

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRAULICO UN REACTOR UASB UTILIZADO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Diana Arroyave Gómez, Maribel González Arteaga y Darío Gallego Suárez.
Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Facultad de Minas.
Calle 55 N° 80-54 apto 523, margoiq@yahoo.com.

Palabras claves: Comportamiento hidráulico, tipo de flujo, dispersión

Resumen: El estudio fue realizado a partir de una prueba de trazadores que incluyó la búsqueda y selección de una sustancia trazadora apta para la digestión anaerobia (LiCl). Mediante de la aplicación de tres modelos para flujo real, Dispersión, Resnick y tanques en serie, se pudo concluir acerca del tipo de flujo predominante en el reactor. Se determinó también que los parámetros de diseño operacionales tales como la carga orgánica volumétrica, la velocidad superficial no corresponden a valores adecuados

Introducción.

En la actualidad, existe un gran problema en lo que respecta a los sistemas implementados para el tratamiento de aguas residuales, ya que la mayoría de las veces estos sistemas no se encuentran en condiciones óptimas de funcionamiento, debido principalmente a que el diseño y la operación no se realiza adecuadamente en la gran mayoría de los casos, lo que hace muy importante la evaluación constante de los sistemas de tratamiento de aguas residuales para garantizar el logro de los objetivos técnicos y económicos.

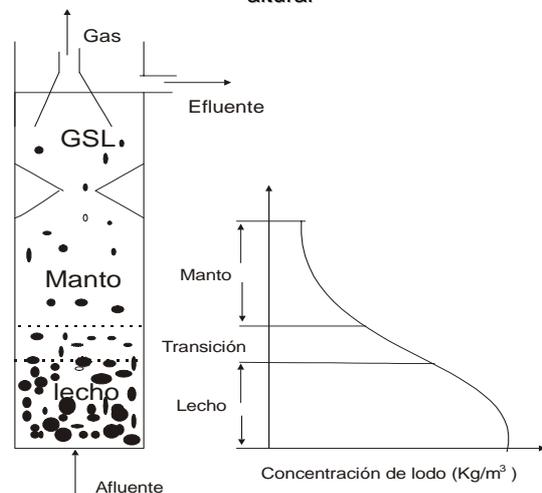
Los reactores (UASB) han sido ampliamente usados para el tratamiento de aguas residuales de baja y alta carga orgánica, de naturaleza soluble y compleja (4). La operación de éstos se basa en la actividad autorregulada de diferentes grupos de bacterias que degradan la materia orgánica y se desarrollan de manera continua, formando un lodo biológicamente activo dentro del reactor, siempre y cuando en el interior se tenga un buen contacto con el agua residual y un tiempo de permanencia suficiente para alcanzar una alta eficiencia en la remoción de material orgánico biodegradable (10, 12). Para garantizar una buena operación de este tipo de reactores, es necesario evaluar su comportamiento hidráulico con el fin de identificar el tipo de flujo y los problemas que lo afectan.

En la Figura 1 se muestra un esquema del reactor UASB. Estudios realizados por Hulshoff y Lettinga (1988), identificaron diferentes zonas hidráulicas en un reactor UASB; en el lecho de lodo el flujo es tipo pistón, en el manto de lodo el comportamiento es turbulento y el flujo puede llegar a ser completamente mezclado y en la

parte del sedimentador, el flujo es laminar parecido a flujo pistón.

Este reactor tiene entonces un modelo de flujo pistón- mezcla completa- pistón y de una forma global, este comportamiento se inclina mas hacia flujo completamente mezclado (2)

Figura 1. Representación esquemática de un reactor UASB y la variación de la concentración de lodo con la altura.



En este trabajo se presenta el estudio hidráulico para determinar la distribución de flujo, tiempo real de residencia y los parámetros de diseño de un reactor UASB. Finalmente se concluye acerca de su desempeño actual con los parámetros de diseño que posee

1. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR UASB

La alimentación al reactor es tipo flauta, el agua residual que se trata entra y se distribuye por el fondo a través de cuatro anillos cada uno

conformado por 7 boquillas. El reactor está formado por una primera cámara que tiene una altura de 2,64 m donde se encuentran seis sondas o sitios de muestreo cada 0,5 m hasta una altura de 2,5 m, las que se utilizan para realizar el seguimiento de la variación de la concentración de lodo en el reactor con el perfil de lodos. El resto de la altura lo constituye la zona de separación GSL. En la Tabla 1 se aprecia las dimensiones del reactor en estudio.

Tabla 1. Dimensiones del reactor UASB

Dimensiones	Medidas
Longitud (m)	9,0
Ancho (m)	6,0
Altura útil (m)	4,0
Altura total (m)	4,45
Area (m ²)	54,0
Volumen útil (m ³)	216,0
Volumen total (m ³)	240,0
Caudal (L/s)	2,5
Tiempo teórico de retención	24h

Fuente : Universidad de Antioquia, 1990

Del seguimiento de los perfiles de lodo del reactor en cuestión, se puede deducir que el lodo biológico es granular y que el reactor cuenta con un exceso exagerado de lodo que no es necesario para obtener una buena producción de biogás y por el contrario interfiere en el comportamiento hidráulico. (1)

2. Metodología

2.1 Metodología Experimental

Debido a que el estudio hidráulico del reactor es una descripción casi exacta de lo que sucede a nivel de distribución de flujo en su interior, es necesario que a la hora de realizarlo exista continuidad en el proceso para garantizar que los resultados de la evaluación hidráulica, sean confiables y permitan conocer a ciencia cierta los factores hidrodinámicos que lo afectan. Con el propósito de que esto se cumpliera fue necesario montar un sistema de alimentación alterna que proporcionara un caudal casi constante durante el tiempo que duró la prueba.

