

## APLICACIÓN DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA A LOS RESIDUALES DE INDUSTRIAS LÁCTEAS

Jorge GONZÁLEZ, Pedro VALDÉS, Gertrudis NIEVES y Barbarita GUERRERO

Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia. Carretera del Guatao km 3 1/2, La Lisa CP. 19200. C. Habana, Cuba

(Recibido septiembre 1993, aceptado junio 1994)

Palabras clave: digestión anaerobia, manto de lodos, lecho empacado, residuales lácteos

### RESUMEN

En el presente trabajo experimental se empleó la digestión anaerobia como biotecnología para la depuración de los efluentes de industrias lácteas. Los reactores utilizados en estas experiencias, en los que se logra una efectiva retención de la biomasa activa, se aprovecharon por considerarse que son los que brindan un mecanismo adecuado para obtener la reducción de los tiempos de retención hidráulica de los residuales, garantizando menores costos de construcción y la posibilidad de extender el uso de la digestión anaerobia en residuales de bajas concentraciones de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), manteniendo alta eficiencia de remoción de la carga orgánica contaminante aplicada y elevado factor de conversión en biogás. Se demostró que el filtro anaerobio empacado de flujo ascendente y el reactor de manto de lodos son las opciones apropiadas, desde el punto de vista tecnológico, para el tratamiento de depuración de los efluentes residuales lácteos. En ambos sistemas se consiguieron eficiencias de remoción de la contaminación, expresadas como DQO superiores al 95% como promedio, para valores similares de carga aplicada, mientras que la producción de biogás indicó ligera ventaja para el reactor de manto de lodos, con respecto a la concentración de metano en todo el rango de Bv estudiado.

### ABSTRACT

An experimental study using anaerobic digestion as a biotechnology for the treatment of wastes produced within the dairy industry was made. The reactors used in these experiments, in which an effective retention of the active biomass within the system occurs, are here considered as the reactors with the appropriate mechanism to allow the reduction of the hydraulic retention time of the wastes. These advantages will thus guarantee a reduction of construction costs and the possibility of applying the anaerobic digestion on wastes with low Chemical Oxygen Demand (COD) retaining high organic matter removal efficiencies and biogas conversion. The Up-Flow Packed Bed Filter (UPBF) and the Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB) proved to be appropriate options for the treatment of dairy wastes. Both achieved COD removal efficiencies higher than 95% for similar volumetric organic loads applied (Bv), while the production of biogas indicated little advantage in the methane concentration of the biogas generated in the UASB reactor.

---

### INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia ha sido empleada durante muchos años en el tratamiento de efluentes industriales con altas concentraciones de materia orgánica, así como en la estabilización de lodos biológicos, generados en la depuración aerobia de residuales; sobre todo mediante el uso de

reactores convencionales en los que se requieren largos tiempos de retención hidráulica. Esta situación ha estado condicionada fundamentalmente por el desconocimiento del proceso de la metanogénesis y las bajas velocidades de crecimiento ( $\mu$ ) de las bacterias encargadas de la etapa de formación del metano en el proceso global de la digestión (Mc.Carty 1982).

Sin embargo, con el descubrimiento de nuevos aspectos del proceso se definieron tecnologías que consideran la retención de la biomasa activa en los reactores. Esto permite disminuir los tiempos de retención hidráulica de los efluentes a tratar y a la vez ampliar el alcance de aplicación de esta ruta metabólica como biotecnología de depuración para el tratamiento de residuales con menores concentraciones de contaminantes, expresadas como Demanda Química de Oxígeno (DQO). De esta forma se mantiene una buena eficiencia de remoción y valores aceptables de conversión de la materia orgánica removida en biogás, aunque con menores índices de generación por unidad de volumen de reactor (van den Berg 1984).

