

## Mean hydraulic retention time and pathways flow simulation through out a physical model for a WSPs and an UASB

Gerardo Aldana<sup>1</sup> y Jhonny Pérez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones del Agua (CIA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.

<sup>2</sup>Grupo GISA, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira. Km 5 vía a Maicao, Tel (5) 7274979, Riohacha, La Guajira. gerardoaldana\_21@hotmail.com

### Abstract

Wastewater Treatment Plant Works has been facing hydraulic problem refers to back-mixing, short-circuiting and wind effect, thus reducing of the Mean Hydraulic Retention Time, MHRT. Tracer studies for full-scale WSPs and UASB is complex and expensive. For that, a calibrated physical model, PM is better alternative to determine MHRT even though similarities between prototype and physical model are achieved. The aim of this study is to determine the MHRT through out two physical models by using Rhodamine WT dye and LiCl then it was compared with one obtained previously from the prototype. The methodology was the construction and calibration of the models scale reduced 1:18 and 1:90 from prototype (maturation pond, Lidsey UK) and (UASB, Colombia), respectively. Hydraulic pathways using tracer's techniques in still and artificial solution water was analysed. The results found an agreement of the layout match in terms of MHRT (0.77d against to 0.89d) for WSPs and (4,8h against to 6,17) for an UASB between P.M and prototypes over 96% of confidence level. Dispersed-mixed flow was achieved.

**Key words:** Physical model, prototype, MHRT, geometric similarity, WSPs, UASB.

## Simulación del patrón de flujo y del tiempo de retención hidráulico en lagunas de estabilización y reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA) a través de un modelo físico

### Resumen

Los sistemas de tratamiento de aguas municipales tales como lagunas de estabilización maduración, LEM y reactores anaerobios de flujo ascendente, RAFA presentan diferencia entre el tiempo de retención nominal, TRN y el tiempo de retención hidráulico, TRH, debido a problemas en el interior del reactor tales como: cortos circuitos, flujo reverso y viento. Realizar estudios hidráulicos en plantas de tratamiento reales resulta complejo y costoso. Una alternativa para analizar el TRH es mediante la construcción de un modelo físico calibrado que simule las condiciones de similitud y semejanza entre el modelo y el prototipo. El objetivo de este estudio fue determinar el TRH y patrón de flujo utilizando dos casos de estudios con modelos físico: LEM y RAFA. La metodología consistió en el diseño, calculo de las relaciones de longitud y construcción, empleando una reducción a escala de 1:18 (LEM) y 1:90 (RAFA) entre el prototipo y el modelo. Se utilizo un trazador Rodamina WT con agua potable y LiCl con agua sintética en los modelos para la obtención del TRH y se comparó con el obtenido en los prototipos en Lidsey, Inglaterra (LEM) y Ginebra, Colombia (RAFA). Los resultados indicaron superposición de la distribución de los tiempos, TRH de 0,77 d (prototipo) y 0,89 d (modelo) para LEM, y de 4,8 h (prototipo) y 6,17 h (modelo) para el RAFA para un nivel de confiabilidad promedio fue mayor de 96%. En ambos casos se encontró patrón de flujo disperso.

**Palabras clave:** Modelo físico, prototipo, similitud geométrica, TRH, lagunas de estabilización, RAFA.

## Introducción

En la ingeniería se denomina modelos físicos a construcciones en escala reducida de estructuras a las cuales se le denomina prototipo, estos modelos físicos en comparación a otros modelos tales como: matemáticos y analógicos, permiten estudiar el comportamiento hidráulico en 3D, y usando un modelo físico perfeccionar el diseño base, antes de que la construcción sea iniciada. La investigación permite un ahorro económico y verificación de los fenómenos que satisfacen las leyes de la conservación de la masa, movimiento y de la energía [1].

El modelo físico es la representación que se hace del prototipo con el propósito de estudiar detalladamente el comportamiento de la estructura del dispositivo, en este caso el reactor, o parte de ella, bajo ciertas circunstancias pre-establecidas de flujo (modelo calibrado). Especialmente en hidráulica el modelo físico es más pequeño, en tamaño, que el prototipo que representa, pero existe similitud tanto en semejanza geométrica, cinemática y dinámica entre uno y otro a través de un factor de relaciones de longitud relativa [2].

El estudio hidráulico en prototipos de lagunas de estabilización de maduración (LEM) y en reactores anaerobios de flujo ascendente, (RAFA) es complicada. La hidrodinámica en LEM es compleja, debido a que involucra varios factores, tales como: geometría, relación largo/ancho, ( $L/W$ , adimensional); temperatura, pH; constante de muerte endógena, número de dispersión (mezcla axial, transversal y/o vertical) y el TRH [3]. Hoy en día, este campo de estudio tiene todavía grandes vacíos y no existen repuestas a preguntas que se hacen los investigadores. Las ecuaciones de diseño tradicionales para LEM no incluyen parámetros que se ajusten a la realidad [4], y se requiere realizar estudios con trazadores, los cuales son costosos, engorrosos y de larga duración [4], para determinar el TRH y la eficiencia hidráulica de la laguna. Mientras que la utilidad de estudios en modelos físicos para tratamiento de agua, y específicamente para LEM, puede ser criticable, la imposibilidad de estudiar los efectos combinados de todos esos factores al mismo tiempo es igualmente criticable [5].

