

Two-phase anaerobic treatment with a UASB reactor

**A. Díaz, E. Behling, M. Herrera, E. Gutiérrez, S. García, E. Chacín
N. Fernández y C.F. Forster***

*Departamento de Ingeniería Sanitaria, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia. Apartado 526, Maracaibo 4001-A, Venezuela*

E-mail: nferman@luz.ve

**School of Civil Engineering, The University of Birmingham
Edgbaston, Birmingham B15 2TT, United Kingdom*

Abstract

A UASB-type reactor was used to apply anaerobic treatment to synthetic wastewater (soluble starch) in a two-phase system to determine the organic load-handling capacity of these systems as well as resistance to heavy metals, such as lead and copper. A two-phase system was used: a continuous-flow a ciclogenic reactor in phase 1 and a UASB metanogenic reactor in Phase 2. The latter was fed by gravity with the effluent from Phase 1. Three different organic loads were applied to the system: 10.0, 13.3 and 16.6 kg COD/m³d. For the metal studies, combinations of CuAc, CuCl₂, PbAc and PbCl₂ were used to determine the toxicity of different Pb- and Cu-forming compounds.

The results determined that the maximum organic load-handling capacity of the UASB reactor is 17 Kg COD/m³d with up to 95% and 80% efficiency in COD removal and methane yield, respectively, with a biogas production of 0.33 m³ CH₄/kgCOD_{removed}.

With respect to heavy metals, it was found that the toxic effect was more severe with chloride compounds than with acetate compounds.

Key words: Anaerobic treatment, phase separation, organic load, anaerobic digestion, toxicity.

Tratamiento anaerobio en separación de fases utilizando un reactor UASB

Resumen

Esta investigación está centrada en la aplicación del tratamiento anaerobio con la utilización de un reactor del tipo UASB (reactor de manto de lodo) [1] para tratar un agua residual sintética de almidón soluble en un sistema de dos fases, estudiando las cargas orgánicas capaces de ser manejadas y la resistencia a metales pesados como el plomo y el cobre.

Para este estudio se utilizó un sistema de dos fases constituido por un reactor acidogénico de flujo continuo y un reactor metanogénico UASB, alimentado por gravedad con el efluente del primero. Cuando las diferentes cargas orgánicas fueron investigadas se sometió el sistema a tres diferentes cargas, kgDQO/m³d: 10; 13.3; y 16.6 y se utilizaron combinaciones de CuAc, CuCl₂ y PbAc, PbCl₂ para determinar la toxicidad del Pb y Cu, formando diferentes compuestos.

Los resultados obtenidos determinaron que la segunda fase en este tipo de sistemas puede manejar cargas orgánicas de hasta 17 kgDQO/m³d con altas eficiencias en cuanto a remoción de DQO y producción de metano, 95% y 80% respectivamente, con una producción de biogas de 0.33

$\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kgDQO}_{\text{removida}}$. Con respecto a los metales pesados, se encontró que en combinación con cloruro el efecto tóxico fue más pronunciado que en la unión con el acetato.

Palabras claves: Tratamiento anaerobio, reactor de dos fases, carga orgánica, digestión anaerobia, toxicidad.

Introducción

Los sistemas de tratamiento anaerobios de aguas residuales se han utilizado ampliamente en muchas partes del mundo, con mayor popularidad en los países desarrollados debido a la energía que se obtiene a partir de las aguas residuales haciéndolos así atractivos y de gran utilidad [2,3,4].

El propósito de este trabajo es estudiar el empleo de los reactores UASB en fases separadas [5] con la finalidad de comprender su eficiencia en el manejo de diferentes cargas orgánicas y en su capacidad de aceptar tóxicos específicos como el Cobre y el Plomo.

Las cargas orgánicas aplicadas al sistema de dos fases fueron desde 10 hasta 16.6 Kg de DQO/ m^3d lo que originaría diferentes cargas orgánicas para cada fase debido a la diferencia de tamaño de los dos reactores utilizados en la investigación.

Con relación a las cargas orgánicas, se observó que para una carga orgánica aplicada al sistema de 13.31 Kg DQO/ m^3d , el mismo obtuvo su mayor eficiencia en cuanto a remoción de DQO y producción de metano.

