

Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo

Evaluation of hydrodynamic behavior as a tool to optimize anaerobic reactors of attached growth

Andrea Pérez, Patricia Torres*

Facultad de Ingeniería, Escuela EIDENAR – Área Académica de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, AA. 25360, Cali, Colombia

(Recibido el 15 de noviembre de 2007. Aceptado el 9 de mayo de 2008)

Resumen

Las condiciones de flujo no ideal en los reactores afectan su desempeño; las causas comunes son cortos circuitos, zonas muertas y recirculación interna por corrientes cinéticas y/o de densidad. En este estudio se optimizó el diseño de un filtro anaerobio a escala real que trata las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, el cual presentaba problemas de represamiento y bajas eficiencias de remoción. La evaluación del comportamiento hidrodinámico inicial mostró la presencia de flujo dual (32% flujo pistón - FP y 37% mezcla completa - CM), zonas muertas (20%) y ausencia de cortos circuitos; adicionalmente, la modelación del reactor indicó un grado de dispersión elevado y un comportamiento tendiente a un reactor CM en serie de dos unidades. Con base en estos resultados, se implementaron dos modificaciones en el diseño del reactor: falso fondo y tubería perforada para evacuación de biogás, las cuales permitieron incrementar la fracción de FP (44%), reducir la fracción de zonas muertas (15%), disminuir el Índice de Dispersión (ID) e incrementar la tendencia del reactor a un CM en serie de tres unidades, lo que aumentó el tiempo de retención hidráulico (TRH) real de 9,6 a 10,2 horas (TRH teórico 12 horas) y las eficiencias teóricas de remoción de 73 a 78%.

----- **Palabras clave:** Filtro anaerobio; comportamiento hidrodinámico; flujo pistón; mezcla completa; modelo de reactores completamente mezclados en serie; modelo de dispersión axial; modelo de Wolf-Resnick

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 2 + 321 21 83, fax: + 57 + 2 + 331 21 75, correo electrónico: andreaperezvidal@hotmail.com (A. Pérez)

Abstract

The conditions of the non-ideal flow in reactors affect their performance; the common causes are short circuits, dead zones and internal recirculation by kinetics and/or density stream. In this study, the design of an anaerobic filter at full scale that treats cassava starch wastewater was optimized. It presented halt damming problems and low removal efficiencies. The initial hydrodynamic behavior showed the presence of dual flow (32% plug flow - PF and 37% mixed flow -MF), dead zones (20%) and absence of short circuits; additionally the modelling reactor indicated a high dispersion degree and tendency to a mixed reactor in series of two units. Based on these results, the following two modifications were implemented in the reactor design: false bottom and perforated pipe for biogas evacuation. This allowed to increase the PF fraction (44%), reduce the dead zones fraction (15%), decrease the dispersion index (DI) and increase the tendency of the reactor to MF in series of three units, which improved the real hydraulic retention time (HRT) from 9.6 to 10.2 h (HRT theoric 12 hours) and the theoric removal efficiencies from 73 to 78%.

----- *Keywords:* anaerobic filter; hydrodynamic behavior; plug flow; mixed flow; reactor perfectly mixed in series model; dispersion axial model; Wolf-Resnick model

Introducción

El diseño de los sistemas de tratamiento de aguas residuales se ha centrado fundamentalmente en el proceso bioquímico dejando en segundo plano aspectos hidrodinámicos como las características de flujo, régimen de mezcla, tiempos de residencia, geometría del reactor, estado de agregación de elementos del fluido etc., los cuales influyen en el desempeño de los procesos que se llevan a cabo durante el tratamiento. Por tanto, el conocimiento de la hidrodinámica del sistema permitirá mejorar su eficiencia [1].

El comportamiento hidrodinámico de reactores puede evaluarse siguiendo el método experimental estímulo-respuesta, en el que se inyecta en el afluente un trazador de concentración conocida, fácilmente detectable y que no participe en ninguno de los procesos físicos y químicos que puedan alterar la hidrodinámica real del fluido [2]. En reactores biológicos esta evaluación es compleja debido a la presencia de varias fases: agua residual, gas, biomasa y medio de soporte (en el caso de filtros biológicos) lo que puede ocasionar resultados erróneos por la adsorción del trazador en cualquiera de estas fases [3]. De acuerdo con Rocha *et. al* [2] se recomienda tener en cuenta los siguientes criterios para selección del trazador: no biodegradable para evitar adsorción en la biomasa; no adsorción en el biogás; estable en el tiempo y bajo condiciones del proceso (pH y potencial redox); soluble en el agua y preferiblemente con elevado peso molecular para evitar problemas por difusión; rango de concentración con respuesta lineal y buena sensibilidad. Las sustancias trazadoras pueden ser: colorantes como fluoresceína o rodamina; iones como cloruros especialmente de sodio, potasio o litio; fluoruros o nitratos; elementos radiactivos como isótopos; ácido clorhídrico o benzoico y otras sustancias químicas como alizarim, sapirol y naftol [4].

La aplicación del trazador puede hacerse en forma instantánea o continua, siendo la primera la más usada; en la dosis instantánea, el trazador se adiciona rápidamente a la entrada del reactor. En la dosis continua la aplicación se inicia de manera

rápida y se mantiene constante durante un período de tiempo y finalmente se suspende de forma instantánea [5]. Se recomienda que la duración del ensayo corresponda a tres veces el tiempo de retención hidráulico teórico del reactor [4].