2.1.1 Prueba de trazadores.

Para realizar el estudio hidráulico del reactor UASB, se montó una prueba de trazadores (9). El procedimiento consistió en inyectar 240 gr de LiCl disuelto en 3 l de ácido acético al reactor

(volumen 240 m³ y un flujo de 2.5 l/s) por medio de una dosis instantánea correspondientes a 0,177 mgLi⁺/L asumiendo, según lo predicho teóricamente, que el reactor tiene un predominio de mezcla completa. Se seleccionó el LiCl como trazador porque el litio es un elemento inerte para las bacterias metanogénicas a concentraciones menores de 1 g/l. Se adicionó 2 ml de ácido nítrico a las muestras, para preservarlas hasta su posterior análisis (2). Se determinó la concentración de trazador a la salida durante intervalos de tiempo iguales (1 h) por dos tiempos de residencia teóricos. El método de análisis utilizado para la determinación de Li⁺ fue el de espectrofotometría de absorción atómica.

Tres condiciones que se tuvieron en cuenta por ser necesarias más no suficientes para garantizar el éxito de la prueba fueron: operación continua del reactor durante los 48h que duró la prueba, no hubo recirculación de líquido y caudal constante (2.5L/s).

2.2 Metodología de cálculo

Con los datos de concentración de trazador obtenidos, se realizó una serie de cálculos para obtener las funciones y curvas de distribución de flujos y tiempos de residencia.

Se determinaron los valores de E(t), F(t) y 1-F(t), y sus respectivas funciones de distribución adimensionales E(θ), F(θ) y C(θ). Estas funciones de distribución se utilizaron para evaluar el tipo de flujo del reactor por medio de los siguientes modelos: Dispersión, Tanques en serie (9) y el modelo de Wolf y Resnick (1963).

Se evaluaron también parámetros de diseño como son la carga orgánica volumétrica, la carga hidráulica volumétrica y la velocidad superficial promedio del fluido. Al comparar estos valores con los recomendados por la bibliografía para este tipo de reactores, se pudo comprobar el cumplimiento de dichas relaciones y su contribución al diseño. El estudio se completó con el valor del porcentaje de trazador recuperado que se puede determinar por medio de un balance de material para esta sustancia.

3. Resultados y Discusión

3.1 Curvas de distribución

Curva C(t). La distribución de la concentración del trazador en el efluente del reactor UASB se aprecia en la Figura 5.14.

Figura 2. Distribución de la concentración del trazador en el efluente del reactor UASB.

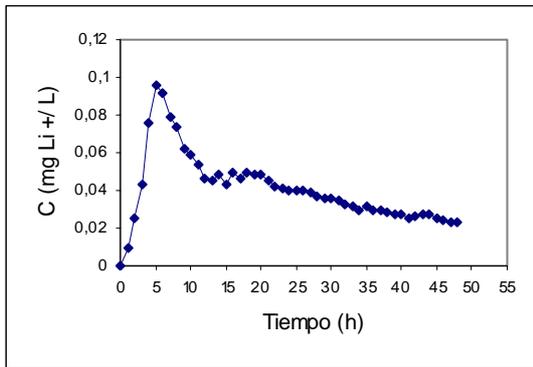


Tabla 2. Parámetros obtenidos para la curva de distribución de concentraciones de trazador en el efluente del reactor.

Parámetros	Valor
Varianza	213,7
Tiempo de residencia teórico (h)	24,0
varianza adimensional	0,371

Aunque la cantidad de datos obtenidos experimentalmente describe una tendencia definida de la curva de concentraciones, si se hubieran tomado muestras en intervalos de tiempo menores, posiblemente se habría apreciado una concentración máxima de trazador mayor que la que se observó.

En la Figura 2 se puede apreciar que cumplir dos tiempos de residencia teóricos (48 h) no fue suficiente para que alcanzara a salir la totalidad del trazador, es decir, se observa una cola larga decreciente al final pero con una tendencia muy lenta a cero, lo que hace pensar que el tiempo de residencia real del reactor es mucho mayor que el teórico calculado, debido a factores de flujo que lo alejan de la idealidad como se analizará posteriormente. Otro aspecto importante a considerar es que la concentración máxima de trazador (0,0953 mg/L) se obtiene muy rápidamente y mucho antes de cumplirse dos tiempos de residencia teóricos que era lo esperado según trabajos realizados por Avella (2001); Sin embargo este valor a pesar de ser el máximo, fue mucho menor que esperado teóricamente (0,177 mg/L).

Para los primeros valores de tiempo, la concentración de trazador va aumentando progresivamente desde cero como es característico de un reactor real que presenta una combinación de flujo pistón y mezcla completa. Así mismo se puede observar que no solamente existe el pico de máxima concentración, sino que

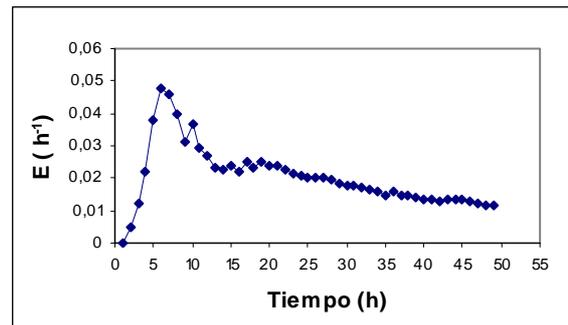
después de haberse obtenido una concentración de 0,455 mg/L de trazador en la hora 13, para la hora 14 este valor se incrementa un poco creando otro pequeño pico que teóricamente da una idea de la presencia de cortocircuitos.

