

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS

### 5.1 OPERACIÓN DEL REACTOR A FLUJO INTERMITENTE

#### 5.1.1 PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL

En las siguientes Figuras se muestran los resultados obtenidos al operar el digestor a flujo intermitente.

En la Figura 5.1 se muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo. La temperatura dentro del reactor se mantuvo relativamente constante con el paso del tiempo, se puede observar que la temperatura máxima registrada fue de 24°C y la mínima de 18°C. El tiempo de operación fue del 03 de julio al 19 de julio de 2009.

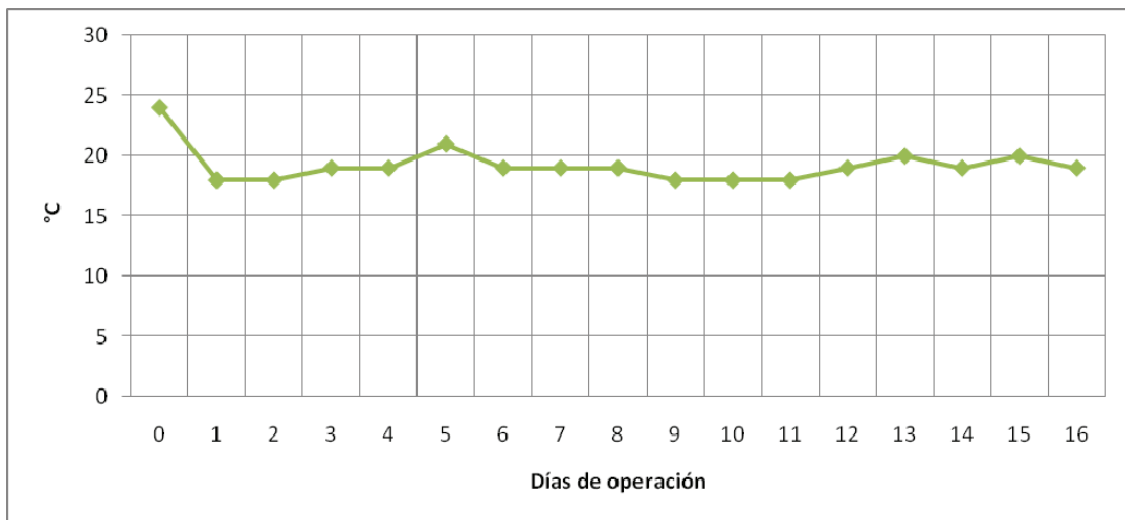


Figura 5. 1 Registro de temperatura en la operación del digestor experimental.

En la figura 5.2 se muestra la relación que existe entre la temperatura y la generación de biogás. Como se puede observar, la temperatura se mantuvo dentro de un rango de temperaturas entre 18 y 24 °C y no ocurrieron cambios drásticos de la misma al comenzarse a generar el gas metano ya que entre los días 9 y 14 la temperatura se mantuvo en el rango de temperaturas de 18 a 20 °C.

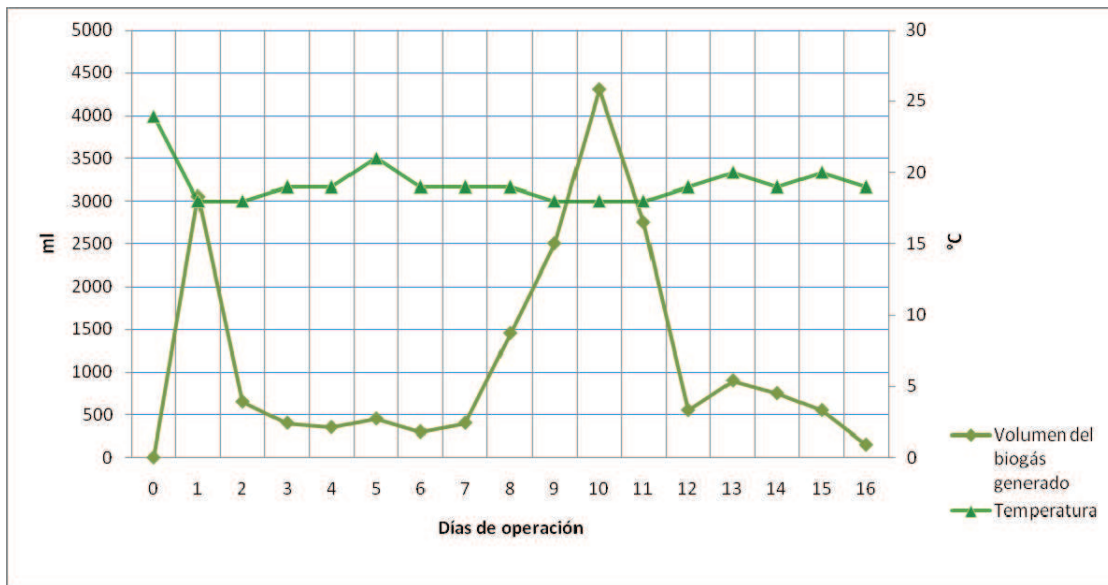


Figura 5. 2 Relación de la temperatura con la producción de biogás.