El RAFA se define como un proceso continuo de tratamiento anaerobio de aguas residua-

les, en el cual el desecho circula de abajo hacia arriba a través de varias boquillas distribuidas uniformemente, posee una estructura interna de desviaciones de flujo que permite el retorno de los lodos a través de una sedimentación integrada. El efluente se retira del proceso por la parte superior del reactor, normalmente se obtiene biogas (metano) como subproducto [6, 7].

Los reactores RAFA fueron desarrollados por Lettinga y sus colaboradores en Holanda en 1970 [8], y fueron evaluados por primera vez en Colombia en la ciudad de Cali, departamento del Valle del Cauca, específicamente en la planta piloto de Cañaveralejo en un reactor de  $64 \text{ m}^3$  entre 1983 a 1989 [9]. Estos reactores se consideran un avance de los sistemas de tratamiento primario tradicionales tales como: pozos sépticos y tanque Imhoff [10].

La mayoría de los estudios hidráulicos realizados en RAFA han sido a escala de laboratorio o en modelo matemáticos sin considerar ningún factor de relación con el prototipo, lo que acarrea incertidumbre y errores en la extrapolación de los resultados. La distribución del caudal de alimentación verticalmente es muy diferente entre la unidad de laboratorio y el reactor a escala real. Estudios realizados en reactores RAFA a escala real en el Valle del Cauca, Colombia utilizando un trazador de Litio [11], demostraron que las tres zonas (lecho y manto de lodo y sedimentador) no pueden ser observadas a lo largo del volumen del reactor, debido a que el reactor es completamente cerrado y construido en concreto armado.

Esto en la realidad es criticable pero en un modelo físico a escala reducida y con un flujo debidamente calibrado pueden ser determinados: TRH, patrón del flujo, número de dispersión y la eficiencia del reactor. Una vez calibrado el modelo físico se debe verificar con un reactor RAFA (prototipo) a fin de evidenciar que exista similitud y semejanza para ambos casos para la curva de concentración del trazador versus tiempo [3].

En este trabajo de investigación se diseñaron y construyeron dos modelos físicos calibrados para compararlos con dos casos de estudios; a) una laguna en Lidsey, Inglaterra (prototipo) y un modelo físico escala reducida 1:18 y b) un reactor RAFA del Valle del Cauca, Colombia (prototipo) y un modelo físico escala reducida 1:90 a fin de determinar las similitudes entre modelo y

prototipo en términos de TRH y patrones de flujo utilizando trazadores.

### Base teórica

El diseño adecuado de un modelo físico debe incluir similitud y flujo dinámicamente semejante con el prototipo equivalente al valor de las cifras significativas en su relación homóloga [3] teniendo en cuenta las siguientes similitudes:

#### Similitud física y geométrica

Las dos estructuras deben ser físicamente semejantes, Para que haya similitud geométrica, se requiere que el modelo sea una representación exacta a escala del prototipo [12]. En lo posible es conveniente no distorsionar el modelo, pero esto en muchos casos es inevitable en la práctica. Un modelo será no distorsionado si la escala geométrica se conserva en todas las dimensiones [3].

Un modelo físico será distorsionado si la escala geométrica es diferente en una dirección, usualmente tal dirección es la vertical. La similitud física se encuentra reduciendo el tamaño del prototipo hasta que quede un tamaño razonable.

Las magnitudes envueltas en la geometría entre el modelo y el prototipo pueden ser expresada en función de su longitud, área y volumen homólogo tal como se indica en las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\frac{L_p}{L_m} = L_r \quad (1)$$

$$\frac{A_p}{A_m} = \frac{L_p^2}{L_m^2} = L_r^2 \quad (2)$$

$$\frac{V_p}{V_m} = L_r^3 \quad (3)$$

donde:  $L_p$ ,  $A_p$ ,  $V_p$  = longitud, área y volumen del prototipo (m, m<sup>2</sup> y m<sup>3</sup> respectivamente);  $L_m$ ,  $A_m$ ,  $V_m$  = longitud, área y volumen del modelo físico (m, m<sup>2</sup> y m<sup>3</sup> respectivamente); y  $L_r$  = relación longitud relativa (adimensional).

#### Similitud cinemática

La similitud cinemática en un flujo, se garantiza cuando las regiones donde ocurre tal flujo

son similares. Esa circunstancia se puede garantizar cuando las velocidades y aceleraciones en puntos correspondientes del flujo son paralelas y guardan una proporción constante a través de todo el campo de flujo [13].