Curva E. La distribución del tiempo en que sale cada elemento de fluido del reactor es denominada por Levenspiel (1999) como la función de distribución de edad del efluente o curva E. Si el caudal permanece constante, E(t) se puede definir de la siguiente manera(8):

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} = \frac{C_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (1)$$

La curva E tiene como restricción que el fluido solo entre y salga del reactor una vez (Avella, 2001).

Figura 3 Curva de distribución de edades de trazador a la salida del reactor UASB.



Curva F. La curva F se utiliza para describir la concentración acumulativa de la sustancia trazadora a la salida (midiendo la concentración en el reactor en función de su concentración inicial (C/Co)) (8).

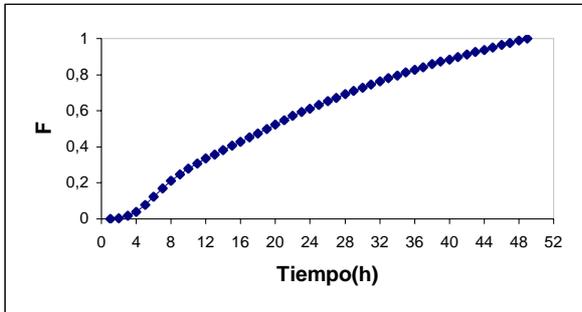
Para reactores con flujo no ideal y cuando las concentraciones están dadas por un número finito de puntos, el caudal es constante y los Δt_i son iguales, se tiene que:

$$F(t) = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{\sum_{i=1}^f C_i} \quad (2)$$

En la Figura 4 se aprecia la representación gráfica de la distribución del porcentaje de trazador que ha salido en un tiempo t con respecto a la cantidad de trazador que alcanzó a salir y no con respecto a la cantidad total inyectada, y por eso el valor final de F(t) es 1. Es

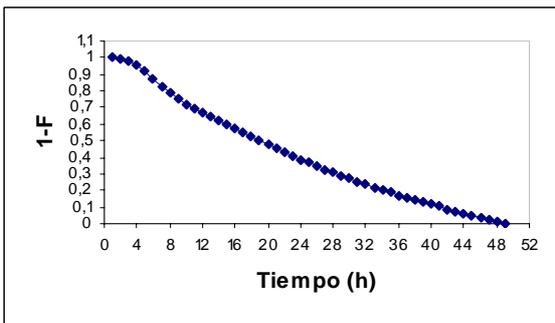
importante resaltar que esta curva representa una distribución y no un balance de material.

Figura 4. Distribución de la fracción de trazador a la salida del reactor UASB



Como es lógico el comportamiento de $1-F(t)$ es análogo al de la Figura 4

Figura 5 Distribución del trazador remanente en el reactor para cualquier tiempo t.



La forma de esta curva al igual que la de la Figura 4 no dependen de las condiciones de contorno, es decir, del tipo de flujo que predomine en el reactor sino más bien de los problemas hidráulicos, tales como cortocircuitos, recirculaciones o zonas muertas.

3.2 Análisis Cualitativo de la tendencia de la curva de concentración de trazador.

Los principales parámetros que se tienen en cuenta para el análisis de la tendencia de la curva son:

- $t_i = 1h$: tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.
- $t_p = 5h$: tiempo modal, tiempo para la presentación de la máxima concentración
- $t_o = 24h$: tiempo medio de retención teórico.
- $t_m = 36h$: tiempo mediano, corresponde al paso del 50% del trazador.
- $t_c = 11.5h$: tiempo en que la concentración es mayor que $C_p/2$.
- $t_b = 1h$: tiempo en que la concentración es mayor que $C_p/10$.
- C_o : concentración inicial de trazador.

$C_p = 0.0953mg/L$: concentración máxima a la salida.

Las relaciones de estos tiempos con el tiempo teórico de residencia sirven para hacer un análisis cualitativo detallado de la tendencia de la curva.(1).

Tabla 3. Relaciones de tiempos experimentales con respecto al tiempo teórico para el análisis de la tendencia de la curva de distribución de trazador.

$\frac{t_i}{t_o} = 0.042$	R > 0.3 indica cortocircuitos. R = 1 para flujo en pistón. R = 0 para flujo mezclado.
$\frac{t_m}{t_o} = 1.500$	R < 1, indica cortocircuitos. R > 1 indica acumulaciones de la sustancia trazadora, las cuales abandonan lentamente a largando la rama descendente de la curva de concentración.
$\frac{t_p}{t_o} = 0.208$	R ≈ 0, indica el predominio de flujo mezclado. R ≈ 1 y $t_i/t_o > 0,5$, se puede afirmar que existe el predominio de flujo pistón.
$\frac{t_c}{t_o} = 0.479$	Para un reactor completamente mezclado esta relación es 0,693 ó mayor.
$\frac{t_b}{t_o} = 0.042$	En el caso de flujo a pistón se aproximará a la razón del tiempo de inyección $\Delta t_o/t_o$ y para el flujo mezclado será de orden 2,3.
$e = 7.160$	El valor de e es igual a 0 para flujo pistón y mayor que 2,3 para flujo mezclado.

