

## Efecto de la presión selectiva en el arranque de un reactor anaerobio horizontal donde se utiliza PVC como soporte

Darío Gallego S.\* y Rubén A. Agudelo G.\*\*

(Recibido el 16 de febrero de 2001)

### Resumen

La aclimatación anaerobia del lodo (*original*), proveniente de la planta aerobia para el tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de El Retiro (PTAR), entregó la muestra cruda con una Actividad Metanogénica Específica (AME) ( $\text{g DQO}_{\text{CH}_4}/\text{g SSV/d}$ ) de 0,053; ésta removió en cinco días el 80% de la demanda química de oxígeno (DQO) a partir de 1.000 mg/l. La variación en la AME en relación con la del *original* (0,06), indica que no se obtiene un lodo de las mejores condiciones anaerobias.

Al comparar la AME del lodo *crudo* inmovilizado (0,052) y sin inmovilizar, se concluye que tal proceso no produjo efectos favorables en este caso; pero los resultados de la inmovilización de la muestra *cruda* y *modificada* (muestra *cruda* después de ser sometida a presión selectiva), indican que en esta última sí existen efectos positivos; el alto valor de la AME de la muestra *modificada* inmovilizada (0,112), permite decir que la combinación de la presión selectiva y la inmovilización resultaron adecuadas para mejorar el lodo de la PTAR.

Del proceso de arranque y operación de los reactores anaerobios horizontales (HAIS) con lodo *crudo* y *modificado* inmovilizado en Polyvinil Cloruro (PVC), variando el tiempo de retención hidráulico (TRH) y alimentando sustrato en poco más o menos 800 mg/l de DQO, se puede decir según las desviaciones estándar en los valores temporales de los parámetros evaluados que aunque no hay completa estabilidad de los reactores, sí hay tendencia a ésta en el último que se ha citado. Parece que en el tiempo de cada ensayo no se desarrolló la biomasa metanogénica necesaria. Los resultados en este caso dan la base para proponer la relación *ml de biogás producido/g de DQO consumida* para evaluar el rendimiento y comportamiento de los reactores en futuros estudios de arranque.

Los resultados de los análisis espaciales en las variables de control, después de que finalizó la etapa de arranque, realizados en los reactores HAIS con el lodo *crudo* y *modificado* inmovilizados, indican que finalmente se consiguieron condiciones de operación aceptables y más favorables en el que usó la muestra *modificada*. Los rendimientos en la remoción de la DQO, de 67 y 84% respectivamente y la estabilidad mejoraron en relación con lo reportado en el arranque.

---

\* Profesor de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. labisani@perseus.unalmed.edu.co.

\*\* Profesor del Departamento de Ingeniería Sanitaria. Universidad de Antioquia. ragudelo@udea.edu.co.

----- *Palabras clave:* biodegradación anaerobia, metanogénesis, cloruro de polivinyl, reactor biológico con lecho de soporte, adherencia de bacterias en material de soporte, reactores de lodo anaerobio en lecho fijo, reactor anaerobio de lodo inmovilizado de flujo horizontal, adherencia del lodo anaerobio en un reactor horizontal de lecho fijo.

## **Selective pressure effect on the starting of a horizontal anaerobic reactor using PVC as support**

### **Abstract**

The mud (original), coming from the aerobic plant for the treatment of wastewater of the Retiro Municipality, known as original was anaerobically acclimated. It gave the sample a specific methanogenic activity (AME) ( $\text{gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{g SSV}/\text{d}$ ) of 0,053, this removed in 5 days 80% of the DQO from a solution with 1.000 mg/l. AME variation was in connection with the original (0,06) it indicates that is very difficult to get a mud with the best anaerobic condition. Comparing AME of the immobilized mud (0,052) and mud without immobilized it can be conclude that the process didn't have good effects, but the raw and modified sample results (raw after being subjected to selective pressure) indicates that the modified sample has positive effects, therefore, it is correct to say that the combination of the selective pressure with the immobilization were appropriate to improve the PTAR mud.

Starting and operation process in anaerobic horizontal reactor with raw and modified were immobilized with Polyvinil Chloride (PVC). By varying the retention hydraulic time and feeding an approximate DQO value of 800 mg/l. According to the standard deviations of the tested parameter it can be said that although there is not full stability in the reactor, there is a tendency in the last one. It seems that the necessary methanogenic mass didn't grow in the test time. In this case the results gave the base to propose a relation  $\text{ml CH}_4/\text{g DQO}$  in order to evaluate the yield and behavior in the future starting studies.

----- *Key words:* anaerobic biodegradation, methanogenesis, polyvinyl cloruro, carrier reactor, reactor star-up, adhesion of bacteria on solid supports, immobilized anaerobic sludge fixed-bed reactors, horizontal flow anaerobic immobilized sludge reactor, packed-bed.

## Introducción

Las modificaciones que se hacen a la nueva generación de reactores anaerobios, básicamente se han centrado en la disminución del tiempo de retención hidráulica, es decir, se busca aplicar altas velocidades internas en el reactor, a la vez que se mantiene la concentración de biomasa. Las nuevas propuestas se caracterizan por que incluyen el desarrollo de técnicas de retención de biomasa, que permiten mantener altas concentraciones de ésta, como es el caso de soportes estáticos o móviles. Este precisamente es uno de los motivos, para que en los últimos años la inmovilización de células viables haya ganado atención [1].

En algunos de los estudios que se han realizado, se concluye que la adhesión de las bacterias anaerobias a los soportes sólidos depende, entre otros, de las características de los grupos de microorganismos, de las propiedades físicas del soporte y de la química del medio.

El trabajo de investigación que se presenta empleó el método de retención de biomasa sobre un soporte estático. En éste se usaron dos semillas; la *cruda*, corresponde a un lodo aclimatado; la *modificada*, se obtuvo cuando a la *cruda* se le aplicó la presión selectiva como técnica de mejoramiento. Se buscó con ello evaluar las diferencias entre las muestras cuando fueron sometidas a inmovilización en los soportes de PVC y los efectos de la inmovilización en la muestra *cruda*; también, mediante el estudio del arranque de los reactores se evaluaron los efectos de las variaciones de la carga hidráulica, cuando se mantuvo constante la concentración del alimento.

Una de las dificultades para evaluar la biomasa inmovilizada es que muchos de los métodos se han desarrollado para el cultivo de células libres [2]; pero se afirma que es posible buscar métodos de análisis de microorganismos inmovilizados en las biopelículas, si se procede por ejemplo a su remoción [3]; aunque también es posible emplear métodos indirectos como los de medida

de la DQO según las recomendaciones de Lazarova, V., Manen, J., Characklis, W. y Bryers, J. [2, 4, 5].

Los métodos que se implementan en este trabajo para evaluar la biomasa inmovilizada y la Actividad Metanogénica Específica (AME) de un lodo en esta condición, permiten el desarrollo de algunas técnicas de medida y experimentación, y abren en nuestro medio el panorama de investigación de estos procesos heterogéneos hacia reactores en los que el fundamento del incremento en el área de contacto entre los microorganismos y el medio, debe incluir el estudio de los materiales que sirven de soporte y su disposición.

