

# Análisis de la factibilidad del empleo de un consorcio microbiano en el tratamiento de vertidos

JORGE DEL REAL OLVERA,<sup>1</sup> FRANCISCO PRIETO GARCÍA,<sup>2</sup> \* EVA MARÍA SANTOS LÓPEZ,<sup>1</sup>  
ALMA DELIA ROMÁN GUTIÉRREZ<sup>1</sup> Y ALBERTO JOSÉ GORDILLO MARTÍNEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química y Ambiental,  
UNIVERSIDAD VERACRUZANA.

\*Para correspondencia.

<sup>2</sup>Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería,  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO,  
Ciudad Universitaria, km 4.5 carretera Pachuca-Tulancingo, Mineral de la Reforma Hgo.,  
México, CP 42184, Tel. (771) 7172000, ext. 6501, e-mail: prietogmx@yahoo.com.mx

## PALABRAS CLAVE

- ◆ Aguas residuales
- ◆ Digestión anaerobia
- ◆ Vinazas
- ◆ Bacterias metanogénicas
- ◆ Biogás

## Resumen

El proceso digestivo anaerobio es un proceso biológico natural en el que una comunidad entrelazada de bacterias cooperan para lograr una fermentación estable y autorregulada, transformando la materia orgánica residual en biogás. En el proceso coexisten cuatro grupos principales de bacterias, siendo las más relevantes las metanogénicas, las cuales tienen como un medio habitual el estómago de los herbívoros. En este estudio se empleó un consorcio microbiano proveniente del fluido ruminal vacuno para investigar la factibilidad de su empleo en la depuración de vinazas provenientes de una destilería, mediante la degradación de la materia orgánica expresada como DQO y la generación de biogás. Los resultados muestran una alta capacidad de degradación del sustrato, disminuyendo en más de la mitad el contenido orgánico inicial (56.7%). Por otro lado, el volumen de biogás generado por el sistema sugiere que las primeras horas de reacción son cruciales para el proceso digestivo. Finalmente, la relación entre el biogás y la DQO indica que por cada gramo de DQO disminuido se generan 971.2 ml de biogás, lo cual representa una muy aceptable degradación del vertido contaminante.

## Abstract

The anaerobic digestive process is a natural biological process in which an interlaced community of bacteria cooperates to obtain stable and auto-regulated fermentation, transforming the residual organic matter into biogas. In the process four main groups of bacteria coexist, being the most important methanogenics, which have like habitual means the stomach of the ruminant. In this study was used an originating microbial partnership of rumen of cow to investigate the feasibility of its use in the depuration of vinasses originating of a distillery, by means of the degradation of organic matter expressed like COD and with the generation of biogas. The results demonstrate a high capacity of degradation of the substrate, diminishing in more than half the initial organic content (56.7%). On the other hand, the volume of biogas generated by the system suggests them first hours of reaction are crucial in digestive process. Finally, the relation between biogas and COD indicate that by each gram of diminished COD 971.2 ml of biogas are generated, which represents a very acceptable degradation of the pollution.

## Introducción

La depuración de las aguas residuales industriales es sin duda alguna, el segmento de la tecnología del agua que ofrece mayor dificultad y riesgo cuando se intenta definir el sistema de reacción para su tratamiento y asegurar los objetivos de calidad programados.

Esta dificultad se inicia cuando se intentan establecer las características originales del vertido residual, ya que muchas veces éstas cambian con el tiempo y con las propiedades de la materia prima en proceso. Por esto, se recurre a análisis representativos y mediciones suficientemente válidas como para fijar una base de partida sólida que permita dar fiabilidad a los cálculos de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) (Petruccioli *et al.*, 2004).

Habitualmente la depuración de las aguas residuales representa una carga económica para la industria, sin que aparentemente genere beneficio alguno. Ello provoca una fuerte (e incluso excesiva) presión por tratar de minimizar la inversión necesaria para la construcción de un sistema de recuperación. Sin embargo, con la aparición de las normas ISO la gestión del medio ambiente ha pasado a ser actualmente un activo en la gestión empresarial y de imagen corporativa.

