

BOLETÍN DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
VOLUMEN 40, NO. 3, 2006, PP. 242-256  
UNIVERSIDAD DEL ZULIA, MARACAIBO, VENEZUELA

**DEGRADACIÓN ANAEROBIA MESOFÍLICA  
Y TERMOFÍLICA DE AGUAS DE PRODUCCIÓN DE  
PETRÓLEO LIVIANO**

EDIXON GUTIÉRREZ, YAXCELYS CALDERA<sup>1</sup>, KATTY CONTRERAS,  
EDITH BLANCO Y NINOSKA PAZ

Centro de Investigación del Agua (CIA), Facultad de Ingeniería, Universidad del  
Zulia, Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela  
Fax 0261-7597182

<sup>1</sup>Laboratorio de Investigaciones Ambientales  
del Núcleo Costa Oriental del Lago (LIANCOL), Universidad del Zulia,  
Cabimas, Estado Zulia, Venezuela  
yaxcelysc@hotmail.com

**Resumen.** Se evaluó la degradación anaerobia de las aguas de producción (AP) provenientes de la extracción de crudo liviano en dos reactores de manto de lodo de flujo ascendente (UASB), bajo condiciones mesofílicas ( $37 \pm 1^\circ\text{C}$ ) y termofílicas ( $57 \pm 1^\circ\text{C}$ ) respectivamente. Se disminuyó progresivamente el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) en intervalos de 6 horas, después de estabilizado, evaluándose 24, 18, 12 y 6 horas. Los parámetros analizados fueron: DQO, Sólidos Suspensidos Totales (SST), Sólidos Suspensidos Volátiles (SSV), pH, alcalinidad, enzimas intracelulares fosfatasa ácida y fosfatasa alcalina, contenido de biogás, Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y porcentaje de metano. Se obtuvieron porcentajes de remoción de DQO promedio que variaron entre 70 y 84%; valores de porcentaje de metano en el rango de 67 a 80% y concentraciones de AGV entre 113 y 129 mg acético/L, para TRH de 24 a 12 h. El TRH óptimo para degradar las AP provenientes de la extracción de crudo liviano, para las condiciones evaluadas, fue de 18 h. Es factible aplicar la digestión anaerobia bajo condiciones mesofílicas o termofílicas a las AP de petróleo liviano.

**Palabras clave:** Agua de producción de petróleo, condiciones mesofílicas, condiciones termofílicas, digestión anaerobia.

---

Recibido: 15 Marzo 2006 / Aceptado: 03 Noviembre 2006  
Received: 15 March 2006 / Accepted: 03 November 2006

## ANAEROBIC MESOPHILIC AND THERMOPHILIC DEGRADATION OF WATERS FROM LIGHT CRUDE OIL PRODUCTION

**Abstract.** Anaerobic degradation of water from light crude oil production in two Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors, under mesophilic ( $37 \pm 1^\circ\text{C}$ ) and thermophilic ( $55 \pm 1^\circ\text{C}$ ) conditions was evaluated. Hydraulic retention time (HRT) decreased progressively, in 6-h intervals, after stabilization. The HRT was determined at 24, 18, 12 and 6 h. Parameters analyzed were: COD, total suspended solids (TSS), volatile suspended solids (VSS), pH, alkalinity, acid and alkaline phosphatase extracellular enzymes, biogas production, volatile fatty acids (VFA), and methane (%) production. Mean averages ranged from 70 to 84% for COD removal, 67 to 80% for methane content, and from 113 to 129 mg acetic/L for VFA concentrations, at a HRT of 24 to 12 h. Under conditions evaluated in this study, optimum HRT to treat water from light crude oil production was 18 h. Anaerobic digestion under mesophilic and thermophilic conditions is a feasible alternative to treat water from light crude oil production.

**Key words:** Anaerobic digestion, mesophilic conditions, thermophilic conditions, waters from crude oil production.

### INTRODUCCIÓN

En muchos países no está permitido descargar a los lagos, ríos y mares, aguas residuales provenientes de la refinación del petróleo, debido a las concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) que presentan, aportadas principalmente por hidrocarburos alifáticos y aromáticos, fenoles y heterocíclicos. Estos compuestos orgánicos pueden ser eliminados por tratamientos fisicoquímicos (Gulyas y Reich 1995).