El cobre y el plomo fueron utilizados como elementos tóxicos, bajo la forma de compuestos diferentes; en una de sus combinaciones se encontraban formando cloruros (cloruro de cobre y cloruro de plomo) y en la otra formando acetato (acetato de cobre y acetato de plomo). De los resultados obtenidos se pudo observar, que cuando el cobre y el plomo se encontraban formando compuestos con cloruros su nivel de toxicidad se incrementó respecto a cuando se encontraban formando compuestos con el acetato. Asimismo, se determinó que los dos metales pesados investigados fueron tóxicos en la fase acidogénica, pero no en la fase metanogénica.

Concluyéndose que en los sistemas anaerobios en fases separadas pueden ser utilizados ampliamente para aguas residuales con alto

contenido de materia orgánica y que son capaces de manejar cargas tóxicas moderadas sin ningún problema.

Metodología Experimental

Se utilizó un sistema anaerobio de dos etapas o fases, compuesto de un tanque acidogénico de flujo continuo y un reactor metanogénico tipo UASB.

Ambos reactores fueron construidos de plexiglass, diseñándoseles en su exterior una especie de camisa por donde circularía agua a una temperatura de 37°C.

El reactor acidogénico tenía un volumen vacío de 0.430 l, 60% del cual fue inoculado con un lodo pregranulado y acidificado. El contenido del reactor fue adecuadamente mezclado utilizando para ello un agitador magnético en el fondo del mismo y la alimentación con un agua residual sintética y nutrientes tal como se muestra en la Tabla 1, se hizo de manera tangencial por la parte baja de la columna.

El reactor metanogénico tenía un volumen vacío de 1.30 l. La columna fue inoculada en un 60% con el mismo lodo pregranulado utilizado en el reactor acidogénico, pero en este caso, no se empleó acidificación previa. La alimentación al reactor metanogénico se hizo desde el fondo del mismo, con el efluente suministrado por el reactor acidogénico, usando el flujo por gravedad. En el fondo del reactor se colocó una pequeña cantidad de grava para garantizar una distribución uniforme del flujo; la grava empleada tenía un diámetro promedio de 5 mm, de la cual un volumen de 44 ml y con 1 cm de altura fue colocada en el fondo del reactor. Antes que el efluente del reactor acidogénico entrara al reactor metanogénico, éste era neutralizado adicionando NaHCO_3 . El envase contentivo de la solución se conectó a un controlador automático de pH, para determinar de acuerdo al valor de éste, la cantidad de solución a adicionar.

Tabla 1
Composición del agua residual sintética

Constituyente	Concentración de Substrato
Almidón soluble	1.15 - 10.00 g/l
NH ₄ HCO ₃	0.28 - 2.26 g/l
Lab Lemco (Caldo)	0.50 g/l
NaHCO ₃	5 - 1000 g/l
KH ₂ PO ₄	0.027 - 0.25 g/l
K ₂ HPO ₄	0.035 - 0.28 g/l
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.13 g/l
MgCl ₂	0.085 g/l
CaCl ₂	0.04 g/l
FeCl ₂ · 6H ₂ O	0.64 g/l
NiSO ₄ · 6H ₂ O	500 µg/l
MnCl ₂ · 4H ₂ O	500 µg/l
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	500 µg/l
H ₃ BO ₃	100 µg/l
CoCl ₂ · 6H ₂ O	50 µg/l
CuSO ₄ · 5H ₂ O	5 µg/l
H ₃ PO ₄ · 12 MoO · 24H ₂ O	40 µg/l

El valor de control fue colocado a pH 7. En el tope de la columna se dispuso además un separador gas-sólido (GSS), el cual fue conectado a un colector de biogas. El diagrama de flujo del sistema puede verse en la Figura 1.

El volumen total del sistema fue de 1.730 l, de los cuales el reactor acidogénico representó un 25% del mismo. El gas producido por los reactores fue medido por desplazamiento de agua. Para este propósito un tanque de agua abierto a la atmósfera fue conectado a los dos colectores de gas. El agua utilizada fue acidificada para reducir la solubilidad de dióxido de carbono en ella, empleando H₂SO₄ a una concentración de 0,1 N. La Tabla 2 presenta las propiedades físicas de los reactores.