La depuración de las aguas residuales en la industria alimenticia se puede llevar a cabo mediante el empleo de varios sistemas biológicos tanto de manera aerobia como anaerobia (Gavrilescu y Macoveanu, 2000). Los residuos generados por la destilación en la industria alcohólica caen dentro de esta categoría (Gavala *et al.*, 2003), dichos residuos llamados "vinazas", frecuentemente presentan alta carga orgánica (expresada como DQO y con un rango de 20-200 g/l), altas temperaturas de vertido y bajo pH (Romero *et al.*, 1990).

La digestión biológica anaerobia es el método especialmente preferido para su tratamiento ya que ofrece varias ventajas adicionales a los métodos convencionales aerobios, por ejemplo: bajos consumos de energía y nutrientes, pequeñas cantidades de biomasa, además de la capacidad de ésta para transformar parte de la polución en metano, el cual puede ser empleado como recurso energético en el mismo proceso de destilación (Pérez *et al.*, 1997; Rodríguez *et al.*, 2001; Beltrán *et al.*, 1999).

Por otro lado, debido a su operación estacional muchas de estas industrias carecen de consorcios microbianos propios que sean capaces de realizar la digestión anaerobia de manera inmediata, por lo que frecuentemente se requieren de largos periodos de tiempo de incubación y adaptación para el arranque de la EDAR (Mace y Mata-Álvarez, 2002; Chang *et al.*, 2004).

Para evitar los problemas operacionales de las estaciones depuradoras, se ha propuesto el empleo de varias clases de microorganismos no nativos, para llevar a cabo la digestión de este tipo de residuos. Así, existen reportados en la literatura diversos tipos de consorcios microbianos analizados con diferente éxito en el proceso; éstos van desde los lodos activados de estaciones municipales (Aivasidis y Diamantis, 2005) y de la industria papelera (Skiadas *et al.*, 2003) hasta los provenientes de la industria textil (Molga *et al.*, 2006) entre algunos otros.

En este mismo contexto, se tiene que los consorcios microbianos provenientes de varios animales domésticos como la vaca, el cerdo, la cabra e incluso el pollo, han sido empleados en los países en desarrollo para tratar de resolver los problemas energéticos (Khalil y Ezeldin, 2001) ya que al fermentar de manera anaerobia estos

generan biogás, compuesto principalmente por metano. No obstante lo anterior, la literatura no reporta el empleo de dichos consorcios microbianos en el tratamiento de aguas residuales aun a pesar de reconocer que en muchos de los casos anteriores la digestión se lleva a cabo completa y eficientemente.

Por todo lo anterior, en este estudio se analiza el desempeño de un reactor biológico por lotes en el rango mesofílico de temperatura, el cual emplea un consorcio microbiano metanogénico proveniente del fluido ruminal vacuno para la degradación de las vinazas producidas por la industria alcohólica del ron.

### Materiales y métodos

El desarrollo experimental fue diseñado específicamente para examinar la viabilidad de emplear dicho consorcio microbiano en la depuración de aguas residuales de la industria alcohólica, así como los efectos cinéticos que este efluente genera sobre la colonia microbiana. A continuación, se describen brevemente los materiales y métodos empleados en el proyecto.

### Vertido contaminante

Las vinazas de ron, utilizadas en este estudio fueron recolectadas en una destiladora ubicada en el municipio de Actopan en el estado de Veracruz, la cual utiliza jugo natural de caña como materia prima para producir alcohol. El vertido contaminante se caracterizó como lo proponen la literatura (Beltrán *et al.*, 1999); determinándose pH, temperatura, demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO<sub>5</sub>), sólidos totales y volátiles, entre otros. El intervalo presentado por la caracterización de siete muestras de vinazas y los valores de la muestra digerida en este estudio se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Características de las vinazas, entre paréntesis las desviaciones estándar.

