

Modelación de filtros sumergidos y aireados

Miguel A. Díaz Marrero

Correo electrónico: migueld@quimica.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

Farah de Armas Machado

Agencia de Medio Ambiente, Ciudad de La Habana, Cuba

Resumen

Se realiza un estudio del comportamiento de un reactor de cama fija sumergido y aireado a escala piloto en el tratamiento de un residual sintético. Los objetivos que se persiguen son modelar el comportamiento de un filtro sumergido y aireado ante variaciones de parámetros operacionales tales como: concentración de la alimentación, tiempo de retención hidráulico, área de empaquetadura y nivel de aireación. Para ello se realizó un diseño de experimento que fue procesado a través del Stat Graphics, determinando la influencia que sobre la remoción de la demanda química de oxígeno tiene estos parámetros o la combinación entre ellos.

Palabras clave: filtros sumergidos y aireados, tratamiento de residuales, biopelícula

Recibido: octubre 2009

Aprobado: diciembre 2009

Publicado: Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXVII, No. 2-3, 2006*

INTRODUCCIÓN

En los últimos diez años aproximadamente, debido a los requerimientos más rigurosos exigidos para los tratamientos de aguas residuales, el aumento de la demanda de espacio libre y la disminución de costos por mantenimiento, los procesos de biopelículas comenzaron a ser frecuentemente usados en el campo de las pequeñas plantas de tratamiento como una alternativa de costo efectiva para la descontaminación de residuales líquidos.

Este tipo de crecimiento es una de las formas más antiguas y común de vida microbiana con una forma de organización especialmente elevada.

Dentro del grupo de procesos de biopelículas se encuentran los **reactores de cama fija sumergida**, que durante décadas han sido conocidos por su gran capacidad para asimilar fluctuaciones de carga, debido a la alta capacidad de adsorción de las biopelículas, así como, por su más

eficiente utilización del espacio si se les compara con las plantas que utilizan los procesos de lodo activado, teniendo además una alta eficiencia en la degradación y una baja producción de lodo. [1-3]

Son precisamente estas características las que hacen de los reactores de cama fija sumergida, ideales para el tratamiento de aguas residuales municipales y efluentes industriales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Formación de biomasa

La biomasa utilizada en el tratamiento fue tomada de una planta de tratamiento de residuales humanos, la cual fue sometida a un proceso de aireación mecánica y alimentación *batch*, adicionándole los nutrientes necesarios de forma tal que se garantizara el crecimiento de la masa microbiana. Cuando se observó que el medio soporte estu-

* Este artículo ha sido seleccionado de la base de publicaciones del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, sometido a revisión técnica y a una edición mejorada para su publicación en Revista Cubana de Ingeniería.

vo cubierto por la película biológica se procedió a alimentar en continuo con la menor de las cargas orgánicas de trabajo.

Descripción del sistema

El esquema de la planta de tratamiento empleada se muestra en la figura 1. EL experimento se realizó en dos columnas cilíndricas de vidrio (R1 y R2) de 10 cm de diámetro y con un volumen total de 3 L. Ambas columnas se empacaron de manera irregular con medios de soportes diferentes compuestos por pequeños anillos hasta una altura de 34,4 cm, ocupando un volumen de 2,7 L.

Las características de las empaquetaduras utilizadas se presentan en la tabla 1.

El residual a tratar alimenta al reactor por medio de dos bombas peristálticas (1 y 1'), que garantizan los flujos deseados, desde el depósito de preparación. El aire suministrado al tratamiento proviene de un compresor (3) pasando por dos medidores de flujo (2 y 2') y se distribuye en los reactores a través de difusores de vidrio.