Control, muestreo y análisis del sistema

Las condiciones de monitoreo a ser mantenidas son temperatura dentro del reactor, presión atmosférica, temperatura ambiental, tasa de flujo influente, producción de biogas, contenido de metano, etc. Estos análisis proveerán las condiciones ambientales óptimas para el crecimiento de las bacterias específicas en los reactores acidogénico y metanogénico. Los paráme-

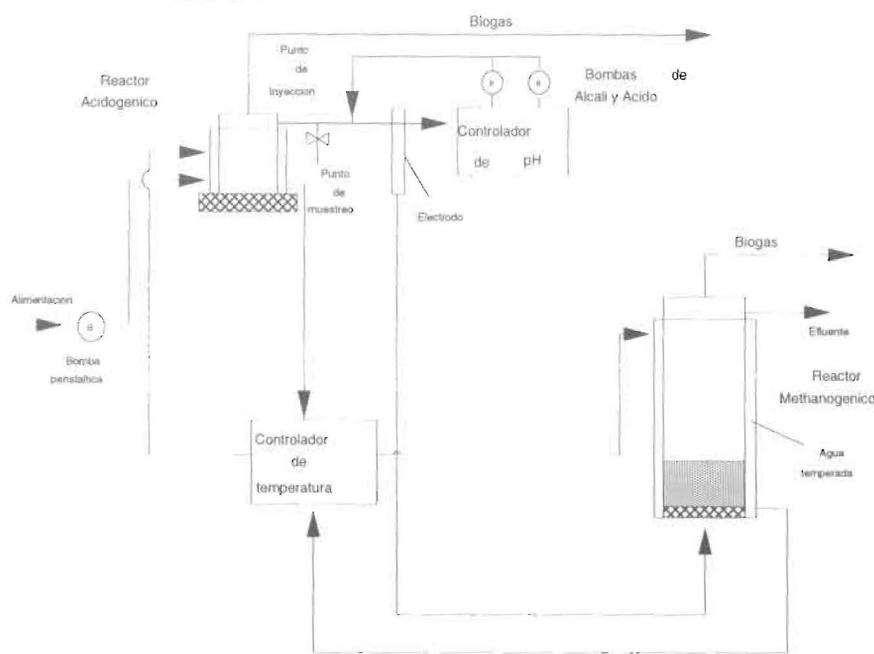


Figura 1. Diagrama de Flujo del Sistema

para determinar el comportamiento acidogénico fueron: pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST). La metodología empleada para la determinación de cada parámetro en estudio es la descrita por los métodos estándar de la AWWA.

le

completados con el resto de la muestra de agua residual con almidón en una proporción de 60% de agua residual y 40% de almidón, y dejado por 48 horas. La DQO inicial fue de 1150 mg/l. Después de 48 horas, se aplicó un flujo continuo con una carga orgánica de 33 kg de DQO/m³d y un tiempo de retención de 5.76 l/d. Esto resultó en un tiempo de retención total de 7.22 horas correspondió al reactor acidogénico y 1.48 horas al reactor metanogénico. La metodología empleada para los parámetros operacionales

se mantuvo a lo largo de la investigación en 37°C. Luego de alcanzar condiciones de estabilidad en el sistema, la DQO fue duplicada a 2300 mg/l. La carga orgánica inicial fue de 33 kg de DQO/m³d, pero

esto debió hacerse incrementando lentamente la carga orgánica y verificando en cada caso las condiciones de estabilidad en el sistema de tratamiento. Alcanzada la estabilidad del sistema para la carga anterior, se incrementó la DQO a 3000 mg/l, en la cual resultó que el reactor acidogénico alcanzó una carga orgánica de 40.17 Kg de DQO/m³d y el reactor metanogénico una carga orgánica de 13 Kg de DQO/m³d. Después de 12 días de trabajo con esta carga orgánica, la DQO se elevó a 4000 mg/l; esta condición se mantuvo por 14 días, tiempo después en el cual la DQO fue aumentada a 5000 mg/l causando una caída en la eficiencia total del sistema.

Efecto tóxico del cobre y plomo sobre el sistema

En la segunda parte de la investigación se utilizaron las mismas condiciones iniciales que para el estudio de las cargas orgánicas y se llegó

Tabla 2
Propiedades Físicas de los Reactores

Propiedades	Reactor Acido-génico	Reactor Metano-génico
Volumen Vacío (ml)	430	1300
Volumen Activo (ml)	270	780
Cámara de Aire (ml)	16	476
Altura Total (cm)	16	40
Altura Líquida (cm)	10.4	30
Diámetro Interno (cm)	7.5	7.5
Diámetro Externo (cm)	9.5	9.5
% del Volumen Total	25.0	75.0