En los últimos años se han realizado numerosas investigaciones para complementar los procesos fisicoquímicos, destacándose la biotecnología basada en la capacidad de los microorganismos para degradar hidrocarburos lo que permite recuperar ambientes contaminados con petróleo y otros combustibles (Bracho *et al.* 2004).

Durante la separación fisicoquímica del crudo extraído de los yacimientos, del agua asociada se obtienen las Aguas de Producción

(AP). La composición de estas aguas es compleja ya que contienen crudo libre y emulsionado, hidrocarburos, sólidos suspendidos, gases, sales, mercaptanos y otros compuestos (Gutiérrez *et al.* 2002). Debido a la calidad que presentan las AP provenientes del Patio de Tanques Ulé ubicado en el estado Zulia, Venezuela (Rincón *et al.* 2003), se requiere plantear alternativas para tratar estas aguas de modo que puedan ser descargadas al Lago de Maracaibo, cumpliendo así la normativa vigente de disposición a cuerpos de agua, controlando así la contaminación del Lago.

Como alternativa para el tratamiento de las AP se presentan los sistemas biológicos anaerobios mesofílicos y termofílicos, los cuales han sido exitosos en el tratamiento de aguas complejas, con cargas orgánicas bajas, moderadas o altas (Lettinga 2001). Entre las desventajas de los tratamientos anaerobios mesofílicos para desechos concentrados, se reportan tiempos de retención altos para inactivar bacterias y virus presentes en las aguas residuales. Esto podría ser superado aplicando tratamientos anaeróbicos termofílicos ( $>50^{\circ}\text{C}$ ). Sin embargo, estos requieren de gasto de energía pudiendo no ser viables económicamente (Pagilla *et al.* 2000).

Algunos investigadores han reportado la sensibilidad de los procesos anaerobios a los cambios de la temperatura y de otros parámetros (pH, concentración de materia orgánica y metales pesados), destacando la importancia del equilibrio enzimático en los reactores (Lettinga *et al.* 1980). Las enzimas, fosfatasa alcalina y ácida, liberadas por los microorganismos que llevan a cabo la degradación anaerobia, se pueden considerar indicadores de los cambios que ocurren durante el tratamiento de un efluente, debido a que son sensibles a las variaciones en la composición de un efluente tratado. La inestabilidad de un reactor puede ser determinada a través de las altas concentraciones de estas enzimas, con antelación a la acumulación de los ácidos grasos volátiles y la disminución de la remoción de la materia orgánica (Zhenglan y Lan 1990).

Varias investigaciones han reportado la factibilidad de reactor anaerobio de manto de lodo de flujo ascendente (UASB), desarrollado

en los años setenta, para tratar aguas residuales industriales. Entre sus ventajas se destacan la capacidad de retener biomasa, formar lodo granular con altas propiedades de sedimentación, manejar altas cargas orgánicas a TRH cortos (Lepisto y Rintala 1999), remover altas concentraciones de materia orgánica biodegradable (80–90%) y producir biogás (Lettinga 2005). El objetivo de esta investigación es evaluar la degradación anaerobia de las aguas de producción provenientes de la extracción de petróleo liviano de la región zuliana (Venezuela), en dos reactores de manto de lodo de flujo ascendente (UASB) bajo condiciones mesofílicas ( $37 \pm 1^\circ\text{C}$ ) y termofílicas ( $55 \pm 1^\circ\text{C}$ ) respectivamente, trabajando a TRH de 24, 18, 12 y 6 horas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### EQUIPO EXPERIMENTAL

Se utilizaron dos reactores UASB construidos en plexiglás con volúmenes de 1,7 y 2,5 L, operando a temperaturas de  $37 \pm 1^\circ\text{C}$  y  $55 \pm 1^\circ\text{C}$ , respectivamente (Figura 1). Los reactores fueron provistos de una chaqueta, manteniendo la temperatura por recirculación de agua caliente. Ambos reactores fueron inoculados con lodo anaerobio granular mesofílico (20% del volumen útil) procedente de una industria cervecera de la localidad. Inicialmente los reactores se cargaron, por dos días, con D+glucosa a una concentración equivalente en DQO de 1500 mg/L y solución de nutrientes (Chacín 1993), por un tiempo de retención de 24 h. Posteriormente, se agregó agua procedente de la extracción de petróleo liviano (APPL).

