

Efecto del tiempo de retención hidráulica en el funcionamiento de un reactor UASB tratando efluentes cárnicos

**Yaxcelys A. Caldera M., Pedro I. Madueño M., Alonso G. Griborio D.,
Edixon C. Gutiérrez G., y Nola M. Fernández A.**

Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Escuela de Ingeniería Civil,
Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Apartado 526.
Maracaibo 4001-A, Edo. Zulia, Venezuela.

Resumen

Se estudió el efecto del tiempo de retención hidráulica (TRH) en el funcionamiento de un reactor UASB tratando efluentes cárnicos bajo condiciones mesofílicas. Se evaluó la concentración promedio de demanda química de oxígeno (DQO) del efluente cárnico de 8500 mg DQO/L a TRH de 36, 24 y 12 h obteniéndose cargas orgánicas (CO) de 5,7; 8,5 y 17 kg DQO/m³d respectivamente. Cada TRH se mantuvo hasta alcanzar valores estables en los parámetros operacionales. Se analizaron los siguientes parámetros: DQO, carbono orgánico total (COT), producción de biogás, porcentaje de metano, pH, alcalinidad, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), producción de ácidos grasos volátiles (AGV) y temperatura. Los resultados demostraron la eficiencia del reactor UASB tratando efluentes cárnicos obteniéndose un porcentaje de remoción de DQO promedio de 79% para la CO de 17 kg DQO/m³d a TRH de 12 h. Se obtuvo una disminución en el porcentaje de remoción de DQO promedio entre 1 y 8% con la variación del TRH. Los cambios en el TRH afectaron la concentración de AGV y SSV, obteniéndose los máximos valores para el TRH de 12 h. El porcentaje de metano estuvo en el rango de 59 – 64%.

Palabras clave: Tiempo de retención hidráulico, efluente cárnico, reactor UASB, tratamiento anaerobio, carga orgánica.

The effect of hydraulic retention time in the functioning of the USAB reactor in slaughterhouse effluent treatment

Abstract

The effect of hydraulic retention time (HRT) in the performance of a UASB reactor treating slaughterhouse effluents was studied under mesophilic conditions. The average chemical oxygen demand (COD) concentration of 8500 mg COD/l at HRT of 36, 24 and 12

h was evaluated, and organic loads (OL) of 5.7, 8.5 and 17 kg COD/m³d, were applied, respectively. Each HRT was kept until operational parameters were established. The following parameters were analyzed: COD, total organic carbon (TOC), biogas production, methane content, pH, alkalinity, total suspended solids (TSS), volatile suspended solids (VSS), volatile fatty acids (VFA) production and temperature. The results demonstrated the efficiency of the UASB reactor treating slaughterhouse effluents. The average COD removal percentage was 79% for OL of 17 kg COD/m³d, at HRT of 12 h. A decrease between 1 and 8% average COD removal percentage was obtained when the HRT was changed. The VFA's and VSS's were affected by the change of TRH, the maximum values were obtained at an HRT of 12 h. The methane percentage was in the range between 59-64%.

Key words: Hydraulic retention time, slaughterhouse effluent, UASB reactor, anaerobic digestion, organic loads.

Recibido: 11-06-2002 . **Aceptado:** 22-04-2003

Introducción

Las aguas residuales cárnicas presentan un gran número de sustancias orgánicas tales como: pelos de animales, pedazos de carne, órganos intestinales, grasa, sangre, materiales alimenticios sin digerir y excretas, así como desagradable olor y color rojo. Debido a estas características de color, grasas y gran contenido de materia orgánica estos efluentes causan severos daños si son descargados en ambientes acuáticos sin tratamiento alguno (Li et al., 2000). Los procesos anaerobios han sido aplicados con éxito en el tratamiento de efluentes industriales destacándose la factibilidad del reactor anaerobio de manto de lodo de flujo ascendente (UASB) para tratar aguas residuales de alta carga como los efluentes cárnicos (Lettinga, 1995).