## Materiales y métodos

Los métodos de análisis usados se referencian en la tabla 1. Los equipos usados se dividieron entre los construidos para realizar la experimentación y aquellos de medida y requeridos para los análisis de laboratorio. Los últimos se presentan en la tabla 2.

**Tabla 1** Métodos de análisis empleados\*

Parámetro	Unidad de medida	El método en la referencia
Ácidos grasos volátiles (AGV)	mg/l	5560 B
Ácidos grasos volátiles (AGV)	meq/l	
pH	Unidades de pH	4500 H+B
Alcalinidad	mg/l CaCO <sub>3</sub>	2320 B
Alcalinidad bicarbonática verdadera	meq/l	
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	5220 D
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	mg/l	2540 E
Sólidos totales (SS)	mg/l	2540 D
Capacidad buffer		
Biogás producido (mL)		

\* Métodos Normalizados para el análisis de aguas y aguas residuales. APHA, AWWA, WPCF. ed—17/1989.

**Tabla 2** Equipos de medida requeridos para el análisis de laboratorio

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Características</b>
Estufa	Memmert	Con regulador de temperatura
Mufla	Terrígeno	Modelo FPCA. Serie 528. Eléctrica
Balanza	Precisa	Modelo 240 A. Analítica. Electrónica. De un plato. Cuatro cifras decimales.
Bomba peristáltica	Cole-palmer	Modelo 7553-70. Serie W92004748. Con control de velocidad. Se usó simultáneamente con dos cabezas No. 13.
PH-metro	WTW	Modelo pH 320. Serie 62005195. Portátil.
Espectrofotómetro	Shimadzu	Modelo UV-150-01. Serie 118219. Con tres cifras decimales.
Termorreactor para DQO	Merck	Modelo TR-300. Serie 83119027
Baño maría	Memmert	Modelo W 350. Serie 790413
Plancha de calentamiento	Corning	Modelo PC-420. Serie 070596294131
Equipo para filtración	Millipore	En vidrio Pirex. Con capacidad de 300 mL

Los construidos para desarrollar la experimentación, son los que se presentan a continuación con la metodología de trabajo.

### **Medidor de biogás**

Para evaluar el metano producido se emplea el método de desplazamiento de líquido, que en este caso debe ser altamente alcalino, ocasionado por el burbujeo del gas; esto se logra por desplazamiento en un frasco de Mariotte, evaluando el volumen del líquido desplazado.

El equipo que se va a usar se diseñó en la Universidad Nacional, sede Medellín. Es de vidrio, tiene una altura de 450 cm y un diámetro interno promedio de 3,6 cm.

### **Soportes para la inmovilización de la biomasa**

Como material de soporte para la inmovilización se utilizaron anillos de PVC, hechos de tubería para agua caliente de ½ pulgada; se sometieron a

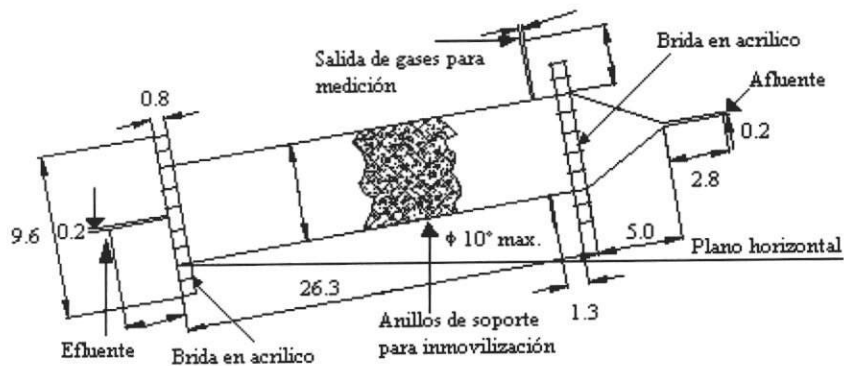
un proceso de lijado interno y externo, para promover una superficie de adhesión rugosa.

De las medidas efectuadas en 5 soportes de PVC, se puede decir que en promedio cada una de estas unidades tiene una longitud de  $1,58 \pm 0,04$  cm; en la parte central de estos anillos, distribuidos a su alrededor, se perforaron cuatro orificios circulares, que tienen un diámetro promedio de  $0,626 \pm 0,005$  cm. Cada soporte tiene un volumen medio de  $1,125$  cm<sup>3</sup> (se obtiene adicionando diez tubos en una probeta que contiene agua y dividiendo el volumen desplazado por 10).

### **Reactores de inmovilización y medida de la correspondiente AME**

El reactor usado está construido en acrílico transparente, véase figura 1.

En las secciones de entrada y salida, y en la parte superior del cilindro cerca de la cara en donde está la sección cónica, se instalaron agujas hipodérmicas metálicas número 16. La que se encuentra en la



**Figura 1** Reactor para ensayos de inmovilización y medida de la AME en un lodo

parte superior del cilindro permite aliviar la presión o la salida de gases del equipo para medir la AME, las otras permiten el flujo del líquido.

En la entrada para impedir que los anillos que sirven de soporte entren al cono, se puso una rejilla. El volumen total promedio del reactor es de 660 ml, de los cuales 40 ml son del cono de entrada.

En la sección cilíndrica del equipo, de manera aleatoria y holgada, se acomodaron 105 anillos de PVC de soporte; esto implica que la porosidad del lecho de inmovilización es del 81%. Para decidir la porosidad se tuvieron en cuenta los comentarios que al respecto se hacen en trabajos como los de Zamariolli *et al.* [6], que opera un reactor HAIS (horizontal con espuma de poliuretano como soporte), los de Zaiat *et al.* [7] quien experimentó con dos reactores horizontales con diferente porosidad y también los aportes de Joo-Hwa Tay [8] en su trabajo con un reactor anaerobio de flujo ascendente con microorganismos inmovilizados en PVC.

La experimentación en la inmovilización y medida de la AME, ejecutadas a la temperatura del laboratorio, se realiza con dos muestras de cada lodo como se identifican en la tabla 3.

El sustrato preparado para alimentar los reactores en la etapa de inmovilización, se hizo de acuerdo con las recomendaciones teóricas, de Samson [9], de adicionar trazas de Ni, Co y Mo buscando enriquecer el espesor de la biopelícula; las características del alimento se presenta en la tabla 4.

**Tabla 3** Muestras de biomasa para experimentar en la inmovilización

Identificación	Característica
LOCRI1	Lodo <i>crudo</i> inmovilizado en el reactor 1
LOCRI2	Lodo <i>crudo</i> inmovilizado en el reactor 2
LOMRI1	Lodo <i>modificado</i> inmovilizado en el reactor 1
LOMRI2	Lodo <i>modificado</i> inmovilizado en el reactor 2

**Tabla 4** Composición del sustrato usado para alimentar los reactores en los que se realiza la inmovilización

Componente	Concentración (mg/l)
Peptona	170,0
Azúcar morena	795,0
Extracto de carne	120,0
CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	8,0
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	9,0
NH <sub>4</sub> Cl	140,0
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	7,0
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	35,0
NaHCO <sub>3</sub>	500,0
Extracto de levadura	35,0

En estos cultivos, para favorecer el desarrollo de la biopelícula, se incluyeron trazas de Ni, Co, Mo, Mn, Zn y vitaminas.

