

# Parámetros de diseño y operación de digestores anaerobios con lodos de cebadero de toros

Silvio J. Montalvo Martínez, Matilde López Torres\* y Roberto Escobedo Acosta.\*

Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Código Postal 19390, Marianao, \*Departamento de Estudios sobre Contaminación Ambiental, Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 25 y 158, Playa, Apartado Postal 6990, Ciudad de La Habana, Cuba.

Recibido: 3 de marzo de 1997. Aceptado: 3 de noviembre de 1997

Palabras clave: cebaderos, procesos anaerobios, lodos, parámetros diseño y operación.  
Key words: fattening-cattle, anaerobic processes, sludges, design and operation parameters

**RESUMEN.** La potencialidad contaminante de las aguas residuales producidas en las instalaciones destinadas a la cría de ganado vacuno para engorde (cebadero de toros), es muy elevada. La producción de aguas residuales por animal puede ser del orden de los 200 L/d. A partir de la sedimentación primaria se producen 80 L de lodo/d por animal. La concentración de sólidos volátiles varía entre 45 y 77 g/L, lo que convierte a estos lodos en el principal contaminante de este tipo de instalación. Uno de los métodos de más amplia utilización a nivel mundial, para depurar lodos orgánicos lo constituye la digestión anaerobia. En el presente trabajo fue estudiado el proceso de digestión anaerobia de estos lodos, en digestores convencionales a escala de laboratorio. Los parámetros de diseño analizados fueron: el tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica o concentración inicial de materia orgánica y los operacionales, la temperatura y el nivel de recirculación de los lodos. Los resultados demostraron que los parámetros de diseño y operación de digestores anaerobios con lodos de cebadero de toros son: tiempo de residencia de 20 d, temperatura de 55 °C, nivel de recirculación del 25 % y carga orgánica entre 2,3 y 3,85 gSV/(L · d).

**ABSTRACT.** The potential pollution of the generated wastewater in the facilities used for fattening-cattle, is too high. It could be up to 200 L/d by animal, and 80 L of sludge/d are obtained after primary sedimentation. The volatile solids concentration changes between 45 and 77 g/L, which converts these sludges into the principal pollutant in this type of facility. The anaerobic digestion constitutes one of the methods of wider utilization in order to purify organic sludges, at world level. In this paper the anaerobic process of these sludges was studied in conventional digesters at laboratory scale. The analyzed parameters were: the hydraulic retention time, the organic loading or initial concentration of organic material as design parameters and the temperature and the sludge recirculation level as operation parameters. The results demonstrated that the design and operation parameters of anaerobic digesters with fattening cattle sludges were: hydraulic retention time of 20 d, temperature of 55 °C, sludge recirculation level of 25 % and organic loading between 2,3 and 3,85 gSV/(L · d).

## INTRODUCCION

La agresividad de las aguas residuales producidas en las instalaciones destinadas a la cría de toros para engorde (cebaderos), es muy elevada.<sup>1</sup>

Los lodos obtenidos fundamentalmente a partir de la excreta de esos animales y los residuos de comida, son uno de los componentes de más difícil disposición en estos casos.

Uno de los métodos de más amplia utilización a nivel mundial para la purificación de este material lo constituye la digestión anaerobia, entre cuyos subproductos se encuentra el biogás, con valor combustible.

El efecto de los parámetros de diseño, tales como la carga orgánica ( $B_0$ ) y el tiempo de retención hidráulico ( $t$ ) y los parámetros de opera-

ción, temperatura ( $T$ ) y recirculación (inoculación de microorganismos activos,  $R$ ), sobre el proceso de digestión anaerobia, constituye un tema ampliamente abordado en este campo. Sin embargo, los valores óptimos de estos parámetros, dependen de muchos factores, tales como: las características del sustrato a tratar, las condiciones climáticas de la región y el tipo de alimentación entre otros. Todo lo cual se debe tener en cuenta a la hora de diseñar la instalación depuradora. De ahí, la necesaria investigación y experimentación.

El objetivo del presente trabajo fue estudiar el efecto de diferentes parámetros de diseño y operación (carga orgánica, tiempo de retención hidráulico, temperatura y nivel de recirculación) durante el proceso de digestión anaerobia de lodos resultantes de la sedimentación primaria de aguas residuales de un cebadero de toros.

## MATERIALES Y METODOS

El trabajo experimental se realizó con excretas provenientes del cebadero de toros de Batabanó, ubicado en la Provincia de La Habana al sur-oeste de Cuba. El plan experimental se diseñó de forma tal, que se pudiera probar la influencia sobre el proceso de los parámetros antes mencionados.