Al conocer las características fundamentales de los residuales de la industria láctea cubana, así como otros trabajos hechos anteriormente utilizando la digestión anaerobia de estos efluentes (González 1978, 1988), se fijó como objetivo fundamental el estudio del comportamiento de los residuales de esta industria al ser sometidos a un proceso de digestión anaerobia no convencional con retención de biomasa, empleando para ello dos sistemas diferentes: un lecho empacado para la filtración biológica del residual y otro del tipo de manto de lodos, el cual no utiliza empaque para lograr la retención de la biomasa activa.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Reactor de lecho empacado

Se empleó una columna de PVC con un diámetro interno de 100 mm y una altura total de 1 metro conformando un volumen cilíndrico de 7.5 L, con una entrada inferior para recibir la alimentación de residual crudo, una salida lateral colocada 100 mm por debajo del borde superior del reactor, por donde parte el efluente tratado y una salida superior para la recolección y medición del gas generado. La columna se empacó con anillos "raschig" de porcelana de 15 x 15 mm hasta 4/5 de su altura total, condicionando un volumen efectivo de 5 L, medidos por desplazamiento de agua.

### Reactor de manto de lodos

Se utilizó un reactor de cuerpo rectangular, hecho de acrílico y con un volumen total vacío de 16.5 L, dotado de salidas laterales para el muestreo y la extracción del efluente tratado. El reactor cuenta con dos campanas, inmersas tres centímetros por debajo de la superficie del líquido, para la recolección del biogás generado.

Como ambos reactores se encontraban en funcionamiento sólo fue necesario realizar la adaptación pertinente al cambio de residual, lo que se hizo en un período de 2 meses, alimentando un residual lácteo diluido, ajustado a 500 mg de DQO por litro con un caudal suficiente para determinar un tiempo de retención hidráulica de 5 días. Se midieron diariamente el pH del efluente, la acidez volátil y la alcalinidad y cada 7 días la DQO, comprobán-

dose una remoción constante de carga orgánica, para ambos reactores en 7 semanas. A partir de este momento se consideró que ambos reactores se encontraban listos para comenzar las corridas experimentales según el esquema de operación que se describe en la figura 1.

Los experimentos se realizaron empleando un residual lácteo preparado a partir de leche entera en polvo y agua corriente, ajustando el factor DQO de la alimentación ( $S_0$ ) en dos niveles, el primero de 1100 mg/L, cercano a los valores medios encontrados para esta industria (Rivas 1982) y el segundo de 2200 mg/L que duplica al anterior y se considera el pico de concentración que puede esperarse en instalaciones lácteas correctamente operadas. El otro factor que se varió de manera programada fue el tiempo de retención hidráulica ( $\theta$ ) que se trabajó en tres niveles, mediante el ajuste del caudal de alimentación a los reactores; se siguió un esquema en el cual se fue aumentando paulatinamente la carga orgánica aplicada a los reactores con el fin de evitar cambios bruscos capaces de alterar más allá de lo normal las condiciones de estado estacionario deseado para muestrear cada tratamiento y que fueron alcanzadas dejando transcurrir un tiempo igual a 3 veces el de retención hidráulica (González 1989).

Cada experimento se repitió 10 veces y se determinaron los valores de DQO del afluente y del efluente ( $S_0$  y  $S_e$ ), el volumen de biogás producido, su contenido en metano y la concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el efluente tratado. De igual forma se controlaron el pH, la acidez volátil y la alcalinidad, realizando los análisis según métodos estandarizados (APHA-AWWA-WPCF 1985).