Las características de los lodos y los requerimientos para los reactores de inmovilización se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5** Características de los lodos y requerimientos para inocular los reactores de inmovilización

<i>Ítem</i>	<i>LOCRI1</i>	<i>LOCRI2</i>	<i>LOMRI1</i>	<i>LOMRI2</i>
DQO <sub>Al filtrado del lodo (mg/l)</sub>	121,500		139,140	
SS <sub>Del lodo (mg/l)</sub>	*4.160,000		7.670,000	
SSV <sub>Del lodo (mg/l)</sub>	*2.560,000		5.130,000	
SSV <sub>Para el reactor (mg)</sub>	752,640		754,110	
Volumen de lodo concentrado inoculado a cada reactor (l)	0,150		0,147	
Volumen de sustrato en cada reactor (l)	0,370		0,370	
SSV/SS	61,54%		66,88%	
DQO <sub>del sustrato preparado (mg/l)</sub>	1.053,630		1.085,070	

\* Estos valores se determinan por evaporación, siguiendo las recomendaciones, y se asume que corresponden a los SS y SSV respectivamente.

La experimentación de la etapa de inmovilización comenzó fijando el pH entre 6,5-7,3; durante el proceso diariamente se mide este y se mantuvo controlado con NaHCO<sub>3</sub>.

La etapa de inmovilización, se realizó con una recirculación total del sustrato, se programó en una primera etapa de quince días; al final de estos para probar la adherencia de la biomasa se hizo un lavado con una solución de azúcar a caudales, muy superiores a los empleados en la primera etapa. Posteriormente se sacaron las muestras para realizar el análisis microbiológico y se continuó con la medida de la AME.

El reactor que se usó para realizar el ensayo en la medida de la AME, es el mismo que sirvió para

efectuar el proceso de inmovilización; por esto, no fue necesario retirar el lodo "semi-adherido" en el lecho, sino que se hicieron los arreglos de tal manera que en este se pudiera ejecutar la experimentación. El procedimiento para la medida de la AME en este caso, no fue agitado. Para que el reactor pudiera servir para la medida del biogás producido, se levantó en su parte delantera, en donde se encuentra la sección cónica, unos 4 cm con relación a la horizontal, formando un ángulo de aproximadamente 10° con ésta; esto permitió la formación de una cámara de gas justo en la base de la aguja por donde ascendió el biogás que se produce.

Antes de proceder a cargar los reactores con la mezcla de ácidos grasos volátiles para realizar la medida de la AME, se extrajeron, con una jeringa sin aguja, las muestras para realizar el análisis microbiológico, no olvidando las sugerencias de usar mecheros y mantener flujo continuo de nitrógeno para garantizar el ambiente adecuado de muestreo.

Se calculó el volumen de la mezcla de AGV necesario para que en el reactor, en el cual se realizó la medida de la AME de la biomasa inmovilizada, la concentración fuera de 4 g/l de DQO; se tuvo en cuenta además incluir 50 ml de micronutrientes, 50 ml de macronutrientes; para cada reactor se procedió a preparar el doble de lo calculado antes y se neutralizó con soda hasta que el pH estuviese cerca de 7, completando el volumen con agua hasta 900 ml; se cargó al reactor respectivo, empleando una bomba peristáltica con cabeza 13, por la parte cónica y permitiendo que por el otro extremo del reactor saliera el fluido desalojado; antes de la carga y durante esta se mantuvo flujo de nitrógeno gaseoso sobre la solución que se estaba inyectando.

Para medir el biogás producido, después de sellar las agujas hipodérmicas de los extremos, se acopló el medidor de biogás con la aguja hipodérmica que se encontraba en la parte superior del cilindro del reactor. La columna a través de la cual debía burbujear el biogás que se pro-



duce, se llenó con una solución de soda, con pH de aproximadamente 13. Se estableció el punto de arranque y cada veinticuatro horas se evaluó la producción de metano, midiendo el volumen del líquido desplazado en el medidor. Cuando el sistema comenzó a disminuir la producción de biogás, se procedió a desmontar el reactor para realizar la segunda alimentación.

La biomasa total "semi-adherida" sobre los soportes de PVC se evaluó al final midiendo los SS, SSV que salían con el sustrato, el agua de enjuague del reactor y los anillos; también se sumó la que es evaluada mediante medidas de la DQO a los anillos después de lavados y teniendo en cuenta, según recomendaciones teóricas, que 1 mg de DQO equivalen a 0,706 mg de peso seco de biomasa.

### **Reactores para el estudio del arranque y operación**

Para ejecutar la experimentación de manera simultánea con las muestras *cruda* y *modificada*, se usaron dos (2) reactores de características similares y medidas muy cercanas. Éstos son de acrílico transparente, constan de un cuerpo cilíndrico similar al de la figura 1, con un diámetro interno promedio de 6,5 cm y de 130,0 cm de longitud media. El cuerpo cilíndrico del reactor se dividió en un volumen en la parte superior libre para acumular el biogás producido, separado del resto por donde fluye el sustrato líquido y en el cual se permitió acomodar los anillos de PVC, mediante una lámina de acrílico plana. A lo largo del reactor espaciados entre sí unos 26 cm se instalaron cuatro puertos de muestreo, conformados por tapones roscados de PVC de 3/4" y jeringas plásticas de 1 ml.

En el reactor se acoplaron de manera holgada y en forma aleatoria los anillos de PVC, que sirvieron como soporte para la inmovilización de la biomasa, manteniendo la porosidad del lecho en 81%.

Uno de los extremos, por el cual ingresó el sustrato al sistema, terminó con una sección cónica con

una aguja hipodérmica metálica No. 16 en su vértice. En el lado opuesto había una tapa plana en la cual se acopló el elemento que controló el nivel del reactor y facilitó mantener el caudal de salida para unas condiciones de flujo de entrada; cerca de este extremo, en la parte superior se colocó un tubo de aluminio por el cual pudo retirarse el biogás producido.

La experimentación ejecutada a la temperatura del laboratorio, se realizó con (1) una muestra de cada lodo; el reactor que contuvo la muestra *cruda* se identificó como el *ARC*, el otro con la *modificada* es el *ART*.

Antes de proceder a cargar los reactores se acopló en cada uno la columna que sirvió para medir el biogás que se produjo; para garantizar el sello al sistema e impedir el contacto con aire atmosférico. En cada reactor, que se inició con la etapa de inmovilización como se indicó antes, se inoculó el lodo y el sustrato que se especificó en la tabla 4, como se señala en la tabla 6. Inicialmente se inoculó el lodo repartiéndolo el volumen por los cuatro tapones roscados de PVC de 3/4" ubicados en los puertos laterales.