La similitud cinemática envuelve la escala de tiempo así como también longitudes homólogas [5]. La relación de tiempo, velocidad,  $v$ , aceleración,  $a$  y caudal,  $Q$ , entre el modelo y prototipo se expresan tal como se indica en las ecuaciones 4, 5, 6 y 7 respectivamente.

$$\frac{TRN_p}{TRN_m} = T_r \quad (4)$$

$$\frac{v_p}{v_m} = \frac{L_r}{T_r} \quad (5)$$

$$\frac{a_p}{a_m} = \frac{L_r}{T_r^2} \quad (6)$$

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \frac{L_r^3}{T_r} \quad (7)$$

donde:  $TRN_p$ ,  $TRN_m$  = tiempo de retención nominal o teórico del prototipo y modelo respectivamente (h y/o d);  $v_p$ ,  $a_p$  y  $Q_p$  = velocidad (m/s), aceleración (m/s<sup>2</sup>) y caudal (L/s) del prototipo;  $v_m$ ,  $a_m$  y  $Q_m$  = velocidad (m/s), aceleración (m/s<sup>2</sup>) y caudal del modelo (L/s).

#### Similitud dinámica

Cuando los flujos tienen distribuciones de fuerzas tales que en puntos correspondientes de ambos flujos, los tipos idénticos de fuerzas son paralelos y se relacionan en magnitud por un factor de escala constante en todos los puntos correspondientes, se dice que ambos flujos son dinámicamente semejantes [14]. El cumplimiento de las condiciones de similitud geométrica, cinemática y de distribución de masas permite garantizar el paralelismo de todas las fuerzas involucradas en el problema y la razón constante y predeterminada de sus correspondientes números adimensionales durante el período de observación del fenómeno. Y estas dos características conforman, precisamente, la similitud dinámica deseada entre un prototipo y su modelo físico [2]. La similitud de distribución de masas ocurre

cuando los dos flujos tienen relación de densidades constante para puntos correspondientes en el interior del flujo. La relación de fuerza y masa entre prototipo y modelo se expresan en las ecuaciones 8 y 9 respectivamente:

$$\frac{F_p}{F_m} = F_r = \rho L_r^4 T_r^2 \quad (8)$$

$$\frac{M_p}{M_m} = F_r T_r^2 L_r^{-1} \quad (9)$$

donde:  $F_p$ ,  $M_p$  = fuerza y masa del prototipo (Nw, Kg respectivamente);  $F_m$ ,  $M_m$  = fuerza y masa del modelo (Nw, Kg respectivamente);  $\rho$  = densidad del agua (1000Kg/m<sup>3</sup>).

La similitud dinámica debe ser verificada a través de los números adimensionales; para LEM se usa el número de Reynolds (Re), el cual involucra fuerzas de viscosidad e inercia y puede ser calculado usando la ecuación 10 [15] y para corregir la viscosidad cinemática a una temperatura local ( $v_T$ ) se usa la ecuación 11 [3]; para el RAFA se calcula el número de Peclet ( $Pe=1/d$ ) [9, 11, 16, 17] que involucra las fuerzas de turbulencia y de dispersión. El número de dispersión ( $d$ ) se determina con los datos experimentales del estudio con trazador (Rodamina WT y LiCl) usando la metodología descrita por [18] y el coeficiente de dispersión ( $D$ ) se calcula usando la ecuación 12 [3]. El comportamiento del flujo de acuerdo al número de dispersión se expresa como: flujo pistón  $0,001 < d < 0,20$ ; flujo disperso  $0,20 < d < 2,5$  y mezcla completa,  $2,5 < d < 5,0$  [3].

$$Re = \frac{LWH}{[(W + 2H)TR\mu]} \quad (10)$$

$$v_T = v_{20^\circ C} e^{-0.08037T} \quad (11)$$

$$D = \frac{\nu^* H}{Pe} \quad (12)$$

donde: Re = número de Reynolds, adimensional;  $L$ ,  $W$ ,  $H$  = longitud, ancho y profundidad o altura del prototipo o modelo respectivamente (m);  $\nu$  = viscosidad cinemática del agua ( $1.006 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s a 20°C);  $T$  = Temperatura (°C);  $Pe$  = número de Peclet, adimensional;  $d$  = número de dispersión, adimensional; y  $D$  = coeficiente de dispersión (m<sup>2</sup>/s).

## Evaluación hidráulica

La evaluación hidráulica se hace usando trazadores, para nuestro caso RWT para LEM y LiCl para RAFA obteniendo como resultado la distribución de edades del trazador que representa el comportamiento del líquido en el sistema, por lo tanto el modelo estará calibrado cuando su curva de edad tenga una superposición muy cercana a la del prototipo. Con esta información se obtiene también el TRH, dispersión ( $d$ ) y número de Peclet ( $Pe$ ).