Es una práctica común establecer la eficiencia hidráulica de un reactor analizando la tendencia de la curva de concentración de trazador y relacionar sus diferentes parámetros con las condiciones de flujo; generalmente, la forma que toma la curva de concentración da una primera indicación del comportamiento hidrodinámico del reactor [5]. A partir de esta curva puede obtenerse la función de distribución del tiempo de residencia conocida como $E(t)$ o DRT que a su vez permite determinar el TRH real y la aplicación de diferentes modelos matemáticos para analizar el comportamiento del reactor.

El análisis matemático y los modelos de simulación permiten comprender el comportamiento cuantitativo del sistema biológico y predecir el desarrollo general del reactor; adicionalmente, pueden ayudar en la puesta en marcha y operación, en la descripción de la dinámica y las características de control del mismo y en la estimación de los tiempos requeridos para alcanzar nuevos estados estables cuando se presenta alguna perturbación [6].

En términos generales, el objetivo general de la modelación de un proceso es poder plantear descripciones matemáticas sencillas para ayudar a analizar, comprender y predecir el comportamiento de un proceso físico complejo en función de las variaciones de los parámetros que lo gobiernan [7]. Pueden utilizarse diversos criterios, modelos y procedimientos para estudiar las características de flujos no ideales que permitan aproximarse a la realidad; entre los modelos matemáticos más conocidos se encuentran el método de Wolf-Resnick [4], el modelo de dispersión axial y el modelo de reactores completamente mezclados en serie [8].

Con relación a las características hidrodinámicas de los filtros anaerobios, [9] sugieren que el flujo horizontal en este tipo de reactor favorece el pre-

dominio de flujo a pistón, lo que a su vez permite la separación de las fases del proceso y la inmovilización de los sólidos; Torres *et. al* [10] mencionan que el flujo horizontal presenta un mejor comportamiento que el vertical, siendo muy eficiente la combinación de ambos tipos de flujo.

Show y Hwa [11] evidenciaron la influencia del medio de soporte y el inóculo en las características hidrodinámicas de filtros anaerobios con flujo ascendente por la considerable disminución del tiempo de retención hidráulico –TRH real, debido a la reducción del volumen útil del reactor, además de evidenciar la presencia de corto circuitos, zonas muertas y predominio de flujo mezclado. Los estudios hidrodinámicos desarrollados por Rocha *et. al* [2] en filtros anaerobios de flujo descendente con diferentes medios de soporte mostraron que además de presentar un régimen de flujo dual (mezcla completa y pistón con predominio del primero) hay presencia de zonas de recirculación interna (cortos circuitos) y zonas muertas. El estudio desarrollado por Colin *et. al* [12] en un filtro anaerobio de flujo horizontal, además de verificar la viabilidad de este tipo de configuración, también permitió identificar la presencia de flujo dual.

Teniendo en cuenta que las condiciones hidrodinámicas de los sistemas de tratamiento influyen directamente sobre las eficiencias de remoción alcanzadas [13], este estudio se concentró en la evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimizar un filtro anaerobio con flujo mixto (ascendente y descendente) que trata las aguas residuales de una agroindustria de extracción de almidón agro de yuca.

Experimentación

La investigación se realizó en un filtro anaerobio a escala real que trata las aguas residuales generadas en el proceso de extracción de almidón de yuca de la rallería Piedras Negras, ubicada en la vereda la Agustina, Municipio de Mondomo - Departamento del Cauca. La figura 1 muestra un esquema del filtro anaerobio al inicio del estudio.

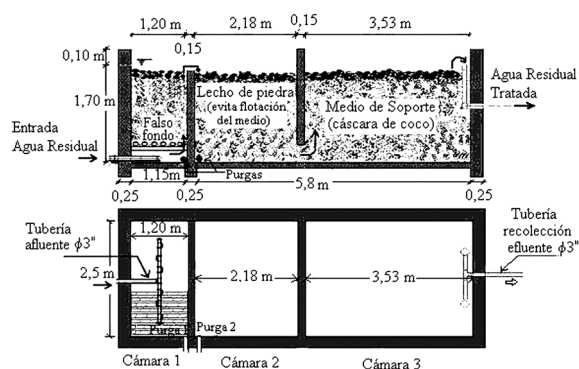


Figura 1 Esquema del filtro anaerobio al inicio del estudio

El reactor contaba con un volumen total de 32,4 m³ y un volumen útil de 29,5 m³; los baffles permitían los cambios de dirección del flujo (ascendente y descendente) y dividir el reactor en tres cámaras; el diseño inicial muestra la presencia de un falso fondo solo en la cámara 1. El medio de soporte empleado fue cáscara de coco y el inóculo fue estiércol de vaca. La porosidad del medio se determinó mediante una prueba de laboratorio que consistió en llenar un recipiente de volumen (V1) con cáscara de coco y adicionar un volumen de agua (V2) hasta alcanzar la capacidad total del recipiente, la relación entre V1 y V2 correspondió a la porosidad del medio.

Ensayo hidrodinámico inicial

Se evaluó el comportamiento hidrodinámico del filtro anaerobio mediante un ensayo de trazadores con inyección instantánea de Cloruro de Litio (LiCl); la solución del trazador se preparó teniendo en cuenta la pureza del LiCl, su peso molecular y la del ión litio, de tal manera que se garantizara una concentración de 1,5 mg Li⁺/L en el reactor, asumiendo una mezcla completa e instantánea del Li⁺ en el volumen del reactor.