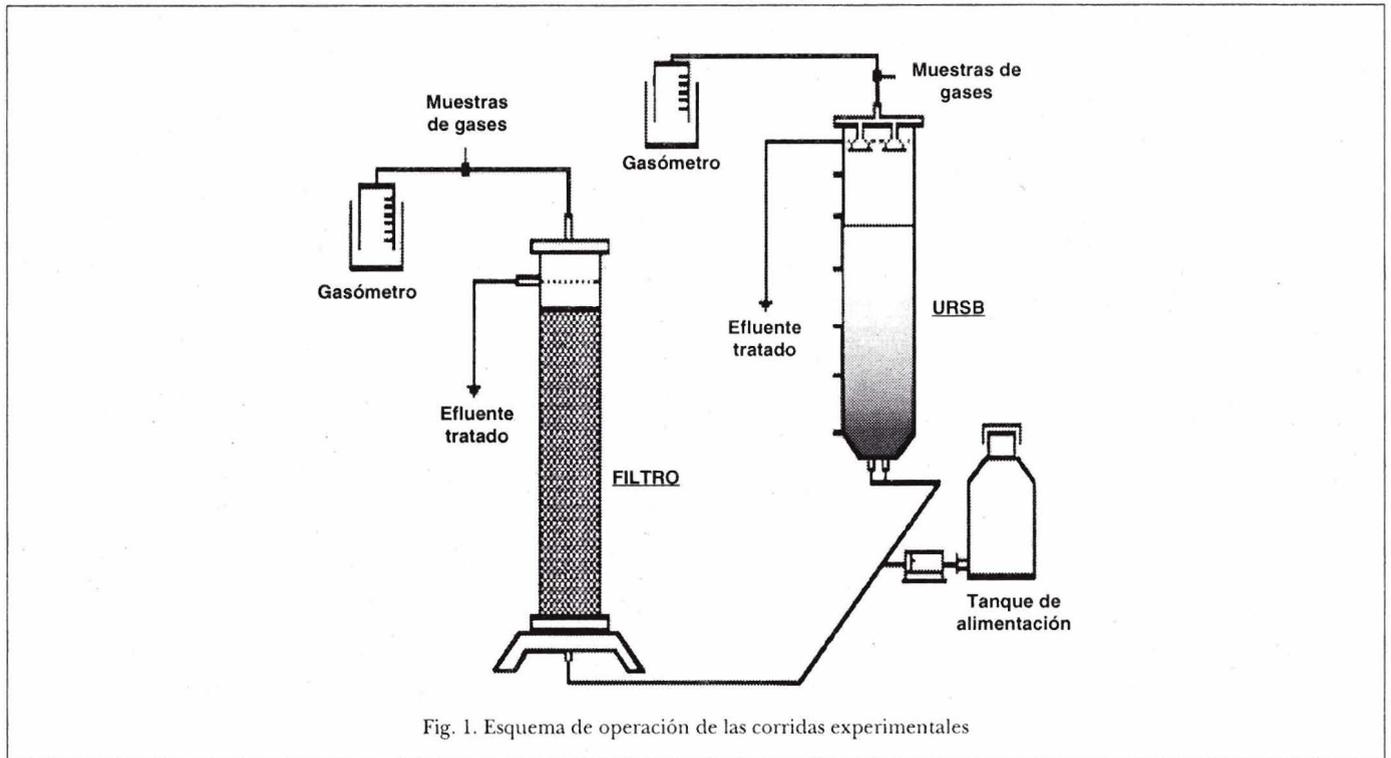
Para las diferentes condiciones experimentales, se calcularon los valores de eficiencia de remoción de la carga contaminante en cada reactor, la cantidad específica de metano producido y la concentración de éste en el biogás; tomándolas como variables de respuesta fundamentales para el experimento. Se consideró, para la determinación del volumen efectivo aquel donde existe actividad biológica, lo que sucede en el reactor empacado para todo el espacio donde hay empaque, mientras que en el reactor de manto de lodos esto sucede hasta la altura a la que se expande la capa de lodos biológicos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variaciones programadas para los valores de la DQO en la alimentación de los reactores ( $S_0$ ) y en el tiempo de retención hidráulica ( $\theta$ ), permitieron experimentar en un rango de carga orgánica volumétrica aplicada ( $B_v$ ) que varió desde 0.42 hasta 2.10 kg DQO/m<sup>3</sup>·d. Los resultados obtenidos se presentan ordenados con respecto a los valores de  $B_v$  aplicados.

En la tabla I resaltan, en primer término, los valores de eficiencia de remoción de la carga orgánica, expresada como DQO y determinada según la expresión:

$$\% E = (S_0 - S_e) * 100 / S_0$$



donde  $S_0$  representa la DQO en el residual alimentado al reactor y  $S_e$  la DQO de salida del reactor.

La eficiencia resultó alta (93.4–96.9) y muy estable en cada reactor en el rango de  $B_v$  ensayado y a la vez no se observaron diferencias significativas entre ellos, desde el punto de vista práctico, lo que indica que ambos son capaces de depurar eficientemente este tipo de efluente residual, estando lejos aún el límite de carga que pueden asimilar.

La concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en la salida de los reactores ( $X_e$ ), con desviaciones estándar

pequeñas, no mostraron una tendencia definida al aumento o la disminución cuando se llevó  $B_v$  con variaciones simultáneas de  $S_0$  y  $\theta$ , lo que parece indicar que no se sobrepasaron los límites de velocidad ascensional para iniciar un arrastre de sólidos en ninguno de los dos reactores.