En la Figura 5.3 se muestra el comportamiento del pH y la temperatura con respecto al tiempo. En esta gráfica se puede observar que la variación del pH es mínima y se encuentra dentro del rango de 6 a 6.5, los primeros 9 días en los que se produjo únicamente bióxido de carbono, y a partir del día 10 hasta el día 14 que es cuando se produjo gas metano, se mantuvo constante en el valor 7. Así mismo se puede observar que los días siguientes, en los cuales la producción de metano cesó, el valor del pH varió en el rango de 6 a 6.2. Mientras tanto, la temperatura se mantuvo relativamente constante, aunque entre los días 9 a 14 que es cuando se produjo metano, ésta mantuvo una estabilidad más cerrada ya que tan sólo hubo una variación de 2 °C.

Debido a lo anterior se afirma que los cambios en el pH obedecen a las reacciones que ocurren dentro del digestor; y que la poca variabilidad de la temperatura, propició que se dieran las condiciones óptimas dentro del digestor para que se llevaran a cabo de forma correcta las etapas de digestión.

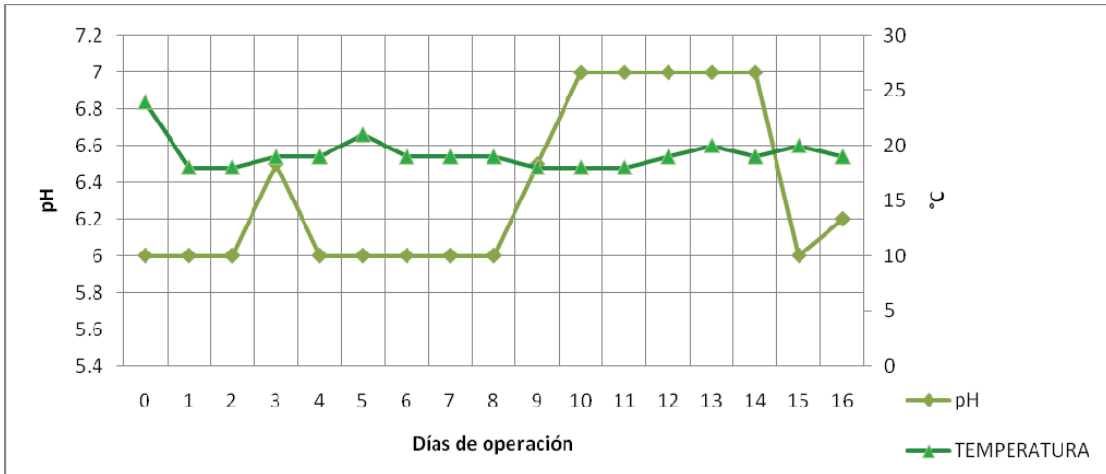


Figura 5. 3 Relación de pH con la temperatura de operación.

En la Figura 5.4 se puede observar que el pH varía dentro del rango de 6-7, lo cual ayudó a que el proceso de digestión se llevara a cabo de manera correcta. También se puede observar que la producción de biogás comenzó desde el primer día y que para el día 10 se comenzó a producir gas metano, momento en el cual el pH se tornó a 6.5; así mismo se observa que la mayor producción de biogás se obtuvo en el día 10 y que a partir de ahí comenzó a disminuir.

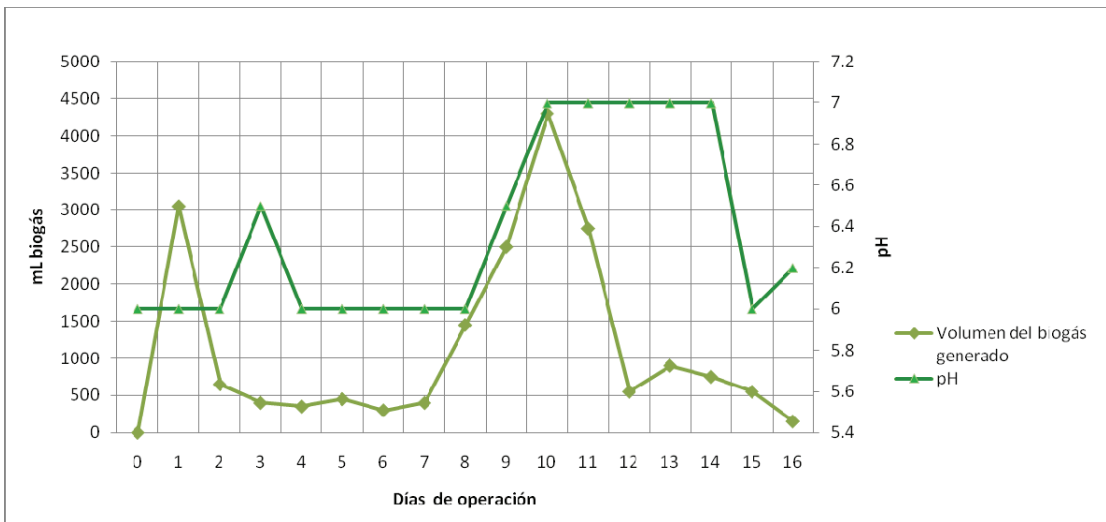


Figura 5. 4 Relación del pH con la producción de biogás.