El ensayo se realizó con un tiempo de retención hidráulico-TRH teórico de 12 horas (caudal promedio de 410 mL/s), valor que corresponde al TRH de diseño del reactor [14]; para el cálculo del TRH se tuvo en cuenta la porosidad del me-

dio de soporte (60%) lo que redujo el volumen útil del reactor a $17,7\text{m}^3$. El ensayo de trazadores tuvo una duración de 36 horas, correspondiente a 3 veces el TRH teórico y la toma de muestras se realizó con los intervalos de tiempo mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1 Intervalos de tiempo de medición

<i>Periodo de evaluación</i>	<i>Intervalo de tiempo para toma de muestra</i>
0 – 12 horas	Cada 10 minutos
12 – 24 horas	Cada 20 minutos
24 – 36 horas	Cada hora

Las muestras se preservaron con ácido nítrico (HNO_3) a un pH menor de 2,0 unidades para la posterior lectura de la concentración del ión litio por espectrofotometría de absorción atómica [15]. El análisis de los datos del ensayo se realizó a partir de la curva de tendencia de la concentración del trazador y se construyó la curva de distribución de tiempos $E(t)$ para determinar el TRH real o experimental. Adicionalmente, se aplicaron los modelos matemáticos de Wolf-Resnick [4], dispersión axial y reactores completamente mezclados en serie [8]

Optimización del diseño del reactor

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el estudio hidrodinámico inicial y los problemas de represamiento de flujo en el reactor evidenciados en otras investigaciones realizadas en esta configuración de reactor [16, 17, 18, 19] se propusieron las siguientes modificaciones en el diseño:

- Falso fondo en las cámaras 2 y 3
- Implementación de tuberías perforadas para evacuación del biogás

Una vez adecuado el filtro, se inició el arranque del reactor que tuvo una duración de 198 días, existiendo periodos en los que el filtro operó de manera intermitente debido a paradas normales

del proceso productivo, principalmente por condiciones climáticas, económicas y escasez de materia prima.

Ensayo hidrodinámico final

Con el objetivo de evaluar el efecto de las modificaciones implementadas en el diseño del filtro anaerobio, se realizó un estudio hidrodinámico al final del arranque del reactor optimizado empleando la misma metodología del ensayo inicial.

Se evaluó el mismo TRH teórico de 12,0 horas correspondiente a un caudal promedio de 395 mL/s ; el caudal fue menor al del ensayo inicial debido a que las vigas construidas para el falso fondo ocuparon un volumen de 1 m^3 , lo que redujo la capacidad útil del reactor a $28,5\text{ m}^3$; teniendo en cuenta la porosidad del medio de soporte (60%), el volumen útil del reactor fue de $17,1\text{ m}^3$. La toma de muestras se realizó con los intervalos de tiempo mostrados en la tabla 2 y fueron procesadas por espectrofotometría de adsorción atómica [15].

Tabla 2 Intervalos de tiempo de medición

<i>Período de evaluación</i>	<i>Intervalo de tiempo para toma de muestra</i>
0 – 12 horas	Cada 10 minutos
12 – 16 horas	Cada 20 minutos
16 – 21 horas	Cada 30 minutos
21 – 36 horas	Cada hora

Resultados y discusión

Estudio hidrodinámico inicial

- Análisis de la curva de tendencia

La figura 2 muestra la curva de concentración de trazador vs tiempo obtenida en el estudio hidrodinámico inicial.

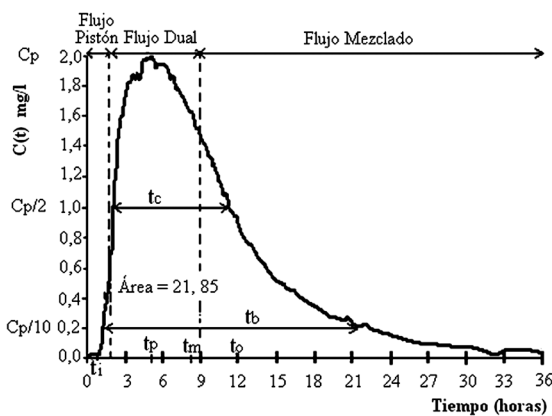


Figura 2 Curva de concentración de trazador vs tiempo. Ensayo inicial

En la figura se observa que el tiempo que transcurre desde la inyección del trazador hasta que aparece en el efluente corresponde a $t_i = 0,3$ horas. De acuerdo con Hirsch (1969) citado por [5] la fracción de flujo a pistón puede considerarse hasta el primer punto de inflexión de la curva donde cambia de concavidad ($t = 1,8$ horas).

Entre el punto anterior y el punto de inflexión en la rama descendente de la curva, que corresponde a $t = 9,0$ horas, el flujo es considerado dual (pistón y mezclado) y a partir de este tiempo el flujo predominante es mezclado (entre 9 – 36 horas). La Tabla 3 detalla los valores de algunos parámetros que permitieron analizar el comportamiento de la curva de tendencia.

Tabla 3 Análisis de la curva de tendencia del trazador. Ensayo inicial

Parámetro		Relación		Significado (CEPIS, 2004)
$t_p =$	5,2	$t_p/t_o =$	0,43	$t_p/t_o \approx 0$ (predominio flujo mezcla completa) si $t_p/t_o \approx 1$ y $t_i/t_o > 0.5$ (predominio flujo pistón)
$t_i =$	0,3	$t_i/t_o =$	0,03	$t_i/t_o = 0$ (flujo mezcla completa) $t_i/t_o = 1$ (flujo pistón) $t_i/t_o < 0.3$ (cortos circuitos)
$t_c =$	9,0	$t_c/t_o =$	0,75	$t_c/t_o = 0.693$ (flujo mezcla completa)
$t_b =$	21,0	$t_b/t_o =$	1,75	$t_b/t_o \approx 2.3$ (flujo mezcla completa)
$t_m =$	8,0	$t_m/t_o =$	0,67	$t_m/t_o < 1$ (cortos circuitos y/o zonas muertas) $t_m/t_o > 1$ (acumulación indeseada de trazador o error de ensayo)
$e =$	2,2	-		$e \geq 2,3$ (flujo mezcla completa) $e = 0$ (flujo pistón)

$t_o = 12.0$ horas; $C_o = 0.02$ mg/L ; $C_p = 2.0$ mg/L

t_p = tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.

t_i = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.

t_o = tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención (12.0 horas)

$t_c = t_p/2$ o tiempo en que la concentración es mayor que $C_p/2$

t_b = tiempo en que la concentración es mayor que $C_p/10$.