3.3 Modelos matemáticos para flujo real.

Para el estudio de los diferentes modelos es conveniente medir el tiempo θ en función del tiempo medio de residencia, y cada una de las funciones de distribución, en función de θ si son divididas por t_m (9).

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} tE(t)dt}{\int_0^{\infty} E(t)dt} \approx \frac{\sum C_i t_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{t}{t_m} \quad (3.1)$$

3.3.1 Modelo de dispersión. El grado de dispersión del flujo, se puede cuantificar por medio del coeficiente de dispersión D y el

número de dispersión D/uL y la varianza (Levenspiel, 1989).

Un D/uL alto, significa una dispersión rápida del trazador, indicando presencia de flujo mezclado, ($D/uL > 0,01$).

Un D/uL bajo, significa una dispersión lenta, ($D/uL < 0,01$).

Un $D/uL = 0$, significa que no hay dispersión, por consiguiente predomina el flujo en pistón.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (t_i - t_m)^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \approx \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - t_m^2 \quad (4)$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2} \quad (5)$$

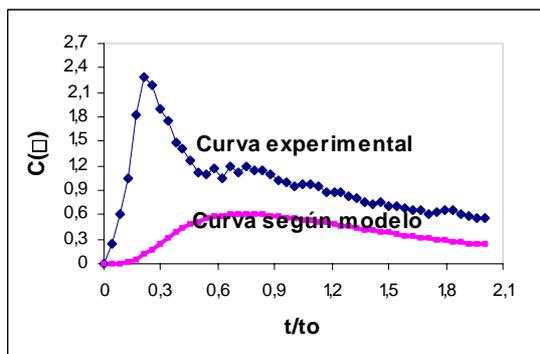
Cuando el grado de dispersión es grande, se utiliza la siguiente expresión.

$$\sigma_\theta^2 = 2(D/uL) - 2(D/uL)^2(1 - e^{-(uL/D)}) \quad (6)$$

llevando a cabo un procedimiento iterativo como lo recomienda (9), partiendo de un valor semilla de 0.1855, se obtiene un $D/uL = 0.245$ que se considera grande indicando que el flujo presenta una marcada tendencia a mezcla completa (dispersión grande).

En la Figura 6 se graficaron superpuestas la curva de $C(\theta)$ para el reactor real y la curva de $C(\theta)$ según el modelo de dispersión; se aprecia que la real está más dispersa que la predicha por el modelo. Esta dispersión se debe posiblemente a que por el exceso de lodo que presenta el reactor, disminuye el espacio disponible para la circulación del líquido y aumenta el proceso de mezcla que implica una redistribución del líquido, ya que por un número indeterminado de veces durante el paso del flujo a través del reactor, se crean turbulencias que al aumentar hacen que el flujo sea aun más disperso y viceversa.

Figura 6 Comparación de la curva de concentración experimental y el modelo de dispersión grande.



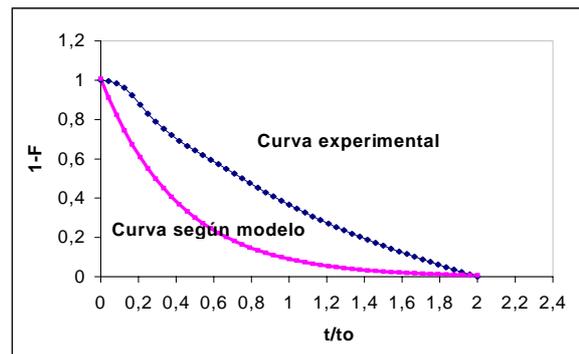
3.3.2 Modelo De Wolf Y Resnick. EL modelo propuesto por David Wolf y William Resnick (1963) está descrito por la siguiente expresión.

$$1 - F(t) = e^{-\beta((t-\varepsilon)/t_m)}; t > \varepsilon \quad (7)$$

El modelo da una primera aproximación al tipo de flujo, analizando los valores experimentales que toma β y ε en la ecuación que dependen de las características hidráulicas que se hayan encontrado predominantes para describir el comportamiento del reactor.

En este caso los valores obtenidos para β y ε fueron 3.1985 y 0.065 respectivamente. Según la clasificación de Resnick y Wolf (1963), Al ser $\beta > 1$ y $\varepsilon > 0$ el reactor en estudio presenta predominio de mezcla con flujo pistón. La curva según el modelo se superpone con la curva de datos experimentales para observar el ajuste.

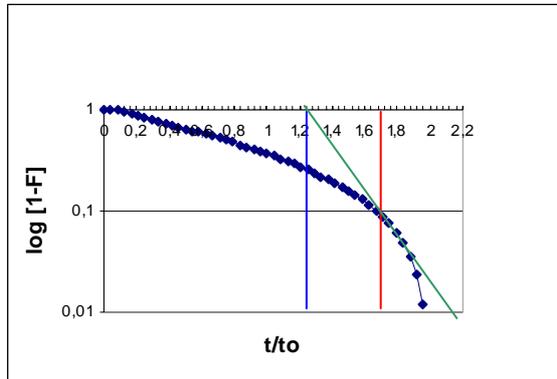
Figura 7 Comparación de curva de fracción remanente experimental con la del modelo de Wolf y Resnick.