**Tabla 6** Características del lodo y el sustrato en el arranque de los reactores ARC y ART

	<b>Reactor ARC</b>	<b>Reactor ART</b>
SS en el lodo usado (mg/l)	8.930,00	7.670,00
SSV en el lodo usado (mg/l)	5.090,00	5.130,00
SSV/SS	0,57	0,67
pH del lodo que se inocula	7,45	7,02
Volumen de lodo inoculado (ml)	1.500,00	1.600,00
Volumen de sustrato inoculado (ml)	1.950,00	1.800,00
pH en el efluente del reactor	7,32	7,11

Posteriormente se alimentó el sustrato por la aguja hipodérmica del cono de entrada. El procedimiento y los controles de esta fase de inmovilización

de quince días fueron los mismos que se describieron antes.

Una vez finalizada la etapa de inmovilización se procedió a realizar los ensayos de arranque y operación. Cada reactor fue alimentado con el sustrato, cuya composición se tiene en la tabla 7.

**Tabla 7** Sustrato preparado para el estudio del arranque y operación de los reactores ARC y ART

<i>Elemento</i>	<i>Concentración (mg/l)</i>
Azúcar morena	790,0
NH <sub>4</sub> Cl	43,6
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	12,9
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	6,7
NHCO <sub>3</sub>	1.000,0
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	8,0
Solución de trazas	1 mL
* DQO <sub>filtrada</sub>	830,0 ± 76,0
* Alcalinidad total (como CaCO <sub>3</sub> )	577,0 ± 32,0

\* De diez datos realizados en tiempos diferentes.

En la operación para el estudio del arranque y operación de los reactores, entre ensayo y ensayo se incrementó la velocidad superficial del líquido a través del lecho de inmovilización (al disminuir el TRH) un 30% del valor anterior pero se mantuvo constante la concentración del alimento. Datos de alcalinidad, concentración de AGV, DQO, pH y caudal del efluente se colectaron diariamente; además se midió la producción de biogás. Se comenzó con un tiempo de retención medio de 24 h como se planeó inicialmente, hasta llegar cerca a 4,0 h, en el cual se tuvo una carga orgánica promedia de 4,80 kg/m<sup>3</sup>\*d de acuerdo con la concentración de la DQO en el alimento. El pH se mantuvo en el intervalo de valores recomendados (6,5-7,3).

Finalmente, seleccionando una carga hidráulica, se continuó alimentando el reactor y se

procedió a realizar las medidas de las variables de control a través de este, sacando muestras en los puertos; datos de alcalinidad, concentración de AGV, DQO y pH, se colectaron y analizaron.

## Resultados

- De la aclimatación y caracterización del lodo original. El procedimiento de aclimatación, que se llevó a cabo en un período de cerca de 80 días, consistió en el intercambio progresivo de sobrenadante, mediante la aplicación de cargas por lotes de soluciones de azúcar morena en concentraciones variables para que el sistema se mantuviera entre 600 y 800 mg/l de DQO. El proceso se mantuvo hasta lograr remociones cercanas a un 86%.

Algunas de las características del lodo *original* con el cual se procedió a realizar la aclimatación, y las de la muestra aclimatada, que se conoce como *cruda*, son dadas en la tabla 8.

**Tabla 8** Características de las muestras de lodo *original* y *cruda*

<i>Ítem</i>	<i>Muestra original</i>	<i>Muestra cruda</i>
*SS (mg/l)	17.259,000	9.310,000
*SSV (mg/l)	12.732,000	5.290,000
SSV/SS	0,740	0,570
AME (g DQO <sub>CH4</sub> /g SSV/d)	0,006	0,043**

\* Estos valores se determinan por evaporación, siguiendo las recomendaciones, y se asume que corresponden a los SS y SSV respectivamente.

\*\* Valor promedio de dos muestras en la primera alimentación. La desviación de los valores individuales con relación al valor medio no es mayor al 0,2%.

- Del proceso de inmovilización y medida de la AME de las muestras de lodo cruda y modificada. La biomasa inmovilizada, presente en cada reactor al finalizar la medida de la AME de las muestras en esta condición, se presenta en la tabla 9.



**Tabla 9** Biomasa inmovilizada en cada reactor

<i>Ítem</i>	<i>LOCRI1</i>	<i>LOCRI2</i>	<i>LOMRI1</i>	<i>LOMRI2</i>
SS <sub>Líquido nadante dentro del reactor</sub> (mg)	2.779,52	2.872,28	1.098,49	894,60
SSV <sub>Líquido nadante dentro del reactor</sub> (mg)	1.934,83	1.945,13	787,73	613,20
(SSV/SS) <sub>Líquido nadante dentro del reactor</sub> (%)	69,61	67,72	71,71	68,54
SS <sub>En el agua de enjuague de anillos</sub> (mg)	299,42	168,53	236,00	253,34
SSV <sub>En el agua de enjuague de anillos</sub> (mg)	217,95	107,62	206,00	216,66
(SSV/SS) <sub>En el agua de enjuague de anillos</sub> (%)	72,79	63,86	87,29	85,52
DQO <sub>Correspondiente a los SSV adheridos en los anillos</sub> (mg)	0,00	1,26	152,99	140,18
SSV <sub>Adherida en los anillos según los análisis de DQO</sub> (mg)	0,00	0,89	108,01	98,97
SSV <sub>Total presente en el reactor</sub> (mg)	2.152,78	2.053,64	1.101,74	928,83

De la producción de biogás reportada por las muestras de lodo inmovilizado en las dos alimentaciones se seleccionó la región de mayor pendiente; mediante un análisis de regresión de estos intervalos se puede encontrar el valor para evaluar la AME. En la tabla 10 se presentan los resultados del análisis de regresión para cada una de las muestras en la primera (1A) y segunda alimentación (2A), considerando en

todas un intervalo de tiempo entre las 144 y 264 horas.

Los resultados de la AME para las muestras de lodo *crudo e inmovilizado*, *LOCRI1*, *LOCRI2*, *LOMRI1* y *LOMRI2* en las dos alimentaciones se presentan en la tabla 11. Como las condiciones del laboratorio a las cuales se ejecutaron las experiencias son de  $25,9 \pm 1,4$  °C y 640 mmHg, se deben tener en cuenta las correcciones en los cálculos.