## Materiales y métodos

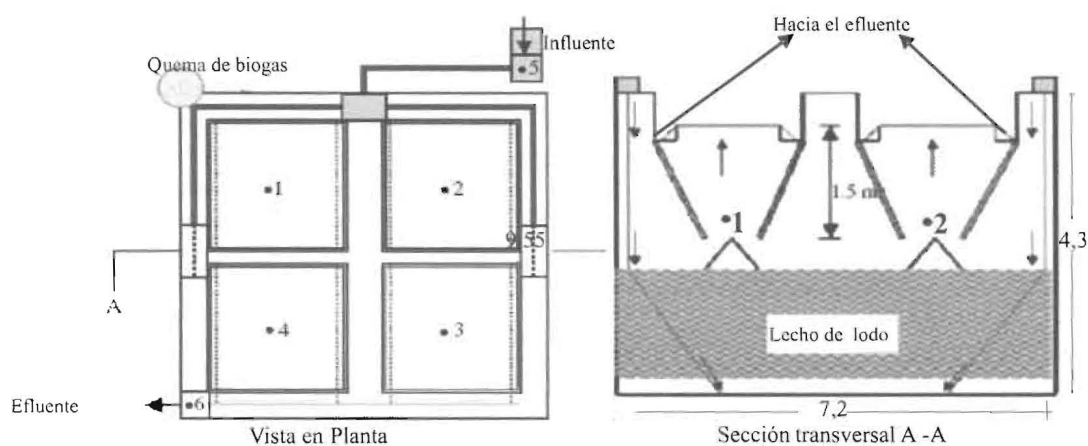
### RAFA

El prototipo seleccionado para el RAFA fue un reactor real ubicado en Ginebra, Colombia que trata las aguas residuales provenientes del municipio de Ginebra, Valle del Cauca, Colombia, tal como se muestra en la Figura 1.

La metodología de diseño del modelo físico del reactor RAFA se desarrolló tomando todas las características geométricas del RAFA de Ginebra y se construyó a escala reducida 1:90 con material de acrílico, se alimentó por debajo con agua sintética y se utilizaron Rodamina WT (RWT) y CILI como trazador para seleccionar el de mayor porcentaje de recuperación en el efluente. Las dimensiones del reactor RAFA prototipo se muestran en la Tabla 1.

### Laguna de maduración

El prototipo seleccionado para este estudio fue una laguna de estabilización de maduración (LEM) a escala real localizada en el sistema de tratamiento de Lidsey al Sureste de Inglaterra. La metodología del modelo físico consistió en la construcción del modelo, calibración del caudal de entrada con una bomba peristáltica marca Watson Marlow modelo 505Du, 220 rpm (agua potable), realizar un estudio de TRH con RWT como trazador y finalmente calibración del viento para reproducir la magnitud y dirección del viento del prototipo usando un anemómetro de copa marca MJP Geopacks LCD. La generación del viento se produjo con dos ventiladores los cuales poseían tres velocidades de control. Un modelo físico a escala reducida 1:18 fue construido dentro de una casa de invernadero en bloques de ce-



Fuente: [11].

Nota: 1, 2, 3 y 4: Puntos internos de muestreo, dimensiones en metros

Figura 1. Reactor RAFA de Ginebra, usado como prototipo (no escala).

Tabla 1  
Características y dimensiones del reactor RAFA de Ginebra (prototipo)

Parámetro	Valor
Caudal de diseño (L/s), promedio/máximo	10,8/19,4
TRN (h), promedio/mínimo	7,1/3,9
Carga orgánica volumétrica (KgDBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> .d), promedio/máxima	0,71/1,29
DBO <sub>5</sub> agua residual cruda (mg/L)	209
Profundidad total/profundidad líquida (m)	4,3/4,0
Largo/Ancho (m)	9,55/7,2
Número de puntos de entrada del afluente	24
Volumen total/volumen efectivo, m <sup>3</sup>	296/275
Número de dispersión, Tiempo de retención nominal TRN de 5 hora	0,3805
Velocidad del flujo, m/h. TRN de 5 hora	0,79
Producción de biogás promedio, m <sup>3</sup> /h. TRN 5 hora	5,4
DQO total promedio del afluente, mg/L. TRN 5,1 hora	559
DQO total promedio del efluente, mg/L. TRN 5,1 hora	279
Eficiencia de remoción en términos de DQO,% y TRN 5,1 hora	50,1
Tiempo de retención hidráulico (TRH) o real, h (estudio con trazador)	4,8

Fuente: [11].

mento y cubierto de plástico transparente como se muestra en la Figura 2.

Se calcularon las relaciones de longitud relativa entre el modelo y el prototipo para establecer la similitud y semejanza. Estas relaciones fueron afectadas por condiciones externas tales como temperatura y humedad, las cuales usualmente suben y bajan dentro de la casa de invernadero y no fueron controladas.

### Características de la laguna central de Lidsey (prototipo)

El sistema de tratamiento incluye tres lagunas de maduración en paralelo, Norte, Central y Sur. La laguna seleccionada como prototipo fue la laguna central. El sistema en general incluye filtro percolador, tanques de sedimentación y lagunas terciarias de maduración. El flujo desde