### AGUA RESIDUAL

El agua de producción se obtuvo del Patio de Tanques de Ulé, ubicada en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. Las aguas provienen de la segregación Tía Juana Liviano (TJL) y se obtuvieron de la separación del agua asociada a la extracción de crudo liviano ( $>31,8^\circ\text{API}$ ), clasificación según el Instituto Americano del Petróleo (Neuman *et. al.* 1981). Las muestras se colectaron por un muestreo simple cada 15 días, se almacenaron en re-

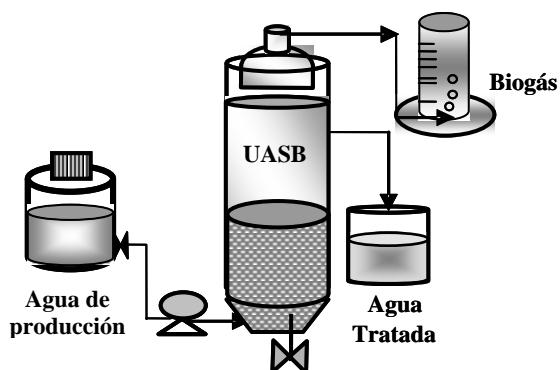


Figura 1. Esquema del reactor UASB utilizado en el laboratorio durante el tratamiento anaerobio de las aguas de producción provenientes de la extracción de crudo liviano.

cipientes plásticos de 20 L, se trasladaron al laboratorio y se refrigeraron a 4 °C para su conservación.

#### CONTROL Y ANÁLISIS DEL SISTEMA

Para evaluar la biodegradabilidad de las aguas de producción se inició el estudio con una concentración 1.400 mg DQO/L. Posteriormente para alcanzar la condición termofílica ( $55^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ), en el reactor termofílico, se procedió a aumentar la temperatura desde la condición mesofílica ( $37^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ) a razón de 1°C/día. Los reactores se evaluaron para las cargas orgánicas de 1.400, 1.867, 2.800 y 5.600 kg/m<sup>3</sup>/d a tiempos de retención de hidráulica (TRH) de 24, 18, 12 y 6 h, respectivamente. Para el control del sistema se determinó la DQO, alcalinidad, pH, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) (APHA *et al.* 1998); contenido de metano y ácidos grasos volátiles (AGV) (Cromatografía gaseosa).

Las enzimas intracelulares fosfatasa alcalina y fosfatasa ácida se determinaron mediante el uso de kit comerciales (Human M Colorímetrics Kits). Las alícuotas de lodo se sometieron a sonicación durante 20 minutos a una potencia de 50/60 Hz, se centrifugaron a 3.000 rpm durante 30 min. Posteriormente, el sobrenadante obtenido se utilizó para la determinación colorimétrica de la actividad de las enzimas extracelulares fosfatasa alcalina y ácida (Chávez *et al.* 2005, Goel *et al.* 1998).

La evaluación de las muestras se realizó por triplicado calculando para cada caso el promedio y la desviación estándar. El tratamiento estadístico fue realizado utilizando el programa de computación SPSS 10.0 para Windows. Mediante correlación de variables se determinó la influencia de la variación del TRH sobre la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos evaluados.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Las muestras recolectadas durante el curso de la investigación se analizaron y se obtuvo la caracterización del agua residual de las aguas de producción provenientes de la extracción de crudo liviano (Tabla 1). Se observa que el efluente cumple con los requerimientos nutricionales necesarios para llevar a cabo la actividad biológica, por lo que no fue necesario agregar nutrientes al agua residual.