El tiempo de retención hidráulica (TRH) en un digestor es uno de los factores más importantes para el control de los sistemas de digestión anaerobia. El fenómeno de lavado, el mecanismo de procesos de digestión de dos fases y la transferencia de hidrógeno son afectados por el TRH (Zhang y Noike, 1994). Se ha reportado que la disminución en el porcentaje de remoción de materia orgánica y la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) en reactores UASB podría deberse al bajo tiempo de contacto entre la biomasa y el sustrato producto de la disminución en el TRH (Nadais et al., 2001).

En este trabajo se estudió el efecto del TRH en el funcionamiento de un reactor UASB, a escala de laboratorio, tratando efluente cárnicos bajo condiciones mesofílicas, evaluando

los TRH de 36, 24 y 12 h a la concentración promedio de demanda química de oxígeno (DQO) del efluente cárnico de 8500 mg DQO/L.

Materiales y métodos

Equipo experimental

Para realizar el estudio se utilizó un reactor UASB construido en plexiglás, con una capacidad de 4,030 L (FIG. 1). Las características físicas del reactor se presentan en la TABLA 1.

El reactor se colocó en un cuarto a temperatura controlada ($37 \pm 1^\circ\text{C}$) en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de La Universidad del Zulia, se inoculó con lodo anaerobio pregranulado (un 30% del volumen útil del reactor) proveniente de una industria cervecera. En el fondo del reactor se colocó grava, 4% del volumen útil del reactor, para proveer una distribución uniforme del flujo. El gas producido en el reactor fue medido por desplazamiento del agua en un colector de gas conectado a un tanque abierto a la atmósfera, los cuales contenían agua acidificada (ácido sulfúrico 0,1 N) para reducir la solubilidad del CO_2 .

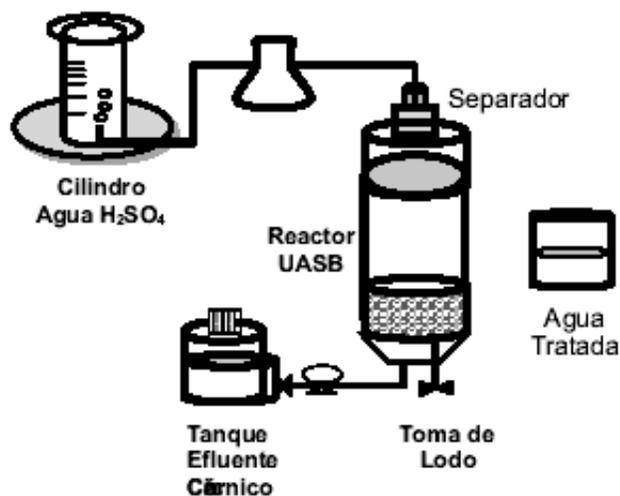


Figura 1. Reactor Anaerobio UASB colocado en el Laboratorio.

TABLA 1. Dimensiones del reactor UASP.

Parámetro	Capacidad
Volumen vacío	4530 mL
Volumen útil	4030 mL
Altura total	68 cm
Altura útil	58 cm
Altura del cono	10 cm
Diámetro interno del cilindro	9,5 cm
Diámetro externo del cilindro	10,5 cm
Diámetro máximo del cono	10,5 cm
Diámetro mínimo del cono	6 cm

Luego de ser de inoculado, el reactor fue alimentado con agua residual sintética constituida por: agua destilada, solución de glucosa y nutrientes. Con una DQO inicial aproximadamente de 1000 mg DQO/L de agua residual sintética, para lo cual se agregó una cantidad adecuada de glucosa (1 g glucosa/L de agua destilada). Adicionalmente, para ajustar el pH a 6,7-7,5 se agregó bicarbonato de sodio en una cantidad equivalente de 1 g/L. La hidráulica del sistema inicialmente fue por carga durante 72 h, para posteriormente ser puesto en funcionamiento a flujo continuo con el mismo sustrato. Después de estabilizado el sistema se alimentó el reactor con efluente cárnico por 90 días iniciando con una concentración de 2000 mg DQO/L, la cual se incrementó progresivamente hasta alcanzar la concentración promedio del efluente de 8500 mg DQO/L. Todo esto se realizó sin ajuste del pH.