En la Figura 5.5 se puede observar que la inflamabilidad del gas comenzó a partir del día nueve, que la mayor inflamabilidad se obtuvo en los días once y doce y que el último día que el gas inflamo fue el día catorce.

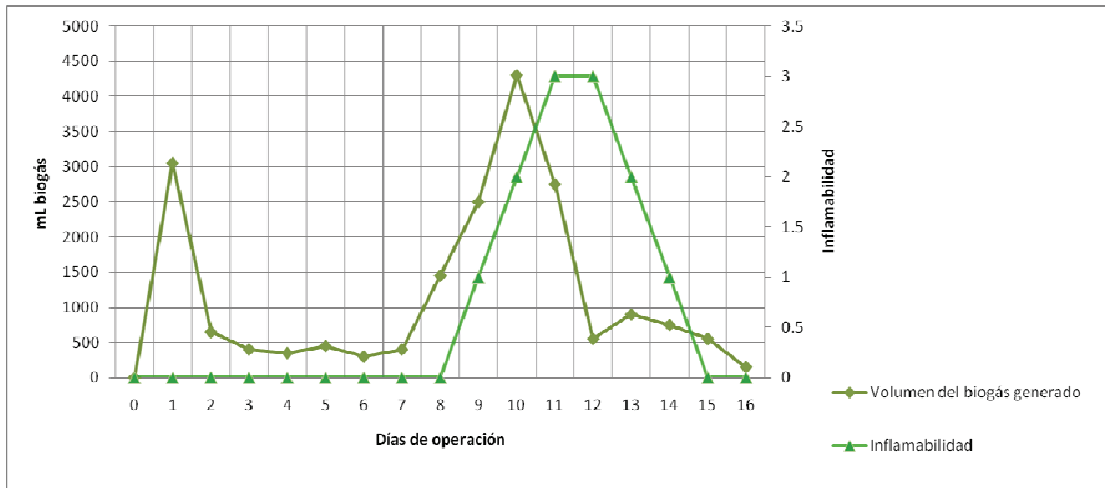


Figura 5. 5 Pruebas de inflamabilidad y la producción de biogás.

Donde el grado de inflamabilidad fue clasificado como se muestra en la Tabla 4.6.

En la Figura 5.6 se muestra una fotografía de la combustión de biogás generado en este experimento.

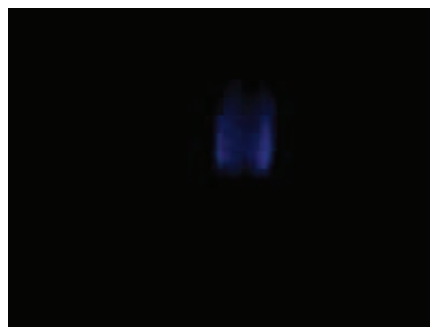
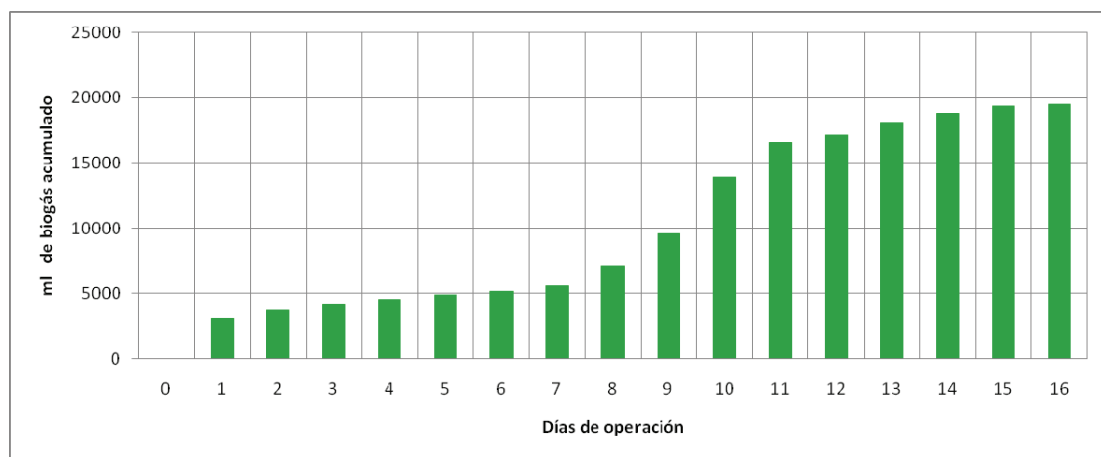


Figura 5. 6 Combustión del biogás generado.

