

Ensayos de biodegradabilidad anaerobia de efluentes cerveceros con lodo granular y lodo floculento

C.J. Collazos Chávez*
M.C. Díaz Báez*

Anaerobic biodegradability essays from brewery wastewater using granular and flocculent sludges

RESUMEN

Desde comienzos de la década de los noventa la industria cervecera del país ha venido implementando tecnologías anaerobias, particularmente del tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), para el tratamiento de las aguas residuales de sus plantas industriales en diferentes regiones del país. Por diferentes razones estas instalaciones están funcionando con algunas deficiencias, lo cual es motivo de preocupación tanto para el sector industrial como para las entidades de control. El presente artículo constituye la segunda parte de una investigación encaminada a establecer criterios para la selección y mejoramiento de los lodos utilizados en estos sistemas. También se busca analizar la influencia de otros factores asociados como características del desecho, condiciones de operación y parámetros de diseño. El estudio se desarrolló en dos etapas, en las que se emplearon lodo granular y lodo floculento para evaluar la degradabilidad de los residuos líquidos de dos plantas cerveceras. Igualmente, se incluyó el lodo propio de una de esas instalaciones.

Para los ensayos se emplearon botellas serológicas de 160 ml. Aunque todos los inóculos reflejaron altos porcentajes de biodegradabilidad (> 80% DQOs), el lodo floculento resultó ser el más eficiente en virtud a su mayor adaptabilidad a los sustratos estudiados, lo cual se vio reflejado en un menor tiempo de respuesta (< 5 días). El origen del inóculo y las características físicas y microbiológicas del mismo parecen explicar dicho comportamiento.

PALABRAS CLAVES:

biodegradabilidad anaerobia, UASB, tratamiento de aguas residuales, digestión anaerobia, efluentes de cervecerías, reactores anaerobios.

ABSTRACT

At the beginning of the nineties the colombian beer industry begun the application of anaerobic technology for the treatment of their wastewater effluents through different regions of the country. These treatment plants have not been working appropriately due to different factors, and are creating concern among the industrial sector and the water pollution control agencies. This work constitutes the second phase of a research project designed to establish a selection and improvement criteria of the sludges used in the systems. It also looks to analyze other associated factors such as: waste characteristics, operation conditions and design parameters. The investigation was conducted in two phases using granular and flocculent sludges. This method was used for determining the anaerobic biodegradability of wastewater from two industrial plants. Test were performed in 160 ml pressure-resistant glass vessels at a wide range of initial substrate loading ratios. The average biodegradability of the two substrates was >80% COD at loading ratios between 1.1 and 1.2 gCOD/gVSS. The results also showed that a high retention time will be needed to achieve 85% degradation efficiency with the granular sludge. The flocculent sludge turned out to be the most efficient in terms of its better adaptability to the studied substrates. This was evidenced in its lower response time (<5 days). An optimum initial substrate mass concentration was estimated and the fraction of methane gas in produced biogas was calculated for each loading. The source and the physicochemical and microbiological characteristics of the inoculum seem to explain such behavior.

KEYWORDS:

anaerobic biodegradation, Up Flow Anaerobic Sludge Bed Reactors (Uasb), industrial wastewater treatment, anaerobic digestion, brewery wastewater, anaerobic reactors.

* Profesores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales de la industria cervecera mediante reactores anaerobios tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) es una de las aplicaciones más frecuentes de este tipo de procesos en el ámbito mundial (Lettinga, 1980, 1983, 1990).

En Colombia, durante los últimos diez años, la industria cervecera ha construido varias plantas con tecnología anaerobia para reducir la contaminación generada por sus aguas residuales (Ojeda, 1996), pero pese a los numerosos estudios que existen al respecto y la amplia difusión de la tecnología adoptada, los resultados no han sido del todo satisfactorios.

Algunas plantas se inocularon con lodo granular, pero debido a los altos costos de importación de dicho material muchas de ellas se arrancaron con lodo floculento proveniente de lagunas de estabilización que tratan aguas residuales de la industria de aceite de palma africana. Tanto las plantas inoculadas con lodo granular como las inoculadas con lodo floculento no muestran un desempeño satisfactorio, por lo que se han tenido que realizar estudios más detallados que permitan determinar las causas del problema y sus posibles soluciones.