El modelo matemático permite cuantificar el porcentaje de flujo pistón (P), Mezcla completa (M), y zonas muertas (m_e), que se presentan en la operación normal del reactor a partir de parámetros como φ y $Tan\alpha$ para cuyo cálculo se sigue el siguiente procedimiento:

Se grafican los valores de la fracción remanente experimentales ($1-F$) en escala semilogarítmica en función del tiempo adimensional (t/t_0).

Figura 8. Determinación de los parámetros $\tan\alpha$ y θ del modelo de Wolf y Resnick.



Se traza la línea tangente en el punto donde la curva se empieza a volver vertical. Para trazar la línea tangente en el mejor punto, fue necesario evaluar la tendencia lineal de los últimos valores y a partir del coeficiente de correlación, seleccionar el punto en el que verdaderamente empieza a comportarse linealmente la parte final de la curva. Si esta línea empezara antes a volverse vertical el valor de $\tan\alpha$ sería menor porque aumentaría la diferencia entre los puntos de corte ($Y=1$ y $Y=0,1$). Así mismo si se trazara la línea tangente en puntos donde es más evidente la tendencia vertical, el valor de $\tan\alpha$ podría aumentar demasiado.

En la Figura 8 se aprecia que la línea se empieza a volver vertical a partir de un valor de t/to igual a 1,79. Si se traza la tangente en este punto, se observa que el corte con $\log(1-F) = 1$ es 1,24 y el valor de corte con $\log(1-F) = 0,1$ es 1,7.

De la Figura 8 se halló un valor de θ igual a 0,0416 y una $\tan\alpha$ de 2,174, con estos resultados pueden determinarse los demás parámetros para el modelo de Wolf y Resnick, el porcentaje de mezcla completa, pistón y zonas muertas en el interior del reactor, que se aprecian en la Tabla 5.10.

Tabla 4. Parámetros del modelo de Wolf y Resnick.

Parámetros	Valores
θ	0,0416
$\tan\alpha$	2,174
P	0,1721
$.m_e$	0,6221
M	0,3126

En el cálculo de los parámetros anteriores se tuvo en cuenta la presencia de corto circuitos indicados por la formación de un pequeño pico posterior al pico inicial. El porcentaje de

cortocircuitos fue 36 % y se determinó con la fracción de área bajo la curva del primer pico sobre el área total.

Como puede observarse existe un factor determinante que aleja el flujo de la idealidad y es el porcentaje de zonas muertas que es considerablemente grande (62,21 %), indicando que el trazador tiene una alta probabilidad de quedarse atrapado dentro del reactor en un volumen que no es útil y que corresponde al espacio que no está disponible para el flujo de líquido porque es ocupado por el exceso de lodo. Una vez más confirmamos que el tiempo de residencia experimental es mucho mayor que el teórico y por esto el trazador no alcanzó a salir en su totalidad.

El flujo pistón correspondiente a un porcentaje de 17,21 %, puede estar dando en el fondo donde la concentración del lodo es mayor, sin embargo además del flujo pistón, esta alta concentración y la gran cantidad de materia inerte conformada por el lodo muerto acumulado y arena se convierte en el mayor porcentaje de zonas muertas que ocasionan que parte del agua quede atrapada temporalmente impidiendo el paso del trazador hacia la salida y por ende que el volumen útil disminuya en más de un 50%.

Los porcentajes cuantificados por medio de este modelo, revelan el predominio de mezcla completa debida principalmente a las burbujas de biogás que se forman en el lecho y a la turbulencia que se genera por el paso del líquido a través del poco espacio disponible.

3.3.3 Modelo De Tanques En Serie. Este modelo supone que el reactor se puede representar por varios tanques de mezcla completa ideales del mismo tamaño en serie (9). Si el número de tanques es grande, el flujo será más aproximado a un flujo pistón. Por el contrario, si el número de tanques es pequeño, la respuesta se aparta considerablemente de dicho flujo y se inclina más hacia mezcla completa (9).

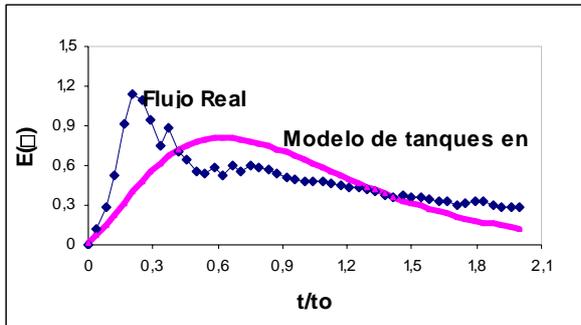
$$\sigma^2_{\theta} = \int_0^{\infty} \frac{\theta^2 N^N \theta^{(N-1)} e^{-N\theta} d\theta}{(N-1)!} - 1 = \frac{1}{N} \quad (8)$$

de donde $N \cong 3$. Como el número de reactores formado por la serie es muy pequeño, se deduce que el comportamiento del UASB se aleja del de un reactor pistón de flujo continuo.

En la Figura 9 se muestra la comparación de la distribución de edades del trazador en el efluente entre el modelo de tanques en serie y los valores experimentales. En cuanto a la curva según el modelo, se aprecia que es semejante a la

experimental, siendo la del modelo mucho mas suave porque el pico de máxima concentración aparece en un tiempo dos veces mayor que el de la curva experimental en la que se observa un pico muy pronunciado para los primeros valores.