En la figura 5.7 se muestra el tiempo de retención hidráulica experimental (TRH), el cual es de 16 días, para la temperatura promedio de 19 °C. Este TRH se determinó de acuerdo al tiempo en el

que tuvo que mantener la materia dentro del digestor para que comenzara y terminara de producir gas inflamable. Todo lo anterior se determinó como respuesta del reactor en la experimentación.

En la Figura 5.7 se muestra la cantidad de biogás acumulado en los 16 días que duró el experimento. Y como se puede observar esta producción mantuvo una tendencia a la baja desde el día 10, momento en el que se determinó que después del último día que el biogás inflamara se tomarían dos días más, para retirar el lodo digerido del digestor, siendo éste el tiempo de residencia hidráulica.



*Figura 5. 7 Producción de biogás acumulado en la operación del digestor experimental.*

En la Figura 5.8 se muestra el lodo digerido resultante de la digestión experimental. Se puede observar que se presenta un color oscuro y es relativamente líquido, no muestra trozos grandes de materia y algo muy importante es que presenta un olor fétido y muy fuerte a diferencia de lo que se menciona en la teoría. Esto debido a que hace falta un tiempo de operación más largo.



*Figura 5. 8 Características del lodo digerido.*

En la Tabla 5.1 se muestran las características químicas del lodo digerido, las cuales fueron obtenidas a través de un análisis químico de laboratorio. Con esto es posible obtener el porcentaje de remoción promedio obtenido.

*Tabla 5. 1 Características químicas del lodo digerido.*

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL LODO DIGERIDO, SUSTRATO ALIMENTADO Y CARGA REMOVIDA			
	SÓLIDOS TOTALES (ST) g/L	SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES (STV) g/L	SÓLIDOS TOTALES FIJOS (STF) g/L
Lodo digerido	90.34	64.33	26.01
Sustrato alimentado	253.12	245.33	7.79
Carga removida	162.77	181	

Con los datos anteriores se realiza el cálculo siguiente para obtener el % de remoción de ST :

1. Porcentaje de sólidos totales removidos:

$$\text{ST removidos} = (253.12 - 90.34) \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

$$\text{ST removidos} = 162.78 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

$$\% \text{ de remoción de ST} = \frac{(162) \frac{\text{g}}{\text{L}} * 100}{253.12 \frac{\text{g}}{\text{L}}}$$

$$\% \text{ de remoción de ST} = 64.3\%$$

#### 5.1.2 SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos al operar el digestor a flujo intermitente utilizando como inóculo el lodo digerido de la primera etapa experimental.

En la Figura 5.9 se muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo. Lo cual se traduce a que la temperatura dentro del reactor se mantuvo relativamente constante con el paso del tiempo, se puede observar que la temperatura máxima registrada fue de 25°C y la mínima de 17°C.

En la Figura 5.10 se puede observar que desde el momento en el que comenzó la producción de gas metano la temperatura estuvo por arriba del promedio, por lo contrario en los últimos días de generación de metano se puede observar que la temperatura comenzó a disminuir, lo cual se traduce a que en esta etapa la temperatura fue regida por los procesos que se llevan a cabo dentro del digestor.

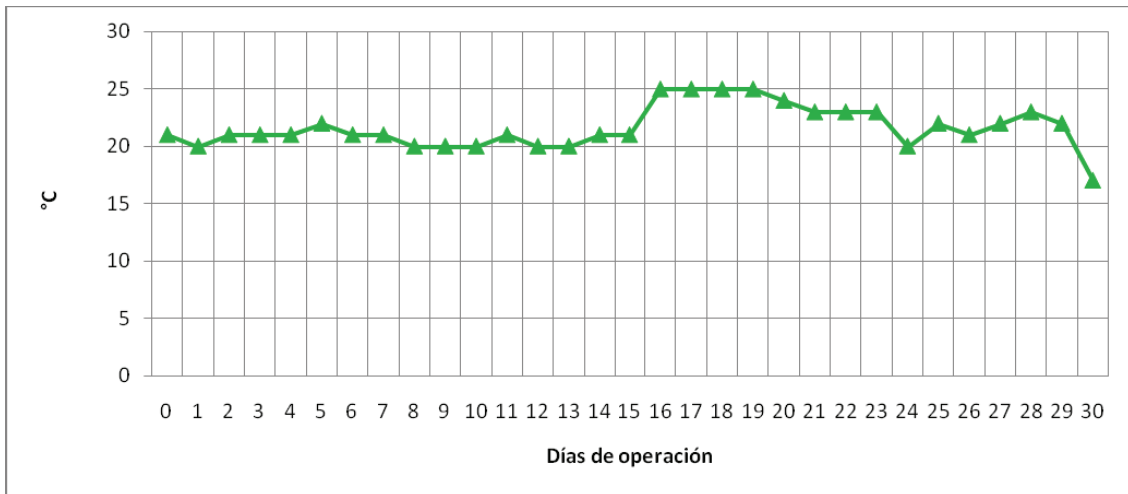


Figura 5. 9 Registro de la temperatura de operación en la etapa a flujo intermitente.