En esta investigación se busca evaluar y comparar la biodegradabilidad anaerobia de los residuos líquidos generados en dos plantas cerveceras, utilizando como inóculos lodos granular y floculento en plantas diferentes. Estos lodos habían presentado la estructura trófica más balanceada en un estudio anterior (Espitia, 1999). Con ello se pretende establecer si existe alguna incompatibilidad en la relación inóculo/sustrato que pudiera afectar la operación y el control del proceso.

La biodegradabilidad anaerobia (DQO_{BD}) es comparable con la DBO. Durante la prueba de biodegradabilidad, la DQO acidificada (DQO_{AC}) se mide directamente en términos de DQO metanogénica y DQO de ácidos grasos volátiles ($DQO_{CH_4} + DQO_{AGV}$), en tanto que la producción celular (DQO_{cel}) se calcula por balance de masa o un estimativo, basado en la producción celular por fermentación y metanogénesis.

El método utilizado para medir la biodegradabilidad de los residuos cerveceros es una adaptación de las técnicas propuestas por Shelton y Tiedje (1984), Battersby y Wilson (1988), Young (1991) y la norma ISO 11734,

1995 (prueba de biodegradabilidad por lote). Esta técnica permite evaluar diferentes variables en un período relativamente corto (30-45 días). El método se basa en medir a lo largo del tiempo la producción de metano generado dentro de unas botellas (*batch*) que contienen medio mineral, lodo metanogénico activo y la muestra problema.

El estudio se desarrolló en dos etapas: en la primera se evaluó la degradación biológica del residuo de una cervecería de Bogotá con los dos lodos mencionados anteriormente, mientras que en la segunda se evaluó el agua residual de una cervecería localizada en el municipio de Tocancipá, utilizando además el lodo con que opera dicha planta (lodo propio), que también es un lodo floculento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Reactores

La prueba de biodegradabilidad se realizó en botellas serológicas de 160 ml, con un volumen de fase gaseosa de 30% del volumen total. Una vez inoculadas las botellas se taparon con tapones de hule y sellos de aluminio, se agitaron y se incubaron a $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sustrato

En la primera etapa se utilizó como sustrato el efluente industrial de la cervecería de Bogotá, con una DQO soluble (DQOs) de 896 mg/l, y en la segunda etapa el de la cervecería de Tocancipá, con 464 mg/l de DQOs. Para proporcionar a los microorganismos todos los nutrientes necesarios, se adicionó medio mineral preparado de acuerdo con Balch *et al.* (1976). Las botellas con el medio se esterilizaron antes de la adición de los microorganismos y del agua residual de prueba.

Inóculo

Como inóculo se utilizó lodo activo granular (49.750 mg/l de SSV) de la cervecería de Nariño y floculento (14.810 mg/l de SSV) de la cervecería de Boyacá. En la primera etapa se trabajó con dos cargas orgánicas de prueba: 1 g DQO/g SSV y 2 g DQO/g SSV. En la segunda

Cuadro 1. Plantas en estudio

Referencia	Primera etapa	Segunda etapa
Residuo a tratar	Cervecería en Bogotá	Cervecería de Tocancipá
Lodo	Granular (cervecería de Nariño) Floculento (cervecería de Boyacá)	Granular (cervecería de Nariño) Floculento (cervecería de Boyacá) Propio (cervecería de Tocancipá)
Cargas que hay que evaluar (número)	2	1

etapa se incluyó el propio lodo de la cervecería de Tocancipá (26.324 mg/l SSV) y se operó con una carga de 1 g DQO/g SSV.

Montaje de la prueba

En la primera etapa, las botellas de muestra se trabajan por triplicado para sacrificar una, de cada carga, al tiempo cero, verificando el pH y determinando DQO, AGV y SSV iniciales para los cálculos. Las otras botellas se siguieron durante un período aproximado de 30 días, midiendo cada tres o cuatro días la producción de metano. Al finalizar la prueba se procedió a abrir las botellas, determinando los valores finales de pH, DQO y SSV. A lo largo del experimento se corrió un testigo (con

lodo y medio mineral únicamente), para obtener la producción neta de metano del agua residual.