Figura 9. Comparación de las curvas de distribución de edades del trazador experimentales en el efluente del UASB y la del modelo de Tanques en Serie.



Los resultados obtenidos por los tres modelos de flujo real, permiten concluir que el reactor presenta una gran tendencia a comportarse hidráulicamente como mezcla completa según lo predicen teóricamente en sus estudios Lettinga et al (1988) lo que indica que la metodología utilizada permitió obtener buenos resultados.

3.4 Balance de material para el trazador.

Para un elemento de trazador, el balance de masa está dado por (11):

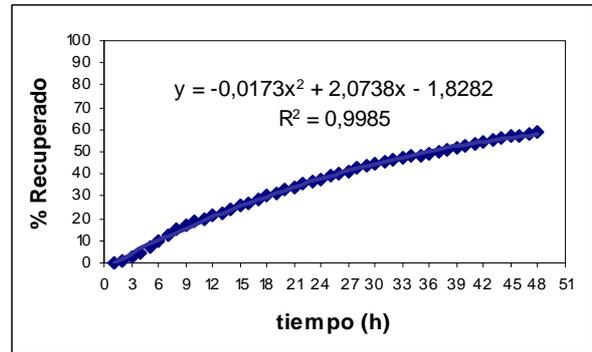
$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación} \quad (9)$$

Por medio de este balance se llega a la ecuación 10 que representa el porcentaje de trazador recuperado en cada hora.

$$\% \text{ recuperado} = \frac{\sum_i Q C_i \Delta t_i}{C_o V_T} \quad (10)$$

los valores obtenidos se grafican para observar la curva de tendencia.

Figura 10. Porcentaje de trazador Recuperado durante la prueba de trazadores.



La Figura 10 representa el balance de material para el trazador e indica el porcentaje que en realidad salió (correspondiente a un 60% únicamente). Como se mostró anteriormente, una concentración exagerada de lodo provoca que el flujo dentro del reactor no esté bien distribuido y que el trazador no haya logrado salir en su totalidad durante las 48 horas que duró el estudio hidráulico, debido a que esta sustancia quedo retenida en algunas zonas de mayor concentración de lodo. Según la ecuación que representa tendencia de la curva, se puede calcular que el trazador podría terminar de salir en aproximadamente 120 horas, correspondientes a 5 días que es un tiempo demasiado largo y no tiene sentido a la hora de evaluar la eficiencia de un equipo.

3.5 Parámetros de diseño de un reactor UASB

Carga orgánica volumétrica. Para desechos industriales se usan cargas orgánicas volumétricas límites de diseño de 15 a 20 KgDQO/m³d (13).

$$L_o = \frac{Q^* S}{V_T} = 1,71 \text{ KgDQO/m}^3\text{d} \quad (11)$$

Es evidente que la carga orgánica volumétrica actual es mucho menor que la que se podría alcanzar en condiciones ideales (lodo granular en concentraciones normales).

para lograr una carga orgánica alta, el caudal tendría que ser muy alto y se correría el riesgo de lavar el reactor por la excesiva cantidad de lodo presente en el reactor. Simultáneamente de esta expresión se puede deducir que con una carga orgánica volumétrica como la máxima recomendada por la bibliografía (20 KgDQO/m³d) y con un tiempo de residencia tan prolongado como el que se tiene realmente se obtendría una remoción de sustrato hasta de 10 veces la que se logra actualmente.

Carga hidráulica volumétrica.

Experimentalmente, se ha determinado que la carga hidráulica volumétrica no debe sobrepasar los $5 \text{ m}^3/\text{dm}^3$ (3).

$$Lh = \frac{Q}{V_T} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 * d} \quad (12)$$

El valor obtenido es menor que el valor límite lo que indica que la remoción se da lentamente debido a problemas de flujo mas que al mecanismo de la digestión anaerobia. El tiempo de retención hidráulico en realidad es mayor que el teórico, indicando que por ser la carga hidráulica demasiado pequeña, el fluido permanece dentro del reactor un tiempo exageradamente mayor que el estrictamente necesario para que se de una remoción eficiente. Se puede decir entonces que existe en el reactor un alto porcentaje de factores que afectan o retardan el flujo y por ello no se trata la cantidad de agua que se podría tratar. Los factores mencionados anteriormente indican que el sistema esta siendo subutilizado en cuestión de caudal y por ende, en carga hidráulica.

Carga superficial. Con el fin de prevenir el lavado, es necesaria una tasa de flujo ascendente más baja que la velocidad de sedimentación del lodo.

Se recomienda para el lodo granular, que el valor medio puede estar entre 1 y 3 m/h, siendo en la parte baja del reactor menor o igual que 1 m/h (2)

$$V_s = \frac{Q/24}{A} = \left(\frac{Q}{24}\right) \cdot \frac{H}{V_T} = \frac{H}{24 \cdot t_o} = 0.166 \text{ m/h} \quad (13)$$

Como se puede observa, esta Velocidad es muy baja comparada con la referencia. Para el lodo granular que se tiene, podría ser mas alta y esto coincide con la baja carga hidráulica. Si la carga hidráulica aumentara hasta el máximo valor ($5 \text{ m}^3/\text{dm}^3$), la velocidad superficial aumentaría como se muestra a continuación.

