

# ESTUDIO DE LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y DE LAS BIOPELICULAS ANAEROBIAS, COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO CONTINUO EN DOS FASES DE LA FRACCION ORGANICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

E.F. CASTILLO\*, M. VERGARA\*\*, L.P. ARENAS\*\*, C. SANDOVAL\*\*, M. EPALZA\*\*

Universidad Industrial de Santander

\* Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales – CEIAM

\*\* Grupo de Investigación en Digestión Anaerobia

ceiam@uis.edu.co

Fecha Recepción: 15 de Mayo de 2007

Fecha Aceptación: 13 de Abril de 2008

---

## RESUMEN

El proceso de digestión anaerobia para el tratamiento de Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos FO-RSU en una fase ha demostrado tener buenos resultados al remover la totalidad del carbono fácilmente biodegradable para un sustrato procedente de la FO de los RSU [3]. Investigaciones recientes muestran también que la separación de las fases en la digestión anaerobia favorece el desempeño global del proceso, obteniéndose un mayor porcentaje de metano en el biogás generado y un biosólido más estable comparado con el proceso en una fase. Sin embargo uno de los factores que más influye en el tratamiento anaerobio en una y dos fases es el desarrollo de la hidrólisis enzimática, siendo esta la etapa inicial del proceso en la cual se obtiene la degradación de la FO de los RSU hasta ácidos orgánicos, alcoholes, aminoácidos y carbohidratos [5].

La digestión anaerobia se analiza en un sistema de dos fases y los parámetros más relevantes a estudiar son: el tiempo de retención hidráulica (TRH), la temperatura, la formación, la caracterización y la evaluación de la microbiota en la Biopelícula Anaerobia, la caracterización de la microbiota responsable de la Hidrólisis, la evaluación del índice de hidrólisis de la fracción celulósica, además del diseño y construcción de un nuevo sistema de biorreactores y la medición de la producción específica de metano. En el desarrollo de la investigación se hace énfasis en la caracterización y la correlación de los microorganismos que intervienen en el proceso de digestión anaerobia en dos fases y el seguimiento in-situ de la biopelícula sobre un soporte seleccionado.

**Palabras claves:** Digestión anaerobia, Biopelícula, Hidrólisis, Metanogénesis

## ABSTRACT

The anaerobic digestion process for the urban solid waste organic fraction (USWOF) by one phases had showed good results for removing of the biodegradable total carbon for a substrate of the USWOF. The recent researches had also showed that anaerobic digestion in two phases favors the global performance of the process, obtaining itself a greater methane percentage in the biogas and a more stable biosolid if it is compared with a process in one phase. However, one of the factors more influence in the anaerobic treatment in one and two phases is the development of the enzymatic hydrolysis, being this first stage of the process in which the degradation of the USWOF is obtained until organic acids, alcohol, amino acids and carbohydrates. [5]

The anaerobic digestion will be analyzed in a two phases system and the most relevant parameters to study are: the time of hydraulic retention (THR), the temperature, the formation, the characterization and the evaluation of microbiota in the anaerobic biofilm, the characterization of microbiota responsible for hydrolysis, the evaluation of the hydrolysis index of the cellulose fraction, in addition of the design and

construction of a new system of bioreactors and the measurement of the specific methane production. In the development of the research emphasis in the characterization and the correlation of the microorganisms that take part in the process of anaerobic digestion in two phases and the follow in-situ of the biofilm on a selected support.

**Keywords:** *Anaerobic digestion, Biofilm, Hydrolysis, Metanogénesis*

---

## INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia en dos fases; consiste de una etapa inicial de hidrólisis-acidogénesis y en una segunda etapa de metanogénesis, esta separación implica la conformación de una biota específica para cada etapa. [4, 7] El efecto de la etapa hidrolítica en el proceso global es muy significativo, dado que en la medida en que aumente la concentración de sustancias solubles o hidrolizadas de menor tamaño molecular como productos generados en ésta fase y su posterior destino como sustrato para las siguientes etapas del proceso, es de esperarse un mayor rendimiento de la fase metanogénica y por ende un incremento en la eficiencia global del proceso anaerobio. De esta manera la fase hidrolítica constituye la etapa limitante del proceso, siendo su estudio de gran relevancia para establecer las condiciones de operación más favorables (temperatura, pH y tiempo de retención hidráulico) que permitan la especialización de ésta fase, valorado con los niveles de producción de ácidos grasos volátiles por kilogramo de sustrato alimentado y el índice de hidrólisis.