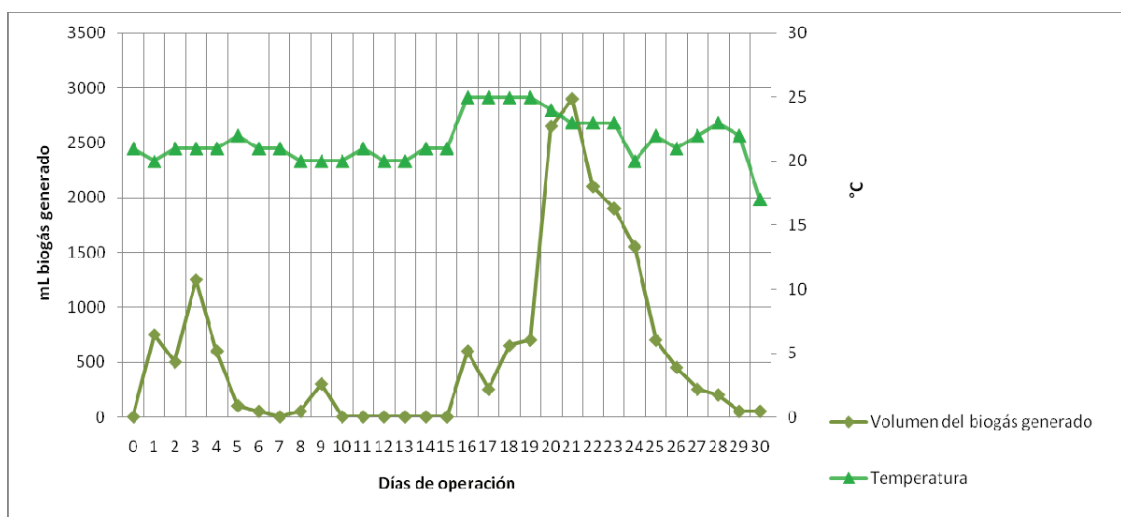


Figura 5. 10 Relación de temperatura con la producción de biogás en la etapa a flujo intermitente.

En la Figura 5.11 se muestra la relación entre el pH y la temperatura con respecto al tiempo. En esta figura se puede observar que la variación del pH se mantiene relativamente constante en el valor 6 los primeros 16 días, y a partir del día 17 hasta el día 29, el pH se mantiene entre 6.5 y 7.5, para después caer a 6 nuevamente.



También se puede observar que un día después de que el digestor se tornara básico, comenzó la producción de biogás inflamable, lo cual es el resultado de la degradación de ácidos por parte de las bacterias metanogénicas. El pH aumenta debido a que los ácidos contenidos en la mezcla son transformados por dichas bacterias a  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  principalmente.

En la Figura 5.12 se puede observar que la generación de metano comenzó poco tiempo después de que el pH se tornó básico. También se puede observar que la producción de biogás comenzó desde el primer día. Asimismo se observa que la mayor producción de biogás se obtuvo en el día 21 y que a partir de ahí comenzó a disminuir.

En la Figura 5.13 se puede observar que la inflamabilidad del gas comenzó a partir del día 18, que la mayor inflamabilidad se obtuvo en los días 19 a 23 y que el último día que el biogás inflamó fue el día 28.

Donde el grado de inflamabilidad fue clasificado como se muestra en la Tabla 4.6.

En la Figura 5.14 se muestra una fotografía de la combustión de biogás generado en este experimento.