Tabla 1. Características del agua de producción provenientes de la extracción de crudo liviano.

Parámetro	Valor Promedio	Norma Venezolana para descarga a cuerpos de agua (Decreto 883, 1995)
pH	8,3	6–9
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	2.670	
DQO (mg/L)	1.400	350
Nitrógeno total (mg/L)	20	40
Fósforo (mg/L)	2,2	10
Hidrocarburos (mg/L)	36	20
Aceites y grasas (mg/L)	66	
SST (mg/L)	104	80
SSV (mg/L)	54	
Fenoles (mg/L)	31	0,5
Cloruros (mg/L)	1.502	
Sulfatos (mg/L)	23	

DQO: Demanda Química de Oxígeno; SST: Sólidos Suspensidos Totales; SSV: Sólidos Suspensidos Volátiles.

Se determinaron los requerimientos nutricionales de nitrógeno (13,4 mg/L) y fósforo (1,9 mg/L) para estas aguas, con el fin de garantizar el crecimiento de microorganismos, considerando una producción estimada de biomasa de 0,1 kgSSV/kgDQO removida con una eficiencia de remoción del 80% (Malina y Pohland 1992). Como se observa (Tabla 1), las aguas pueden proporcionar los requerimientos nutricionales ya que contienen mayor cantidad que la requerida (20 mg/L y 2,2 mg/L de N y P, respectivamente). Adicionalmente, los valores del pH y la alcalinidad indican que las mismas pueden ser tratadas anaeróbicamente sin la necesidad de suministrar alcalinidad química adicional (Tabla 1). Sin embargo, al comparar los valores obtenidos para las aguas de producción con los establecidos en Gaceta Oficial (1995), las concentraciones de DQO, hidrocarburos y fenoles, no cumplen el límite de descarga, por lo que se hace necesario tratar este efluente antes de su disposición.

Los resultados de los parámetros evaluados se muestran en la Tabla 2. El estudio se inició evaluando el TRH de 24 h, disminuyendo progresivamente, después de estabilizados los reactores, en intervalos de 6 h. Se evaluaron los TRH de 24, 18, 12 y 6 h, para las dos condiciones de temperatura. Durante la evaluación de los diferentes TRH los valores de pH (7,9–8,5) y alcalinidad (1.960–2.633 mg CaCO<sub>3</sub>/L) se mantuvieron dentro del rango considerado óptimo para el desarrollo de los microorganismos (Hernández 1995).

Se obtuvo un alto porcentaje de remoción de DQO para los TRH de 24, 18 y 12 h, los valores promedio variaron entre 70 y 84% para las dos condiciones de temperatura evaluadas (Figura 2). Cuando se disminuyó el TRH de 12 a 6 h se observó una disminución en el porcentaje de remoción de DQO para un valor promedio de 40 y 67% a condiciones mesofílicas y termofílicas, respectivamente. Los porcentajes de remoción DQO indican que en condiciones termofílicas se removió mayor cantidad de materia orgánica medida como DQO. Esto podría deberse a que para altas cargas orgánicas o TRH cortos la degradación de materia orgánica es favorecida a temperaturas elevadas (termofílicas), debido al mayor crecimiento de los microorganismos, comparada con las temperaturas bajas (Angelidaki y Ahring 1994).

Tabla 2. Resultados de los parámetros evaluados durante el tratamiento anaerobio, mesofílico y termofílico, de las aguas de producción provenientes de la extracción de crudo liviano.