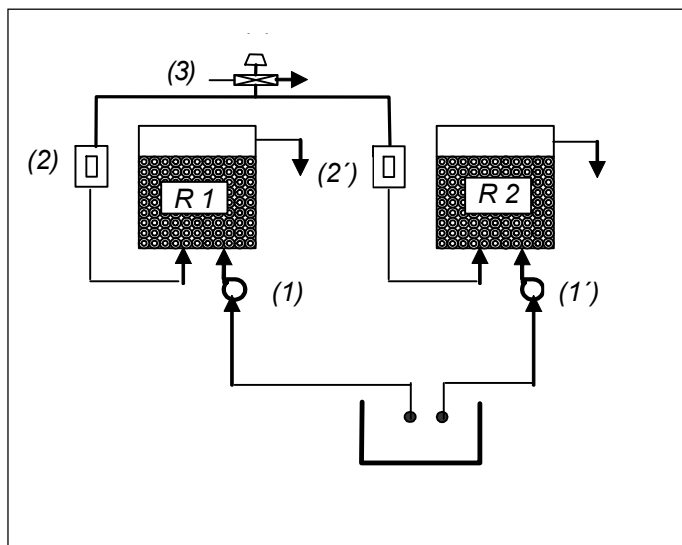


Fig. 1. Esquema de la planta de tratamiento empleada.

Tabla 1
Características de las empaquetaduras utilizadas

	Reactor 1	Reactor 2
Material	vidrio	plástico
Área del espacio de empaquetadura	520	175
Espacio vacío (%)	80	90

Condiciones experimentales

El residual sintético se preparó en el laboratorio a partir de extracto de levadura y peptona con una concentración aproximada de 999 y 1 103 mg L⁻¹ respectivamente, medidos como DQO, para soluciones preparadas de 1 gL⁻¹ de dichas sustancias. La concentración para cada experimento se logró mezclando estas sustancias de manera tal que cada una aportara la mitad de la DQO requerida. La composición de nitrógeno para la levadura y la peptona fueron de 11,7 % y 11,2 % respectivamente. Por experiencias anteriores se sabe que este sustrato presenta un adecuado balance nutricional con respecto a la relación DQO:N:P.[4]

Para estudiar el comportamiento del sistema con diferentes variables operacionales y su influencia en la eficiencia de remoción se realizó un diseño de experimento variando en dos niveles la concentración inicial del residual, el flujo de aireación, el tiempo de retención y las áreas específica de las empaquetaduras.

Combinando estas variables se realizaron dieciséis corridas experimentales (ocho para cada reactor). En la tabla 2 se presentan las diferentes corridas experimentales con los valores de cada una de las variables.

Con los datos obtenidos de la tabla 2 se determinaron los valores de carga orgánica volumétrica (Bv) a utilizar, así como las cargas por unidad específica de empaquetadura (Ba), las cuales se muestran en la tabla 3.

Para el caso del flujo de aire (tabla 4), como este parámetro está relacionado con el volumen del reactor y el área específica de la empaquetadura, para confeccionar el modelo se determinó para los dos niveles de aire la relación:

$$Q_{ae} = \frac{Q_{aire}}{V \cdot A_{esp}} \left[\frac{m^3}{(m^2 \cdot h)} \right]$$

Al finalizar cada corrida se realizaron lavados de los reactores con aire, empleando un flujo que permitiera expandir la cama alrededor de 2 cm por un tiempo de 6 h como mínimo. Este procedimiento se realizó con el fin de eliminar cualquier interferencia que pudiera ocasionar en la eficiencia de remoción de la nueva corrida, el exceso de lodo que quedara atrapado en la cama del reactor.

La temperatura ambiente a la cual se desarrolló el experimento se mantuvo entre los 26 y 30 °C. En cada corrida las características de las corrientes fueron monitoreadas diariamente según los métodos estándar, realizando las siguientes determinaciones:

- DQO. Alimentación y efluente de los reactores.
- Sólidos. Efluente de los reactores.
- pH. Efluente de los reactores.