Las experiencias fueron realizadas en reactores de 10 L, operando el sistema en la primera etapa, con una concentración inicial de sólidos volátiles (SV) de 77 g/L, por lo que, las variaciones de cargas orgánicas

por volumen de reactor, se lograron mediante cambios en la carga hidráulica. La carga orgánica correspondió a 2,56; 3,85 y 7,70 gSV/(L · d), para tiempos de retención hidráulico de 30, 20 y 10 d respectivamente (Tabla 1).

En la segunda etapa de trabajo, los experimentos fueron realizados de acuerdo con las condiciones que se relacionan en la Tabla 2.

Cada una de las corridas experimentales (en ambas etapas), se efec-

tuaron al menos dos veces, obteniéndose una buena réplica de los resultados. El tiempo de experimentación en todos los casos fue aproximadamente de 90 d.

Como una de las variantes para garantizar una alta retención celular y poder disminuir los tiempos de retención hidráulico en estos sistemas, se evaluó el efecto de la recirculación del licor mezclado entre el 25 y 50 % del flujo de lodo crudo a tratar en los reactores.

Las muestras fueron tomadas una vez alcanzado el estado estacionario, el cual se correspondió con una producción constante de biogás y de eliminación de sólidos volátiles.

Los análisis químicos fueron realizados de acuerdo con las técnicas descritas en los métodos normalizados para análisis de agua y aguas residuales.<sup>2</sup>

Los resultados fueron evaluados estadísticamente a través de un programa de computación<sup>3</sup>, con el objetivo principal de comprobar la posible significación de los parámetros analizados.

**Tabla 1.** Condiciones experimentales para la primera etapa.

Corrida	$t_r$ (d)	Temperatura (°C)
1	10	Ambiente (16-29)
2	20	Ambiente (16-29)
3	30	Ambiente (16-29)
4	20	40
5	20	55

**Tabla 2.** Condiciones experimentales para la segunda etapa.

Parámetros	Condiciones		
Concentración inicial de materia orgánica (gSV/L)	45	63	75
Temperatura (°C)	Ambiente (16-33)	40	55
Tiempo de retención (d)	10	20	30
Recirculación (%)	0	25	50

**Tabla 3.** Efecto de la temperatura bajo las condiciones experimentales de la primera etapa.

Corrida	Temperatura (°C)	$S_0$ (gSV/L)	$B_v$ (gSV/(L · d))	$t_r$ (d)	Eficiencia (%)
2	16-29	77	3,85	20	36
4	40	77	3,8	20	45
5	55	77	3,8	20	45

**Tabla 4.** Efecto de la temperatura bajo las condiciones experimentales de la segunda etapa.

Serie I					
Corrida	Temperatura (°C)	$S_0$ (gSV/L)	$B_v$ [gSV/(L · d)]	$t_r$ (d)	Eficiencia (%)
6	20-27	74	2,44	30	35
7	40	74	2,44	30	44
8	55	74	2,44	30	47
Serie II					
9	16-27	46	1,52	30	29
10	40	46	1,52	30	36
11	55	46	1,52	30	39
Serie III					
12	24-33	44	4,4	10	19
13	55	44	4,4	10	33

## RESULTADOS Y DISCUSION

Como es práctica habitual, el análisis de la eficiencia del proceso anaerobio de los lodos, se basó en la degradación de los SV y como parámetro complementario se empleó la producción de biogás. El estado estacionario en todas las experiencias fue alcanzado a partir de los 15 a 20 d.

### Efecto de la temperatura sobre el proceso de digestión

Los resultados obtenidos en la primera etapa experimental resultaron muy similares a los alcanzados por Hashimoto en 1982 (Tabla 3). Las eficiencias obtenidas en el presente estudio fueron ligeramente superiores a las que han sido reportadas.<sup>4</sup> Hashimoto encontró para residuales de cebadero de toros, que la mayor biodegradabilidad se alcanza a 40 °C.

Eficiencias de 42 y 45 % (basadas en los SV), han sido reportadas para residuales similares,<sup>5</sup> trabajando con 8 d de  $t_r$ , temperatura de 35 °C y 5 d y 60 °C respectivamente. Sin embargo, se reporta para un número considerable de residuos<sup>6</sup> una temperatura óptima alrededor de los 55 °C.

El pH se mantuvo en el efluente entre 7,0 y 7,3 y a la entrada entre 6,8-7,0. Los mayores valores de este parámetro fueron obtenidos a 55 °C.

La calidad del gas en las diferentes corridas fue similar (cercano a 70 % de  $CH_4$ ). No se observaron diferencias significativas. El volumen de gas producido por volumen de reactor por día [ $V_g/(V_r \cdot d)$ ], fue semejante para 40 y 55 °C (entre 1 y 1,2), aunque en general hubo mayor producción a 55 °C, siendo menor para el proceso a temperatura ambiente [ $0,8 V_g/(V_r \cdot d)$ ].