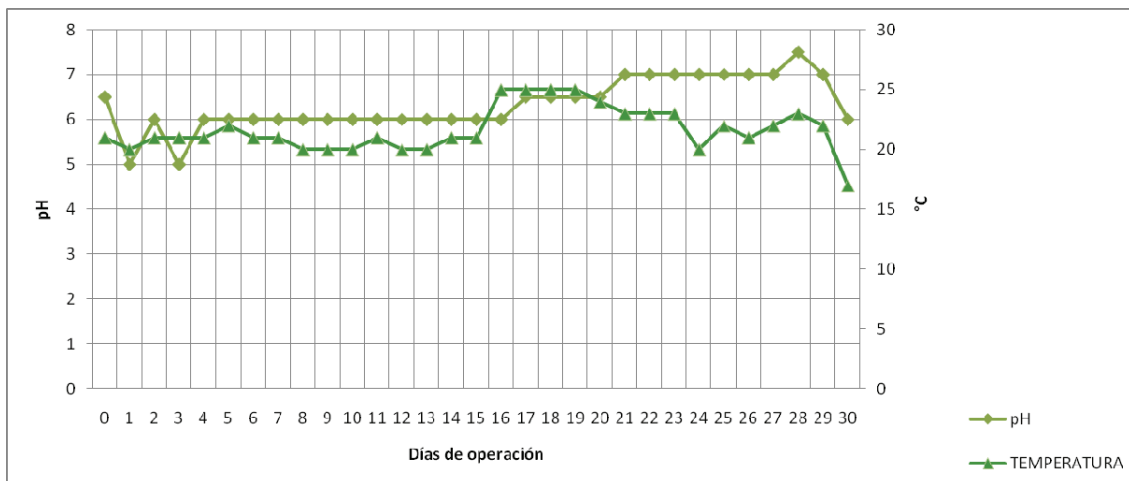


Figura 5. 11 Relación del pH con la temperatura en la etapa a flujo intermitente.

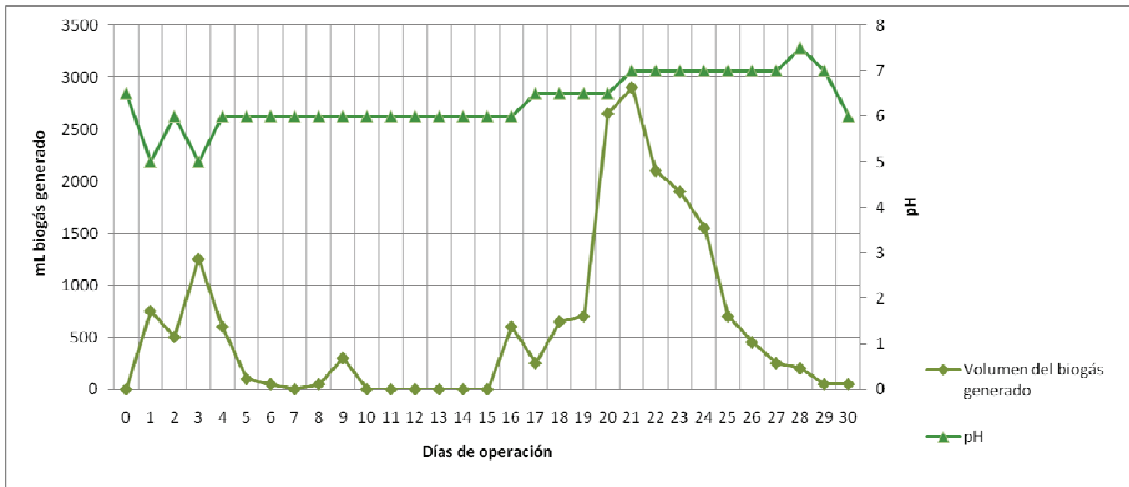


Figura 5. 12 Relación del pH y la producción del biogás en la etapa a flujo intermitente.

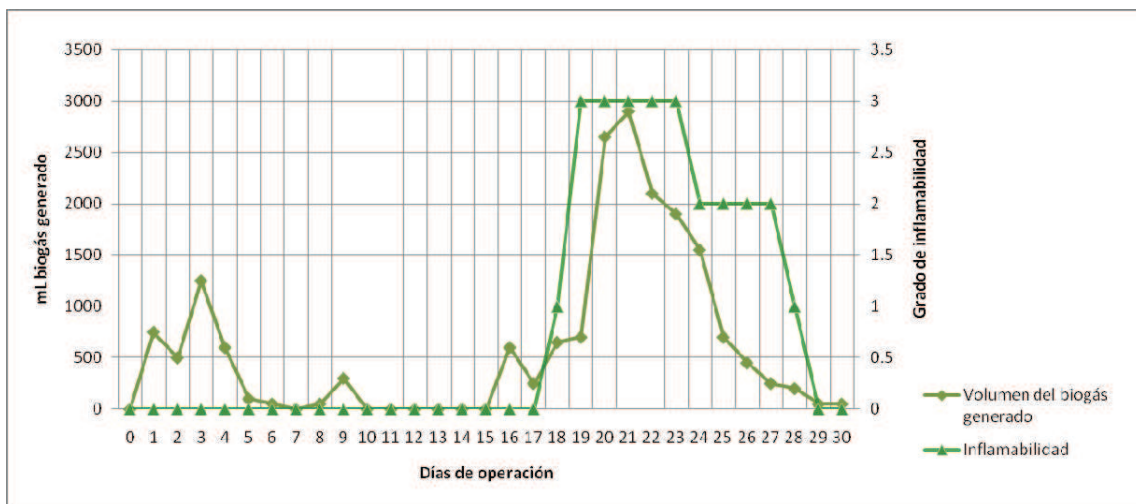


Figura 5. 13 Relación producción de biogás e índice de inflamabilidad en la etapa a flujo intermitente.