Tabla 3
Parámetros operacionales aplicados al sistema anaerobio de dos fases

Reactor Acido-génico	Reactor Metanogénico		Sistema
	DQO (g/l)	OLR (kg DQO/m ³ d)	OLR (kg DQO/m ³ d)
15.39	1.03	4.56	3.83
30.79	2.07	9.17	7.65
40.17	2.95	13.00	10.00
53.56	3.90	17.27	13.31
66.95	5.20	23.36	16.60

Los reactores fueron controlados por los parámetros de control utilizados para el estudio del comportamiento del reactor acidogénico y metanogénico: pH, alcalinidad, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y demanda de Oxígeno (DQO) y demanda de Oxígeno (DQO). En el reactor metanogénico los parámetros de control fueron: pH, alcalinidad, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST). La metodología empleada para la determinación de cada parámetro en estudio es la descrita por los métodos estándar de la AWWA.

Condiciones iniciales de experimentación

Los reactores fueron controlados por los parámetros de control utilizados para el estudio del comportamiento del reactor acidogénico y metanogénico: pH, alcalinidad, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y demanda de Oxígeno (DQO) y demanda de Oxígeno (DQO). En el reactor metanogénico los parámetros de control fueron: pH, alcalinidad, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST). La metodología empleada para la determinación de cada parámetro en estudio es la descrita por los métodos estándar de la AWWA.

La temperatura se mantuvo a lo largo de la investigación en 37°C. Luego de alcanzar condiciones de estabilidad en el sistema, la DQO fue duplicada a 2300 mg/l. La carga orgánica inicial fue de 33 kg de DQO/m³d, pero

Parámetros operacionales

Reactor Acido-génico	Reactor Metanogénico
DQO (g/l)	DQO (g/l)
1.15	1.15
2.3	2.3
3.0	3.0
4.0	4.0
5.0	5.0

a un valor máximo de carga orgánica para el sistema de 13,31 Kg de DQO/m³d, la cual resultó ser la carga óptima de tratamiento. Después que el sistema alcanzó condiciones de estabilidad, determinadas por una producción constante de biogas y una remoción constante de DQO, se procedió a la agregación de los tóxicos en concentraciones de 0.5 mmol/l. El orden de agregado fue el siguiente: PbAc por 15 días, luego la adición de tóxicos fue parada por 3 días, tiempo en el cual el CuAc fue usado. Inicialmente los reactores acidogénico y metanogénico trabajaron como un sistema completo de tratamiento, agregando el tóxico al sustrato del reactor acidogénico para luego alimentar con el efluente de éste al reactor metanogénico. Para la segunda parte de este experimento, a fin de determinar cuál de las dos fases era la más afectada por los tóxicos, cada uno de los reactores fue alimentado independientemente. Para el reactor acidogénico el sustrato utilizado fue el almidón soluble preparado en un agua residual sintética con las mismas condiciones experimentales y se le agregaron como tóxicos solamente CuCl y PbCl.

Para el reactor metanogénico se preparó una mezcla de ácidos grasos equivalentes en DQO y carga orgánica a los experimentados cuando el sistema de dos fases se encontraba unido y se le agregaron los mismos tóxicos y en el mismo orden.

Resultados

La primera parte de esta investigación, se orientó a determinar la carga orgánica máxima que es capaz de ser tratada utilizando reactores tipo UASB en dos etapas o fases; en ella se encontró que el valor óptimo para operar estos sistemas es de aproximadamente 54 Kg de DQO/m³d para un reactor acidogénico, y de 17 Kg de DQO/m³d para un reactor metanogénico. Estos valores están asociados al hecho que bajo las condiciones antes indicadas, la remoción de DQO y la producción de metano son máximos. En la Tabla 4 se presentan los diferentes valores de remoción de DQO y de producción de metano para las diferentes cargas orgánicas aplicadas al sistema.

El resultado encontrado para un reactor metanogénico puede ser comparado con el en-

contrado por Lettinga y otros en 1989 [1] quienes determinaron que un sistema de tratamiento UASB en una planta completa de tratamiento de aguas residuales provenientes de una fábrica donde la materia prima son las papas, cuya agua residual resulta con alto contenido de almidón, puede ser operada a condiciones óptimas de 17 Kg de DQO/m³d, similar a la carga óptima encontrada para el reactor metanogénico en este experimento. La eficiencia de remoción del sistema durante su operación, al variar la DQO aplicada de 3000 a 4000 mg/l (4000 mg/l corresponde a una carga orgánica del sistema de 13.31 Kg de DQO/m³d), alcanzó el valor máximo de remoción de este parámetro (95%). Los mismos porcentajes de remoción de DQO se registraron en el sistema durante una semana completa, para posteriormente incrementar la carga orgánica a 16.6 kg de DQO/m³d del sistema en conjunto (DQO 5000 mg/l). A alcanzar estos valores se observó una pronunciada reducción en la remoción de la DQO, disminuyendo de manera porcentual desde un 95 a 20% después de 4 días de operación.