Los resultados de la segunda etapa son mostrados en la Tabla 4. Aunque las eficiencias obtenidas a temperatura de 55 °C son sólo ligeramente superiores a las logradas a 40 °C, hay que añadir que a 55 °C, puede

lograrse un efecto selectivo tanto de bacterias como de parásitos que no se logra a temperaturas inferiores, con lo que se eliminan del medio microorganismos patógenos indicadores de la contaminación. Este efecto «germicida» ha sido reportado por otros autores.<sup>7,8</sup>

Los resultados de las corridas 12 y 13 son análogos a los de las series I y II, en cuanto a comparación de procesos a diferentes temperaturas se refiere, aunque en este caso, hay una diferencia en eficiencia mucho más marcada (14 %), lo cual se debe fundamentalmente a que se trabajó con 10 d de tiempo de retención hidráulico.

En las series I, II y III el comportamiento del pH fue similar al de la primera etapa. De igual forma, la calidad del gas estuvo cercana al 70 % de CH<sub>4</sub>. Sin embargo, el volumen de biogás producido se comportó según se presenta en la Tabla 5.

#### Efecto del tiempo de retención hidráulico

En la primera etapa experimental pudo comprobarse que no hay diferencias entre 20 y 30 d de tiempo de retención en la eficiencia del proceso, mientras que para 10 d, se obtuvo un 7 % menos de eficiencia, si se compara con los t<sub>r</sub> mayores (Tabla 6).

El comportamiento del pH se mantuvo muy similar en las tres corridas. El volumen del gas desprendido estuvo entre 0,7 y 0,9 V<sub>g</sub>(V<sub>r</sub> · d), obteniéndose la mayor producción para t<sub>r</sub> de 30 d.

En la segunda etapa (Tabla 7), se observó un incremento de un 2 % en la eficiencia con el aumento del t<sub>r</sub>, no siendo este significativo, (serie IV). Este comportamiento se mantuvo en la serie V, aunque con marcadas diferencias entre los extremos de t<sub>r</sub> estudiados. La serie VI mostró igual tendencia que la serie IV, sin embargo, esta diferencia no estuvo en correspondencia con el aumento de t<sub>r</sub>.

El efecto de este parámetro en la producción de biogás (Tabla 8), pudiera parecer contradictorio (menor t<sub>r</sub> mayor producción de biogás). Sin embargo, aunque los microorganismos trabajen de forma menos eficiente, no llegan a inhibirse a los bajos tiempos de retención hidráulicos estudiados.

#### Efecto de la recirculación

Las mayores eficiencias fueron alcanzadas para un flujo de recirculación del 50 %. Sin embargo, este nivel de recirculación implica el doble

del bombeo de lodos, lo que encarece en buena medida el proceso a escala industrial para obtener un 4 % más de eficiencia, en comparación

con el proceso que emplea recirculación del 25 %. De ahí que se proponga trabajar con un nivel de recirculación del 25 %. Por otra parte,

**Tabla 5.** Efecto de la temperatura sobre la producción de biogás.

Corrida	Producción de biogás V <sub>g</sub> (V <sub>r</sub> · d)	Temperatura (°C)
6	0,56	20-27
7	0,77	40
8	0,95	55
9	0,92	16-27
10	0,97	40
11	1,06	55

**Tabla 6.** Efecto del tiempo de retención hidráulico en la primera etapa experimental.

Corrida	Temperatura (°C)	S <sub>0</sub> (gSV/L)	B <sub>0</sub> (gSV/(L · d))	t <sub>r</sub> (d)	Eficiencia (%)
1	16-29	77	7,70	10	29
2	16-29	77	3,85	20	36
3	16-29	77	2,54	30	36

**Tabla 7.** Efecto del tiempo de retención hidráulico en la segunda etapa experimental.

Serie IV					
Corrida	Temperatura (°C)	S <sub>0</sub> (gSV/L)	B <sub>0</sub> (gSV/(L · d))	t <sub>r</sub> (d)	Eficiencia (%)
14	20-27	63	6,30	10	26
15	20-27	63	3,46	20	36
16	20-27	63	2,08	30	32
Serie V					
17	16-27	46	4,60	10	18
18	16-27	46	2,30	20	27
19	16-27	46	1,52	30	36
Serie VI*					
20*	55	44	4,40	10	37
21*	55	44	2,45	30	39

\* Recirculación del 50 %.

**Tabla 8.** Influencia del t<sub>r</sub> sobre el volumen de biogás producido.

Corrida	Producción de biogás V <sub>g</sub> (V <sub>r</sub> · d)	t <sub>r</sub> (d)
14	0,78	10
15	0,73	20
16	0,51	30
17	1,07	10
18	0,98	20
19	0,92	30
20	0,95	10
21	0,93	30

debe señalarse también que el bombeo con este nivel no sólo representa un 5 % más de eficiencia con relación al proceso sin recirculación, sino que además, provoca el rompimiento de la capa de espuma que tiende a formarse en los digestores debido a diversos factores bastante conocidos (Tabla 9).