Parámetro	Intervalo	Digerida
pH	4.00 – 5.5	4.00 (0.02)
Temperatura (°C)	82.5 – 86.5	86.30 (0.10)
DQO (g/l)	12.2 – 63.5	59.20 (0.12)
DBO <sub>5</sub> (g/l) 1	21 – 12.8	8.43 (0.04)
Sólidos Totales (g/l)	15.54 – 42.3	25.87 (0.09)
Sólidos Volátiles (g/l)	1.234 – 3.82	2.33 (0.02)
Fósforo Total (mg/l)	16.6 – 65.7	52.35 (0.11)
Nitrógeno (mg/l)	21.3 – 64.0	35.00 (0.09)
Fenoles	2.80 – 20.0	9.87 (0.05)
Materia Orgánica (%)	94.9 – 95.9	---

### Inóculo

El cultivo primario de bacterias empleadas en este estudio se obtuvo del fluido ruminal proveniente del estómago vacuno. Ya que éste tiene un hábitat primordialmente anaerobio, donde las bacterias metanogénicas son el paso controlante en la cinética de crecimiento microbiano del consorcio, en este estudio se dejó fermentar al fluido sólo y de manera natural durante un lapso de 63 días para identificar las diversas etapas anaerobias. Uno de los reportes más completos de las especies bacteriales metanogénicas fue proporcionado por McHugh y colaboradores en el 2004, muchas de las cuales se lograron identificar en los análisis microbiológicos realizados a la colonia aquí empleada (Figura 1).

### Reactor anaerobio

La oxidación anaerobia se llevó a cabo en un digestor de vidrio de 4 litros con agitación, el cual fue operado por lotes a una temperatura de 35 ± 2 °C y 150 rpm tal y como se muestra en la figura 2. Para iniciar la digestión con células libres,

se colocaron 2.5 litros de vinaza neutralizada y diluida al 30% en vol. junto con 0.5 litros de inóculo metanogénico para iniciar la adaptación. Posteriormente se incrementó paulatinamente la concentración de vinaza hasta llegar a las características de operación de la destiladora en el mismo lapso de tiempo que le tomó al inóculo llegar a las condiciones metanogénicas. Los parámetros analizados en el sistema de reacción fueron: a) La cantidad de biogás generado por el medio, el cual

fue medido en un gasómetro por desplazamiento de líquido, b) La demanda química de oxígeno (DQO) mediante la digestión de la muestra de acuerdo con la norma NMX-AA-030-SCFI-2001 y c) el pH del efluente como lo establece la norma NMX-AA-008-SCFI-2000 para asegurar que se trabaja en condiciones metanogénicas.