La producción después de 7 días de operación del sistema alcanzó condiciones de estabilidad, el metano producido fue 4.76 l/d lo que representó 2.75 m³/m³ de volumen de reactor por día, con un contenido promedio de metano del 75.7%. Esto se verificó para 3000 mg/l de DQO. Cuando la DQO fue elevada hasta 4000 mg/l, el porcentaje de metano obtenido fue de 80%, para un volumen de biogas colectado de 9.11 l/d (5.26 m³ CH₄/m³d). Un nuevo aumento en la DQO a 5000 mg/l originó una disminución abrupta en la producción de biogas. La Tabla 4 presenta la rata de producción para cada carga orgánica.

Del estudio de toxicidad realizado con la utilización de cobre y plomo a concentración de 0.5 mmol/l, relacionadas al cobre y plomo en el compuesto y no al compuesto total, se pudo comprobar el efecto de ellos al tratamiento anaerobio de las aguas residuales.

Cuando el sistema alcanzó condiciones de estabilidad la DQO removida fue de 86.77%, este período fue mantenido por 25 días, tiempo después del cual el PbAc fue adicionado al sistema (0.5 mmol/l Pb).

Una pequeña declinación en la remoción de DQO fue observada el día después (desde 86.77 a 80%). Las mismas condiciones fueron mantenidas por 15 días, tiempo en el cual la disminución de la remoción en la DQO fue de 86.77% a 79.59%. Luego de tres días sin la adición de tóxicos se colocó el CuAc al sistema, alcanzando una disminución más severa relacionada a la remoción de la DQO, la cual fue de 86.77 (alcanzada nuevamente con la recuperación) hasta 48.97%. Cuando los tóxicos usados fueron analizados en relación a la producción de biogas (l/d) o al porcentaje de metano, los resultados indican que tanto la producción de biogas como la concentración de metano en el biogas aumentaron con la adición de PbAc y/o CuAc, con mayor producción de biogas al utilizar CuAc.

Para la segunda parte de esta investigación los reactores, como se dijo anteriormente, se separaron alimentándose con diferentes sustratos ya que así fue requerido para mantener condiciones idénticas de experimentación. Las cargas orgánicas utilizadas para cada reactor fueron similares a las aplicadas cuando ellos operaron un sistema conectado en serie; la única diferencia radicó en el hecho de que los tóxicos se agregaron directamente en el sustrato de cada fase, a concentraciones de 0.5 mmol/l. Los tóxicos empleados fueron cloruro de plomo y cloruro de cobre. El propósito de este cambio fue determinar el impacto del Cu y Pb formando diferentes compuestos.

El resultado observado fue que se incrementó el nivel de toxicidad para el reactor acidogénico respecto al reactor metanogénico. El reactor acidogénico varió su pH, el cual debía permanecer en el rango de 4.3 a 4.9, a 6.5; para este valor de pH la acidogénesis en fases separadas no ocurre, lo que determinó una inhibición muy elevada de las bacterias acidogénicas por parte de los tóxicos usados. La Tabla 5 presenta los resultados de valores de pH obtenidos para el reactor acidogénico para los tóxicos usados. Por el contrario, el reactor metanogénico demostró una gran capacidad para asimilar la adición de los tóxicos en estudio, analizada a través de los parámetros DQO y la producción de biogas.

Del resultado de esta investigación se pudo determinar que contrario a lo que otras investigaciones [6,7,8] han especulado a la poca resis-

Tabla 4
Relación entre la carga orgánica (kg DQO/m³d), biogas producido y el porcentaje de metano en el biogas

OLR (Kg DQO/m ³ d)	Biogas (l/d)	Metano (%)
10	4.76	75.7
13.31	9.10	80.2
16.64	< 1.0	< 40

Tabla 5
Valores de pH en el reactor acidogénico para los tóxicos usados

Metal Pesado (mmol/l)	pH (Ion Ac ⁻)	pH (Ion Cl ⁻)
Cu 0.5	4.6 - 6.35	6.1 - 6.8
Pb 0.5	4.6 - 5.1	4.2 - 4.7

tencia de las bacterias metanogénicas, estas demostraron ser las más resistentes y las de mayor eficiencia en la remoción de tóxicos como los estudiados en esta experimentación.