C_p = concentración máxima a la salida

t_m = tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.

e = excentricidad

El valor de 0,43 para la relación t_p/t_o y la tendencia a cero de la relación t_i/t_o evidenció el predominio de flujo mezclado. Los valores de las relaciones t_c/t_o y t_b/t_o , además de mostrar la tendencia de flujo con mezcla completa, también indicaron la presencia de procesos de difusión debidos a corrientes de inercia (turbulencia) y recirculaciones en el reactor. La relación t_i/t_o menor a 0,3 y el valor menor a la unidad de la relación t_m/t_o indicaron la presencia de cortos circuitos o espacios muertos. Debido a que en la curva $C(t)$ no se observaron picos de concentración del trazador antes del valor máximo C_p que indiquen la existencia de corto circuitos, puede afirmarse que en este reactor no se presentó este fenómeno y por el contrario hubo presencia de zonas muertas. La excentricidad (e) de la curva, que está en función de la recirculación del flujo en el interior del reactor [4], confirma la presencia y predominio de flujo con mezcla completa.

A partir del área bajo la curva de la figura 3, se calculó la función de distribución del tiempo de residencia $E(t)$, obteniéndose como TRH real o experimental 9,6 horas, valor inferior al TRH teórico de 12,0 horas; de acuerdo con [8] el desplazamiento de la curva $E(t)$ hacia la izquierda del TRH teórico es un comportamiento típico de un reactor con presencia de espacios muertos. Comparando ambos valores de TRH, se puede estimar la fracción de zonas muertas (f_m) a partir de la diferencia entre la unidad y la relación $TRH_{real}/TRH_{teórico}$, lo que en este caso equivale a 0,2 [20].

En términos generales, el análisis de la curva de tendencia del trazador mostró que el reactor presentó un flujo dual con predominio de mezcla completa, presencia de zonas muertas (20% aproximadamente) y ausencia de cortos circuitos.

- Modelo simplificado de Wolf y Resnick

Los resultados de la aplicación de este modelo se observan en la tabla 4 y en la figura 3. En ellas se observa que el reactor presentó un régimen hidráulico de flujo dual: mezcla completa (37%)

y flujo a pistón (32%) con un predominio ligeramente mayor del primero, lo que coincide con el análisis de la curva de tendencia del trazador. Respecto a la fracción de zonas muertas este modelo matemático indica un porcentaje mayor (31%) al estimado con el cálculo de la fracción f_m (20%) [20].

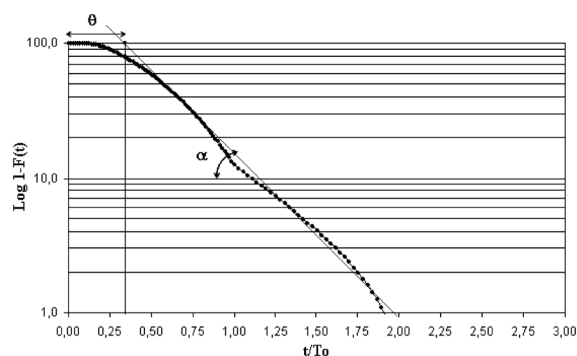


Figura 3 Aplicación método de Wolf Resnick. Ensayo inicial

Empleando la ecuación del modelo de Wolf-Resnick y el TRH real (9,6 horas), se observa que el valor de $F(t)$, correspondiente a la fracción removida o eficiencia de remoción del reactor, sería del orden del 73%. En diferentes estudios reportados [17, 18, 19] las eficiencias de remoción de DQO alcanzadas han variado entre el 50 y 70%; los porcentajes de remoción más bajos estuvieron asociados principalmente a la falta de capacidad buffer.

- Modelo de dispersión axial

El grado de dispersión axial en el reactor se calculó a partir de las ecuaciones planteadas por Levenspiel [8], quien define el número de dispersión para reactores como D/uL . Inicialmente se calculó la varianza (σ^2) usando los resultados obtenidos en el ensayo de trazadores y posteriormente se calculó la expresión $\sigma_{(0)}^2$ usando el TRH real. Los datos de la aplicación del modelo y el índice o número de dispersión (ID) calculado se muestran en la tabla 5.

Tabla 4 Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick. Ensayo inicial

θ	α	p	Zona muerta % (m)	Fracción Mezcla Completa % (M)	Fracción Flujo Pistón % (P)
0,32	1,17	0,46	31	37	32

Ecuación básica de Wolf-Resnick*

$$F(t) = 1 - e^{-n^* \left(\frac{t}{T_0} - \theta \right)}$$

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0} ; \quad n = \frac{1}{(1-p)(1-m)}$$

$$F(t) = 1 - e^{-2.70^* \left(\frac{t}{12} - 0.32 \right)}$$

* Ref. [5, 4]

p: fracción pistón; m: zona muerta; T_0 : TRH experimental; C: concentración de trazador medida en el tiempo t; C_0 : concentración de trazador en el tiempo cero (inicio del ensayo); F(t): fracción o eficiencia de remoción del sistema