**Tabla 10** Análisis de regresión para determinar las pendientes

<i>Ítem</i>	<i>LOCRI1</i>		<i>LOCRI2</i>		<i>LOMRI1</i>		<i>LOMRI2</i>	
	<i>1A</i>	<i>2A</i>	<i>1A</i>	<i>2A</i>	<i>1A</i>	<i>2A</i>	<i>1A</i>	<i>2A</i>
<b>Análisis de varianza</b>								
M <sub>SE</sub>	14,533300	2,800000	26,133300	27,204800	8,533330	56,819000	3,142860	42,700000
F <sub>0</sub>	1.812,740000	6.241,000000	1.714,530000	1.555,320000	1.472,950000	1.034,060000	1.950,110000	616,980000
R <sup>2</sup>	99,779800	99,935900	99,767200	99,743500	99,729200	99,614700	99,795300	99,355900
Coefficiente correlación	0,998900	0,999680	0,998840	0,998720	0,998650	0,9980710	0,998976	0,996774
Error estándar	3,812260	1,673320	5,112080	5,215820	2,921190	7,537840	1,772810	6,534520
<b>Prueba T</b>								
T <sub>0</sub> Pendiente	45,576300	79,000000	41,406800	39,437500	38,379100	32,156700	44,160100	24,839200
Error de la pendiente	0,037970	0,016670	0,050920	0,051950	0,029060	0,075079	0,017658	0,065085
Pendiente	1,616670	1,316670	2,108330	2,048810	1,116670	2,414290	0,779762	1,616670

**Tabla 11** Resultados de la medida de la AME de las muestras de lodo inmovilizado

Ítem	LOCRI1	LOCRI2	LOMRI1	LOMRI2
SSV presentes en el reactor (mg)	2.152,780	2.053,640	1.101,740	928,830
Concentración de la solución de AGV usada (mg DQO/l)	879.644,400	879.644,400	879.644,400	879.644,400
Volumen de la mezcla de AGV usada (ml)	2,500	2,500	2,500	2,500
AME (g DQO <sub>CH4</sub> /g SV/d)	Primera Alimentación	0,038	0,053	0,052
	Segunda Alimentación	0,031	0,051	0,112

### Resultados sobre el estudio del arranque y operación de los reactores

En la tabla 12 se presentan los tiempos de retención y el intervalo en días que se trabajaron durante la experimentación para el estudio del arranque y operación de los reactores *ARC* y *ART*.

**Tabla 12** Información sobre el arranque de los reactores *ARC* y *ART*

Reactor	¹caudal medio (ml/min)	²tiempo medio de retención horas	Experimentación	
			Del día	Al día
<i>ARC</i>	1,60 ± 0,13	31,0 ± 3,00	1	15
<i>ART</i>	1,93 ± 0,20	31,0 ± 3,00	1	15
<i>ARC</i>	2,06 ± 0,63	23,0 ± 6,00	15	25
<i>ART</i>	2,82 ± 0,91	20,0 ± 5,00	15	25
<i>ARC</i>	3,95 ± 0,20	12,5 ± 0,70	25	34
<i>ART</i>	4,88 ± 0,22	12,2 ± 0,60	25	34
<i>ARC</i>	5,70 ± 0,12	8,61 ± 0,19	34	41
<i>ART</i>	6,77 ± 0,15	8,80 ± 0,21	34	41
<i>ARC</i>	8,35 ± 0,27	5,88 ± 0,19	41	49
<i>ART</i>	8,81 ± 0,44	6,78 ± 0,35	41	49
<i>ARC</i>	10,60 ± 0,55	4,65 ± 0,22	49	56
<i>ART</i>	11,23 ± 0,50	5,32 ± 0,23	49	56

1 Es el valor medio de los datos experimentales.

2 Calculado con el valor medio de los datos diarios admitiendo que el volumen libre para la masa líquida en el reactor permanece constante.

En las figuras 2, 3, 4 y 5, se relacionan las variaciones de las variables pH, capacidad "buffer" y producción de biogás de los reactores *ARC* y *ART*, durante el arranque y operación.

El estudio se extiende hasta el análisis de los cambios espaciales, en un tiempo de retención hidráulico determinado, en las variables AGV, capacidad buffer, ABV, DQO y pH a lo largo de los reactores *ARC* y *ART*; en las tablas 13 y 14 se presentan los resultados de los análisis de varios días; los puertos se numeran comenzando por el más cercano a la entrada.

## Análisis

### Biomasa inmovilizada

Comparando los valores de los SSV inoculados a los reactores de inmovilización de la tabla 5, con los resultados de la tabla 9 se puede decir que en las muestras *crudas* y *modificadas* se presentó incremento de la biomasa mientras se dio el proceso de inmovilización, es decir, se presentó una reproducción de células sobre la superficie como concibe Characklis *et al.* que puede ser la inmovilización [4]; pero el incremento en la muestra cruda es muy superior al de la modificada. El crecimiento en los reactores de muestra cruda, de aproximadamente 180%, no fue muy diferente el uno del otro; en los modificados, con un incremento promedio de 35%, sí hay algo de di-

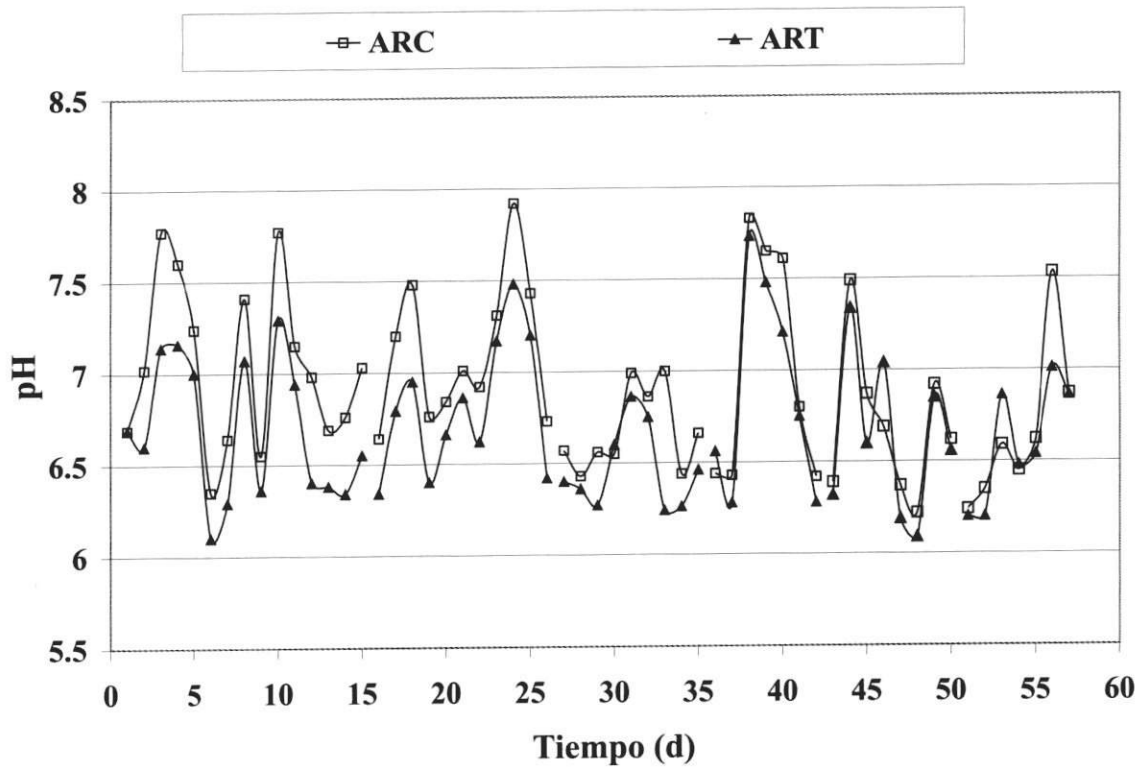


Figura 2 Comparación del pH en el efluente de los reactores ARC y ART durante el arranque