Agua residual

Este estudio fue realizado con agua residual del Matadero San Isidro, ubicado en la vía La Concepción a 15 km de Maracaibo, estado Zulia, Venezuela, que para el momento de la experimentación, sacrificaba un promedio diario de 20 a 30 bovinos, 10 a 15 porcinos y algunos ovinos. La TABLA 2 presenta las características del agua residual. El agua residual llega a un tanque de almacenamiento temporal del efluente en el matadero por sistema de canales y tuberías conectados a los diferentes puntos del proceso productivo: limpieza de corrales, sala de matanza y secciones de subproductos. Antes de llegar al tanque, el efluente pasa por una tanquilla provista de una rejilla a la entrada donde se retienen los sólidos de mayor tamaño. Las muestras de agua residual fueron tomadas directamente del tanque de almacenamiento temporal y almacenadas en envases plásticos de 20 L de capacidad para ser trasladadas al laboratorio, donde se refrigeraron a 4°C para su conservación. Posteriormente fueron caracterizadas e incorporadas al reactor para su

tratamiento.

TABLA 2. Características del agua residual de la industria cárnica.

Parámetro	Valor Promedio
pH	6,6
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	900
SST (mg/L)	750
SSV (mg/L)	520
DQO (mg/L)	8500
COT (mg/L)	2500
N (mg/L)	1064
P (mg/L)	74

Control y análisis del sistema

El estudio se inició con un TRH de 36 h para lo cual se alcanzó una CO de 5,7 kg DQO/m³d, posteriormente se disminuyó el TRH a 24 h y finalmente se evaluó a un TRH de 12 h, obteniéndose las CO de 8,5 y 17 kg DQO/m³d, respectivamente. Cada CO se mantuvo hasta alcanzar valores estables en los parámetros de operación del reactor. Como parámetros de operación se consideraron reducción de la DQO superior a 80%, producción de metano superior a 0,1 m³ CH₄/DQOremovida a condiciones de temperatura y presión estándar (STP), valores de la relación AGV/alcalinidad bicarbonática (AB) menores de 0,3 (Noyola, 1994).

Durante el estudio se analizaron los siguientes parámetros: pH, alcalinidad, DQO, SST y SSV tanto a la entrada como a la salida del reactor según lo establecido en la metodología descrita en el estándar métodos (APHA, AWWA, WCF, 1992).

Adicionalmente se determinó la concentración de AGV a la muestra de salida, mientras que, la temperatura, la producción de biogás y el porcentaje de metano en el biogás se determinó para el sistema. La concentración de ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico, se determinó utilizando un cromatógrafo de gas Perkin Elmer Autosystem. Las muestras se filtraron previamente por una membrana de acetato de celulosa de 0,20 µm y se agregó ácido fórmico analítico al 10%, finalmente se inyectó 4 µm de muestra al cromatógrafo. Como gas de arrastre se utilizó nitrógeno, el cual se mantuvo a través de una columna a una temperatura constante de 150°C. Los componentes se identificaron mediante un detector de ionización de flama (FID) conectado a un integrador electrónico

(PE Nelson modelo 1022) para registrar la señal de salida. El porcentaje de metano se determinó utilizando un cromatógrafo de gas Perkin Elmer Autosystem con una columna de vidrio empacada W/Hayesep Q 80/100 6' x ¼" x 2 mm Marca Xpertk. El cromatógrafo operó de modo isotérmico a 150°C en el horno y 200°C en el inyector. Como gas de arrastre se utilizó nitrógeno a 20 mL/min. Las muestras de biogas fueron inyectadas al cromatógrafo con ayuda de una jeringa cromatográfica. Los compuestos eluidos de la columna fueron cuantificados y determinados por un detector de ionización de llama (FID) a 160°C. La cuantificación se realizó a través del Método Estándar Externo, inyectando muestras estándar de concentración conocida del gas y los resultados se expresaron en porcentaje de metano.