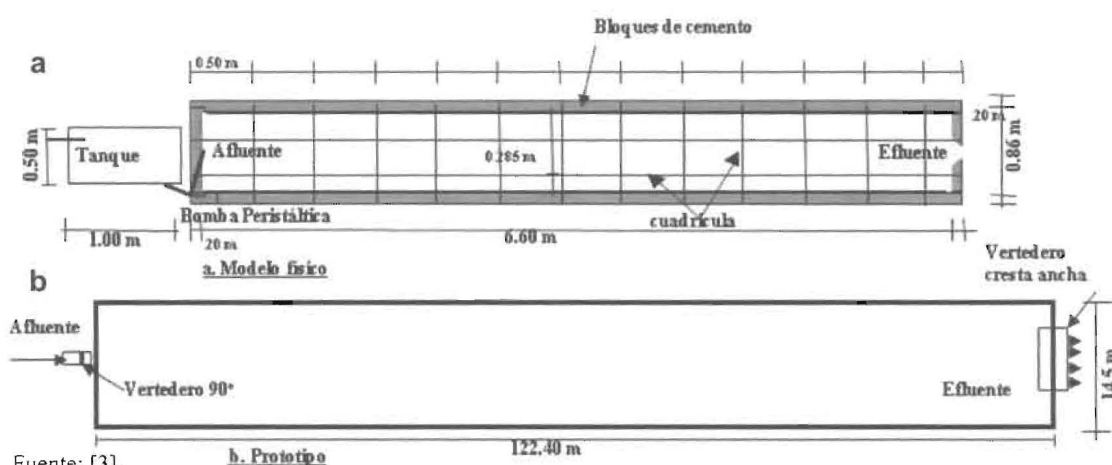
los tanques de sedimentación después de los filtros percoladores alimentan las lagunas a través de una tubería de acero de 20" de diámetro equipada con un vertedero de 90° en V a la entrada de cada laguna con altura ajustable. La metodología utilizada incluyó un estudio con trazador en el campo (Rodamina WT). Las especificaciones técnicas son descritas en la Tabla 2.

El flujo en cada laguna fue dividido por una pared de bloque, la cual distribuye el flujo en dos direcciones. Esto mantiene un ajuste grueso del flujo a las tres lagunas. El ajuste fino

del flujo a cada laguna se logró levantando el nivel del vertedero.

**Determinación del TRH con trazador**

Para el RAFA se utilizó como trazadores: Cloruro de Litio (LiCl) inyectando 1,5 mL a 2000 mgLi<sup>+</sup>/L y 2 mL de RWT a 80,92 mg/L. Las mediciones de Litio se realizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica (marca Perkin Elmer, modelo 3110, método de llama gas aire-acetileno a 670,80 nm) con un límite de detección mínimo de 0,01 mg/L. Las muestras fue-



Fuente: [3].

Figura 2. a. Vista en planta del modelo físico UniS y b. Prototipo LEM de Lidsey (no escala).

Tabla 2  
Características y dimensiones de la laguna le Lidsey, Inglaterra (prototipo)

Parámetro	Valor
Caudal de diseño (L/s)	9,0
TRN (d)	2,17
Tiempo de retención hidráulico (TRH), d (estudio con trazador)	0,90
Profundidad total líquida (m)	0,95
Largo/Ancho (m)	122/14,5
Volumen total, m <sup>3</sup>	1686,06
Número de dispersión	0,37
Velocidad del flujo, m/s.	1,53x10 <sup>-4</sup>
Coliformes en el afluente, UFC/100 mL	1,75x10 <sup>7</sup>
Coliformes en el efluente, UFC/100 mL	1,69x10 <sup>4</sup>

Fuente: [3].

ron preservadas con ácido Nítrico, mantenidas en refrigeración y digestadas antes de su medición [19]. Para la RWT se usó un Fluorímetro (marca Turner Designs modelo 10-005-, serial 5852). Sensibilidad por debajo de 0,5 mg/L, precisión de 0,5%. Ambos trazadores fueron agregados como señal de impulso y simultáneamente usando una jeringa para cada uno. Las muestras fueron recolectadas en el efluente por un periodo de 4,8 veces el TRN y para determinar la curva de distribución del fluido se usó la curva normalizada  $E(\theta)$  en función del tiempo adimensional ( $\theta$ ) [9, 11, 18, 20, 21]. Para LEM se agregaron 250  $\mu\text{L}$  a 238 mg/mL de RWT con señal de impulso usando una micropipeta, las muestras fueron medidas en línea en el efluente usando un fluorímetro (marca Chelsea Instruments modelo Minitracka WT II). Sensibilidad de 1  $\mu\text{g/L}$  conectado a un registrador de datos (marca Geo-marine Instruments) durante 3 veces el TRN y para determinar la curva de distribución del fluido se usó la curva normalizada  $C$  en función del tiempo [18].

### Presentación y análisis de resultados

Los cálculos de similitud y semejanza entre el prototipo y modelo para el RAFA y LEM fueron realizados utilizando los datos básicos presentados en las Tablas 1 y 2 y calculados en una hoja de datos Microsoft Excel office 2003. La altura inicial de 0,044 m (4,44 cm), no era recomendada para observar la trayectoria del trazador en el RAFA, por lo tanto el modelo se distorsionó en su dimensión vertical en 12,5 veces, obteniéndose una altura final de 0,55 m. Esta distorsión fue también aplicada al sedimentador incrementando el valor inicial desde 0,016 m a 0,20 m. La relación de longitud homologa fue 0,011 para el RAFA y 0,0539 para el LEM. Similarmente, la profundidad en la LEM fue distorsionada por un factor de distorsión (F.D) de 8, convirtiéndola desde 0,05m a 0,40 m. Los valores calculados para la similitud geométrica entre los modelos y los prototipos se presentan en la parte superior de la Tabla 3.