### Resultados y discusión

En la literatura (Gavala *et al.*, 2003) se resumen

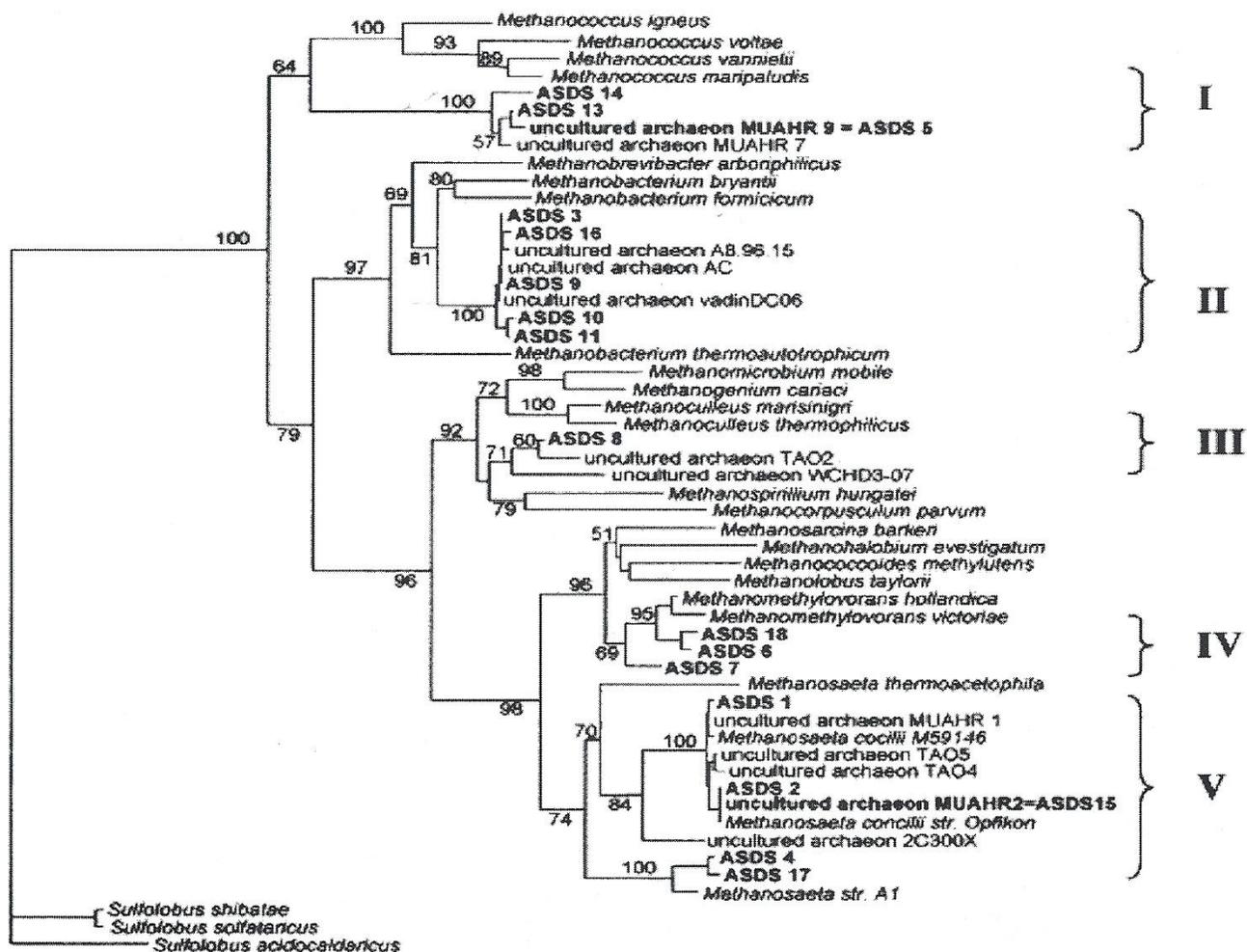


Figura 1. Resultado del análisis filogenético del fluido ruminal vacuno.

varios de los mecanismos cinéticos, a través de los cuales se puede describir correctamente la oxidación de la materia orgánica empleando un consorcio microbiano. La mayoría de los autores coinciden en que existen por lo menos cuatro etapas bien definidas de reacción de acuerdo con los microorganismos presentes en el sistema, los cuales son: 1) hidrólisis, 2) acidogénesis, 3) acetogénesis y 4) metanogénesis. Dándole a esta última etapa Figura 1. Resultado del análisis filogenético del fluido ruminal vacuno. Figura. 2. Diagrama del equipo experimental (a) Digestor anaerobio (b) Parrilla (c) Fluido ruminal (d) Vertido residual (e) Bomba (f) Gasómetro Análisis de la factibilidad del empleo de un consorcio microbiano en el tratamiento de vertidos la mayor relevancia por ser la más prolongada en el tiempo y donde ocurren los cambios más significativos de transformación.

En el presente proyecto se propuso como primer punto, analizar el comportamiento digestivo natural del fluido ruminal sin sustrato, siguiendo el desarrollo microbiano mediante la cuantificación del volumen de biogás generado para identificar así la fase metanogénica del inóculo.

Los resultados que se pueden observar en la figura 3, sugieren la presencia de las distintas etapas reportadas para el transcurso de toda digestión metanogénica. Aquí el volumen de biogás generado se ve incrementado notablemente en la fase acetogénica (aproximadamente de 5-15 días); sin embargo es en la etapa metanogénica (aproximadamente de 20-40 días) es donde la cantidad de volumen generado llegó a incrementarse hasta en un 48.38% más que la fase anterior. Lo anterior concuerda con lo reportado en la literatura (Gavala, 2003).