Resultados y Discusión

pH y alcalinidad

Los cambios en el TRH no afectaron el pH y la alcalinidad del sistema. Los valores promedio de pH se mantuvieron entre 7,2 y 7,6; mientras que los valores promedio de alcalinidad estuvieron en el rango de 3054 y 3713 mg/L CaCO₃. Estos valores de pH y alcalinidad son considerados adecuados para que se desarrolle el proceso de digestión anaerobia (Ruiz et al., 2000; Metcalf y Eddy, 1995), por lo que no fue necesario ajustar el pH del sistema.

Demanda química de oxígeno, DQO

La remoción de materia orgánica expresada como DQO se evaluó para tres TRH: 36, 24 y 12 h, obteniéndose las cargas orgánicas (CO) de 5,7; 8,5 y 17 kg DQO/m³d respectivamente, manteniéndose la concentración promedio del efluente cárnico en 8500 mg DQO/L (TABLA 3).

TABLA 3. Condiciones de operación.

Carga orgánica (kg DQO/m ³ d)	DQO (mg/L)	TRH (h)	Días de operación
5,7	8500	36	28
8,5	8500	24	30
17	8500	12	22

La FIG. 2 presenta el comportamiento en la variación del porcentaje de remoción de DQO durante la experimentación donde se observa una tendencia a disminuir a medida

que se disminuye el TRH. Al evaluar el TRH de 36 h, por 28 días, se obtuvo un porcentaje de remoción de DQO promedio de 88% (TABLA 4). Posteriormente se disminuyó el TRH a 24 h, para una CO de 8,5 kg DQO/m³d, obteniéndose un comportamiento similar con una reducción en el porcentaje de remoción de DQO promedio del 1%, esta CO se evaluó por 30 días y el porcentaje de DQO promedio fue de 87%. Finalmente se evaluó por 22 días el reactor para un TRH de 12 h y una CO de 17 kg/m³d, obteniéndose un porcentaje de remoción de DQO promedio de 79%. Resultados similares reportan Sayed et al. (1987), quienes trataron efluentes cárnicos en un reactor UASB granular y obtuvieron porcentajes de remoción de DQO en el rango de 55-85% para un TRH de 12 a 14,4 h a una CO de 11,5 kg DQO/m³d.

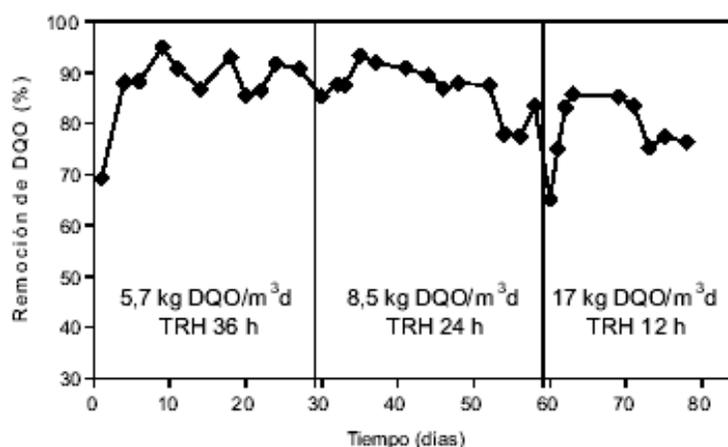


Figura 2. Variación del porcentaje de remoción de DQO.

TABLA 4. Valores promedio de los parámetros operacionales.

Carga orgánica (kg DQO/m ³ d)	TRH (h)	DQO removida (%)	m ³ CH ₄ /kgDQO rem	AGW/AB
5,7	36	88	0,24	0,550
8,5	24	87	0,24	0,064
17	12	79	0,27	0,244