La similitud cinemática fue lograda en el modelo LEM para la velocidad y la aceleración, en el caso del modelo RAFA sólo se logró para la aceleración debido a la distorsión de la altura. En el caso de la relación de volumen, tanto para el

RAFA y la LEM no se obtuvo similitud debido a la reducción de escala [3]. Los valores calculados para la similitud cinemática entre el modelo y el prototipo se presentan en la parte central de la Tabla 3.

La similitud dinámica para el LEM fue lograda mediante la utilización del número de Reynolds ( $Re_m/Re_p=0,0434$ ), en el caso del RAFA se utilizó el número de Peclet ( $Pe_{mc}/Pe_p=0,0160$ ). El valor del coeficiente de dispersión,  $D$ , fue 1,202  $\text{m}^2/\text{h}$  y el  $Pe = 2,6281$  para el prototipo, y para el modelo fue  $D = 1,73\text{E-}4 \text{ m}^2/\text{h}$  y  $Pe = 0,0423$  corregidos por la relación de longitud relativa (0,011). La similitud en ambos modelos no fue alcanzada para la fuerza y la masa debido a la diferencia en la magnitud entre modelo y prototipo. Los valores calculados para la similitud cinemática entre el modelo y el prototipo se presentan en la parte inferior de la Tabla 3. El flujo del prototipo (RAFA) en el afluente se encuentra distribuido por 24 tuberías de forma uniforme en el área del fondo. El mismo criterio se aplicó para el modelo físico en donde el número de entradas del modelo se determinó dividiendo el área del fondo calculada, 77,4  $\text{cm}^2$  (9,8 cm  $\times$  7,9 cm) y se corrigió por el factor de escala (F.S =90), obteniéndose un total de una boquilla (número de tuberías del prototipo = área/FS = 0,26 boquillas).

Para el caso del RAFA, se obtuvieron porcentajes de recuperación del trazador de 99,34% y 52,66% para el  $\text{Li}^+$  y RWT respectivamente, razón por la cual la información tomada para la evaluación hidráulica fue la obtenida con el  $\text{Li}^+$  y para LEM se recuperó el 52% de RWT, valor que está en el rango de los encontrados en otras investigaciones [3, 5, 16]. Los resultados obtenidos después de aplicar los estudios con trazadores en los modelos revelaron TRH de 0,89 días y 6,17 horas y para los prototipos TRH de 0,77 días y 4,8 horas,  $d = 1,1$  y  $d = 1,14$  para LEM y RAFA respectivamente, con un patrón de flujo predominante de flujo disperso en ambos casos. La forma de la curva de distribución de edad del trazador para ambos casos se observa en la Figura 3, obteniendo una superposición con los prototipos casi total en ambos casos con un nivel de confiabilidad promedio > 96%. La curva de edad del trazador fue reproducida casi en su totalidad para ambos modelos físicos con respecto al prototipo en relación a los flujos advectivos (30 minutos para el

Tabla 3  
Similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y el prototipo del reactor RAFA y Laguna de Maduración, LEM

Variables	Similitud Geométrica											
	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)						Laguna de Estabilización de Maduración (LEM)					
	L (m)	W (m)	H (m)	Hd (m)	Hs (m)	Hsd (m)	L (m)	W (m)	H (m)	Hd (m)	Wv (m)	
Prototipo	9,55	7,20	4,0	-	1,5	-	122,40	14,50	0,95	-	1,5	
Modelo	0,098	0,079	0,044	0,55	0,016	0,20	6,60	0,86	0,05	0,40	0,15	
F.S	97,45	91,14	90	-	90		18,54	16,86	19		10	
F.D	-	-	-	12,5	-	12,5	-	-	-	8		
Relación $L_m/L_p$	0,011	-	-	-	-	-	0,0539	-	-	-		
Relación $W_m/W_p$	-	0,011	-	-	-	-	-	0,0593	-	-		
Relación $H_m/H_p$	-	-	0,011	-	-	-	-	-	0,0526	-		
Relación $Hd_m/Hd_p$	-	-	-	0,137	-	-	-	-	-	0,42		
	Similitud Cinemática											
	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)						Laguna de Estabilización de Maduración (LEM)					
	TRN (día)	v (m/s)	a (m/s <sup>2</sup> )	Q (L/s)	V (m <sup>3</sup> )	T °C	TRN (día)	v (m/s)	a (m/s <sup>2</sup> )	Q (L/s)	V (m <sup>3</sup> )	Q (L/s) adp
Prototipo	0,2084	2,22E-4	1,234E-8	15,278	275	23,5	2,17	6,53E-4	3,48E-9	9	1690	12E-3
Modelo	0,2084	3,05E-5	1,37E-10	2,36E-4	0,0043	30	2,19	3,49E-5	1,84E-10	12E-3	2,27	-
Relación $v_m/v_p$	-	0,1375	-	-	-	-	-	0,0534	-	-	-	-
Relación $a_m/a_p$	-	-	0,0111	-	-	-	-	-	0,0529	-	-	-
Relación $V_m/V_p$	-	-	-	-	1,5E-5	-	-	-	-	-	0,0013	-