Con estos resultados, se propone iniciar la

reacción fermentativa del vertido contaminante después del día 21 ya que de acuerdo con el análisis anterior, se estima que es ahí donde se inicia el crecimiento de los metanogénicos, con los cuales se trabajó en este proyecto.

Una vez localizada la fase de interés del inóculo, se procede a iniciar la digestión de la vinaza.

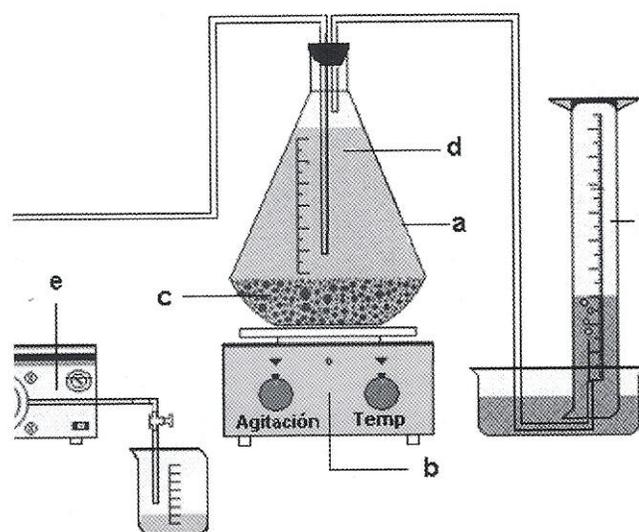


Figura 2. Diagrama del equipo experimental (a) Digestor anaerobio (b) Parrilla (c) Fluido ruminal (d) Vertido residual (e) Bomba (f) Gasómetro Análisis de la factibilidad del empleo de un consorcio microbiano en el tratamiento de vertidos la mayor relevancia por ser la más prolongada en el tiempo y donde ocurren los cambios más significativos de transformación.

Para esto se inócula nuevamente el sistema de reacción y se adaptan a los microbios a las características del vertido, iniciando el proceso con una concentración del 20% de efluente residual, diluido en agua destilada e incrementan su concentración en proporciones semejantes cada 4 días, con lo que se alcanzan las propiedades originales del contaminante en el mismo lapso de tiempo que le toma a la metanogénesis aparecer.

Ya que en este estudio se pretende analizar la factibilidad del fluido ruminal en los procesos de depuración de vertidos, la degradación del efluente se efectúa una vez obtenidas las condiciones adecuadas del inóculo. Posteriormente se

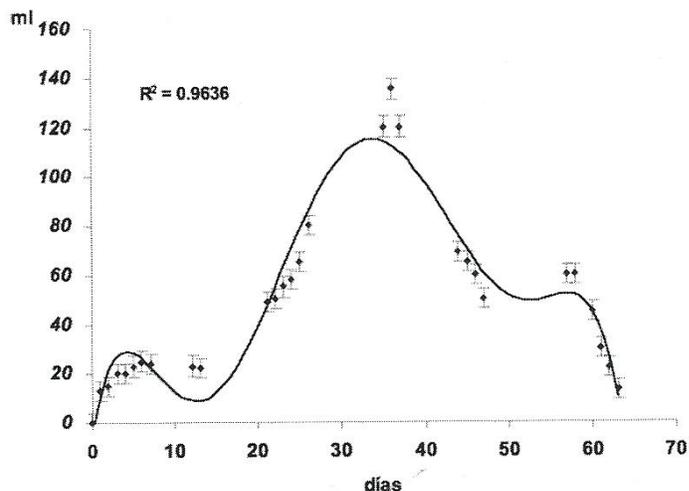


Figura 3. Volumen de biogás producido naturalmente por el fluido ruminal.

realiza la cuantificación de la biodegradación de la materia orgánica mediante la variación de la demanda química de oxígeno (DQO) y el volumen de biogás generado como productos de la digestión. En estas condiciones la variación del pH no resultó ser significativa (aproximadamente entre 6.5-7.5) lo que sugiere una buena estabilidad del