Al variar el TRH de 36 a 24 h se observó una disminución del porcentaje de remoción de DQO promedio del 1%. Mientras que, al variar el TRH de 24 a 12 h se obtuvo una disminución del porcentaje de remoción de DQO promedio del 8%. Estos valores indican que aproximadamente el 79% de la DQO presente en el efluente es degradada a las 12 h. La disminución en el porcentaje de remoción de DQO al variar el TRH fue observada por otros investigadores. Núñez y Martínez (1999), encontraron que la eficiencia de remoción de DQO depende del TRH. Reportan un valor del 67% para una CO de 15 kg DQO/m³d a TRH de 5 h trabajando con un reactor de lecho granular expandido (EGSB) tratando aguas

residuales de una industria cárnica a condiciones mesofílicas, 35°C. Indican que variando el TRH desde 11,6 a 5,2 h la eficiencia de remoción de DQO disminuyó desde 80% hasta 65%. Manjunath et al. (2000), evaluaron el funcionamiento de un reactor UASB tratando efluentes cárnicos a condiciones mesofílicas ($30 \pm 1^\circ\text{C}$), con CO de 4 kg DQO/m³d para TRH de 22 h, 5 kg DQO/m³d a TRH de 5 h y 3,5 kg DQO/m³d a TRH de 15, 10 y 7 h reportan un porcentaje de remoción de DQO promedio de 65%, obteniendo los valores menores para el TRH de 5 h, aproximadamente 60%.

Ácidos grasos volátiles (AGV)

La variación de la concentración de AGV se presenta en la FIG. 3, donde se observa que la producción de AGV siguió el orden acético, propiónico y butírico.

La disminución en el TRH afectó la degradación de los AGV, obteniéndose las máximas concentraciones promedio de AGV para el TRH de 12 h. Al disminuir el TRH desde 24 a 12 h se obtuvo un aumento en la concentración promedio de los ácidos acético y propiónico incrementándose desde 226 a 706 mg/L y desde 99 a 470 mg/L, respectivamente.

Este incremento en la concentración de los AGV podría deberse a que a un TRH corto la velocidad a la que se producen los ácidos orgánicos es mayor que la velocidad de consumo de éstos, lo que origina una acumulación de AGV no degradados (Monroy, 1994).

El valor promedio de la relación AGV/AB (TABLA 4) fue de 0,055; 0,064 y 0,244 para los TRH de 36, 24 y 12 h respectivamente. Esta tendencia al incremento, a medida que se disminuyó el TRH, se debe al incremento de los AGV dentro del reactor; sin embargo, los valores de la relación AGV/AB fueron inferiores a 0,3 lo que indica la estabilidad del sistema (Pley et al., 1983). Estos valores se podrían comparar con los encontrados por Núñez y Martínez (1999), durante el tratamiento de efluentes cárnicos en un reactor EGSB quienes encontraron una relación AGV/AB entre 0,22 y 0,17 indicando que no hubo acumulación apreciable de AGV dentro del reactor.

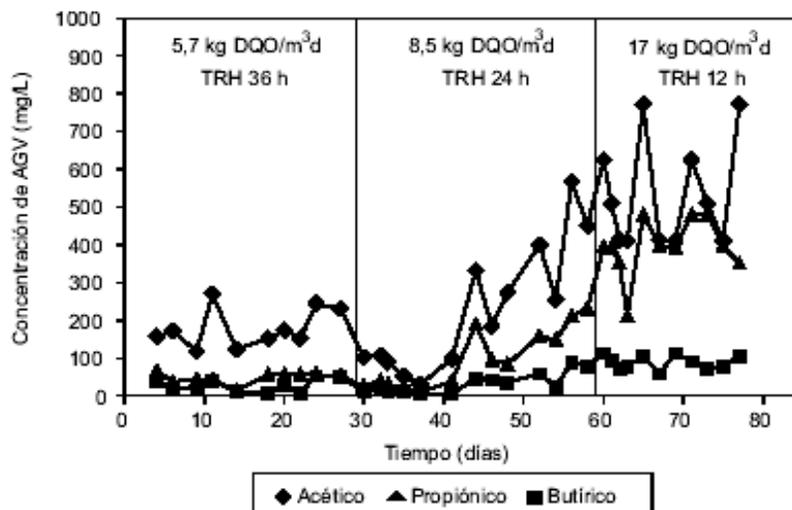


Figura 3. Comportamiento de los AGV.