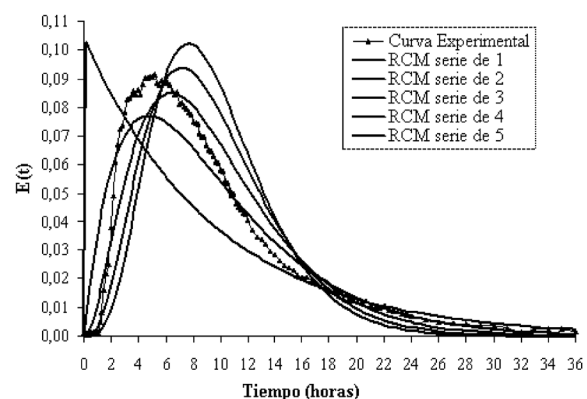
Tabla 5 Resultados de aplicación del Modelo de Dispersión Axial. Ensayo inicial

TRH Experimental (hora)	σ^2 (hora ²)	$\sigma_{(\theta)}^2$	Nº Dispersión (D/uL)
9,6	41,29	0,448	0,143

Valores del número dispersión menores a 0,002 indican grado de dispersión pequeña, valores de 0,025 dispersión intermedia y de 0,2 dispersión grande [8]. Los resultados de la aplicación del modelo indicaron que el reactor presenta un grado de dispersión grande, lo que también confirma la presencia combinada de flujo pistón y mezcla completa.

- Modelo de reactores completamente mezclados en serie-RCM

La figura 4 muestra la curva experimental E(t) obtenida en el ensayo comparada con las curvas E(t) teóricas del modelo de reactores completamente mezclados -RCM en serie de 1 a 5. De acuerdo con el modelo matemático, el predominio del régimen hidráulico con flujo a pistón se incrementa a medida que aumenta el número de RCM en serie. El análisis de correlación de las curvas teóricas con la curva experimental, indicó que ésta presentó la mayor correlación (96%) con el RCM en serie de 2, ratificando la presencia de flujo pistón y mezcla completa.

**Figura 4** Funciones de distribución de tiempos de residencia E(t) experimental y teóricas. Ensayo inicial

En general, el análisis del comportamiento hidrodinámico inicial mostró que el reactor presentó un alto grado de dispersión que lo aleja del flujo a pistón ideal, su comportamiento es tendiente a un RCM en serie de dos y el régimen de flujo es dual con predominio de mezcla completa (37%)

y presencia de zonas muertas en un 31%. Adicionalmente, con el TRH real, correspondiente a 9,6 horas, pueden alcanzarse eficiencias de remoción teóricas de materia orgánica del orden del 73%.

Optimización del diseño del reactor

De acuerdo con los resultados mostrados en este estudio hidrodinámico, se plantearon algunas modificaciones en el diseño del reactor con el objetivo de mejorar su eficiencia y funcionamiento evitando el represamiento del flujo, incrementando la fracción de flujo a pistón y reduciendo el porcentaje de zonas muertas. Las modificaciones se describen a continuación y la figura 5 muestra un esquema del reactor optimizado.

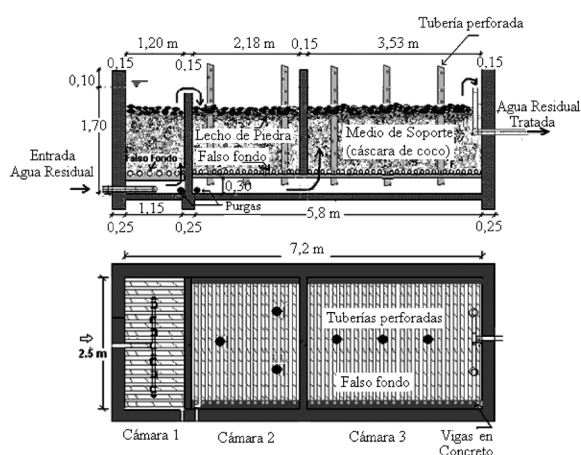


Figura 5 Esquema del filtro anaerobio optimizado

- *Falso fondo en las cámaras 2 y 3:* se construyeron dos vigas en concreto de 30 cm de ancho a lo largo de las cámaras 2 y 3 del reactor que permitieron soportar las varas de guadua empleadas como falso fondo.
- *Implementación de tuberías perforadas para evacuación del biogás:* se empleó tubería PVC sanitaria de 4" con orificios de 3/4" de

diámetro; las tuberías se ubicaron verticalmente distribuidas uniformemente en las cámaras 2 y 3 del reactor.

Ensayo hidrodinámico final

- Análisis de la curva de tendencia

Con el objetivo de evaluar el efecto de las modificaciones realizadas en el diseño del reactor se realizó otro ensayo de trazadores una vez finalizó el periodo de arranque (198 días). La Figura 6 muestra la curva de concentración del trazador vs tiempo obtenida en el estudio hidrodinámico.

En la figura se observa que el tiempo que transcurre desde la inyección del trazador hasta que aparece en el efluente corresponde a $t_i = 1,8$ horas; la fracción de flujo a pistón puede considerarse hasta $t = 2,5$ horas y la fracción de flujo dual (pistón y mezclado) puede estimarse entre 2,5 a 10,5 horas, a partir de este tiempo el flujo predominante es mezclado [5].

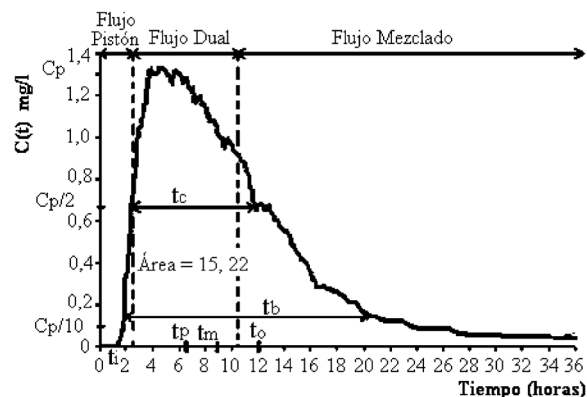


Figura 6 Curva de concentración de trazador vs tiempo. Ensayo final

La tabla 6 detalla los valores de algunos parámetros que permitieron analizar el comportamiento de la curva de tendencia.

