primera semana de biodigestión, en todas las muestras analizadas de suero de quesería con o sin estiércol de vacuno, se obtuvo un valor promedio de pH de 5,5 - 6,5, valor que coincide dentro del rango óptimo para el crecimiento de lactobacilos que está a un pH entre 5,5 - 6,2. Además, dicho rango de pH también se encuentra cerca del rango óptimo para el crecimiento de los m.o. metanogénicos que está entre 6,5 - 7,5 (Marti, 2006).

A medida que se fue elevando la concentración de amonio dentro de los bioles, durante los últimos días de la primera semana, los lactobacilos pudieron ejercer ventaja sobre los metanogénicos, ya que son más resistentes a altas concentraciones de amonio. A partir de la segunda semana de biodigestión, los valores de pH subieron, entre 7,0 - 7,1, lo que habría provocado un descenso del crecimiento de lactobacilos, los cuales son afectados en medios neutros o ligeramente alcalinos. Este incremento de pH podría haberse generado debido al incremento de nitrógeno amoniacal en los procesos de biodigestión (ver subtítulo 3.2.4.4), ya que el nitrógeno amoniacal eleva los niveles de pH en el medio que se encuentre.

En la tercera semana se obtuvo un ligero descenso de pH, entre 6,80 - 6,90, manteniéndose así las cinco semanas posteriores. Los valores de pH promedio de la segunda semana entre 7,0 - 7,10, y de la tercera semana en adelante, de 6,80 - 6,90 tanto de las muestras de suero de quesería con o sin estiércol de vacuno, coinciden dentro del

rango óptimo para el crecimiento de bacterias acetogénicas, que según Escalante *et al.* (2018) estarían a un pH entre 6,8 y 7,2.

La influencia del incremento de la concentración de amonio sobre el pH y el crecimiento de la carga microbiana involucrada en la biodigestión de suero de quesería, según lo descrito líneas arriba, se representa gráficamente a continuación.



**Figura 6.** Influencia de la concentración de amonio sobre el pH y la carga microbiana involucrada.

Nota: Las tres líneas indican las curvas de crecimiento de los microorganismos metanogénicos, acetogénicos y lactobacilos influenciados por el incremento de la concentración de amonio en los procesos de biodigestión de suero de quesería por 8 semanas.

## 4. Conclusiones

La mezcla estiércol/suero proporción 1:7 fue la óptima para la generación biogás, generando 66,38% de nitrógeno gaseoso y 27,67% de metano en el mismo tiempo de biodigestión.

El biogás del suero de quesería regulado con Cal, tiene un alto contenido de nitrógeno gaseoso de 99,86% al sexto día de biodigestión.

Al pre acidificar el suero de quesería no se requiere el retiro de su grasa, lo que permite un tratamiento integral de todo el suero sin dejar residuos tóxicos.

El biol de suero de quesería presentó una mejor estabilidad físico química y microbiológica en comparación a la mezcla estiércol/suero en la proporción 1:7, con un contenido de *Lactobacillus* relativamente más constante.

El aditivo químico para regular el pH del biol, juega un papel importante en la generación de biogás, la cal utilizada para la regulación de pH del suero de quesería generó una baja producción de metano en el biogás.

Un alto contenido de nitrógeno amoniacal de 485,3 mg/L en el biol de suero de quesería y de 569,3 mg/L en la mezcla estiércol/suero proporción 1:7 inhibieron la producción de biogás a los 15 días de biodigestión.

## Agradecimientos

A la empresa COGA por el apoyo en los análisis cromatográficos.

## ORCID

M. Zambrano  <https://orcid.org/0000-0002-0293-1939>

## Referencias bibliográficas

- AMBIENTUM. 2020. Relación Nitrógeno Carbono. Disponible en: [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/sue/los/relacion\\_carbono\\_nitrogeno.asp](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/sue/los/relacion_carbono_nitrogeno.asp)
- Araujo, A.; Monsalve, L.; Quintero, A. 2015. Aprovechamiento del lactosuero como fuente de energía nutricional para minimizar el problema de la contaminación ambiental. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 4(2): 55-65.
- De Padua, M.; Da Cruz, J. 2019. Análisis de la generación de energía eléctrica a través del biogás. Instituto Ensinar. Brasil.

- Escalante, H.; Castro, L.; Amaya, M.P.; Jaimes-Estevez, J. 2018. Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries. *Waste Manag.* 71: 711-718.
- Ghaly, A.E.; Kamal, M.A. 2004. Submerged yeast fermentation of acid cheese whey for protein production and pollution potential reduction. *Water Research* 38: 631-644.
- Jiménez-Delgadillo, R.; Valdés-Rodríguez, S.E.; Olalde-Portugal, V.; Abraham-Juárez, R.; García-Hernández, J.L. 2018. Efecto del pH y temperatura sobre el crecimiento y actividad antagónica de *Bacillus subtilis* sobre *Rhizoctonia solani*. *Revista mexicana de fitopatología* 36(2): 256-275.
- Marti, N. 2006. Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process. USA. ISBN 1-58112-332-9.
- Saddoud, A.; Hassari, Y.; Sayadi, S. 2007. Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey. *BioresourceTechnology* 98: 2102-2108.
- Sage, M.; Daufin, G.; Gesan, G. 2007. Effect of Prehydrolysis of Milk Fat on its Conversion to Biogas. *J. Dairy Science* 91: 4062-4074.