En la Figura 5.14 se muestra la combustión del biogás generado en la segunda etapa de experimentación.



Figura 5. 14 Combustión del biogás generado en la segunda etapa de experimentación.

En la Figura 5.15 se muestra el tiempo de retención hidráulica experimental (TRH) el cual es de 30 días, para la temperatura promedio de 21.64°C. Este TRH se determinó de acuerdo al tiempo en el que se mantuvieron los residuos dentro del digestor, tomado como referencia para esto la producción de biogás inflamable.

En la Figura 5.15 se muestra la cantidad de biogás acumulado en los 30 días que duró el experimento, y como se puede observar esta producción mantuvo una tendencia a la baja desde el día 22 hasta que se obtuvo una producción casi nula.

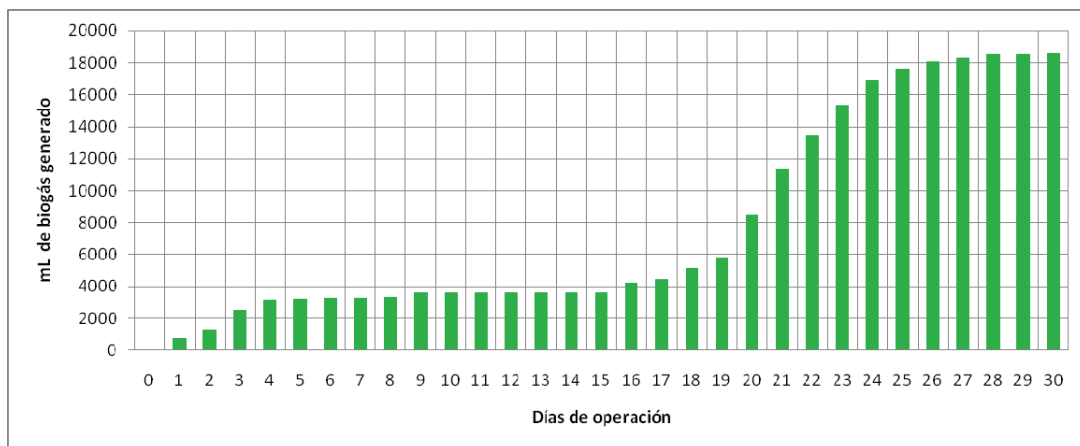


Figura 5. 15 Biogás Acumulado en la etapa a flujo intermitente.

En la Figura 5.16 se muestra el lodo digerido resultante de la digestión experimental, como se puede observar presenta un color oscuro y es relativamente líquido, no muestra trozos grandes de materia y algo muy importante es que presenta un olor fétido y muy fuerte a diferencia de lo que se menciona en la teoría y de la misma manera que en la experimentación anterior.



Figura 5. 16 *Lodo Digerido*

## 5.2 RESUMEN DE RESULTADOS

En la Tabla 5.2 se muestra el resumen de los resultados de la primera y segunda etapa de experimentación.

## 5.3 ANÁLISIS DE DE RESULTADOS

En cuanto a los parámetros a considerar para que se realice la digestión están los siguientes: Tiempo de retención hidráulica, agitación y mezclado, preparación de los materiales, relación proporcional de sólidos a líquidos, pH y temperatura; y de acuerdo a estos se mencionarán las respuestas que mostraron los mismos al ser controlados y se analizarán los factores que llevaron a cada parámetro a tener un comportamiento en particular. Asimismo se analizarán las gráficas de producción biogás-pH, temperatura, inflamabilidad y tiempo de retención. De acuerdo a la experiencia obtenida se puede decir que el hecho de que se colocara un aislante a reactor, influyó directamente en el mantenimiento relativamente constante de la temperatura dentro del reactor, tal como se mostró en la Figura 5.1, lo cual propició que el tiempo de TRH fuera menor al teórico y que las reacciones ocurrieran de acuerdo a lo previsto en la teoría.

Tabla 5. 2 Resumen de Resultados Digestor en su arranque (experimento 1) y su operación a flujo intermitente (experimento 2).

PARÁMETRO	EXPERIMENTO 1	EXPERIMENTO 2
Temperatura promedio °C	19	21
Temperatura máxima °C	24	25
Temperatura mínima °C	18	17
pH promedio	6.3	6.3
pH máximo	7	7.5
pH mínimo	6	5
pH estabilizado promedio	7.2	6.7
pH estabilizado máximo	8	8
pH estabilizado mínimo	7	6
Producción promedio de biogás m <sup>3</sup> /día	0.001147	0.0006
Producción máxima de biogás m <sup>3</sup> /día	0.0043	0.0029
Producción mínima de biogás m <sup>3</sup> /día	0	0
Biogás acumulado m <sup>3</sup>	0.0195	0.0186
Volumen de biogás inflamable m <sup>3</sup>	0.01175	0.01405
No. de días de producción de biogás inflamable	6	11
% de biogás inflamable	60	75
TRH días	16	30

Para el pH se puede observar que no tiene alguna relación en cuanto a variaciones de temperatura, para la primera etapa de experimentación, tal como se mostró en la Figura 4.12; en cuanto a la segunda etapa se tiene que las variaciones de pH, generalmente estaban relacionadas con la variación de la temperatura, es decir cuando la mezcla se tornaba acida la temperatura era relativamente baja y cuando el pH se tornaba básico la temperatura era relativamente alta.