Tabla 3 (Continuación)

Variables	Similitud Dinámica											
	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)						Laguna de Estabilización de Maduración (LEM)					
	d	D, m <sup>2</sup> /h	Pe	μ,kg/m.s	F (Nw)	M (Kg)	Re	F (Nw)	M (kg)	T°C	v (m <sup>2</sup> /s)	d
Prototipo	0,3805	1,202	2,6281	1,0E-3	8,48E-4	2,75E5	512	5,52E-6	1,69E3	18	1,00E-6	0,90
Modelo	0,2601	0,0157	3,8446	8,0E-4	1,45E-10	4,258	22,2	4,18E-10	2,27	14	3,25E-7	1,1
Pe <sub>mc</sub> /Pe <sub>m</sub> *L <sub>r</sub>			0,0423									
Relación Pe <sub>m</sub> /Pe <sub>p</sub>	-	-	0,0160	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Relación Re <sub>m</sub> /Re <sub>p</sub>	-	-	-	-	-	-	0,0434	-	-	-	-	-

Nota:

Subíndice "p" = prototipo, "m" = modelo y "c" = corregido. F.D= factor de distorsión. F.S= factor de escala. Hd= altura o profundidad distorsionada =H\*F. D Hs=altura del sedimentador. V = volumen, m<sup>3</sup>. Hsd= altura del sedimentador distorsionada. v = Velocidad promedio (Q/área transversal). a = aceleración (L/T<sup>2</sup>). Q = caudal (V/T). Q adp= caudal adoptado disminuido por un F.D = 750. - No aplica. v, a, V = Velocidad, aceleración y volumen Wv = ancho del vertedero. Pe = Número de Peclet, Pe = v.h/D. D = d.v.h. F = Fuerza de movimiento (ρ L<sup>4</sup> T<sup>-2</sup>). M = Masa del fluido (F T<sup>2</sup>L<sup>-1</sup>) ρ = Densidad del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>)

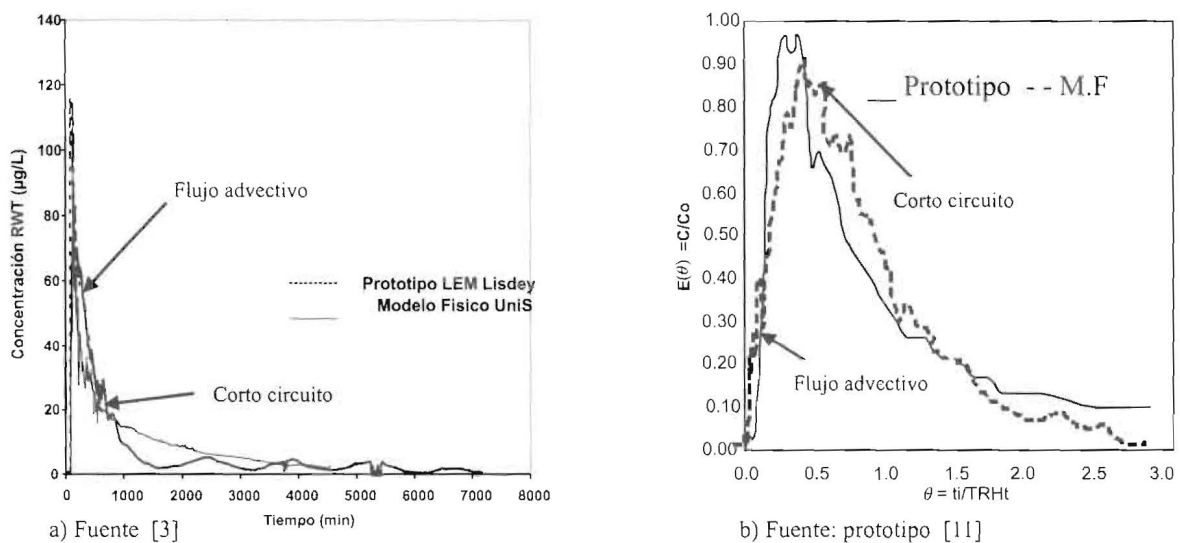


Figura 3. Curva de distribución de edad del trazador comparación entre prototipo y modelo.  
a) LEM Lidsey. b) RAFA Ginebra.

RAFA y 2 horas para LEM), cortos circuitos observados al mismo tiempo tanto para el prototipo como en el modelo (Figura 3), área debajo la curva (TRH) y patrón de flujo. La diferencia significativa entre los caudales, fuerzas y masas no afectó la variable de tiempo aun en condiciones controladas. La variable magnitud del viento fue también reproducida físicamente en el modelo LEM.