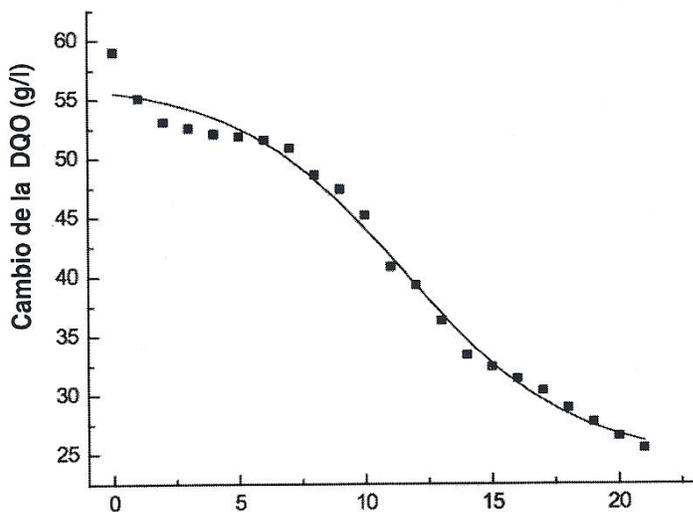


Figura 4. Cambio de la demanda química de oxígeno (DQO) a través del tiempo.

proceso. Los resultados obtenidos figura 3. Volumen de biogás producido naturalmente por el fluido ruminal para el cambio de la DQO se pueden observar en la figura 4.

El cambio total en la demanda química de oxígeno fue del 56.77% en 21 días. Es interesante observar en esta gráfica, que el sistema presentó un periodo entre los días 8-11 donde los cambios en la DQO fueron importantes, destacando que el mayor de ellos se obtuvo en el día 11 (7.45%). Dicha disminución tan pronunciada se obtuvo también en las primeras 24 hrs. de iniciada la digestión (6.6%), lo cual sugiere una buena afinidad del inóculo por el sustrato.

Por otro lado, el comportamiento en la generación de biogás se muestra en la figura 5. Para evitar la presurización del sistema el gas generado fue extraído y medido diariamente. Aquí no debe sorprender el hecho de que la mayor cantidad de gas generado se presentó exactamente los mismos días importantes que en los cambios de la DQO, es decir los días 1 y 11.

Por otro lado, al contrastar la cantidad de DQO disminuida contra el volumen de biogás generado por el sistema, se pudo obtener una relación lineal entre ambos parámetros. El ajuste de los datos a esta función lineal dio como resultado que por cada gramo de DQO disminuido se generen aproximadamente  $971.2 \pm 1.4$  ml de biogás. Mas aun, la biodegradación mostró una cinética química de primer orden con un ajuste de  $R^2 = 0.9656$  y una

primer orden con un ajuste de  $R^2 = 0.9656$  y una

constante de velocidad de reacción  $k=0.3636 \text{ seg}^{-1}$  para ambos casos. Estos resultados respaldan favorablemente bien el hecho de emplear el consorcio microbiano existente en el fluido ruminal para el tratamiento metanogénico de vinazas de ron.

Finalmente, se compararon los datos obtenidos en la experimentación con los reportados en la literatura (Pérez, 1995). Dicho reporte manifiesta que las condiciones de operación fueron orientadas para un sistema de digestión anaerobio termofílico ( $55^\circ \text{C}$ ) en el cual se trataron vinazas de vino, mediante un consorcio microbial previamente adaptado por un tiempo prolongado (12 meses). Como se puede observar en la figura 6, ambos perfiles de remoción tienen aproximadamente las mismas características de desarrollo. Y aun cuando los datos reportados presentan un mejor porcentaje de remoción, el sistema de fermentación requirió de un tiempo superior de adaptación de la ecología microbiana, lo cual confirma que las propiedades del fluido ruminal son adecuadas para ser empleado como una comunidad no nativa, ya que la respuesta biológica es inmediata al sustrato seleccionado.