Para la segunda etapa se repitió el mismo procedimiento, pero adicionando un mayor número de réplicas con el fin de determinar la variación del pH, AGV y SSV simultáneamente con la medición de metano. En el cuadro 1 se presenta la relación de las plantas en estudio y en el cuadro 2 se registran las principales características de dichas instalaciones.

Métodos analíticos

La producción de metano se cuantificó en un cromatógrafo marca Varian Modelo 3600, con detector de conductividad térmica y columna de Sílica Gel 40/60 en

Cuadro 2. Características de las plantas en estudio

PARÁMETRO	PLANTA DE TRATAMIENTO				
	Cervecería de Boyacá	Cervecería de Tocancipá		Cervecería de Bogotá	Cervecería de Nariño
		Etapa 1	Etapa 2		
Caudal de diseño (m³/h)	240	181	433	432	64,8
Tecnología (patente)	Degrémont	Degrémont	Degrémont	Degrémont	Biothane
Tanque de eualización					
- Volumen (m³)	1440	1500	1500	800	476
- TRH (horas)	6,00	2,44	2,44	1,85	7,3
Tanque de acidificación	No tiene				No tiene
- Volumen (m³)		350	2470	1900	
- TRH (horas)		1,9	5,7	4,4	
Tanque de metanización					
- Tipo	Anapulse	Anapulse	Anapulse	Anapulse	Uasb
- Carga diseño (kg DQO/m³•d)	7,5	8,5	8,5	8,5	7,8
- Volumen (m³/unidad)	450	764	764	600	462
- TRH (horas)	3,8	8,4	5,3	5,6	7,1
Lodo de inóculo					
- Tipo	Floculento	Floculento	Floculento	Floculento	Granular
- Origen	L. maltería	L. palma	L. palma	L. palma	Importado
- Biomasa (kg SSV)	6.275	3.438	10.314	35.633	7.102

acero inoxidable. Se utilizó helio como gas de arrastre. Los análisis fisicoquímicos para la determinación de los otros parámetros de control se realizaron de acuerdo con los métodos estándar (Apha, 1994), excepto la determinación de los AGV, para lo cual se usó el método B, recomendado en la Gran Bretaña para el análisis de AGV en lodos anaerobios.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

pH

Tanto en la etapa 1 como en la etapa 2 se observó una relativa estabilidad a lo largo de la prueba, manteniendo el pH en un valor de 6,5 a 7,0 (7 ± 1), condición indispensable para la validez del ensayo.

Producción de metano

En las figuras 1 y 2, correspondientes a la primera etapa (residuo de la Cervecería de Bogotá) se puede apreciar que no obstante haberse alcanzado una producción final muy semejante en ambas cargas y en ambos lodos, la pendiente de la curva (tasa de producción) varía considerablemente del lodo granular al lodo floculento y aun con el mismo lodo entre una y otra cargas.

También se puede observar claramente que la producción máxima de metano se alcanza en el lodo

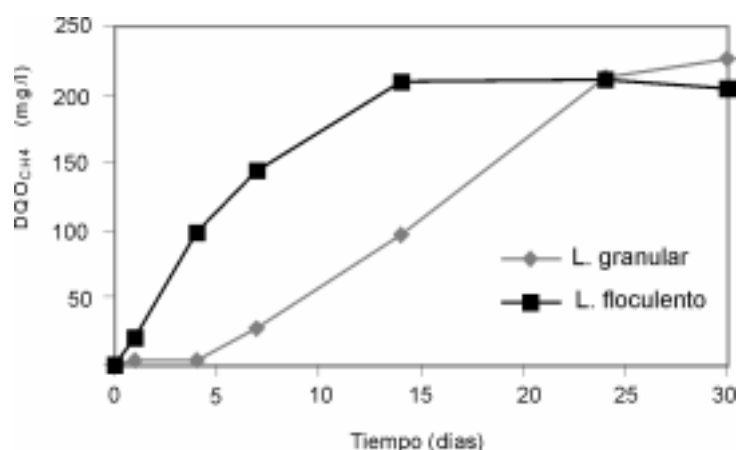


Figura 1. Producción neta de metano ($\text{mg/l DQO}_{\text{CH}_4}$) primera etapa – carga 1 (1g DQO/g SSV).