La formación de la biopelícula anaerobia en reactores de lecho fijo está influida por las características físicas del soporte tales como; rugosidad, área superficial específica, tamaño de poro. [2, 8, 6] Se han realizado numerosos estudios con soportes como el poli vinilo de carbono (PVC), materiales cerámicos, espumas de poliuretano, bambú, anillos rasching, en los cuales se ha encontrado diferentes porcentajes de remoción de Demanda Química de Oxígeno DQO de efluentes de aguas residuales. Otro factor muy importante en la formación de la biopelícula es el tipo de sustrato a tratar y las condiciones hidrodinámicas a las cuales son sometidas.

## METODOLOGÍA

Para la puesta en marcha y operación del biorreactor Hidrolítico Acidogénico se utiliza como sustrato la FO de RSU, variando las condiciones de operación tales como la temperatura y el tiempo de retención hidráulico TRH. Los pasos que se siguieron fueron:

### Selección del sustrato a hidrolizar

El sustrato a hidrolizar es la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos representada principalmente por los residuos procedentes de plazas de mercado del área metropolitana de Bucaramanga, con contenidos equivalentes al 81,2 % de Materia Orgánica Fácilmente Biodegradable y un 48 % de Carbono Orgánico Total (COT), alto contenido de sustancias solubles y extraíbles en agua caliente (46,89 %), contrario a lo observado en el porcentaje de extraíbles cuando se usa como solvente el etanol. El sustrato se somete a un pretratamiento físico de molienda para llevarlo a diámetros de partícula entre 2 y 4 mm.

### Inoculación y arranque

La biota seleccionada fue un lodo mixto en proporción 1:1 conformado por lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Río Frío Girón (Santander), y el lodo procedente de un biodigestor para excretas porcícolas ubicado en la Mesa de los Santos (Santander). Para inocular el biorreactor Hidrolítico se tomó un volumen de lodo mixto (4 L) equivalente al 16,7 % del volumen efectivo de operación del reactor (24 L).

### Experimentación

Se establecen como condiciones de operación las correspondientes a un diseño factorial  $2^2$ , con dos niveles y dos factores variando las temperaturas

en el rango mesófilico y termófilico (35 °C y 55 °C) y los tiempos de retención hidráulico de 10 y 15 días. Mientras que algunas otras variables de proceso tales como; el pH, los ciclos de agitación, el tamaño de partícula y composición del sustrato alimentado y el volumen de reacción se mantienen constantes.

Para la evaluación de la formación, crecimiento y operación de una biopelícula se realizó el montaje de una batería de experimentación para evaluar diferentes soportes (orgánicos e inorgánicos) de forma simultánea y en iguales condiciones de operación (temperatura, flujo afluente y efluente y concentración de sustrato). Los reactores son inoculados con un efluente proveniente de un reactor anaerobio especializado en la fase metanogénica de residuos sólidos orgánicos y una solución al 1 % en peso de ácido acético y sacarosa (AAS), se inoculan con 200 ml del efluente anaerobio y 250 ml de solución de AAS. El seguimiento y monitoreo de los reactores que conforman la batería de experimentación se efectúa diariamente, manteniendo una operación bajo condiciones Batch, en donde el sistema es alimentado diariamente con 20 ml/día de solución de AAS y se extrae igual cantidad del efluente.

## EQUIPOS Y TÉCNICAS ANALÍTICAS

- Sistema biorreactor. Se utilizó un biodigestor de 30 litros con un volumen útil de 24 litros, en acero inoxidable con un sistema pistón en PVC de diámetro de 3 pulgadas, junto con una válvula de globo para la alimentación (Figura. 1).
- La batería de experimentación está conformada por dos (2) reactores de 500 ml, con sistema de agitación (200 rpm) y un baño de calentamiento con controlador de temperatura (38°C) (Figura 2).

Las muestras extraídas son sometidas a los análisis de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales (ST), Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV), Ácidos Grasos Volátiles (AGVs) y Alcalinidad, los cuales son evaluados de acuerdo con los protocolos de análisis del Standard Methods [1], el pH es medido con un pH-metro (Hanna Instruments HI 8314) también se evalúa la actividad metanogénica mediante el montaje de botellas de marriott en la que se mide el desplazamiento de una solución de Hidróxido de Sodio.



Figura 1. Sistema del biorreactor hidrolítico.