### Conclusiones

Desde hace tiempo se han venido empleando los consorcios microbianos de diversos animales en la generación de metano, para tratar de resolver los problemas energéticos de los países en vías

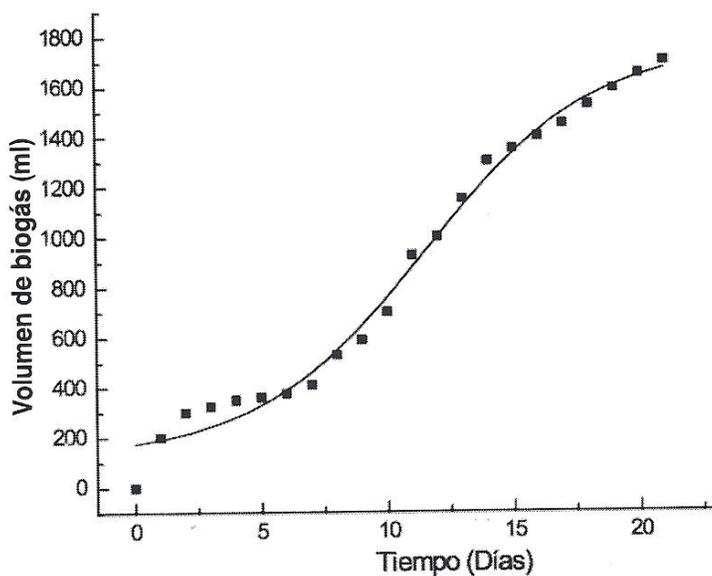


Figura 5. Generación de biogás en el sistema a través del tiempo.

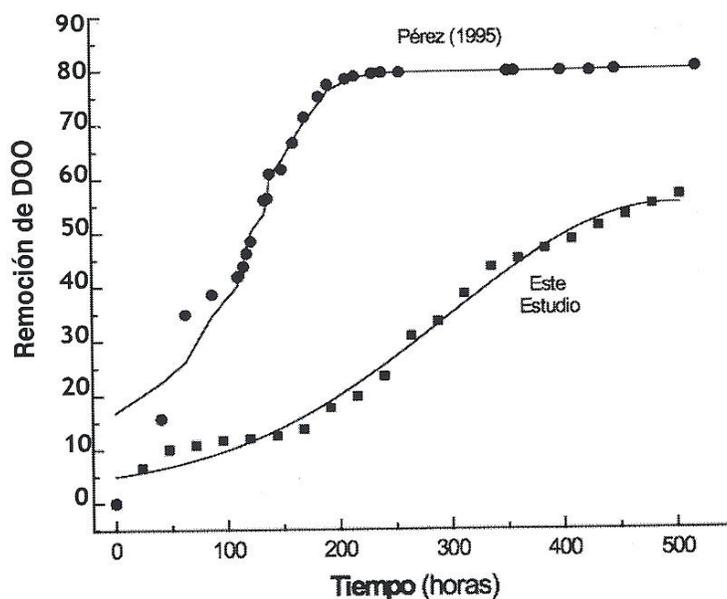


Figura 6. Comparación del porcentaje de remoción de la DQO.

de desarrollo. Sin embargo, muy pocos son los reportes que incluyen este tipo de sistemas microbiales para la depuración de vertidos contaminantes. Los resultados aquí obtenidos, confirman que para llegar a la fase metanogénica, el fluido ruminal vacuno requiere de por lo menos 21 días previos de reacción. Una vez alcanzado dicho estado, los microorganismos son capaces de degradar los contaminantes de las vinazas en más de la mitad de su carga orgánica inicial, llegando a ser de hasta en un  $56.77 \pm 1.4$  % de la DQO en tan sólo 21 días de digestión.

Las primeras 24 horas de digestión influyen considerablemente en el proceso global de reacción, ya que es ahí donde los cambios son más drásticos y se requiere de por lo menos 10 días más de digestión para que se presenten influencias igualmente de significativas.

El volumen de biogás generado en la fermentación, confirma nuevamente la importancia que tienen en el proceso los días 1 y 11. Gracias a que la curva generada por el comportamiento del gas se asemeja a la curva típica del crecimiento microbiano, se puede sugerir que en el día 11 se inicia con la fase exponencial del crecimiento, siendo esta razón por la cual impacta tanto en el proceso.