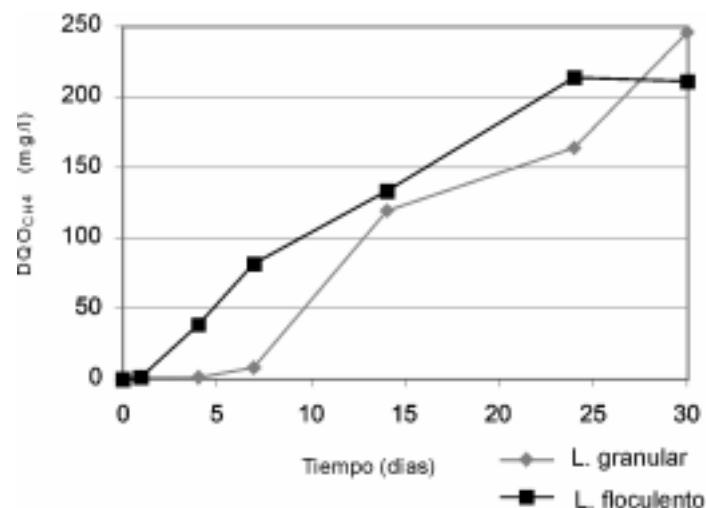


Figura 2. Producción neta de metano ($\text{mg/l DQO}_{\text{CH}_4}$) primera etapa – carga 2 (2g DQO/g SSV).

floculento en un período más corto. Parecería que el lodo granular requiere un tiempo inicial de adaptación de una semana, aproximadamente, en tanto que el lodo floculento comienza la producción de metano de manera casi inmediata. En todos los casos, la producción neta de metano es bastante parecida.

Para la segunda etapa, con el sustrato de la cervecería de Tocancipá, los resultados reflejan un comportamiento semejante al observado en la etapa anterior. El lodo floculento se muestra más activo desde el inicio, comparado con el lodo granular y con el lodo propio (figura 3).

Aunque el lodo granular en esta ocasión tuvo un menor período de adaptación, de todas maneras la inclinación de la curva es similar a la observada en la primera etapa. El lodo floculento de nuevo muestra una mayor producción de metano. El lodo propio presentó un comportamiento similar al mostrado por el lodo granular en la primera etapa.

Balance de DQO

En las Figuras 4 a 6 se muestra la variación de la DQO, DQO_{CH_4} y DQO_{AGV} para los tres lodos (granular, floculento y propio) evaluados con el residuo de la cervecería de Tocancipá. Los datos de la primera etapa no permitieron efectuar este análisis porque no se hizo un seguimiento continuo de los AGV.

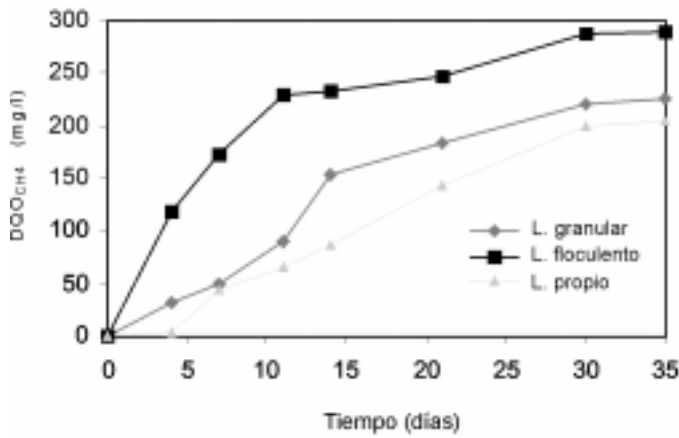


Figura 3. Producción neta de metano (mg/l DQO_{CH4}) segunda etapa (1gDQO/g SSV).

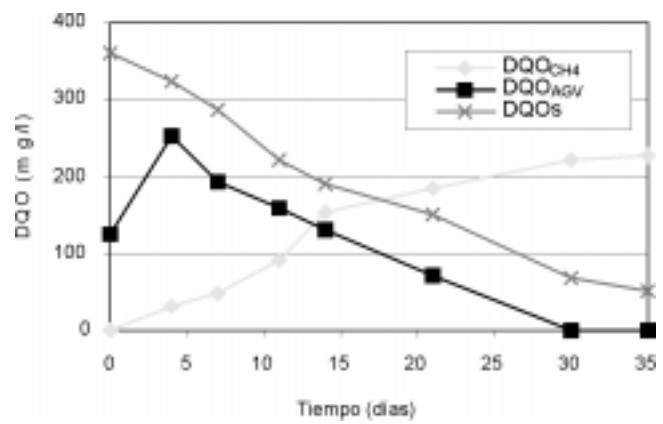


Figura 4. Balance de DQO lodo granular segunda etapa.