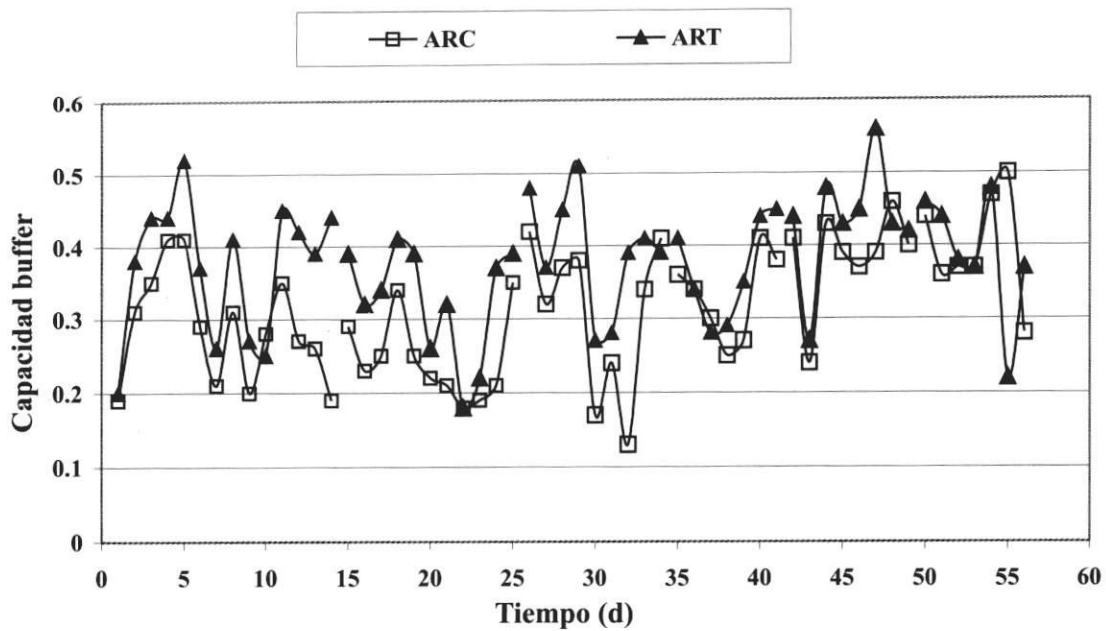


Figura 3 Comparación de la capacidad buffer del efluente de los reactores ARC y ART durante el arranque

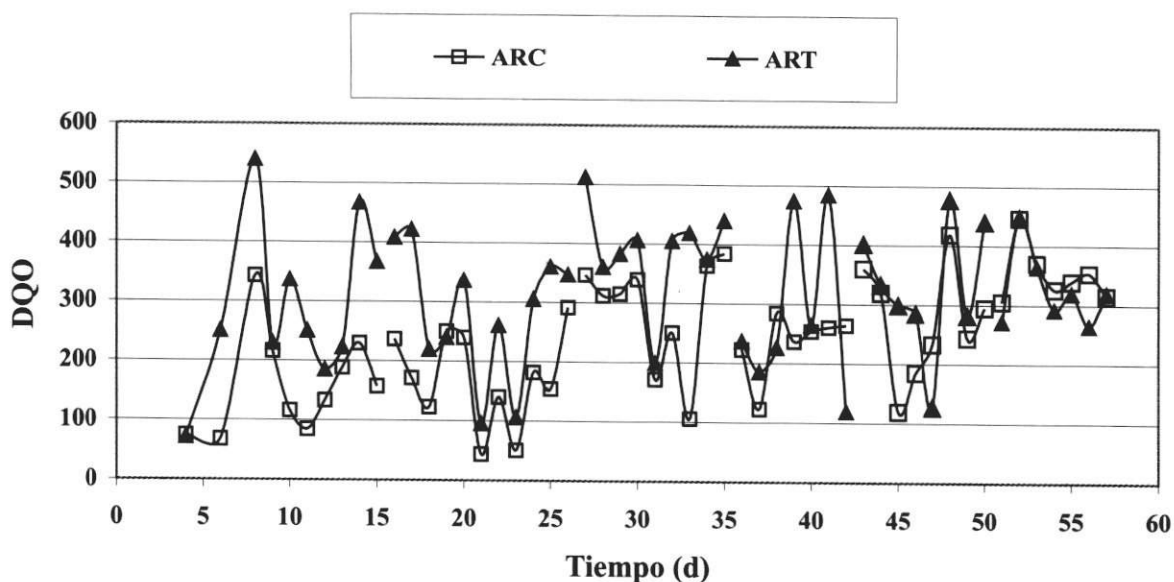


Figura 4 Comparación de la DQO del efluente de los reactores ARC y ART durante el arranque

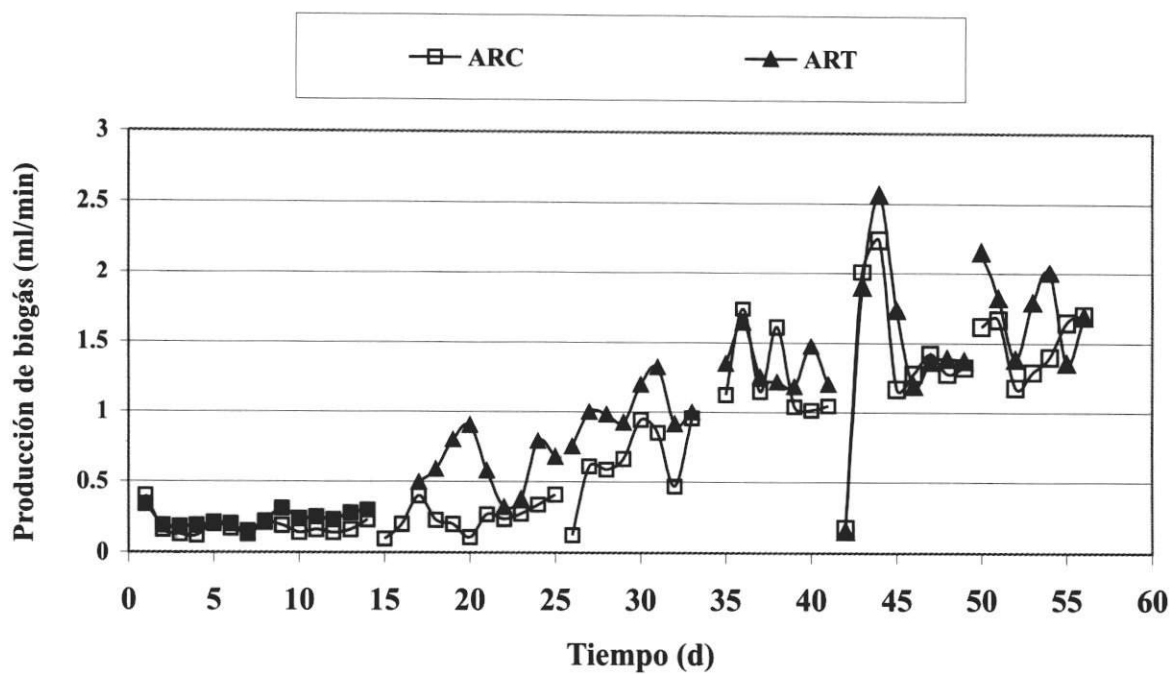


Figura 5 Comparación de la producción de biogás de los reactores ARC y ART durante el arranque