$$V_s = 0.83 \text{ m/h}$$

Esto representaría un aumento del 80% en la velocidad, inclusive en el fondo del reactor. Debido a la alta cantidad de lodo, se puede afirmar que el hecho de aumentar esta velocidad constituye un alto riesgo para la operación del reactor pues el lodo podría ser impulsado por el líquido hasta salir en el efluente, ocasionando el lavado del reactor. En este caso, debido a que se tiene una alta cantidad de lodo, la velocidad no puede ser mayor pero si se quisiera mejorar el rendimiento en la operación, podría disminuirse la concentración de lodo para poder aumentar la

velocidad superficial hasta en un 80 %. Para la parte del reactor en que la concentración de lodo es menor, la velocidad puede ser aun mucho mayor que el valor que se tiene actualmente (hasta 1 y 3 m/h). Sin embargo también se debe tener en cuenta que la carga hidráulica no debe ser muy alta para que el reactor pueda soportar mayores cargas orgánicas y se de una buena remoción según lo recomienda la bibliografía.

Sistema de alimentación. Para utilizar la capacidad de retención del lodo adecuadamente, es importante garantizar un contacto óptimo entre el lodo y el agua residual, con el fin de prevenir la canalización del agua residual a través del manto de lodos y evitar la formación de zonas muertas (5).

La densidad de puntos de alimentación depende tanto del tipo de lodo, como de la temperatura (4). Como el reactor está operando a una temperatura adecuada, consideramos que este no era un factor limitante para la distribución de la alimentación, sin embargo el tipo de lodo si lo es y por ello adoptamos este criterio para hacer dicha evaluación.

El reactor cuenta con un dispositivo a la entrada conformado por cuatro anillos de 7 orificios cada uno, lo que suma en total 28 orificios encargados de distribuir la alimentación en el reactor. Si el área total del reactor es 54 m^2 , él numero de orificios por unidad de alimentación por unidad de área A es igual a $0,52 \text{ N}^0/\text{m}^2$ y su inverso $1/A$ es $1,92 \text{ m}^2/\text{N}^0$. Para un lodo granular como el que se tiene y una carga orgánica volumétrica de aproximadamente $1,71 \text{ KgDQO}/\text{m}^3\text{d}$, el valor de la relacion debería estar entre 0,5-1 según lo recomiendan Hulshoff *et al.* (1989) referenciado por Arroyave *et al.* (2004),es decir, el valor de la relación debería ser menor según y para ello el número de orificios dede ser. Idealmente el número de orificios para cumplir las relaciones teóricas debería ser de 54 a 108.

Según lo dicho anteriormente los problemas de distribución de flujo y variación de caudal a la salida revelados por el estudio hidráulico, se pueden presentar en parte, porque el reactor no cuenta con la cantidad de orificios de alimentación que debería tener y por ende la distribución no es tan eficiente. Una buena distribución del afluente puede afectar favorablemente el lecho del lodo homogeneizando la concentración de ST a medida que aumenta la altura, es decir, podría hacer que la concentración de lodo en cada sonda fuera constante contrarrestando así las zonas muertas que se crean mas que todo en el primer nivel por el apelmazamiento del lodo. Una mala distribución del flujo a la entrada además de provocar variaciones de caudal, hace que el fluido

circule en mayor cantidad por algunas zonas y en otras se retrase e inclusive se estanque.

4 .Conclusiones

- Existe un factor que aleja el flujo de la idealidad y es el porcentaje de zonas muertas que es considerablemente grande, lo que indica que el trazador tiene una probabilidad del 60% de retrasar su salida; trayendo como consecuencia que éste no alcance a salir en su totalidad durante la prueba y por consiguiente el estudio hidráulico esté limitado.
- Los modelos para flujo real y la tendencia de la curva de concentraciones hacen pensar que el reactor aún con problemas tan grandes de flujo como son los cortocircuitos y las zonas muertas, se comporta más como mezcla completa que como pistón.
- A pesar de que los tres modelos indican la misma tendencia del comportamiento hidráulico del reactor, se observa que el modelo que mejor se ajustó fue el de Tanques en serie. Este arrojó que el reactor real se puede representar por medio de sólo tres reactores ideales de mezcla completa.
- De la evaluación de los parámetros de diseño, se puede concluir que los problemas hidráulicos están involucrados con aspectos como la mala distribución del caudal a la entrada debida al exceso de lodo y al limitado sistema de alimentación.
- El efecto del diseño sobre el funcionamiento del reactor es proporcional al exceso de lodo. Es decir, los problemas hidráulicos se disminuirían considerablemente si se optimizara la cantidad de lodo.
- la evaluación de los parámetros de diseño mencionados, revela que si se le hacen las mejoras correspondientes al caudal de alimentación podría aumentar hasta tres veces más.(2)
- La metodología propuesta para evaluar hidráulicamente el reactor UASB permitió obtener resultados lógicos y confiables; sin embargo e hecho de que el trazador no saliera en su totalidad limito la prueba

5. Recomendaciones

- Debido al exceso de lodo presente en el reactor se recomienda extraer lodo para mejorar de esta forma, el funcionamiento hidráulico, la producción de gas y evitar la excesiva perdida de SSV en el efluente. Una cantidad apropiada de este lodo con la actividad que presenta, permitiría el funcionamiento a altos caudales, velocidades de carga orgánica (CVO),

disminuyendo así el tiempo de residencia y aumentando la eficiencia del proceso biológico.