En dichas curvas se observa que al comienzo de la prueba se produce una acumulación de ácidos grasos volátiles (DQO_{AGV}) tanto en el lodo granular como en el lodo propio, retardándose la producción de metano. La etapa limitante en este caso es la metanogénesis. A diferencia de los anteriores, el lodo floculento muestra desde el principio un mayor equilibrio en el balance de las poblaciones que intervienen en el proceso, abatiendo rápidamente la concentración de DQO_{AGV} en beneficio de la metanogénización (DQO_{CH4}).

Aunque el análisis estructural de los lodos (Espitia, 1999) no muestra diferencias estadísticas significativas entre el lodo granular y el lodo floculento, estos resultados demuestran que sí las hay, por lo menos en lo que respecta a la población metanogénica activa. En síntesis, el residuo es altamente biodegradable

con cualquiera de los inóculos. Sin embargo, el tiempo que requieren el lodo granular y el lodo propio para alcanzar una eficiencia del 80% en remoción de la DQO es el doble del tiempo que demanda el lodo floculento.

Biodegradabilidad del residuo

El cuadro 3 contiene los resultados del cálculo de la biodegradabilidad del residuo en cada una de las etapas. De acuerdo con esos resultados, el mayor porcentaje de biodegradabilidad en ambos residuos se obtiene con el lodo floculento, lo cual demuestra su mejor adaptabilidad al sustrato cervecero. Sin embargo, independientemente del tipo de inóculo ambos sustratos son biodegradables.

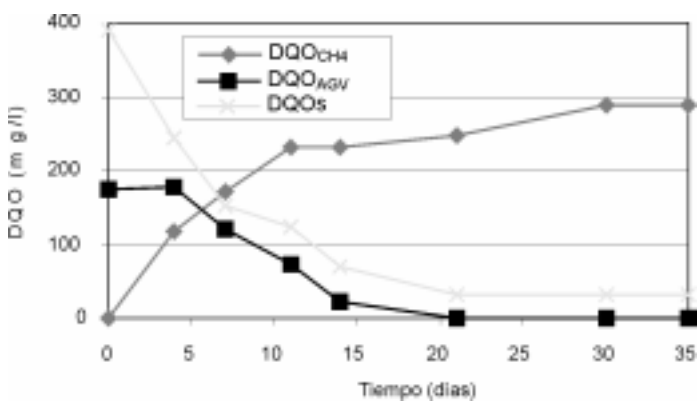


Figura 5. Balance de DQO lodo floculento segunda etapa.

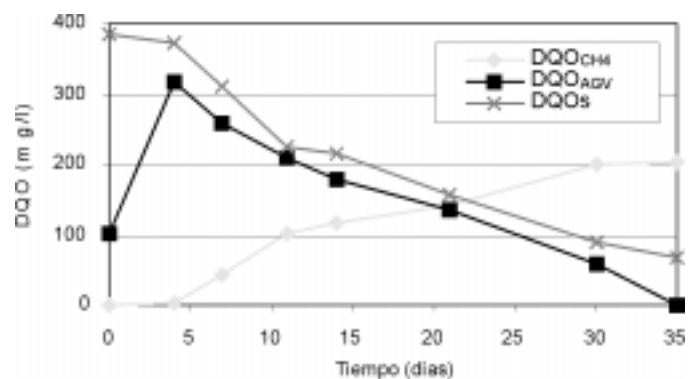


Figura 6. Balance de DQO lodo propio segunda etapa.