Tabla 2
Diferentes corridas experimentales con los valores de cada una de las variables

	Corrida No.	Área específica (m ² m ⁻³)	Tiempo de retención (h)	DQO (S ₀) (mg L ⁻¹)	Flujo de aire (Lh ⁻¹)
Reactor 1	1	520	6	500	170
	2	520	6	500	90
	3	520	12	500	170
	4	520	12	500	90
	5	520	6	1 000	170
	6	520	6	1 000	90
	7	520	12	1 000	170
	8	520	12	1 000	90
Reactor 2	9	175	6	500	170
	10	175	6	500	90
	11	175	12	500	170
	12	175	12	500	90
	13	175	6	1 000	170
	14	175	6	1 000	90
	15	175	12	1 000	170
	16	175	12	1 000	90

Tabla 3
Valores de carga orgánica volumétrica y carga por unidad de área de empaquetadura

	DQO (mg L ⁻¹)	Flujo de alimentación (L d ⁻¹)	Ba (g m ⁻² d ⁻¹)	Bv (g m ⁻³ d ⁻¹)
Reactor 1	500	6	2,13	1 111
	500	12	4,27	2 222
	1000	6	4,27	2 222
	1000	12	8,54	4 444
Reactor 2	500	6	6,35	1 111
	500	12	12,69	2 222
	1000	6	12,69	2 222
	1000	12	25,39	4 444

Tabla 4
Flujo de aire alimentado y valores por unidad de volumen del reactor y de superficie de empaquetadora

	Flujo de aire (L h ⁻¹)	Qae (m ³ m ⁻² h ⁻¹)
Reactor 1	170	0,12
	90	0,064
Reactor 2	170	0,36
	90	0,19

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis de los resultados se centra en modelar el efecto de las variables de operación seleccionadas, sobre el porcentaje de remoción de la DQO. Con esta finalidad se utilizó a través del programa Statgraphics, el método de análisis

estadístico **superficie de respuesta**. Este método, permite mediante un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas, realizar la modelación y análisis, en aplicaciones donde una respuesta es influenciada por varias variables aunque el objetivo no es optimizar la misma.

En la tabla 5, se presentan, los valores medios de los parámetros fijados y los porcentajes de remoción obtenidos que van a servir de base para el análisis.

Se seleccionó un orden máximo de interacción de dos variables lo que permite 5° de libertad para el ajuste del modelo. A través de un análisis de varianza del porcentaje de remoción se determinan los efectos significativos sobre la respuesta y el grado de ajuste del modelo. Los resultados obtenidos del programa son expuestos en la tabla 6.

En la tabla citada se comprueba que hay efectos que tienen valores de *P* altos, indicando que ellos no son significativos. El estadístico *R*-square indica que el modelo ha sido ajustado para responder a un 98,689 7 % en la variabilidad de la eficiencia de remoción.

Tabla 5
Valores medios de los parámetros fijados y porcentajes de remoción obtenidos

Experimento	Área espacio de empaquetadura (m ² m ⁻³)	Tiempo de retención (h)	Qae (m ³ m ⁻² h ⁻¹)	DqO0 (mgL ⁻¹)	Remoción (%)
1	520	12	0,064	540,43	92,58
2	175	12	0,36	505,40	94,31
3	520	12	0,12	505,40	95,45
4	175	12	0,19	519,25	91,72
5	520	6	0,064	525,75	88,38
6	175	6	0,36	521,8	91,05
7	520	6	0,12	521,8	90,64
8	175	6	0,19	530,14	86,64
9	520	12	0,12	993,05	90,68
10	175	12	0,19	993,05	83,41
11	520	12	0,064	1116,7	84,76
12	175	12	0,36	1116,7	89,56
13	520	6	0,12	1048,50	87,59
14	175	6	0,19	1048,50	80,37
15	520	6	0,064	1044,83	81,11
16	175	6	0,36	1044,83	86,85

Para simplificar el modelo se excluyen los efectos no significativos, que son Aesp, Qae, y las combinaciones AB, BC y BD. El análisis de varianza para la eficiencia de remoción, teniendo en cuenta solo los efectos significativos quedaría de la forma que se presenta en la tabla 7.

Otra herramienta que sirve para visualizar los efectos en el orden decreciente de magnitud es el Pareto Chart

(figura 2). El largo de cada barra es proporcional al efecto estandarizado, el cual es el efecto estimado dividido por su error estándar, lo cual es equivalente a realizar una prueba estadística *T* a cada efecto.

La línea vertical en el gráfico define los efectos significativos. Las barras que se extienden más allá de la línea, corresponden a efectos estadísticamente significativos para un 95 % de nivel de confianza.