## 5. Conclusiones

En este estudio se demostró que los modelos físicos son un método práctico y útil para reproducir los TRH y los patrones de flujo que ocurren en un sistema a escala real con un nivel de confiabilidad mayor de 96%. Los modelos físicos para RAFA y LEM deben ser calibrados para el caudal, viento (si aplica) y carga orgánica, a fin de obtener valores precisos que se puedan extrapolar los resultados al prototipo a través de las relaciones de longitud relativa ( $L_m/L_p = 0,011$  y  $0,0539$ ) obtenidos en la similitud geométrica, cinemática y dinámica.

## Referencias bibliográficas

1. B. Mahmood, G. L. Wall and J. M. Russell. A physical model to make short-term management decisions at effluent-irrigated land treatment system. UNITEC. Institute of Technology, School of Engineering, Carrington Road, Auckland, New Zealand (2002).
2. Escuela de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Mecánica de fluidos y recursos hidráulicos. Modelos físicos. Consulta junio 20 de 2007. Disponible: <http://fluidos.eia.edu.co/fluidos/modelos/justificacion.htm>
3. Aldana, G. J. Hydraulic behaviour and performance improvement of waste stabilization ponds using a computational fluid dynamic and physical model. Ph.D Dissertation University of Surrey, England, (2004). 264-290.
4. Aldana, G., Herrera L. y Bracho N. Selección de un trazador para la determinación de regimenes hidráulicos en reactores. Revista Técnica de Ingeniería. Vol 18 No 1, (1995). 113-122.
5. Yabani, M. A study of the hydraulic behavior of waste stabilization pond using a physical model. M.Sc. Thesis center for Environment Health Engineering (CEHE), University of Surrey, (2002), England.
6. El Ministerio de Desarrollo Económico. Resolución 1096 de 2.000, Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS, Colombia, (2000). Sección II, Título E. Tratamiento de aguas residuales (2000) 10.
7. Pérez J. Diseño de un Sistema UASB y lagunas de estabilización para tratar los desechos líquidos de una industria procesadora de camarones. Tesis de Magister en Ingeniería.

- ría Ambiental. Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. División de Postgrado (1998).
8. Hálales, M., Sawajneh Z, Zu\_bi, M., Zeeman, G., Lier, J., Fallad, M., Lettinga, G., Bio-resource Technology Treatment of strong domestic sewage in a 96 m<sup>3</sup> UASB Reactor operated at ambient temperatures: two-stage versus single-stage reactor. 96 (2005). 577-585.
  9. Avella, G. Evaluación del comportamiento hidrodinámico de un reactor UASB y su influencia en la remoción de materia orgánica. Universidad del Valle, Facultad d Ingeniería, Tesis de postgrado para optar al título de Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (2001). 2, 136.
  10. Taschenbuch der Stadt-entwässerung. Karl und Klaus R. Imhoff. Oldenbourg Verlag Munchen Wien, 29 Verbesserte Auflage (1999). 111-223.
  11. Peña., M., Mara, D. Avella, P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. Water Research. Vol 40. (2006) 445-452.
  12. Fox, R y McDonald, A. (1993). Introducción a la mecánica de fluidos, segunda edición, Grupo Impresa, SA de C.V, México. p 318
  13. Bolinaga, J. (1985). Mecánica elemental de los fluidos, Primera edición, Fundación Polar, Venezuela, p 468.
  14. Roberson J y Crowe Clayton, (1991). Mecánica de fluidos, Segunda edición, McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A de C.V. México. p 298.
  15. Agunwamba, J.C. Field Pond Performance and Design Evaluation using Physical Models. Water Research Vol. 26, No 10 (1992) 1403-1407.
  16. Zeng, Y., Mu, S., Lou, S. Tartakovsky, B., Guiot, P., Wu, P. Hydraulic modeling and axial dispersion analysis of UASB reactor. Biochemical Engineering Journal, Vol 25 (2005) 113-123.
  17. Singhal, A., James, G., Praveen, V., Ramachandran, K. (1998). Axial dispersion model for upflow anaerobic sludge blanket reactors. Biotechnology Progress 14, 645-648.
  18. Levenspiel, O. (1987). Ingeniería de las reacciones químicas, 2<sup>da</sup> edición. Ediciones Repla, s. a. Wiley, New York. México.
  19. APHA-AWWA-WEF, (1998). "Standard Methods of Examination of Water and Wastewater". 20<sup>th</sup> Edition.
  20. Lara, c., Diaz, J y Bona, A. Evaluación hidráulica de un reactor UASP de compartimientos. Universidad del Valle (Colombia) y Universidad de Paraná (Brasil), P 255-273. Publicaciones Facultad de Ciencias e Ingeniería. Seminario Internacional: Tratamiento y Postratamiento de Aguas Residuales. (2000). Universidad de Boyacá.
  21. De Carvalho, K., Salgado, M., Passig, F., Pires, E. Avaliação hidrodinâmica de reator uasb submetido à variação cíclica de vazão.. IX taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia. Chile, 1-23 de octubre de 2008. 761-765.

Recibido el 4 de Diciembre de 2008

En forma revisada el 2 de Noviembre de 2009