Conclusiones

Se determinó que los sistemas de tratamiento anaerobios de reactores de tipo UASB pueden manejar cargas orgánicas bastante elevadas en el orden de 13 Kg de DQO/m³ d en un sistema de dos fases.

En un sistema de dos fases, la fase acidogénica es la que puede manejar cargas orgánicas más elevadas la cual es de aproximadamente 54 Kg DQO/m³ d, mientras que el reactor metanogénico la máxima carga orgánica aplicada no debe ser mayor de 17 Kg DQO/m³ d.

En un sistema de tratamiento anaerobio de aguas residuales, la fase acidogénica es limitante en relación al manejo o aceptación de metales pesados ya que la fase metanogénica es capaz de soportar dichos elementos con un mínimo de desajuste.

4. Las bacterias metanogénicas, son las más resistentes y son las que mejores condiciones poseen en la remoción de tóxicos como los estudiados en esta experimentación.

Referencias Bibliográficas

1. Lettinga, G., Hulshoff-Pol, L. W. UASB Process Design for Various Types of wastewater. *Water Science and Technology*, (1989), 24, 87-107.
2. Brunnetti, A. Physical-chemical Factors Affecting Start-up in UASB Digester. Proc. European Symp. Anaerobic Wastewater Treatment, Noordwijkerhout, Netherlands, (1983), 317-321.
3. De Zeeuw, W., Lettinga, G. Start-up of UASB Reactors. Proc. European Symp. Anaerobic Wastewater Treatment, Noordwijkerhout, Netherlands.(1983), 348.
4. Fernández, N.M. An Examination of the Anaerobic Treatment of Wastewater from Coffee Industries. PhD Thesis. University of Birmingham, England (1993).
5. Cohen, A., Breure, A. M.; van Andel, J. G., van Deursen, A. Influence of Phase Separation on the Anaerobic Digestion of Glucose. *Water Research*. (1980), 1439-1448.
6. Chiu-yue, L; Effect of Heavy Metals in Anaerobic Digestion. *Water Research*.(1992), 177-183.
7. Murray, W.D.; van den Berg, L. Effects of Nickel, Cobalt and Molybdenum on Performance of Methanogenic Fixed Film Reactors. *Appl. Env. Microbiol.* (1981), 42(3), 502-505.
8. Mosey, F.E. Assessment of the Maximum Concentration of Heavy Metals in Crude Sewage which will not inhibit the Anaerobic Digestion of sludge. *Water Pollution Control*. (1976), 10-12.

Recibido el 29 de Mayo de 1995

En forma revisada el 25 de Octubre de 1996

Referencias Bibliográficas

1. Lettinga, G., Hulshoff-Pol, L. W. UASB Process Design for Various Types of wastewater. *Water Science and Technology*, (1989), 24, 87-107.
2. Brunnetti, A. Physical-chemical Factors Affecting Start-up in UASB Digester. *Proc. European Symp. Anaerobic Wastewater Treatment*, Noordwijkerhout, Netherlands, (1983), 317-321.
3. De Zeeuw, W., Lettinga, G. Start-up of UASB Reactors. *Proc. European Symp. Anaerobic Wastewater Treatment*, Noordwijkerhout, Netherlands, (1983), 348.
4. Fernández, N.M. An Examination of the Anaerobic Treatment of Wastewater from Coffee Industries. PhD Thesis. University of Birmingham, England (1993).
5. Cohen, A., Breure, A. M.; van Andel, J. G., van Deursen, A. Influence of Phase Separation on the Anaerobic Digestion of Glucose. *Water Research*. (1980), 1439-1448.
6. Chiu-yue, L. Effect of Heavy Metals in Anaerobic Digestion. *Water Research*. (1992), 177-183.
7. Murray, W.D., van den Berg, L. Effects of Nickel, Cobalt and Molybdenum on Performance of Methanogenic Fixed Film Reactors. *Appl. Env. Microbiol.* (1981), 42(3), 502-505.
8. Mosey, F.E. Assessment of the Maximum Concentration of Heavy Metals in Crude Sewage which will not inhibit the Anaerobic Digestion of sludge. *Water Pollution Control*. (1976), 10-12.

Recibido el 29 de Mayo de 1995

En forma revisada el 25 de Octubre de 1996