Tabla 6 Análisis de la curva de tendencia del trazador. Ensayo final

Parámetro	Relación	Significado (CEPIS, 2004)
$t_p = 6,5$	$t_p/t_o = 0,54$	$t_p/t_o \approx 0$ (predominio flujo mezcla completa) si $t_p/t_o \approx 1$ y $t_f/t_o > 0.5$ (predominio flujo pistón)
$t_f = 1,8$	$t_f/t_o = 0,15$	$t_f/t_o = 0$ (flujo mezcla completa) $t_f/t_o = 1$ (flujo pistón) $t_f/t_o < 0.3$ (cortos circuitos)
$t_c = 10,5$	$t_c/t_o = 0,88$	$t_c/t_o = 0.693$ (flujo mezcla completa)
$t_b = 19,3$	$t_b/t_o = 1,61$	$t_b/t_o \approx 2.3$ (flujo mezcla completa)
$t_m = 8,7$	$t_m/t_o = 0,73$	$t_m/t_o < 1$ (cortos circuitos y/o zonas muertas) $t_m/t_o > 1$ (acumulación indeseada de trazador o error de ensayo)
$e = 1,92$	-	$e = 0$ (flujo pistón) $e \geq 2,3$ (flujo mezclado)

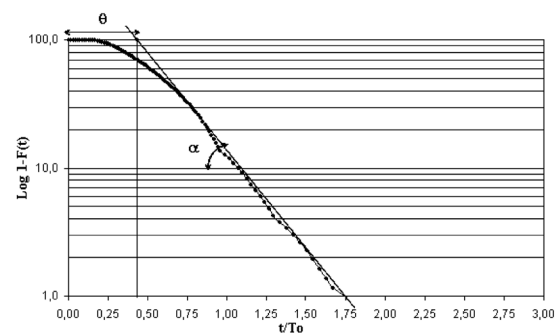
$t_o = 12,0$ horas $C_o = 0$ mg/L ; $C_p = 1,3$ mg/L

Los valores de las relaciones t_p/t_o , t_f/t_o , t_c/t_o y t_b/t_o y la excentricidad evidenciaron el predominio de flujo con mezcla completa. La forma de la curva $C(t)$ mostró que no existen cortos circuitos, sin embargo, las relaciones t_f/t_o y t_m/t_o ratifican la existencia de zonas muertas.

El valor del TRH real o experimental obtenido a partir de la curva $E(t)$ correspondió a 10,2 horas, valor menor al TRH teórico (12 horas), lo que indicó la presencia de espacios muertos que se pueden ratificar con el cálculo de fracción (f_m) correspondiente a 0,15. En términos generales, el análisis de la curva de tendencia del trazador mostró que el reactor presentó un flujo dual con presencia de zonas muertas (15% aproximadamente) y ausencia de cortos circuitos.

- Modelo simplificado de Wolf y Resnick

La aplicación de este modelo se observa en la figura 7 y en la tabla 7. Los resultados indicaron que el reactor presenta un régimen hidráulico de flujo dual: mezcla completa (27%) y flujo a pistón (44%) con predominio del segundo; este comportamiento coincidió con el análisis de la curva de tendencia del trazador.

**Figura 7** Aplicación método de Wolf Resnick. Ensayo final

Respecto a la fracción de zonas muertas, con este modelo se determinó un 29%, porcentaje mayor al obtenido con el cálculo de la fracción f_m (15%). Empleando la ecuación del modelo de Wolf-Resnick y el TRH real (10,2 horas) la eficiencia de remoción teórica del reactor, sería del orden del 78%.

- Modelo de dispersión

Los datos de la aplicación de este modelo se muestran en la tabla 8. El modelo mostró que el reactor presenta un grado alto de dispersión que lo aleja de un régimen de flujo a pistón ideal y que también confirma la existencia combinada de flujo pistón y mezcla completa.

Tabla 7 Resultados de aplicación del modelo de Wolf-Resnick. Ensayo final

θ	α	p	Zona muerta % (m)	Fracción Mezcla Completa % (M)	Fracción Flujo Pistón % (P)
0,44	1,07	0,62	29	27	44

Ecuación básica de Wolf-Resnick*

$$F(t) = 1 - e^{-n \left(\frac{t}{T_0} - \theta \right)}$$

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0} ; \quad n = \frac{1}{(1-p)(1-m)}$$

$$F(t) = 1 - e^{-3,65 \left(\frac{t}{12} - 0,44 \right)}$$

Ref * [5, 4]

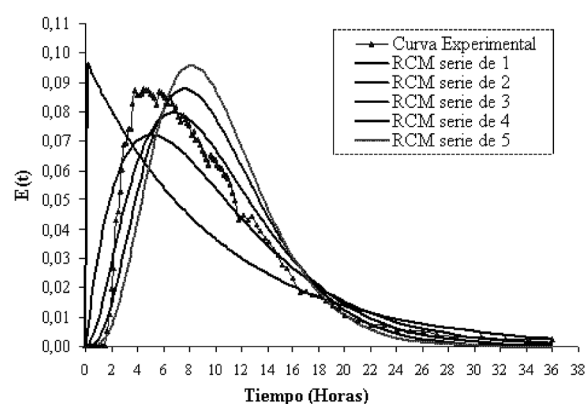
p: fracción pistón; m: zona muerta; T_0 : TRH experimental; C: concentración de trazador medida en el tiempo t; C_0 : concentración de trazador en el tiempo cero (inicio del ensayo); F(t): fracción o eficiencia de remoción del sistema

Tabla 8 Resultados de aplicación del Modelo de Dispersión Axial. Ensayo final

TRH Experimental (hora)	σ^2 (hora ²)	$\sigma_{(t)}^2$	Nº Dispersión D/uL
10,2	40,28	0,387	0,128

- Modelo de reactores completamente mezclados en serie

La figura 8 muestra la curva experimental E(t) obtenida en el ensayo comparada con las curvas E(t) teóricas de reactores completamente mezclados en serie de 1 a 5.