**Tabla 13** Variaciones espaciales de las variables de control en el reactor ARC con caudal promedio de 5,37 ml/min

<b>Puerto</b>	<b>AGV (meq/l)</b>	<b>Capacidad buffer</b>	<b>ABV (meq/l)</b>	<b>DQO(mg/l)</b>	<b>pH</b>
1	6,33 ± 0,24	0,39 ± 0,04	8,61 ± 0,65	470,37 ± 132,39	6,20 ± 0,10
2	5,86 ± 0,64	0,39 ± 0,07	9,82 ± 1,67	321,64 ± 15,91	6,23 ± 0,16
3	5,10 ± 0,60	0,32 ± 0,05	10,28 ± 0,83	255,44 ± 14,62	6,29 ± 0,11
4	4,38 ± 0,86	0,30 ± 0,06	12,13 ± 0,25	210,74 ± 15,48	6,36 ± 0,10
Salida	4,80 ± 0,46	0,27 ± 0,06	10,19 ± 1,39	275,22 ± 37,40	6,55 ± 0,18

**Tabla 14** Variaciones espaciales de las variables de control en el reactor ART con caudal promedio de 5,67 ml/min

<b>Puerto</b>	<b>AGV (meq/l)</b>	<b>Capacidad buffer</b>	<b>ABV (meq/l)</b>	<b>DQO(mg/l)</b>	<b>pH</b>
1	6,09 ± 0,76	0,37 ± 0,07	9,54 ± 1,02	362,05 ± 38,69	6,31 ± 0,11
2	4,10 ± 0,76	0,33 ± 0,01	11,57 ± 0,28	238,254 ± 10,32	6,47 ± 0,13
1	3,67 ± 0,71	0,28 ± 0,03	13,52 ± 1,30	146,26 ± 18,06	6,45 ± 0,08
4	3,48 ± 1,28	0,24 ± 0,04	14,54 ± 1,44	144,54 ± 28,80	6,43 ± 0,17
Salida	3,03 ± 1,12	0,24 ± 0,04	14,26 ± 2,69	129,93 ± 25,79	6,66 ± 0,21

ferencia en el aumento de biomasa entre ellos. Para explicar las anteriores diferencias hay que tener en cuenta los comentarios de Kuroda *et al.* que dicen que en la adhesión de las bacterias a una superficie, no sólo influyen las propiedades físicas y químicas del soporte, sino las características de los microorganismos [3].

De acuerdo con los reportes de Verrier *et al.* no se pudo esperar que en la biomasa inmovilizada en este soporte de PVC la acumulación, e incremento de la AME, se debió por ejemplo a bacterias metanogénicas acetocláticas *Methanosarcina mazei* y *Methanotrix soehngenii*, pues estas bacterias no se adhieren a esta superficie [10]; esto porque la primera no se adhiere no importa que el material sea hidrofílico o hidrofóbico, y la segunda al ser hidrofóbica se adhirió más a las superficies de estas características. El incremento de las bacterias metanogénicas hidrogenofílicas que reportó la muestra modificada e inmovilizada

(LOMIR), en conjunto con la disminución de las sulfato reductoras que se encuentra en el reporte de laboratorio, y el poco incremento de la biomasa en conjunto con el gran aumento de la AME, pueden explicarse seguramente por un aumento de bacterias metanogénicas hidrogenofílicas como son la *Methanospirillum hungatei* y *Methanobrevibacter*, pues dice el autor citado que la primera prefiere entre otros el PVC como soporte (que son materiales que están en un punto medio entre la hidrofobicidad y lo hidrofílico), tendiendo más hacia lo hidrofílico moderado y la segunda también en punto central tirando más a lo hidrofóbico moderado. Hay que tener en cuenta que la *M. Hungatei* fue muy hidrofílica, mientras la *Methanobrevibacter* fue más hidrofóbica.

#### **Cálculo de la AME**

Este se realizó empleando el máximo valor de la pendiente en los diagramas del biogás acumulado



vs tiempo. Los valores para cada caso aparecen en las tablas 8 y 11. En la tabla 10 se presentan los datos estadísticos resultantes del análisis de regresión del biogás producido a través del tiempo para las muestras inmovilizadas en las regiones de mayor pendiente.

Comparando los valores de la AME de la tabla 11 con los datos de la tabla 10, se puede decir que los mejores datos estadísticos, en cuanto a varianza y error estándar, no son los de mejor AME.

Admitiendo que los valores de la AME de las muestras *cruda* y *modificada* son los de mejor condición estadística, estos resultan ser la de la segunda alimentación para el lodo *LOCRI1*, y para la de *LOMRI2* en la primera alimentación; esto permitió decir que la inmovilización sí da efectos positivos. Si el análisis se hace con la de mayor pendiente, aunque la conclusión es la misma, los valores ya corresponden a las muestras *LOCRI2* y *LOMRI1*, en la primera y segunda alimentación respectivamente; este último método de selección es válido de acuerdo con datos estadísticos de la prueba T, el análisis de varianza, los coeficientes de correlación y  $R^2$ .

#### **Evaluación del efecto de presión selectiva en la AME de un lodo inmovilizado en los soportes de PVC**

De acuerdo con los resultados de la tabla 11, admitiendo como método de selección para la determinación de la AME el de mayor pendiente, la presión selectiva aplicada a un lodo que se inmoviliza sí mejoró su AME, pues los valores para las muestras *LOMRI1* y *LOMRI2* que fueron mayores en la segunda alimentación son superiores a los de las muestras *LOCRI1* y *LOCRI2*, que presentan su mejor valor en la primera alimentación. Según los datos para las dos mejores AME que se encuentran y que corresponden a *LOMRI1* (segunda alimentación) y *LOCRI2* (primera alimentación), se puede concluir que los lodos *crudo* y *modificado* inmovilizados tienen una diferencia apreciable en los ml biogás/g SSV \* h, y es mayor en algo más del 114% el del lodo *modificado*.

#### **Evaluación del efecto de la inmovilización en la AME de un lodo crudo**

Se cuantifican los efectos de la inmovilización de un lodo comparando la capacidad de metanizar que tiene en los dos estados. Los datos de la AME de la muestra de lodo *crudo*, con inmovilización para los mejores valores y sin ella, permiten afirmar que se incrementan en poco más o menos un 12% por la inmovilización; entonces se puede decir que la inmovilización tiene poco efecto en la mejora de la AME del lodo *crudo*. Esto, aunque de manera muy baja, prueba las conclusiones de Lazarova *et al.* acerca de la mayor actividad de la biomasa fija [2].