Los valores de  $X_e$  fueron menores en el reactor de lecho empacado, lo que resulta lógico no sólo por el efecto logrado con la empaquetadura, sino porque además el reactor de manto de lodos mantuvo una velocidad ascendente 12-14 % superior en todas las corridas. Sin embar-

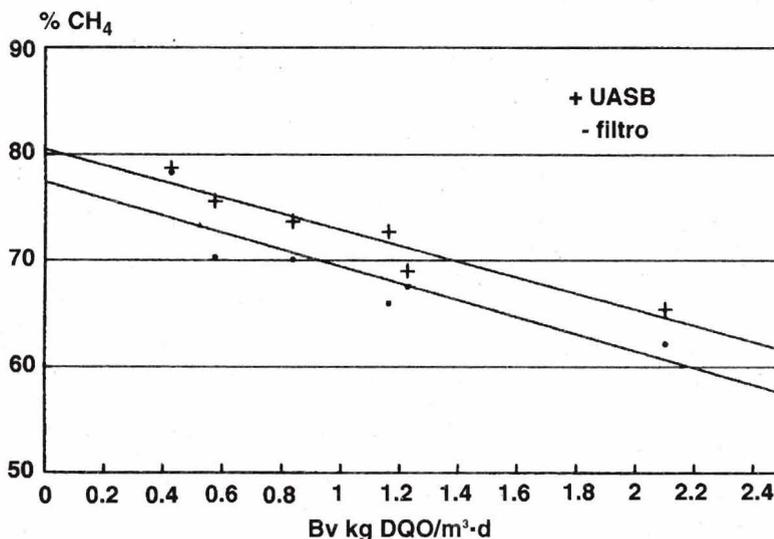


Fig. 2. Variación del contenido de metano en el biogás generado al aumentar la carga orgánica aplicada al reactor

**TABLA I. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DQO, SÓLIDOS EN EL EFLUENTE Y CONVERSIÓN DE LA DQOr PARA DIFERENTES VALORES DE Bv**

REACTOR		Bv kg/m <sup>3</sup> ·d	Efic. %	X <sub>o</sub> mg/L	Ch <sub>4</sub> /DQOr m <sup>3</sup> /kg	
FILTRO EMPACADO	X	0.42	94.60	32.00	0.290	
	S	0.03	2.61	4.33	0.012	
	X	0.56	94.80	17.00	0.270	
	S	0.02	2.08	2.89	0.019	
	X	0.84	96.50	24.00	0.270	
	S	0.03	3.32	3.36	0.015	
	X	1.15	95.10	12.00	0.260	
	S	0.10	3.16	1.03	0.021	
	X	2.10	96.90	15.00	0.260	
	S	0.13	2.15	2.10	0.101	
	MANTO DE LODOS	X	0.42	95.40	43.00	0.300
		S	0.03	2.18	7.31	0.016
X		0.56	94.20	26.00	0.270	
S		0.02	3.13	5.82	0.015	
X		0.84	96.80	48.00	0.250	
S		0.03	0.85	12.63	0.017	
X		1.15	95.20	30.00	0.240	
S		0.10	1.37	6.97	0.006	
X		2.10	93.40	40.00	0.240	
S		0.13	0.77	12.50	0.023	

n=10

go, valores de X<sub>o</sub> entre 25 y 40 mg/L no suelen considerarse como malos en efluentes tratados con sistemas anaerobios de manto de lodos.

Por su parte, la conversión de la DQO removida (DQOr) en metano presentó una ligera tendencia a disminuir con el incremento de Bv, debido a que si bien se produce un aumento de volumen de biogás generado, también ocurre una disminución sensible de su contenido de metano, como se observa en la figura 2, lo que coincide con experiencias similares de Revard (1985) y Guiot *et al.* (1985). Ellos determinaron que la elevación de carga orgánica permite acentuar el volumen de gas generado resultante de la mayor existencia de sustrato disponible, pero se afecta la conversión a metano por la competencia de otros mecanismos que se estimulan con las concentraciones relativamente mayores de sustrato.

El intervalo de 0.24 a 0.30 m<sup>3</sup> de metano/kg DQOr, fue ligeramente menor, aunque no muy alejado de los valores de 0.25 a 0.40 informados por Young (1982), Nyns (1986) y Saxena (1986). Esta situación era de esperar si se tiene en cuenta lo diferente que resultan estos residuales al compararlos con los empleados en los trabajos antes citados, con mayor contenido de DQO y estricto control del pH realizado en esos experimentos, lo que es necesario tener en consideración. En nuestro caso, de manera intencional, no se efectuó corrección del mismo.