**Figura 8** Funciones de distribución de tiempos de residencia E(t) experimental y teóricas

El análisis de correlación indicó que el reactor presentó la mayor correlación (96%) con el RCM en serie de 3.

En general, las condiciones hidrodinámicas finales del reactor mostraron que el filtro anaerobio presentó un alto grado de dispersión, se comporta como un RCM en serie de tres y presenta un régimen de flujo dual con predominio del flujo a pistón (44%) y presencia de zonas muertas en un 29%. Adicionalmente, con el TRH real pueden alcanzarse eficiencias de remoción teóricas de materia orgánica del orden del 78%.

- Comparación de ensayos hidrodinámicos inicial y final

El análisis de las curvas de tendencia inicial y final mostraron que las modificaciones realizadas en el reactor permitieron incrementar la fracción de flujo a pistón, lo que se reflejó en el mayor tiempo que transcurre desde la inyección del trazador hasta que aparece en el efluente (0,3 ho-

ras en el ensayo inicial y 1,8 horas en el final). Adicionalmente, el incremento de las relaciones t_p/t_o y t_i/t_o y la disminución de la excentricidad (e) en el ensayo final también evidenciaron el incre-

mento de la fracción de flujo a pistón. La tabla 9 muestra una comparación de las principales características del reactor al inicio y final de los estudios hidrodinámicos.

Tabla 9 Comparación de las características inicial y final del reactor

Parámetro	Condición	
	inicial	final
TRH teórico (hora)	12,0	12,0
TRH real (hora)	9,6	10,2
Índice o Número de Dispersión (ID)	0,143	0,128
Número de Morril	4.43	3.85
Flujo a pistón (%)	32	44
Mezcla completa (%)	37	27
Cortos circuitos	No	No
Zonas Muertas (%)	31	29
f_m (fracción zonas muertas) %	20	15
Reactor Completamente Mezclado en serie (Nº reactores)	2	3
Eficiencia de Remoción teórica (modelo Wolf-Resnick) (%)	73	78
Eficiencia de Remoción DQO real (%)	50 - 70*	78-81**

* Ref. [16 - 19]

** Ref. [21]

Al final del estudio, el TRH real se incrementó en un 6% (equivalente a 36 minutos) aproximándose un poco más al TRH teórico. La disminución del ID y el índice de Morril indicaron un incremento del régimen de flujo a pistón, característica que también se verificó con el modelo de Wolf-Resnick en el cual se observó un aumento de la fracción de flujo a pistón del 32% al 44%; adicionalmente, el modelo de RCM en serie cuya tendencia al flujo a pistón se incrementa a medida que aumenta el número de reactores también ratificó lo encontrado con los otros modelos, al incrementarse la tendencia inicial del reactor de un RCM en serie de 2 a uno de 3.

El reactor en ninguna de las dos condiciones evaluadas mostró presencia de cortos circuitos y por

el contrario presentó zonas muertas, cuyo porcentaje se redujo en 2 con la aplicación del modelo de Wolf-Resnick y en 5% con el cálculo de la fracción f_m . Teniendo en cuenta que el régimen de flujo a pistón es más eficiente que el de mezcla completa [13], la condición hidrodinámica final del reactor muestra que las modificaciones realizadas en su diseño optimizaron su comportamiento, lo que repercutió positivamente en las eficiencias de remoción de materia orgánica que pueden alcanzarse en el reactor; esto también se observa en la modelación con el método de Wolf-Resnick de las eficiencias de remoción del reactor que indican un incremento teórico del 73% al 78%.

Las eficiencias de remoción de DQO obtenidas experimentalmente al final del arranque del reac-

tor con un TRH teórico de 12 horas, coincidieron con el valor obtenido con el modelo de Wolf-Resnick, ya que en esta etapa se logró un valor medio del 78% con una desviación estándar de $\pm 4\%$ [21]. Es importante resaltar que no solo el mejoramiento de las condiciones hidrodinámicas favorecieron el incremento de las eficiencias de remoción de materia orgánica sino también el adecuado acondicionamiento de los factores ambientales (capacidad buffer), la selección del inóculo (calidad y cantidad) y algunos factores operacionales (estrategia de arranque) también garantizaron el exitoso desempeño del reactor [21]. En términos generales, se observó que las modificaciones realizadas en el diseño del reactor mejoraron su comportamiento hidrodinámico incrementando el TRH real y a su vez las eficiencias de remoción. Adicionalmente, durante la operación del reactor se observó que el represamiento del flujo en las cámaras 1 y 2 que comúnmente se presentaba varias veces al día, no volvió a ocurrir, permitiendo anular la actividad de sondeo del filtro que realizaba diariamente el propietario de la rallandería.