Cabe señalar que el hecho de que la temperatura se mantuviera constante fue lo que propició que el pH de la mezcla, tanto de la primera como de la segunda etapa de experimentación, se comportara obedeciendo únicamente a los procesos químicos que ocurren dentro del reactor.

En cuanto a la producción de biogás, se puede decir que el hecho de que la temperatura se mantuviera relativamente constante y que se estabilizara el pH regularmente a un valor de 7, fue lo que propició que la producción de biogás fuera satisfactoria.

La inflamabilidad del gas producido durante el experimento fue variable, esto debido a que para que se llegue a producir gas metano, se requieren varios días en los cuales:

1. Las bacterias responsables de la hidrólisis producen unidades simples de azúcares, grasas y aminoácidos.
2. Las bacterias responsables de la acidogénesis producen ácidos orgánicos, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y pequeñas cantidades de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y alcoholes, en especial glicerol.
3. Las bacterias responsables de la acetogénesis producen ácido acético e hidrógeno.
4. Por último las bacterias responsables de la metanogénesis producen  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y agua.

Debido a los procesos anteriormente citados la producción de metano sólo se dará si se han llevado a cabo correctamente las fases anteriores, y como se pudo observar en la Figura 5.4, una vez que se ha transformado la mayoría de la biomasa en  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y agua, entonces la producción de metano disminuirá hasta llegar a la producción nula.

En cuanto a la agitación y mezclado se puede decir que no aplicó para este experimento, sin embargo, fue necesario homogeneizar la mezcla manualmente, cuando se le adicionaba NaOH, obteniendo de esta forma un pH estable y homogéneo, lo cual propicio que las reacciones dentro del digestor se llevaran a cabo de forma exitosa.

Los resultados obtenidos de haber triturado los RUO en trozos de alrededor de  $1 \text{ cm}^2$ , fueron totalmente exitosos ya que como se observó en la Figura 5.7 (lodo digerido) la degradación de éstos fue casi total. Otra razón por la que se puede afirmar que el triturar los RUO en trozos

pequeños fue exitosa, es que las bacterias tuvieron más área de acción y por lo subsecuente, esto también contribuyo a que se obtuviera un tiempo de retención hidráulica muy corto.

En cuanto al tiempo de retención que se obtuvo, se puede decir que fue muy corto y es nada parecido al que se estima en la bibliografía para una temperatura de 20° C en promedio, esto debido a que cada uno de los factores mencionados anteriormente contribuyeron satisfactoriamente en la digestión. En la Tabla 5.3 se muestra la comparación del tiempo de retención teórico y el experimental correspondiente a una temperatura de 20°C.

Tabla 5. 3 Tiempo de retención hidráulica comparado con otros estudios en este trabajo.

DIGESTOR A TEMPERATURA DE 20°C	
Dato	TRH, días
Teórico	44 (Mandujano, 1981).
Teórico	60 (Deublein y Steinhauer , 2008).
Experimental 1	16
Experimental 2	30

Con los resultados obtenidos del análisis químico del lodo digerido y de la muestra de RUO, se determinó el porcentaje de remoción. El cual nos indica una aproximación del porcentaje de materia que fue transformada en los productos de la digestión.

La manera en la que se calculó el porcentaje de remoción se expresa en la ecuación 5.1:

$$\% \text{ de remoción} = \frac{ST(\text{influentes}) - ST(\text{efluentes})}{ST(\text{influentes})} * 100 \dots\dots\dots 5.1$$

$$\% \text{ de remoción de ST} = \frac{(253.12 - 90.34)g}{253.12g} * 100$$

$$\% \text{ de remoción de ST} = \frac{(162) \frac{g}{L} \cdot 100}{253.12 \frac{g}{L}}$$

$$\% \text{ de remoción de ST} = 64.3\%$$

El resultado que se obtuvo de esta, es el siguiente: El porcentaje de remoción de la mezcla es del 64%, es decir, el 64% de la materia que se introdujo en el digester, fue transformada a otros elementos.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la fase de experimentación, se puede afirmar que el lodo digerido, mantiene el mal olor y en ningún momento del proceso, la coloración del mismo se torna negra como se esperaba. Cabe señalar que al almacenarlo en un recipiente, este siguió produciendo gas, como si el proceso de descomposición se hubiese inhibido y con el paso del tiempo vuelto a estabilizar, para volver a generar biogás que debido a la disposición final del mismo, ya no se puede comprobar si es gas metano o no.