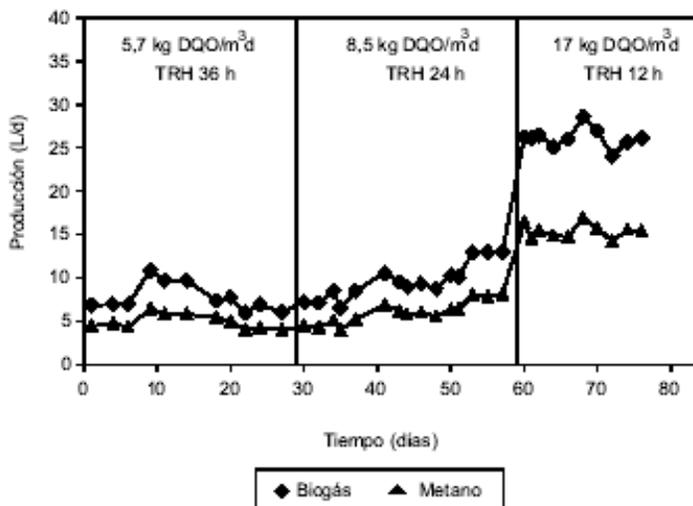


Figura 4. Variación de la producción de biogás y metano.

Tasa de producción de biogás y contenido de metano

La producción de biogás y contenido metano en el biogás se presenta en la FIG. 4, donde se observa un incremento con la disminución del TRH obteniéndose valores promedio de 4,9; 6,0 y 15,5 l CH₄/d para los TRH de 36, 24 y 12 h respectivamente, a condiciones STP. El porcentaje de metano producido no presentó cambios significativos, con valores promedio de 64%, 62% y 59% para TRH de 36 h, 24 h y 12 h respectivamente, indicando estos valores que a pesar del incremento en la concentración de AGV para el TRH de 12 h, la actividad metanogénica no fue detenida gracias a las condiciones adecuadas de pH (7,2) y alcalinidad (3400 mg/L CaCO₃) en el sistema, lo que puede ser apreciado en la relación AGV/AB menor de 0,3. Martínez et al. (1995)

obtuvieron porcentajes de metano en el biogás de 65% para una CO de 1,8 kg DQO/m³d tratando efluentes cárnicos en un reactor UASB.

La relación entre la producción de metano y los kilogramos de DQO removida a condiciones STP presentó un leve incremento obteniéndose para los TRH de 36, 24 y 12 h los valores promedio de 0,24; 0,24 y 0,27 m³ CH₄/DQO removida.

Sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV)

El incremento de la carga orgánica, en este caso producto de la disminución del TRH, origina un aumento en la producción de biogás, lo cual es un factor determinante para la retención del lodo en el reactor (Lettinga et al., 1980).

Los SST y SSV no presentaron un comportamiento regular durante la experimentación, presentando los máximos valores para el TRH de 12 h. Los valores promedio de los SSV para los TRH de 36, 24 y 12 h fueron 470, 410 y 639 mg/L respectivamente, representando estos valores más del 87% de los SST. La gran cantidad de materia orgánica, representada por la concentración de SSV en el efluente tratado, podría deberse al arrastre provocado por el biogás producido.

Del Nery et al., (2001) reportaron valores promedio de SST en el efluente tratado menores a los encontrados en este estudio en el tratamiento de efluentes cárnicos en reactores UASB. Obtuvieron valores promedio de SST de 343 mg/L para una CO de 2.1 kg DQO/m³d a TRH de 17 h; mientras que, Ruiz et al. (2000), trabajando en un reactor anaerobio por carga (ASBR), encontraron que a concentraciones superiores de 6 g DQO/L/d, se presentaron problemas en la operación del reactor debido principalmente a la pobre sedimentación del lodo, lo cual resultó en una descarga de sólidos suspendidos (SS) en el efluente tratado y en una disminución de la eficiencia de remoción de DQO.

Conclusiones

Los resultados demostraron la eficiencia del reactor UASB para tratar efluentes cárnicos obteniéndose un porcentaje de remoción de DQO promedio de 79% para la CO de 17 kg DQO/m³d a TRH de 12 h.

El porcentaje de remoción de DQO promedio disminuyó con la variación del TRH, obteniéndose una disminución de DQO entre 1 y 8% con la variación del TRH desde 36 h a 24 y 12 h, respectivamente.