Cuadro 3. Porcentaje de biodegradabilidad según tipo de lodo

ETAPA 1 (residuo cervecera de Bogotá)			ETAPA 2 (residuo cervecera de Tocancipá)	
LODO (Tipo)	CARGA g DQO/g SSV	BIODEGRADABILIDAD (Porcentaje)	CARGA g DQO/g SSV	BIODEGRADABILIDAD (Porcentaje)
Granular	1,06	93,72	1,22	85,86
	1,87	91,63		
Floculento	0,99	95,37	1,10	91,60
	2,04	95,37		
Propio			1,22	82,16

Cuadro 4. Tasa máxima de biodegradabilidad del residuo, etapas 1 y 2

ETAPA	LODO (Tipo)	CARGA g DQO/g SSV	TASA MAXIMA mg DQO _{CH4} /mg SSV·d
1	Granular	1,06	0,029
		1,87	0,034
	Floculento	0,99	0,070
		2,04	0,080
2	Granular	1,22	0,035
	Floculento	1,10	0,084
	Propio	1,22	0,025

En el cuadro 4 se presenta la tasa máxima de biodegradabilidad para cada etapa y cada lodo, deducida de la curva de producción de metano (pendiente máxima de la curva). Aunque el lodo floculento registra la mayor tasa, su valor es un 10% del teórico esperado (Díaz y Collazos).

Factor de conversión de sustrato a metano

De acuerdo con el cuadro 5, en la primera etapa no existe una diferencia importante entre el lodo granular y el lodo floculento para el factor de conversión. Caso

contrario se presenta en la segunda etapa, donde el lodo floculento permite un factor de conversión muy superior al que ofrecen el lodo granular y el lodo propio.

Producción celular

Los valores teóricos calculados que se muestran en el cuadro 6 parecen razonables, de acuerdo con la literatura existente (Zegers, 1987). Dicho dato incluye la producción de bacterias fermentativas y metanogénicas en proporción aproximada de 7:1, respectivamente.

Cuadro 5. Factor de conversión de sustrato a metano

ETAPA	LODO (Tipo)	CARGA g DQO/g SSV	DQO _{CH4} neta mg/l	DQO _{Removida} mg/l	FACTOR CONVERSIÓN g DQO _{CH4} /g DQO _{Removida}
1	Granular	1,06	226	403	0,56
		1,87	245	384	0,64
	Floculento	0,99	204	342	0,60
		2,04	211	334	0,63
2	Granular	1,22	227	340	0,67
	Floculento	1,10	290	358	0,81
	Propio	1,22	204	322	0,63

Cuadro 6. Producción celular, etapas 1 y 2 de la prueba

LODO (Tipo)	PRIMERA ETAPA		SEGUNDA ETAPA	
	CARGA g DQO/g SSV	PRODUCCION g SSV/ g DQO	CARGA g DQO/g SSV	PRODUCCION g SSV/ g DQO
Granular	1,06	0,16	1,22	0,09
	1,87	0,13		
Floculento	0,99	0,15	1,10	0,12
	2,04	0,14		
Propio	--	--	1,22	0,11

Análisis de las condiciones de operación de las plantas

En el cuadro 7 se presenta un resumen de las condiciones promedio de operación de las plantas de tratamiento en estudio. Los datos los suministraron directamente las cervecerías.

Como se puede observar, todos los reactores anaerobios se encuentran operando por debajo del 50% de la capacidad instalada. Esto se debe a diferentes situaciones, entre éstas la pérdida del inóculo por arras-

tre y disminución del volumen de aguas residuales por reducción en la producción de la fábrica.

Por otra parte, desde el punto de vista de carga orgánica se aprecia igualmente que todos los reactores están trabajando por debajo de la carga de diseño, en parte por la misma razón anterior y en parte por la disminución de la concentración del residuo. Como se puede observar en ese cuadro, la carga volumétrica real aplicada varía entre 2,68 kg DQO/m³·d y 4,57 kg DQO/m³·d, lejos del parámetro de diseño situado entre 7,5 kg DQO/m³·d y 8,5 kg DQO/m³·d.