Tabla 6
Análisis de varianza para la eficiencia de remoción

Fuente	Suma de cuadrados	G1	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A: Aesp	1,003 58	1	1,003 58	1,31	0,305 0
B: Tret	2,917 75	1	2,927 75	3,79	0,109 0
C: Qae	1,254 96	1	1,254 96	1,63	0,257 5
D: S _o	15,019 5	1	15,019 5	19,53	0,006 9
AB	0,002 024 03	1	0,002 024 03	0,00	0,961 1
AC	8,503 88	1	8,503 88	11,06	0,020 9
AD	6,875 98	1	6,875 98	8,94	0,030 4
BC	0,168 638	1	0,168,638	0,22	0,659 3
BD	1,238 66	1	1,238 66	1,61	0,260 2
CD	9,965 25	1	9,965 25	12,96	0,015 5
Error total	3,844 81	5	0,768 962		
Total (corregido)	293,436	15			

R-cuadrado 98,689 7 %

Tabla 7
Análisis de varianza para la eficiencia de remoción. Efectos significativos

Fuente	Suma de cuadrados	G1	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
B: Tret	55,332 6	1	55,332 6	61,50	0,000 0
D: S _o	35,185 1	1	35,185 1	39,10	0,000 1
AC	5,900 29	1	5,900 29	6,56	0,028 3
AD	10,554	1	10,554	11,73	0,006 5
CD	7,801	1	7,801	8,67	0,014 7
Error total	8,997 7	10	0,899 77		
Total (corregido)	293,436	15			

R-cuadrado 96,933 7 %

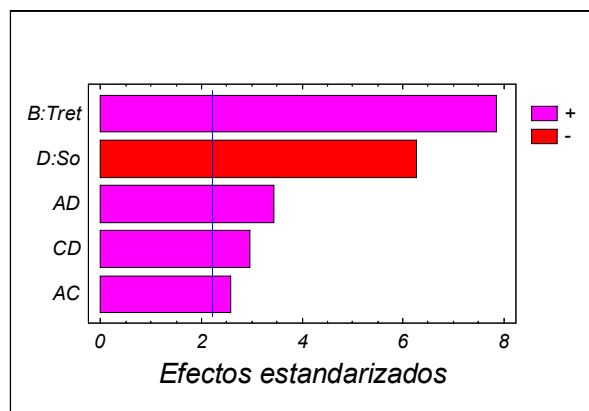


Fig. 2. Gráfico de Pareto estandarizado (%) Rem.

La ecuación ajustada queda de la siguiente forma:
 (%) Rem = $87,727 + 0,619\ 94 \cdot T_{ret} - 0,021\ 501\ 2 \cdot S_o + 0,078\ 643\ 7 \cdot A_{esp} \cdot Q_{ae} + 0,000\ 016\ 817\ 7 \cdot A_{esp} \cdot S_o + 0,025\ 383\ 2 \cdot Q_{ae} \cdot S_o$

donde:

(%) Rem = $(DQO_{inicial} - DQO_{final})100/DQO_{inicial}$

S_o : Concentración inicial del residual (mg/L de DQO).

A_{esp} : Área específica de empaquetadura (m^2/m^3).

Q_{ae} : Flujo de aire por unidad de volumen del reactor y por unidad de área específica de empaquetadura [$m^3/(m^2h)$].

T_{ret} : Tiempo de retención (h).

El modelo describe satisfactoriamente la variabilidad del porcentaje de remoción para un 96,933 7 % de ajuste. La influencia de cada variable sobre el porcentaje de remoción, sigue el siguiente orden decreciente; concentración inicial del residual, flujo de aire empleado, tiempo de retención hidráulico y área específica de empaquetadura.

Eficiencias de remoción entre el 80 y 95 % fueron alcanzados para las condiciones experimentales seleccionadas. La contribución de cada variable al cambio de los porcentajes de remoción se muestra en las tablas 8a, b, c y d.