Parámetro	TRH (horas)			
	24	18	12	6
<b>Mesofílico (<math>37 \pm 1^\circ\text{C}</math>)</b>				
pH	8,5	8,2	8,2	7,4
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	2.633	2.400	2.420	1.960
Metano (%)	79	79	72	53
DQO (%)	75	80	70	40
AGV (mg acético/L)	116	115	113	103
Fosfatasa Alcalina (U/L)	1.639	1.640	1.640	1.616
Fosfatasa Ácida (U/L)	0,670	0,694	0,662	0,621
SSV (%)	42	44	65	73
<b>Termofílico (<math>55 \pm 1^\circ\text{C}</math>)</b>				
pH	7,9	8,0	8,0	7,9
Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	2.203	2.380	2.454	2.190
Metano (%)	67	80	73	54
DQO (%)	73	84	72	67
AGV (mg acético/L)	119	129	118	105
Fosfatasa Alcalina (U/L)	1.651	1.663	1.656	1.620
Fosfatasa Ácida (U/L)	0,694	0,816	0,713	0,670
SSV (%)	52	54	56	67

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico; DQO: Demanda Química de Oxígeno; AGV: Ácidos Grasos Volátiles; SSV: Sólidos Suspensos Volátiles.

A pesar de la disminución en el porcentaje de remoción de DQO para este TRH, los sistemas mostraron estabilidad evidenciándose en la producción de metano (53-80%) y concentraciones bajas de AGV (103-129 mg acético/L), que se observaron durante todo el proceso de evaluación, mostrando que la disminución en el TRH (aumento de carga orgánica) no afectó la producción de metano (Figura 3). Sin embargo, se observó una disminución en el porcentaje de metano para el TRH de 6 h.

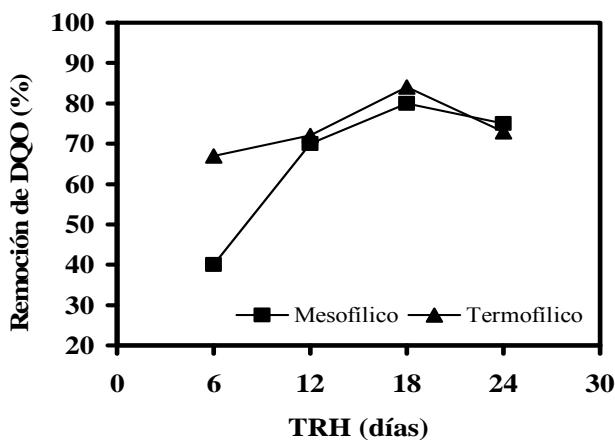


Figura 2. Variación del porcentaje de remoción de DQO durante el tratamiento anaerobio, mesofílico y termofílico, de las aguas de producción provenientes de la extracción de crudo liviano.

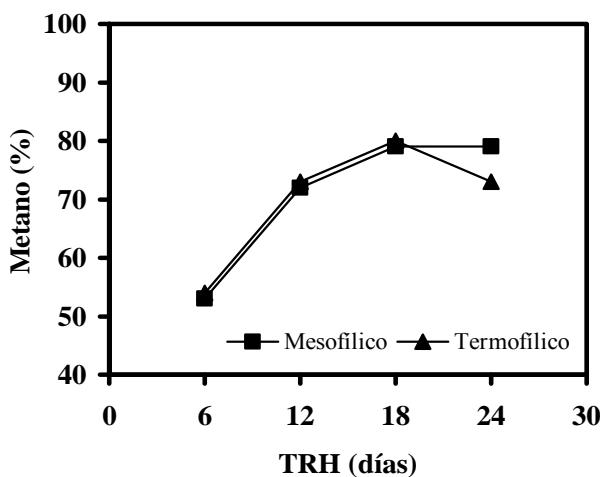


Figura 3. Variación del porcentaje de metano durante el tratamiento anaerobio, mesofílico y termofílico, de las aguas de producción provenientes de la extracción de crudo liviano.

La disminución en los valores de remoción de DQO al variar el TRH ha sido reportado por otros investigadores. Caldera *et al.* (2003) evaluaron el efecto del TRH en el funcionamiento de un reactor UASB

durante el tratamiento de un efluente cárneo, a condiciones mesofílicas. La concentración del efluente fue de 8.500 mg/L a TRH de 36, 24 y 12 h. Obtuvieron una disminución del 8% en el porcentaje de remoción de DQO al variar el TRH de 24 a 12 h.