#### **Arranque y operación de los reactores**

Los estudios al respecto son de importancia porque se ha encontrado que últimamente no ha sido tan amplia la implementación de esta tecnología básicamente, según Foresti *et al.* por los problemas encontrados en el arranque del reactor y en la dificultad para mantener en forma estable su operación [11].

Los valores de los AGV a lo largo de los reactores *ART* y *ARC*, según las tablas 13 y 14, manifiestan que el comportamiento del primer reactor es mejor con valores de cerca de 3 en el último 50% del recorrido.

En relación con la producción de biogás se puede decir que ésta aumenta a medida que se incrementa el caudal alimentado; es muy baja (menor de  $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$ ) hasta caudales de sustrato alimentados mayores a unos 5 ml/min. Es decir, básicamente los últimos tres caudales ensayados resultan con producciones de biogás por encima de este valor, y llega finalmente a un promedio de cerca de 0,5. En términos generales, la mejor producción de biogás se tiene con el lodo *modificado*.

La capacidad buffer durante el arranque se mantiene, en términos generales, entre 0,25-0,45; hay tendencia a llegar a valores superiores a 0,45 en las experiencias con los dos menores tiempos de retención hidráulica probados. La mayor estabili-

dad se encuentra con el segundo caudal experimentado; durante el período de arranque los mayores valores en la capacidad buffer las presenta el reactor *ART*. De acuerdo con los valores de las tablas 13 y 14, a lo largo de los reactores se encuentran valores de capacidad buffer adecuados, que disminuyen a medida que la muestra avanza; en este caso se observa mejor comportamiento para el reactor que opera con la muestra *modificada*.

Durante el arranque de los reactores, por lo general para todos los caudales ensayados se encontró que el pH se mantiene en promedio en un intervalo de 6,2-7,3, intervalo que se ajusta a las consideraciones adecuadas que hace Novaes [12]; la mayor inestabilidad la presentan los dos primeros caudales probados, sólo el tercero presenta una estrecha variación del pH. En términos generales los mayores valores corresponden a los del reactor que emplea la semilla *cruda*. El comportamiento del pH a lo largo de los reactores de acuerdo con los datos de las tablas 13 y 14, indica pocas variaciones a medida que se avanza hacia la salida; en este caso se observan valores del pH superiores para las muestras del reactor *ART*.

Los valores de la DQO del efluente durante el período de arranque de los reactores muestra amplia variación (en promedio de 100-400), pero con una tendencia a ser más estrecha la variación en los mayores caudales experimentados. Los valores correspondientes al reactor *ART*, sobre todo en los de menor caudal, son superiores a los del *ARC*, pero esto es menos visible en los mayores caudales experimentados; en el último las diferencias son pocas. Las variaciones en la DQO a lo largo de los reactores según las tablas 13 y 14, que en el reactor *ART* son menores que en el *ARC* y además se puede decir que es en la primera mitad de los reactores en donde básicamente se consigue la disminución de la DQO.

### Conclusiones

- Con el proceso de inmovilización en los soportes de PVC se consigue incrementar la biomasa *cruda* y *modificada* en el reactor.

- Para iguales períodos de tiempo, empleando el mismo sustrato en la inmovilización, los aumentos de la biomasa cruda y modificada no son los mismos, seguramente porque las poblaciones que la conforman son diferentes.
- La AME de las muestras de biomasa cruda inmovilizada en la primera alimentación son superiores a las correspondientes en la segunda alimentación; para la modificada la situación es la contraria.
- La AME de la muestra cruda inmovilizada es superior a la que reporta en condición libre, es decir, el proceso de inmovilización permite mejorar la AME.
- La AME de la muestra modificada e inmovilizada, es superior a la de la cruda en idéntica condición; es decir, el incremento tan alto de la biomasa en el período de inmovilización que se ha dado en la última muestra no mejoró la población metanogénica.
- De acuerdo con la DQO removida, la producción de biogás y los parámetros pH y capacidad buffer evaluados en el efluente durante la fase de arranque de los reactores con biomasa inmovilizada, el reactor con la muestra modificada presenta mejores condiciones de operación.
- La evaluación espacial de las variables de control en los reactores permite decir que el reactor de mejores condiciones de operación es el que opera con la muestra *modificada*, en el cual se encontró una remoción de cerca del 80% de la DQO en poco más o menos la mitad del reactor, es decir, en tiempos de retención muy cercano a cuatro horas. Esto mismo se puede deducir con las demás variables evaluadas.

### Referencias

1. Pakula, R. and Freeman, A. *A new continuous Biofilm Bioreactor for Immobilized oil-Degrading Filamentous Fungi Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 49. pp. 20-25. 1996.
2. Lazarova, V. and Manen, J. "Biofilm Characterization and Activity Analysis in Water and Wastewater

- Treatment". *Review Paper. Wat. Res.* Vol. 29. No. 10. pp. 2.227-2.245. 1995.
3. Kuroda, M. *et al.* "Methanogenic Bacteria adhered to solid supports". *Wat. Res.* Vol. 22. No. 5. pp. 653-656. 1998.
  4. Characklis, W. G. *et al.* "Dynamics of Biofilm Processes: Methods". *Water Res.* Vol. 16. pp. 1.207-1.216. 1982.
  5. Bryers, J. and Characklis, W. "Early Fouling Biofilm Formation in a Turbulent Flow System: Overall Kinetics". *Wat Research.* Vol. 15. pp. 483-491. 1981.
  6. Zamariolli, D. M. *et al.* "Degradación de pentaclorofenol (PCP) en el reactor anaeróbico horizontal de lecho fijo (RAHLF)". *V Taller y Seminario Latinoamericano. Tratamiento anaerobio de aguas residuales.* Viña del Mar Chile. pp. 1-6. 1998.
  7. Zaiat, M. *et al.* "Spatial and temporal variations of monitoring performance parameters in horizontal-flow anaerobic immobilized sludge (HAIS) reactor treating synthetic substrate". *Wat. Res.* Vol. 31. No. 7. pp. 1.760-1.766. 1997.
  8. Joo-Hwa, T. "Performance of Anaerobic Packed-Bed System with Different Media Characteristic". *Wat. Sci. Tech.* Vol. 34. No. 5-6. pp. 453-459. 1996.
  9. Samson, R. *et al.* "Immobilized Cells Systems in anaerobic digestion processes". En: *Tyagi, R. d. Wastewater treatment by Immobilized Cell.* C.R.C. Press. pp. 153-190. 1990.
  10. Verrier, D. *et al.* Initial adhesion of Methanogenic bacteria to polymers. *Biotech. Letters.* Vol. 9. No. 10. pp. 735-740. 1987.
  11. Foresti, E. *et al.* Horizontal-Flow anaerobic immobilized sludge (HAIS) reactor for paper industry wastewater treatment. *50<sup>th</sup> Pardue Industrial Waste Conference Proceedings.* Ann Arbor Press, Inc. Chelsea. Michigan 48118. Printed in U.S.A. pp. 421-425. 1995.
  12. Novaes, R. F. "Microbiology of Anaerobic Digestion". *Wat. Sci. Tech.* Vol. 18. No. 12. pp. 1-14. 1986.