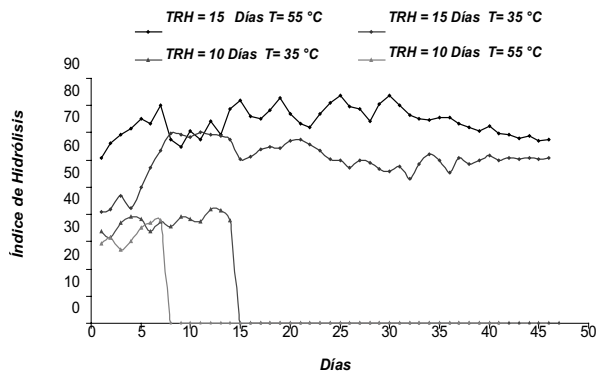


Figura 2. Batería de experimentación formación de biopelícula anaerobia.

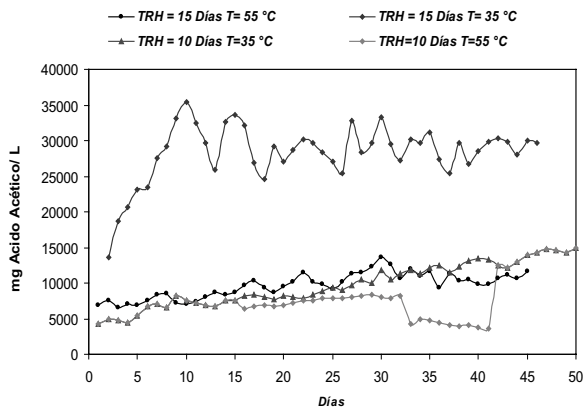
## RESULTADOS

Para la evaluación del índice de hidrólisis se parte del principio que el desempeño de la etapa hidrolítica conlleva al desarrollo de la separación de fases en el efluente (un licor con carga orgánica soluble y un biosólido que contiene la fracción orgánica no solubilizada), puede utilizarse la determinación del índice global de hidrólisis a partir de las DQO's de las fases nombradas como una buena aproximación inicial, ya que en definitiva este análisis revela la concentración de compuestos orgánicos solubilizados que están disponibles para la evolución de los procesos metanogénicos.

En la figura 3 se puede observar que para los experimentos llevados a cabo con TRH de 10 y temperaturas mesofilicas y termofilica el índice de hidrólisis durante los primeros alcanza un valor máximo de 43%, después de lo cual se inicia un descenso hasta llegar a un valor nulo debido a que no se generó un efluente soluble o hidrolizado para evaluar la DQO como consecuencia de la saturación del sistema por sólidos afectando la capacidad simbiótica de los microorganismos para asimilar la cantidad de sustrato adicionado.



**Figura 3.** Índice de hidrólisis Biorreactor hidrolítico.



**Figura 4.** Ácidos Grasos Volátiles Biorreactor hidrolítico

Para la condición evaluada con TRH de 15 días a la temperatura de 35 °C el índice de hidrólisis presenta un incremento que va desde el 40% hasta el 70% durante los primeros siete días de experimentación, periodo en el cual también se registra una caída súbita del potencial de hidrógeno en el sistema, favoreciendo de esta manera la tasa de crecimiento de los microorganismos hidrolíticos-acidogénicos y por ende un aumento

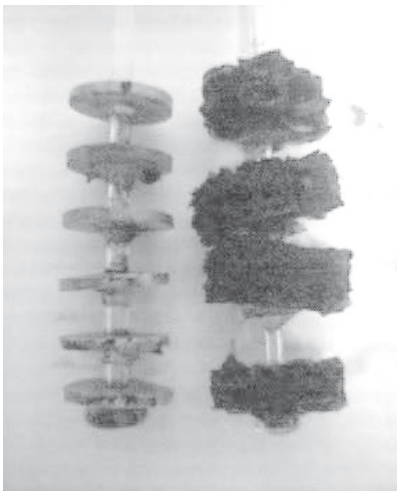
en el desempeño de la hidrólisis. Sin embargo, al final de la experimentación se alcanzó un índice de hidrólisis promedio equivalente al 60%. Mientras que para la temperatura de 55°C se puede apreciar un incremento del índice del 60% hasta del 80% durante los primeros 7 días, periodo en el cual también se registra una caída significativa del potencial del hidrógeno; sin embargo, a partir de este día se presenta una estabilidad del pH, mientras que el índice de hidrólisis genera una serie de fluctuaciones alcanzándose un valor promedio de 70% al cabo del día 45 cuando finaliza la experimentación.