Para las condiciones evaluadas el TRH óptimo para la degradación de las AP provenientes de la extracción de crudo liviano, fue de 18 h. Para este TRH se obtuvieron porcentajes de remoción de DQO y metano de 80 y 79% para condiciones mesofílicas y de 84 y 80% para condiciones termofílicas respectivamente. Estos resultados son comparables con los reportados por Rincón *et al.* (2002), quienes evaluaron el TRH óptimo para el sistema de tratamiento anaerobio UASB, utilizando aguas de producción de petróleo liviano, a condiciones mesofílicas ( $37 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ) y TRH de 36, 24, 17, 11, 8 y 6 h indican que el TRH óptimo fue de 15 h, donde obtuvieron porcentajes de remoción de DQO y metano superiores al 80%. Los autores encontraron que a TRH menores a 10 h hubo inhibición de las metanobacterias, evidenciado por las altas concentraciones de AGV y los bajos porcentajes de remoción de DQO.

Los mayores porcentajes de remoción de DQO se obtuvieron para las condiciones termofílicas, esta conversión puede estar asociada a que las altas temperaturas aceleran los sistemas enzimáticos biológicos, siendo esta una de las principales razones de aplicar condiciones termofílicas en reactores durante el tratamiento de efluentes con alta carga orgánica (Van Lier *et al.* 2001). Sin embargo, no hubo diferencia significativa ( $P > 0,05$ ) entre los valores obtenidos para condiciones mesofílicas y termofílicas, para los TRH de 24 a 12 h. Resultados similares obtuvo Kim *et al.* (2002), quienes compararon la estabilidad y eficiencia de la digestión anaerobia a condiciones mesofílicas ( $35^{\circ}\text{C}$ ) y termofílicas ( $55^{\circ}\text{C}$ ) en cuatro configuraciones de reactores diferentes y tres etapas: arranque, estado estacionario e incremento de cargas orgánicas, para aguas sintéticas. Estos investigadores reportaron que la diferencia entre los parámetros evaluados a las diferentes temperaturas estuvo relacionada con la configuración de los reactores y no con las condiciones de temperatura.

La actividad de las enzimas extracelulares fosfatasa alcalina y ácida (Figuras 4 y 5, respectivamente), mostraron una correlación directamente proporcional (nivel de significancia 0,05) con respecto al porcentaje de remoción de DQO, indicando que los valores de la actividad de estas enzimas ofrecen un método confiable y rápido para detectar la estabilidad de un proceso de digestión anaerobia (Zhenglan y Lan 1990). Resultados similares los reportaron Chávez *et al.* (2005), quienes determinaron la actividad enzimática de un lodo granular anaerobio durante la degradación de agua residual de una industria láctica, bajo condiciones mesofílicas ( $37 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ) y TRH de 24 en un reactor UASB. La digestión en el reactor reveló que la actividad de la enzima fosfatasa alcalina alcanzó valores de 100 UL y la fosfatasa ácida se mantuvo alrededor de 4,4 UL para valores de pH promedio de 7,8 y porcentajes de remoción de DQO de 76%. Ellos concluyeron que la medición de la actividad enzimática resultó un parámetro eficaz y directo del monitoreo de la eficiencia de la digestión anaerobia y de la estabilidad del reactor UASB.