- Una buena herramienta para realización de una extracción o purga de lodo sería determinar la actividad metanogénica específica (AME) en función de los SSV de cada uno de los sitios de muestreo del reactor, lo que indicaría de una forma mas clara la relación entre la actividad y el contenido de sólidos. Determinando así la capa menos activa y por lo tanto la zona más apta para la purga.
- Para un estudio hidráulico más completo, se recomienda aplicar la metodología propuesta a cada zona para obtener el perfil de flujo y compararlo con el comportamiento global. Esto permitiría observar cual es la zona que aporta mayores problemas hidráulicos al reactor.
- Para un buen desarrollo de la prueba de trazadores, es necesario además de seleccionar correctamente el trazador contar con la cantidad apropiada y dar un tiempo considerablemente mayor que el teórico de residencia para garantizar que todo el trazador alcance a salir en su totalidad
- El trazador se debe inyectar en un punto de mezcla a la entrada para evitar que se estanque desde el principio en una zona donde no haya buena distribución.
- Se recomienda hacer simultáneamente el muestreo y el análisis de la sustancia trazadora para hacer un balance de material que permita conocer a ciencia cierta el instante en que termina de salir el trazador y por ende hasta que punto se debe muestrear.
- La variación del caudal a la entrada tampoco es favorable para el proceso. Se debe evitar interrupciones muy prolongadas en la alimentación para no desestabilizar el flujo y obtener un porcentaje de remoción siempre uniforme.
- El número de boquillas a la entrada se podría duplicar para mejorar la distribución del flujo a través de toda el área disponible. A la vez una buena distribución del flujo, ayudaría a homogeneizar la concentración de lodo en cada zona para evitar apelmazamientos que generan zonas muertas.

NOMENCLATURA

- C_t: Concentración de trazador en cualquier instante t, mg/l
E: Edad del fluido a la salida
m_e: Fracción de espacios muertos.
M: Fracción de flujo mezcla completa.
P : Fracción de flujo pistón.
Tan α : Pendiente de la recta ajustada para un ciclo (logarítmico) de datos.
 φ : Fracción del tiempo en el que el trazador empieza a presentarse en el efluente del reactor.

θ : Tiempo adimensional
 σ^2 : Cuadrado de la amplitud de la distribución o varianza, h^2
 σ^2_{θ} : Varianza adimensional.
 β : Parámetro que indica eficiencia en el modelo de Resnick y Wolf
 ε : Parámetro del modelo de Resnick y Wolf

BIBLIOGRAFIA

1. Arroyave D, González M, (2004). "Evaluación Del Comportamiento Hidráulico Un Reactor UASB Utilizado Para El Tratamiento De Aguas Residuales". Medellín,. Tesis de grado (Ingeniero Químico) Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Procesos y Energía.
2. Avella G, (2001). *Evaluación del comportamiento hidrodinámico de un reactor UASB y su influencia en la remoción de materia*. Cali.Tesis de grado (M.Sc. ingeniería sanitaria y ambiental). Universidad del Valle. Facultad de ingeniería. Postgrado en ingeniería sanitaria y ambiental.
3. Chernicharo C, Machado R, (1997). *Feasibility Of The UASB/Af System for Domestic Sewage Treatment in Developing Countries*. En: Water Science and Technology, Volume 38, Number 8-9. Pp. 325 – 332.
4. Hulshoff L, Lettinga G, (1984). *New Technologies for Anaerobic Wastewater Treatment*. En: Water Science and Technology, Volume 18, Number 12, p 41-53.
5. Hulshoff L, Lettinga G, (1988). *Process design for varios type of waste water*. Departament of Enviromental Technology. Wageningen Agricultural University.
6. Hulshoff P, (1995). *Anaerobic Wastewater Treatment Technology with Emphasis to Upflow Anaerobic Sludge Bed (UASB) Reactor Systems, Tecnología de Reactores Anaeróbicos*. En "Curso-Taller Internacional sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales",. Universidad del Valle, Santiago de Cali.
7. Field J, (1989). *Posibilidades y Potencial del Tratamiento Anaeróbico de Aguas Residuales con Énfasis en el Sistema UASB*. En "Seminario Internacional sobre Digestión Anaeróbica - Elementos de Diseño". Universidad de los Andes, Bogotá.
8. Levenspiel O, (1999). *Chemical reaction engineering*. Departament of Chemical engineering Oregon state University, Jhon Wiley and Sons.3rd ed. New York NY.
9. Levenspiel O, (1981). *Ingeniería de las reacciones químicas*. Ed Reverté S.A. 2 ed. Barcelona..
10. Mejía J.H, (1999). *Diseño, construcción y evaluación de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales*. Lima. Tesis de grado (Ingeniero Químico). Facultad de ciencias y tecnología.
11. Metcalf And Eddy, (1995). *Ingeniería de las aguas residuales*. En :Tratamiento vertido y reutilización. Mc Ed McGraw Hill Volumen 2. New York.
12. Soto M, Méndez R, Lema J, (1993). *Methanogenic and non-methanogenic activity tests. Theoretical basis and experimental set up*. En: Water Research. Volume 27, Number 8. Pp 1361-1376.
13. Souza E.M, (1986) *Criteria for the utilizacion design and operation of UASB reactors*. En: Post conference international seminar on anaerobic treatment in tropical Countries, Sau Pauli. Brazil.
14. Universidad De Antioquia, (1990). Manual de funcionamiento y puesta en marcha de los reactores UASB planta san pedro. 1990.