Conclusiones y recomendaciones

- El análisis de la curva de tendencia y la aplicación de los tres modelos matemáticos (Wolf-Resnick, dispersión axial y RCM en serie) permitieron identificar que la configuración del filtro anaerobio presenta un flujo dual (pistón y mezcla completa) con ausencia de cortos circuitos y presencia de zonas muertas.
- El análisis de la curva de tendencia, la disminución del número de dispersión y la modelación del filtro anaerobio con los modelos de Wolf-Resnick y RCM en serie ratificaron el incremento de la fracción de flujo a pistón evidenciando que las modificaciones planteadas en el diseño del reactor mejoraron su comportamiento hidrodinámico. Estas modificaciones incrementaron el régimen de flujo a pistón de un 31 a 43% y redujeron la fracción zonas muertas en un 5%.

- El mejoramiento de las condiciones hidrodinámicas del reactor también favoreció el incremento de las eficiencias de remoción de materia orgánica y a su vez contribuyó a evitar el represamiento del flujo en el reactor.

Agradecimientos

El estudio se enmarcó en el proyecto de investigación “Producción más limpia aplicada al proceso de extracción de almidón de yuca” financiado por Colciencias y la Universidad del Valle.

Referencias

1. G. Giacomán, L. I. Rejón, S. R. Aguilar. “Evaluación de las características hidráulicas de un reactor de lecho fluidificado para el tratamiento aerobio de las aguas residuales”. México. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales*. 2006.
2. M. A. Rocha, H. Normando, C. Onofre. “Aplicação de tracadores em filtros anaeróbicos para avaliação das características hidrodinâmicas”. Porto Alegre, Brasil. *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - Região Rio Grande do Sul (ABES/RS). XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2000.
3. B. Jiménez, A. Noyola, B. Capdeville. “Selected dyes for residence time distribution evaluation in bioreactors”. *Biotechnology Techniques*. Vol. 2. 1988. pp. 77- 82.
4. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - CEPIS*. “Tratamiento de agua para consumo humano”. Filtración Rápida. Perú. 2004.
5. G. Galvis. “Consideraciones sobre la aplicación del modelo simplificado de Wolf y Resnick”. Barranquilla. Colombia. *XXVII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. 1984.
6. D. Corredor, L.A. Caicedo. “Modelos matemáticos para reactores biológicos de lecho empacado (PBR): una revisión bibliográfica”. *Revista ingeniería e investigación*. Vol. 25. 2005. pp. 101-110.
7. D. Himmelbalu, K. Bishoff. *Process Analysis and Simulation: Deterministic System Analysis y simulación de procesos*. John Wiley and Sons Wiley. New York. 1987. pp. 59-88.
8. O. Levenspiel. *Ingeniería de las reacciones químicas*. New York. Ed. Reverté. S.A. 6ª ed. 1997. pp. 277 -346.

9. N. Cuzin, J. Farinet, C. Segretain, M. Labat. "Methanogenic fermentation of cassava peel using a pilot plug flow digester". *Bioresour. Technology*. Vol. 41. pp. 1992. 259-264.
10. P. Torres, J. Rodríguez, O. Rojas. "Extracción de almidón de yuca. Manejo integral y control de la contaminación hídrica". *CIPAV Livestock Research for Rural Development*. Vol.17. 2005 <http://www.cipav.org.co/lmd/lmd17/7/torr17074.htm>. Consultada Julio 17 de 2007.
11. K. Y. Show, T. J. Hwa. "Influence of support media on biomass growth and retention in anaerobic filters". *Water Research*. Vol. 33. 1999. pp. 1471-1481.
12. X. Colin, J. L. Farinet, O. Rojas, D. Alazard. "Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support". *Bioresour. Technology*. Vol. 98. 2007. pp 1.602-1.607. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.06.020>. Consultada Junio 12 de 2007.
13. M. V. Sperling "Principios básicos do tratamento de esgotos". *Principios do tratamento biologico de aguas residuarias*. DESA. UFMG. Brasil. Vol. 2. 1996. pp. 210.
14. J. Rodríguez, P. Torres. "Optimización del diseño, manejo, operación y control de un filtro anaerobio a escala piloto para la depuración de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca de la región del cauca. Definición de parámetros de diseño para escalamiento". *Proyecto de investigación - Informe final*. Cali, Colombia. PRONATTA, Universidad del Valle, COPRAUCA. 2002. pp. 10 – 45
15. APHA, AWWA, WPCF. "Standard Methods for the examination of water and wastewater". U.S.A. 20ª ed. 1998.
16. P. Torres, J. Rodríguez. *Depuración Anaerobia a Escala Piloto de las Aguas Residuales del Proceso de Extracción de Almidón de Yuca en la Región del Departamento del Cauca*. Proyecto de investigación - Informe final. Cali, Colombia. Universidad del Valle. 2002. pp. 25 -51.
17. J. Caicedo. "Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio de flujo horizontal". Tesis pregrado. Ingeniería Sanitaria. Universidad del Valle. Cali. Colombia. 2004. pp. 60 -81.
18. M. Caicedo, A. Gómez. "Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en un filtro anaerobio de flujo horizontal con baffles". Tesis pregrado. Ingeniería Sanitaria. Universidad del Valle. Cali. Colombia. 2004. pp. 25 -70.
19. M. Valencia, H. Vargas. *Desempeño de un filtro anaerobio de flujo horizontal con guadua como medio de soporte en la depuración de los efluentes provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca*. Tesis pregrado. Ingeniería Sanitaria, Universidad del Valle. Cali, Colombia. 2004. pp. 91.
20. C. R. Lara, J. Díaz, A. Bona. "Evaluación hidráulica de un reactor UASB de compartimientos". Tunja, Boyacá. *Seminario Internacional sobre tratamiento de aguas residuales y biosólidos*. Brasil 2000. pp.129-139.
21. A. Pérez. "Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Mejoramiento de variables operacionales y ambientales". *Tesis de Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Universidad del Valle. . Cali. Colombia. 2007. pp. 88 – 89