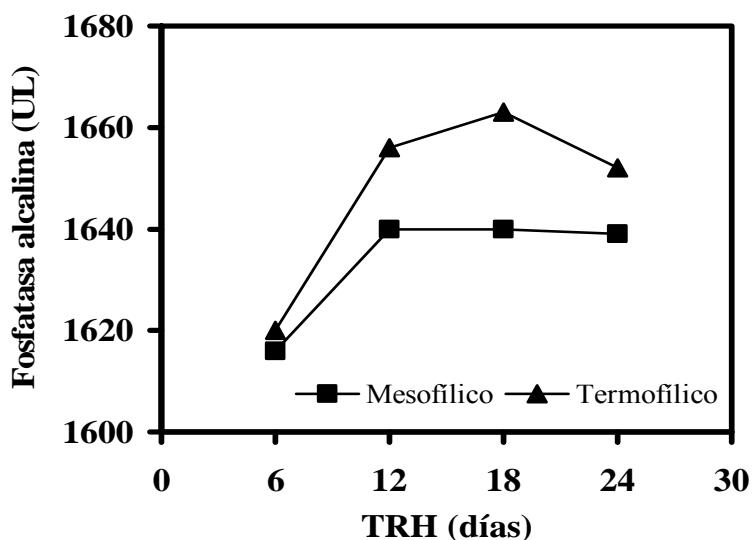


Figura 4. Variación de la actividad de la fosfatasa alcalina durante el tratamiento anaerobio, mesofílico y termofílico, de las aguas de producción provenientes de la extracción de crudo liviano.

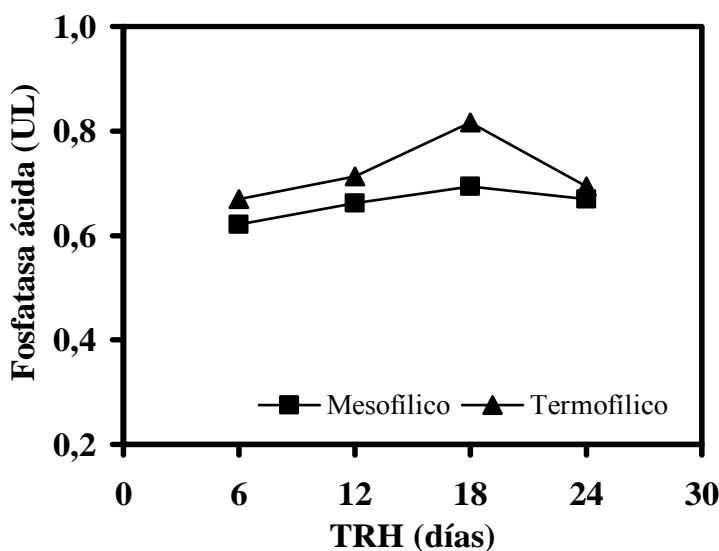


Figura 5. Variación de la actividad de la fosfatasa ácida durante el tratamiento anaerobio, mesofílico y termofílico, de las aguas de producción provenientes de la extracción de crudo liviano.

Durante la evaluación del TRH óptimo (18 h) se obtuvieron los mayores valores de remoción de DQO, actividad enzimática y porcentaje de metano para las dos temperaturas evaluadas (Tabla 2). Estos valores indicaron que al aumentar la capacidad enzimática se incrementó la degradación de materia orgánica por parte de los microorganismos, aprovechando al máximo el sustrato.

## CONCLUSIONES

Los resultados demostraron que las aguas de producción de petróleo liviano son degradadas aplicando la digestión anaerobia bajo condiciones mesofílicas o termofílicas, obteniéndose porcentajes de remoción de DQO promedio que variaron entre 70 y 84%; valores de porcentaje de metano en el rango de 67 a 80% y concentraciones de AGV entre 113 y 129 mg acético/L, para TRH de 24 a 12 h. El TRH óptimo para degradar las AP provenientes de la extracción de crudo liviano, para las condiciones evaluadas, fue de 18 h.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con fondos otorgados por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CONDES) de la Universidad del Zulia a los proyectos CC-0693-04 y CC-400-06.

## LITERATURA CITADA

- ANGELIDAKI, I. Y B. AHRING. 1994. Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: effect of temperature. *Water Research* 28: 727–731.
- APHA, AWWA, WEF. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater (20<sup>th</sup> ed.). American Public. Health Assoc., Washington, D. C., 1207 pp.
- BRACHO, M., L. DÍAZ Y L. SOTO. 2004. Biodegradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos y heterocíclicos por *Pseudomonas* spp. *Ciencia* 12: 269–275. Universidad del Zulia, Maracaibo.
- CALDERA, Y., P. MADUEÑO, A. GRIBORIO, E. GUTIÉRREZ Y N. FERNÁNDEZ. 2003. Efecto del tiempo de retención hidráulica en el funcionamiento de un reactor UASB tratando efluentes cárnicos. *Multiciencias* 3: 33–40.
- CHACÍN, E. 1993. Treatment characteristic of two phase anaerobic system using a UASB reactor. Ph.D. Thesis, Univ. of Birmingham, England, 151 pp.
- CHÁVEZ, M., R. TAJADA, D. MEJÍAS, E. CHACÍN Y N. FERNÁNDEZ. 2005. Actividad enzimática del lodo granular en reactor UASB tratando efluente lácteo. *Bol. Centro Invest. Biol.* 39: 293–299. Univ. Del Zulia, Maracaibo.
- GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE VENEZUELA No. 5021. 1995. Extraordinario. Lunes 18 de diciembre de 1995. Sección 3. De las descargas a cuerpos de agua. Artículo 10, 7 pp.