Aunque no aparece en las gráficas ni descrito en las tablas, es necesario destacar el comportamiento del pH a lo largo de todas las corridas, pues si bien en la etapa de adaptación al residual lácteo se utilizó cal para elevar el pH hasta 7 unidades en ambos reactores, aumentando también la alcalinidad, después de comenzadas las corri-

das experimentales en ninguno de los dos reactores ensayados se realizó corrección alguna del pH, manteniéndose de forma muy estable en valores de 6.5 a 6.8 durante todas las corridas. Esto desde el punto de vista económico resulta muy conveniente y no afecta sensiblemente la eficiencia, aunque pudiera haber influido en la conversión del metano, al trabajar en un intervalo de pH por debajo del considerado como óptimo, entre 6.9 y 7.2 unidades.

### CONCLUSIONES

La digestión anaerobia de residuales lácteos en reactores no convencionales que consideran la retención de la biomasa activa en su interior fue experimentada con éxito, logrando tratamientos con alta eficiencia de remoción de la DQO aplicada (95% como promedio) y factores de conversión en metano de la DQO removida de 0.24 a 0.30 m<sup>3</sup>/kg, variando su contenido en este compuesto desde 60 hasta 80%.

El filtro anaerobio, con una retención hidráulica entre 1 y 3 días produjo un efluente con un contenido promedio de 18 mg/L de sólidos suspendidos volátiles (SSV), mientras que en el reactor de manto de lodos, para tiempos de retención que variaron entre 0.5 y 1.5 días, el residual tratado tuvo un valor promedio de SSV de 40 mg/L que, aunque superior al anterior, no deja de ser aceptable en estos reactores.

Desde el punto de vista de operación, ambos sistemas resultaron opciones adecuadas para la depuración del residual lácteo mediante la ruta anaerobia. Algunas evidencias favorecen la recomendación del sistema UASB por la mejor utilización del volumen del reactor y por tener un mayor factor de conversión a metano para cargas orgánicas similares aplicadas.

### REFERENCIAS

- APHA-AWWA-WPCF (1985). Standard Methods for the Examination of the Water and Wastewater. American Public Health Association, Nueva York, 16ª Ed.
- González J.S. y Valdés P.A. (1978). Caracterización preliminar de residuales de la Empresa de Productos Lácteos Habana. Inst. Inv. Ind. Alimenticia. (sin publicar).
- González J.S. y Guerrero B. (1982). Caracterización de residuales líquidos de 4 establecimientos de la Empresa de Productos Lácteos de Bayamo. Inst. Inv. Ind. Alimenticia (sin publicar).
- González J.S. (1988). Tratamiento anaeróbico convencional de residuales lácteos. Inst. Inv. Ind. Alimenticia (sin publicar).
- González J.S. (1989). Tratamiento anaeróbico de residuales de la industria cárnica. Tesis para la obtención del grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Ciudad de La Habana, Cuba.
- Guiot S.R. y van den Berg L. (1985). Performance of an up-flow anaerobic reactor combining a sludge blanket and a filter treating sugar waste. *Biotechnol. Bioengin.* 27, 800-806.
- Mc.Carty P.L. (1982). *Anaerobic Digestion*. Elsevier Biomedical Press, Amsterdam.
- Nyns E.J. (1986). Biomethanation processes. *Biotechnology* 8, 207-218.
- Revard C.J. (1985). Comparison of the standard CSTR with an up-flow packed bed reactor. *Biotechnol. Bioengin.* 15, 375-382.
- Rivas J.N., González J.S. y Valdés P.A. (1982). Contaminación de las aguas por subproductos lácteos. Proc. 8vo. Seminario Científico CNIC, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Saxena K.L. (1986). Packed bed anaerobic reactor for treatment of meat wastes. *Asian Environ.* 8, 2-20.
- van den Berg L. (1984). Developments in methanogenesis from industrial waste water. *Can. J. Microbiol.* 30, 975-990.
- Young J.C. y Dahab M.F. (1982). Operational characteristics of anaerobic packed bed reactors. *Biotechnol. Bioengin. Symp.* 12, 303-310.