Cuadro 7. Condiciones de operación y desempeño de las plantas de tratamiento

PARÁMETRO	PUNTO DE MUESTREO	PLANTA				
		Cervecería de Boyacá	Cervecería de Tocancipá Etapa 1	Cervecería de Tocancipá Etapa 2	Cervecería de Bogotá	Cervecería de Nariño
Caudal (m ³ /h)	Entrada tanque de equalización	119	300	300	198	30
	Salida reactores anaerobios	119	40	60	136	30
	Efluente final	119	280	280	343	30
	By-pass (rebose)	0	60 - 150	60 - 150	207	0
	% de capacidad instalada	49,6%	22,1%	41,6%	31,5%	46,3%
DQO (mg/l)	Tanque de equalización	2.366	1.600	1.600	2.321	1.722
	Tanque de acidificación	1.440	1.300	1.300	2.250	N.E.
	Efluente reactores	280	300	300	220	369
	Efluente final	280	30	30	774	238
	Eficiencia neta en reactores	81%	77%	77%	90%	79%
DBO ₅ (mg/l)	Tanque de equalización	1.313	1.100	1.100	1.934	1.033
	Tanque de acidificación	1.088	900	900	1.951	N.E.
	Efluente reactores	106	240	240	81	152
	Efluente final	106	10	10	610	65
	Eficiencia neta en reactores	90%	73%	73%	96%	85%
SST (mg/l)	Tanque de equalización	215	350	350	359	491
	Efluente reactores	428	N.D.	N.D.	N.D.	340
	Efluente final	428	5	5	166	164
TRH real en los reactores (horas)		7,6	25,0	16,7	17,6	15,4
Carga del lodo ó A/M (kg DQO/kg SSV.d)		0,66	0,36	0,54	0,21	0,17
Carga volumétrica (kg DQO/m ³ .d)		4,57	2,86	2,86	3,06	2,68

Teóricamente, la eficiencia que se espera obtener en un reactor anaerobio tipo Uasb o equivalente, como los que se emplean en la industria cervecera, es del 75-80% en remoción de DQO (Paques, 1988). Con base en ello, todos los reactores estarían cumpliendo con dicha expectativa pero, por supuesto, en condiciones de carga muy inferiores a las contempladas en el diseño real.

La baja capacidad de retención de la biomasa en el sistema explica en buena medida el desequilibrio que se observa actualmente entre las poblaciones acidogénicas y metanogénicas, por lo menos en lo que respecta al lodo propio (cervecería de Tocancipá). Igualmente, de acuerdo con Espitia (1999), este lodo presenta deficiencias en cuanto a la población fermentativa y sintrófica, lo cual puede ocasionar retardo en la metanogénesis.

En cuanto a la planta inoculada con lodo granular, parece que no se estuviera produciendo el fenómeno de granulación en el interior del reactor; por el contrario, al igual que en el caso de las plantas inoculadas con lodo floculento presenta un arrastre significativo de sólidos suspendidos. Esto podría explicarse por las condiciones de baja carga en que opera. Se ha observado en diferentes investigaciones (Hulshoff, Pol, 1989) que la granulación se presenta cuando la carga del lodo es mayor de 0,6 kg DQO/kg SSV·d.

Además, se considera que someter los reactores a prolongados períodos de baja carga conduce a la formación de un tipo de lodo anaerobio esponjoso, constituido por bacterias filamentosas (presumiblemente *Methanotrix soehngenii*). Esto muestra la importancia de una alta carga para una apropiada selección de los componentes livianos y pesados del lodo. El caso de la cervecería de Tocancipá parece ajustarse literalmente a esta situación.

En general, el proceso de granulación parece estar acompañado de un drástico lavado del lodo de inóculo. Después del lavado viene la granulación, en tanto que la concentración del lodo comienza a incrementarse lentamente. Este patrón de lavado es típico de la mayor parte de los estudios experimentales que se reportan en la literatura (Hulshoff, Pol, 1989; Orozco y Giraldo, 1986; Campos y Anderson, 1991; Hwang y Hansen, 1992, entre otros).

CONCLUSIONES

Los resultados permitieron comprobar que los dos residuos evaluados, la cervecería de Bogotá y la cervecería de Tocancipá, son altamente biodegradables (> 80% de la DQOs) con cualquiera de los inóculos utilizados en el estudio. No obstante, el lodo floculento proveniente de la cervecería de Boyacá es el más eficiente.

Los datos obtenidos en torno a las condiciones de operación de las plantas en estudio permiten observar que todas, sin excepción, están trabajando con cargas orgánicas volumétricas inferiores a las que se recomendaron en el diseño. Se sugiere incrementar la carga de operación en todas las instalaciones para permitir una adecuada selección del inóculo.