- GOEL, R., T. MINO, H. SATOH Y T. MATSUO. 1998. Enzyme activities under anaerobic and aerobic conditions in activated sludge sequencing batch reactor. *Water Research* 32: 2081–2088.
- GULYAS, H. Y M. REICH. 1995. Organic compounds at different stages of a refinery wastewater treatment plant. *Water Sch. Tech.* 32: 119–126.
- GUTIÉRREZ, E., N. FERNÁNDEZ, L. HERRERA, Y. SEPULVEDA Y Z. MÁRMOL. 2002. Efecto de la aplicación de ozono sobre la biodegradabilidad de aguas de formación. *Multiciencias* 2: 50–54.
- HERNÁNDEZ, A. 1995. Depuración de aguas residuales (2 ed.). Colección Senior No. 9, Capítulo 10, Madrid, pp. 765–792.
- KIM, M., Y. AHN Y R. SPEECE. 2002. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic. *Water Research* 36: 4369–4385.
- LEPISTO, R. Y J. RINTALA. 1999. Extreme thermophilic (70°C), VAF-FED UASB reactor; performance, temperature response, load potential and comparation with 35 and 55°C UASB reactor. *Water Research* 33: 3162–3170.
- LETTINGA, G. 2001. Digestion and degradation, air for life. *Water Science Tech.* 44: 157–176.
- LETTINGA, G. 2005. A good life environment for all through conceptual, technological and social innovations. *Memorias del VIII Taller y Simposio Latinoamericano sobre Digestión Anaerobia*. Punta del Este, Uruguay. Pp. 1–15.
- LETTINGA, G., A. VAN VELSE, S. HOBMA, W. DE ZEEUW Y A. Klapwijk. 1980. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment. *Biotechnology and Bioengineering* 22: 699–734.
- MALINA, J. Y F. POHLAND. 1992. Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes, Vol. 7. Technomic Publication, New York, 214 pp.

- NEUMAN, H., D. SEVERIN Y B. PACZYNNSKA-LAHME. 1981. Composition and properties of petroleum. *Geology of Petroleum*, Vol. 5. John Wiley and Sons, New York, 135 pp.
- PAGILLA, K., H. KIM Y T. CHEUNBARN. 2000. Aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of swine waste. *Water Research* 34: 2747–2753.
- RINCÓN, N., E. CHACÍN, J. MARÍN, L. MOSCOSO, L. FERNÁNDEZ, M. TORRIJOS, R. MOLETTA Y N. FERNÁNDEZ. 2002. Tiempo de retención hidráulico óptimo para el tratamiento anaerobio de aguas de producción de petróleo liviano. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia* 25: 90–99.
- RINCÓN, N., E. CHACÍN, J. MARÍN, R. MOLETTA Y N. FERNÁNDEZ. 2003. Anaerobic biodegradability of water separated from extracted crude oil. *Environmental Technology* 24: 963–970.
- VAN LIER, J., F. VAN DER ZEE, N. TAN, S. REBAC Y R. KLEEREBEZEM. 2001. Advances in high-rate anaerobic treatment: staging of reactor systems. *Water Science Tech.* 44: 15–25.
- ZHENGLAN, J. Y Y. LAN. 1990. Study of the enzymatic activity in the anaerobic sludge digestion. *Water Research* 24: 917–920.