Con respecto a la concentración de Ácidos Grasos Volátiles AGV's, se puede observar en la Figura 4 que el experimento con mayor producción (30 g Acido Acético/lit) corresponde al ensayo evaluado bajo condiciones de TRH de 15 días y temperatura de 35 °C. En ésta fase del proceso global de digestión anaerobia se espera obtener la mayor cantidad posible de (g AGV's/kg sustrato) con el fin de tener una mayor proporción de materia orgánica hidrolizada o soluble para la posterior fase de metanogénesis, ya que de esta forma el porcentaje de fijación de carbono como metano aumenta. Es así como se obtuvo una producción de g AGV's / kg de sustrato alimentado (409,09 g AGV's/kg sustrato) bajo condiciones de TRH de 15 días y una temperatura de 35 °C, la cual comparada con los otros experimentos presentó un mayor valor; mostrando como resultado que esta corresponde a la condición de operación más favorable para el desempeño del biorreactor hidrolítico-acidogénico de la (FO-RSU).

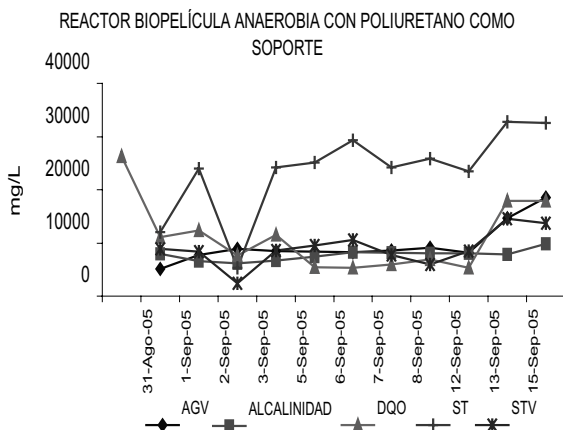
Con respecto a la formación de la biopelícula anaerobia sobre los dos soportes seleccionados se puede observar una mayor fijación de biopelícula sobre el soporte orgánico (tusa de mazorca) con respecto al soporte inorgánico (espuma de poliuretano) de acuerdo con la fotografía presentada en la Figura 5. Este comportamiento puede ser consecuencia del área superficial de la tusa, la cual es mayor comparada con la espuma de poliuretano, favoreciendo la fijación de la biopelícula sobre el soporte. La espuma de poliuretano, aunque presenta una menor fijación de biopelícula, ofrece una mayor resistencia a su degradación con el tiempo de experimentación. En la Figura 6 se observa el comportamiento de la espuma de poliuretano en forma cilíndrica como soporte para la fijación de la biopelícula en las

variables a medir. La concentración de SST se mantuvo en el intervalo de 5.000 a 32.000 mg/L, la DQO, los STV y la alcalinidad presentan un comportamiento similar.

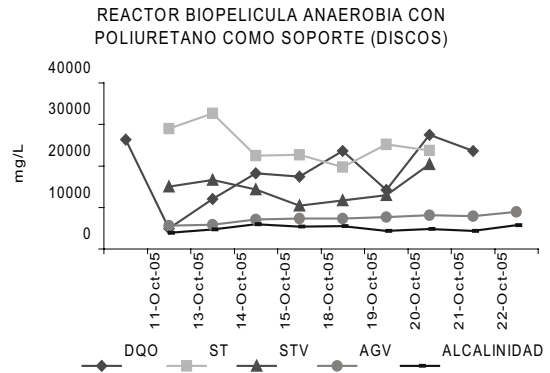
En la Figura 7 se muestra que la alcalinidad y la concentración de AGVs presentan un comportamiento constante en el intervalo de 5.000 a 10.000 mg/l. Sin embargo, los ST son altos con valores entre 20.000 a 30.000 mg/L. Por el contrario la DQO presenta una fuerte disminución al inicio de la experimentación y posteriormente tiende a crecer a valores de 25.000mg/l y en la Figura 8 se observa que el contenido de ST en concentraciones que van de 15.000 a 55.000 mg/L. La alcalinidad y los AGVs se mantienen en valores constantes menores de 10.000 mg/L.



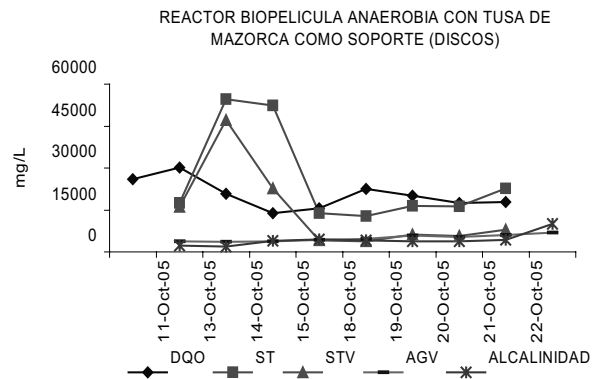
**Figura 5.** Formación biopelícula sobre los soportes de poliuretano y tusa de mazorca.