Como hecho interesante debe destacarse que en la serie VI, se observó un 2 % de diferencia en la eficiencia entre los reactores que operaban a  $t_r$  de 10 y 30 d. A partir de la prueba  $t$  de Student para un 95 % de confianza, se comprobó que esta diferencia no era significativa, lo que se debe fundamentalmente, al efecto que causa la inoculación de una gran masa de microorganismos activos que aceleran el proceso en el digestor aún a  $t_r$  tan bajos como 10 d.

**Efecto de la carga orgánica**

La variación de este parámetro puede deberse a: cambios en el  $t_r$  debido a la variación del flujo de entrada al proceso; cambios en la concentración de materia orgánica en el residual o ambas causas a la vez.

Con relación a la variación por cambio de  $t_r$  se aprecia claramente que, para el intervalo estudiado, a mayores cargas orgánicas (menor  $t_r$ ), la eficiencia se hace menor (Tablas 6 y 7).

Para evaluar la variación por cambio de concentración del sustrato se hace necesario agrupar los datos según la Tabla 10. Para igual  $t_r$  hay un aumento de la eficiencia con el incremento de la concentración inicial en el intervalo estudiado, con una sola excepción a  $t_r$  de 10 d, sin embargo, no debe olvidarse que existen varios factores que intervienen en este comportamiento, como son: la temperatura y el propio residual. En el caso de la temperatura, aunque es ambiente tiene amplias fluctuaciones y el residual puede tener incluso una misma concentración de SV, pero su característica puede ser diferente (mayor cantidad de residuos fibrosos o restos de otros alimentos, etc.). No obstante el hecho

**Tabla 9.** Efecto de la recirculación sobre el proceso anaerobio

Corrida	Temperatura (°C)	S <sub>0</sub> (gSV/L)	B <sub>0</sub> (gSV/L d)	t <sub>r</sub> (d)	R (%)	Eficiencia (%)
22	16-27	46	1.52	30	0	31
23	16-27	46	1.52	30	25	36
24	16-27	46	1.52	30	50	40

**Tabla 10.** Efecto de la variación de S<sub>0</sub> sobre la eficiencia del proceso

t <sub>r</sub> (d)	Concentración de materia orgánica (gSV/L)			Eficiencia (%SV)
	74	63	46	
10	—	28	31	19
20	—	30	27	—
30	—	32	21 30 29	—

de poder llegar a una casi total generalidad del fenómeno, sin dudas, constituye un hecho muy positivo para la predicción de este comportamiento.

**CONCLUSIONES**

Se comprobó que el aumento de la temperatura favorece el proceso de digestión independientemente de las cargas orgánicas aplicadas.

Se demostró que en estos sistemas es factible operar con tiempos de retención hidráulico de 20 d, sin llegar a afectar la eficiencia del proceso en comparación con las que se obtendrían a tiempos de retención superiores.

Como el proceso alcanza el estado estacionario entre los 15-20 d, es de esperar que la fase de arrancada a escala industrial sea rápida y que no se presenten serios inconvenientes.

Los parámetros de diseño y operación con los cuales se garantiza una mayor degradación de materia orgánica en digestores convencionales empleando lodos provenientes de cebaderos de toros son: tiempos de residencia de 20 d; temperatura de 55 °C; recirculación del 25 % y carga orgánica entre 2,3 y 3,85 gSV/(L · d).

**BIBLIOGRAFIA**

- López M. Montalvo S J, Escobedo R, Ruiz M, Correa O y Rodríguez X. *Memories 3rd International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries*, D.F. México, 613-615, 1995.
- APHA:AWWA:WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 16th edition, Washington, D.C., 1985.
- Statsoft. Inc. *Statistica for Windows*, Release 4.5 A, 1993.
- Hashimoto A.G. Thermophilic and mesophilic anaerobic fermentation of swine manure. *Agriculture Wastes*, **6**, 175, 1983.
- Hill D. T. Design parameters and operating characteristics of animal waste anaerobic digestion systems beef cattle. *Agricultural Wastes*, **5**, 205, 1983.
- Van Lier J.B, Martin J.L.S, Lettinga G. Effect of temperature on the anaerobic thermophilic conversion of volatile fatty acids by dispersed and granular sludge. *Water Research*, **30**, 199, 1996.
- Olsen J.E, Hansen P. Inactivation of some parasites by anaerobic digestion of cattle slurry. *Biological Wastes*, **22**, 107, 1987.
- Sorlini C. A note on the removal of faecal bacteria in cattle slurry after different farm and laboratory treatments. *Biological Wastes*, **22**, 39, 1987.