Finalmente al comparar el porcentaje de DQO disminuido y el volumen de biogás generado se obtiene una relación lineal bastante estable del proceso, teniendo que por cada gramo de DQO disminuido se generan aproximadamente 971.2 ml de gas; todo lo anterior con una cinética de reacción de primer orden. Por otro lado, la comparación de los datos aquí obtenidos con los reportados en la literatura concuerdan favorablemente, presentando una misma tendencia de biodegradación. Por lo anterior, el proceso sustenta convenientemente la manipulación del consorcio con

finés ambientales, más allá de sólo energéticos. Además el tiempo empleado para la adaptación y respuesta del sistema es relativamente corto, lo que proporciona muy buenas perspectivas para ser empleado en las estaciones depuradoras de aguas residuales como consorcios no nativos.

## Bibliografía

- Aivasisidis, A. y Diamantis, V. (2005), *Biochemical reaction engineering and process development in anaerobic wastewater treatment*. Adv. Bioch. Eng. Biotech. 92, 49-76.
- Beltrán, F. J.; García-Araya, J. F. y Álvarez, P. M. (1999), *Wine distillery wastewater degradation 2: Improvement of aerobic biodegradation by means of an integrated chemical (ozono)-biological treatment*, J. Agric. Food. Chem. 47, 3919.
- Chang, H.T., Parulekar S.J., y Ahmed M. (2004), *A dual-growth kinetic model for biological wastewater reactors*. Am. Chem. Soc. 45, 234-240.
- Gavala, H. N; Angelidaki, I. y Birgitte K. (2003), *Kinetics and modeling of anaerobic digestion process*. Adv. Bioch. Eng. and Biotech., 81, 58-93.
- Gavrilescu M. y Macoveanu M. (2000), *Attached-growth process engineering in wastewater treatment*. Bioproc. Eng. 23, 95-106.
- Khalil, E. M. y Ezeldin, B. E. (2001), *Seasonal variation of biogas from three types of animal dung*. Tesis Ahfad University for Women, Omdurman, Sudan.
- Mace S. y Mata-Álvarez J. (2002). *Utilization of SBR technology for wastewater treatment: An overview*, Ind. Eng. Chem. Res., 41, 5539-5553.
- McHugh S., Carton, M., Collins, G., y O'Flaherty, V., (2004), *Reactor performance and microbial community dynamics during anaerobic biological treatment of wastewaters at 16-37 °C*, FEMS Microbiol. Ecol. 48, 369-378.
- Molga, E.; Cherbanski, R. y Szpyrkowicz, L., (2006), *Modeling of an industrial full-scale plant for biological treatment of textile wastewaters: Application of neural networks*. Ind. Eng. Chem. Res. 45; 1039-1046
- Pérez García M., (1995). *Utilización de biorreactores avanzados en la depuración anaerobia de vertidos de alta carga orgánica*,

Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Cádiz, Pag. 255.

- Pérez M., Romero L. I. y Sales D. (1997). *Thermophilic anaerobic degradation of distillery wastewater in continuous-flow fluidized bed bioreactors*, Biotec. Prog. 13, 33-38.
- Petruccioli E., Eusébio A., Lageiro M., Federico F. y Cardoso J. (2004). *Microbial characterization of activated sludge in jet-loop bioreactors treating winery wastewaters*, J. Ind. Micr. Biotech. 31, 29-34.
- Rodríguez E. M., Beltrán F. J., Álvarez P. A., García J. F. y Rivas J. (2001). *Treatment of high strength distillery wastewater (cherry stillage) by integrated aerobic biological oxidation and ozonation*, Biotech. Prog. 17, 462-467.
- Romero L.I., Martínez de la Ossa E. y Sales D. (1990), *Microbial purification kinetics of wine distillery wastewaters*, J. Chem. Tech. Biotech. 58, 141-149.
- Skiadas I.V. Gavala, H. N. Schmidt, J.E. y Ahring B. K (2003) *Anaerobic Granular Sludge and Biofilm Reactors*. Adv Biochem. Engin. and Biotechnol. 82, 35-67.