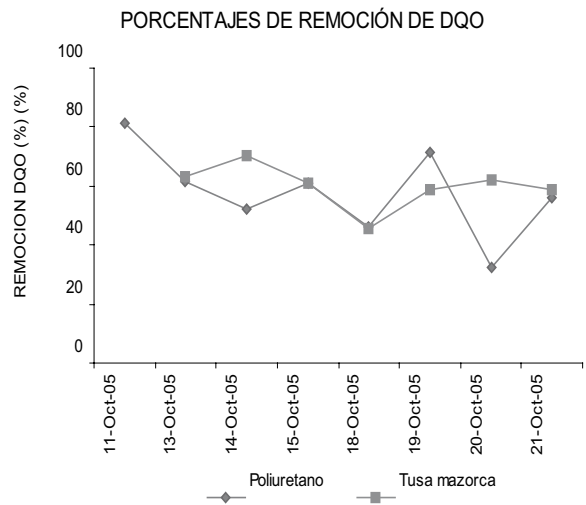
**Figura 6.** Comportamiento batería de biopelícula anaerobia con espuma de poliuretano en forma cilíndrica como soporte.



**Figura 7.** Comportamiento del reactor de biopelícula Anaerobia con poliuretano como soporte (discos).



**Figura 8.** Comportamiento reactor biopelícula anaerobia con tusa de mazorca como soporte (discos)



**Figura 9.** Porcentajes de remoción de DQO de reactores biopelícula anaerobia con poliuretano y tusa de mazorca como soporte.

En la Figura 9 se puede apreciar los valores de remoción de DQO de los dos soportes, la tusa de mazorca mantiene un comportamiento con menos fluctuaciones comparado con el de poliuretano. El porcentaje promedio de remoción fue de 55 % para el poliuretano y de 60 % para la tusa de mazorca.

## CONCLUSIONES

El mayor índice de hidrólisis (80%) se obtuvo en el experimento llevado a cabo a un TRH de 15 días y una temperatura de 55°C, sin embargo, la condición más favorable de operación del biorreactor fue la desarrollada a un TRH de 15 días y temperatura de 35 °C dado que se alcanzó la mayor producción específica de AGV's (409,09 g AGV's/kg) a pesar de que presentó un índice de hidrólisis menor (70%).

Los datos encontrados durante la experimentación con los soportes de tusa de mazorca y poliuretano son preliminares, sin embargo, inicialmente se considera favorable trabajar con la tusa de mazorca debido a que esta presentó un comportamiento con menos fluctuaciones en los parámetros evaluados. Adicionalmente el porcentaje promedio de remoción de DQO la tusa de mazorca (60%) fue mayor que el del poliuretano (55%). Se estima realizar la experimentación con los otros soportes preseleccionados.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] American Public Health Association—VERRIER, D.; MORTIER, B.; ALBAGNAC, G, American Water Works Association—AWWA; Water Pollution Control Federation— WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed., 1998.
- [2] BREITENBUCHER, K; SIEGL, M.; KNUPFER, A.; RADKE, M. Open-pore sintered glass as a high-efficiency support medium in bioreactors: new results and long-term experiences achieved in high-rate anaerobic digestion, *Water Sci. Technol.* 22 (1990) 25–32.
- [3] CASTILLO, E.; Arellano, V. Estudio de las condiciones de operación de la digestión anaerobia de RSU. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química. Tesis de Grado. 2003.
- [4] CHRISTOF, H.; MARTIN, W.; KARL-HERNZ, R.; GEORG, M.G. Two stage anaerobic fermentation of organic waste in CSTR and UFAF reactors. *Bioresource Technology*, 81 (2002), 19 – 24.
- [5] PAVLOSTATIS , S.G. and GIRALDO-GOMEZ, E. Kinetics of Anaerobic Treatment. En: *Wat. Sci. Tech.* Vol. 24, No. 8. (1991); pp. 35-59.
- [6] PICANCO, A.P.; VALLERO, M.V.G; GIANOTTI, E.P; ZAIAT, M.; BLUNDI, C.E. Influence of porosity and composition of supports on the methanogenic biofilm characteristics developed in a fixed bed anaerobic reactor, *Water Sci. Technol.* 44 (2001) 197–204.
- [7] SCHOBER, G.; SCHAFFER, J.; SCHMID-STAIGER, U.; TROSCHE, W. One and two stages digestion of solid organic waste. *Water Research*, 33, 854 – 860.1990.
- [8] VERRIER, D.; MORTIER, B.; ALBAGNAC, G. Initial adhesion of methanogenic bacteria to polymers. *Biotechnol Lett* 1987;9(10):735–40.