Confrontando los datos de eficiencia, carga de lodo (A/M) y TRH en las diferentes plantas estudiadas, se observa que la planta de la cervecería de Boyacá, que posee el mejor inóculo en la actualidad, guarda un mejor equilibrio teórico/práctico con respecto a las demás instalaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Collazos, C.J. y Cala, J.M., PTAR "Río Frío", Aplicación de la tecnología Uasb para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en Bucaramanga, *Gaceta Ambiental* Acodal, seccional Valle del Cauca, edición nacional, No. 6, septiembre-octubre de 1992, Cali, Colombia.
- Díaz, M.C., *Manual de ensayos de caracterización de lodos y reactores anaerobios*, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1999.
- Espitia, S., Caracterización microbiológica de lodos anaerobios. Tesis de maestría. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1999.
- Field, J., Parámetros operativos del manto anaerobio de lodos de flujo ascendente. Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodo - Uasb. Cali, Univalle, CVC, Universidad Agrícola de Wageningen, 1987.
- Field, J., Reyes S. y Lettinga, G., Ensayos anaerobios. Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodo - UASB. Cali, Univalle, CVC, Universidad Agrícola de Wageningen, 1987.
- Gil Victoria, Luis H., Fundamentos del tratamiento anaeróbico de aguas residuales-Criterios de diseño. Universidad Nacional de Colombia, seccional de Medellín, 1993.
- Hulshoff Pol, L.W., The Phenomenon of Granulation of Anaerobic Sludge. Wageningen, Ph.D. thesis, Netherlands, Landbouwniversiteit, 1989.
- Kato, M.T., The Anaerobic Treatment of Low Strength Soluble Wastewater. Ph.D. thesis, Wageningen, Netherlands, Landbouwniversiteit, 1994.

- Lema, J.M., Méndez, R., Iza, J., García, P., Fernández-Polanco, F., Chemical Reactor Engineering Concepts Design and Operation of Anaerobic Treatment Processes, Valladolid, España.
- Lettinga, G., Anaerobic Treatment of Low Strength and Cold Wastewater, in *Anaerobic Reactor Technology*, Wageningen, Netherlands, 1982.
- Lettinga, G. and Hulshoff, P., Anaerobic Wastewater Treatment Technology with Emphasis to Upflow Anaerobic Sludge Bed (Uasb) Reactor Systems, in *Anaerobic Reactor Technology*, Wageningen, Netherlands, 1982.
- Lettinga, G. and Hulshoff, P., Basic Aspect of Anaerobic Wastewater Technology, in *Anaerobic Reactor Technology*, Wageningen, Netherlands, 1992.
- Lettinga, G. and Hulshoff, P., Uasb Process Design for Various Types of Wastewaters, *Wat. Sci. Technol*, 24:87-107.
- McCarty, P.L. and Smith, D.P., Anaerobic Wastewater Treatment, *Environmental Science and Technology*, Vol. 20, No. 12, 1986, pp. 1200-1206.
- Ojeda, E.O., Tratamiento anaerobio de aguas residuales de Bavaria. IV Seminario y Taller Latinoamericano sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, Bucaramanga, Colombia, 1996.
- Paques, Experience with the Uasb System on Brewery Wastewater, Lieshout, Netherlands, 1998.
- Paques, Parámetros de diseño de plantas anaerobias para el tratamiento de aguas residuales de la industria cervecera en Colombia, Bavaria S.A., 1999.
- Skellinkhout, A. and Collazos, C.J., Full-scale Application of the Uasb Technology for Sewage Treatment, *Wat. Sci. Technol*, Vol. 25, No. 7, 1992, pp. 159-166.
- Zegers, F., Microbiología. Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos - Uasb. Cali, Universidad del Valle, CVC, Universidad Agrícola de Wageningen, 1982.

Agradecimientos

Los autores desean destacar la colaboración brindada por los funcionarios de las plantas cerveceras en estudio. Igualmente, el auspicio de Colciencias, el apoyo oportuno del personal de laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia y el respaldo de los compañeros de la Unidad Académica de Ambiental. Su colaboración fue muy valiosa para el desarrollo de la investigación.