La concentración de AGV incrementó al disminuir el TRH, sin embargo el sistema mantuvo el equilibrio ácido base, debido a las condiciones adecuadas de pH (7,2-7,6) y alcalinidad (3054 - 3713 mg/L CaCO₃), mostradas en la relación AGV/AB menor a 0,3.

La producción de metano no fue afectada por la variación en el TRH, se obtuvo un porcentaje en el rango de 59-64%, indicando estos valores que la concentración de AGV no causó inhibición de las metanobacterias.

Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT).

Referencias bibliográficas

1. APHA, AWWA, WCF. (1992). Standard methods for examination of water and wastewater. 18th Ed. Washington, DC, USA.
2. DEI NERY, V.; POZZI, E; DAMIANOVIC, M.; BARROS F. (2001). Upflow anaerobic sludge blanket reactors treating poultry slaughterhouse wastewater under different design and operational parameters. Anaerobic Digestion 2001. Anaerobic Convension for sustainability. Antwerpen. Belgium. September 2-6: 423-427.
3. LETTINGA, G. (1995). Anaerobic digestion and wastewater treatment systems". Antonieyan Leeuwenhoek, 67: 3-28.
4. LETTINGA, G.; Van Velsen, A.; Hobma, S.; Zeeuw, W.; Klapwijk, A. (1980). Use of upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering. 22: 699 – 734.
5. LI, W.; ZHAO, Q.; MA, F.; LIU, H.; XU, G. (2000). Treatment of slaughterhouse wastewater by an effectively combined SBBR system. 2nd international symposium on sequencing batch reactor technology. Volumen II. Poster presentations. July 10-12. Norbonne France. pp. 116-119.
6. MANJUNATH, N.; MEHROTRA, I.; MATHER, R. (2000). Treatment of wastewater from slaughterhouse by DAF-UASB system. Wat. Res. 34(6): 1930-1936.
7. MARTÍNEZ, J.; BORZACCONI, L.; MALLO, M.; GALISTEO, M.; VIÑAS, M. (1995). Treatment of slaughterhouse wastewater. Wat. Sci. Tech. 32(12): 99 - 104.

8. METCALF & EDDY, INC. (1995). Ingeniería de las aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. 3ra ed. McGraw-Hill. España. Capítulo 8. pp. 478-488.
9. MONROY, O. (1994). Control de la digestión anaerobia. III Taller y Seminario Latinoamericano sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Uruguay. pp. 185-194.
10. NADAIS, H.; CAPELA, I.; ARROJA, L.; DUARTE, A. (2001). Effect of organic, hydraulic and fat shocks on the performance of UASB reactor with intermittent operation. *Wat. Sci. Tech.* 44(4):49 - 56
11. NOYOLA, A. (1994). Diseño, inoculación y arranque de reactores UASB. II Taller y Seminario Latinoamericano sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Uruguay. pp. 133 - 143.
12. NUÑEZ, L.; MARTÍNEZ, B. (1999). Anaerobic Treatment of Slaughterhouse wastewater in an expanded granular sludge BED (EGSB) reactor. *Wat. Sci. Tech.* 40 (8): 99-106.
13. PLEY, R.; BOYLE, W.; Converse, J. (1993). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength. *Journal Wat. Pol.* 58(5): 406-411.
14. RUIZ, C.; TORRIJOS, M.; SOUSBIC, P.; MARTÍNEZ, J.; MALLETA, R. (2000). The anaerobic SBR process: basic principles for design and automation. Segundo international symposium on sequencing batch reactor technology. Volumen 1. Oral presentations. July 10-12. Norbonne France. pp. 102 - 109.
15. SAYED S.; VAN CAMPEN, L.; LETTINGA, G. (1987). Anaerobic treatment of slaughterhouse waste using a granular UASB reactor. *Biol Wastes* 21: 11-28.
16. ZHANG, T.; NOIKE, T. (1994). Influence of retention time on reactor performance and bacterial trophic populations in anaerobic digestion process. *Wat. Res.* 28(1):27 - 369.