Tabla 8a
Concentración de la alimentación

	S_o (mg/L)			≈ 500	$\approx 1\ 000$	(%) Remoción
	A_{esp} (m^2/m^3)	T_{ret} (h)	Q_a (L/h)	(%) Remoción	(%) Remoción	
Reactor 1	520	12	90	92,58	84,76	7,82
	520	12	170	95,45	90,68	4,77
	520	6	90	88,38	81,11	7,27
	520	6	170	90,64	87,59	3,05
Reactor 2	175	12	90	91,72	83,41	8,31
	175	12	170	94,31	89,56	4,75
	175	6	90	86,64	80,37	6,27
	175	6	170	91,05	86,85	4,2

Tabla 8b. Flujo de aire

	Q_a (L/h)			90	170	(%) Remoción
	A_{esp} (m^2/m^3)	T_{ret} (h)	$\approx S_o$ (mg/L)	(%) Remoción	(%) Remoción	
Reactor 1	520	12	500	92,58	95,45	2,87
	520	6	500	88,38	90,64	2,26
	520	12	1 000	84,76	90,68	5,92
	520	6	1 000	81,11	87,59	6,48
Reactor 2	175	12	500	91,72	94,31	3
	175	6	500	86,64	91,05	4,41
	175	12	1 000	83,41	89,56	6,15
	175	6	1 000	80,37	86,85	6,48

Tabla 8c. Tiempo de retención

	Tret (h)			6	12	(%) Remoción
	Aesp (m^2/m^3)	Qa (L/h)	S _o (mg/L)	(%) Remoción	(%) Remoción	
Reactor 1	520	90	500	88,38	92,58	4,2
	520	90	1 000	81,11	84,76	3,65
	520	170	500	90,64	95,45	4,81
	520	170	1 000	87,59	90,68	3,09
Reactor 2	175	90	500	86,64	91,72	5,08
	175	90	1 000	80,37	83,41	3,04
	175	170	500	91,05	94,31	3,26
	175	170	1 000	86,85	89,56	2,71

Tabla 8d. Área de la empaquetadura

Aesp (m^2/m^3)			520 Reactor 1	175 Reactor 2	(%) Remoción
Tret(h)	Qa (L/h)	S _o (mg/L)	(%) Remoción		
12	90	500	92,58	91,72	0,86
12	90	1 000	84,76	83,41	1,35
12	170	500	95,45	94,31	1,14
12	170	1 000	90,68	89,56	1,12
6	90	500	88,38	86,64	1,74
6	90	1 000	81,11	80,37	0,74
6	170	500	91,05	90,64	0,41
6	170	1 000	87,59	86,85	0,74

Los resultados obtenidos permiten establecer que una disminución en el porcentaje de remoción, producida por un aumento de la concentración inicial del residual, puede ser compensada a través de un aumento del flujo de aire empleado, lo cual puede verse en el gráfico de interacción de factores (figura 3), obtenido del modelo desarrollado por el programa Statgraphic, donde se relaciona el porcentaje de remoción en función de estas dos variables manteniendo el resto constantes en su valor central.

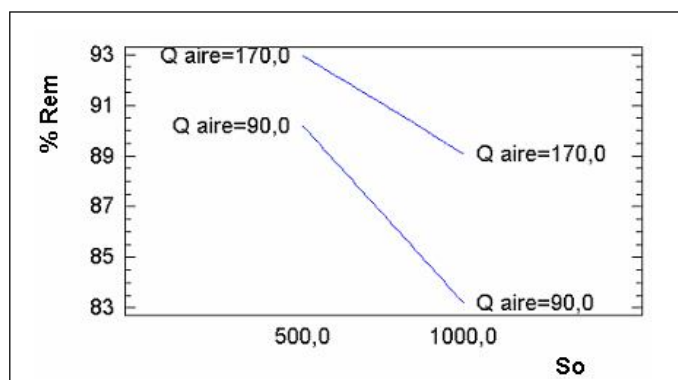


Fig. 3. Interacción para el porcentaje de remoción.

En esta investigación no se caracterizó el consumo de oxígeno, sin embargo, se puede afirmar, que los niveles de flujo de aire utilizados, garantizaron un proceso aerobio en la oxidación de materia orgánica. Una comparación entre los flujos reportados en la literatura para este tipo de tratamiento en función de la superficie del soporte y los empleados en este estudio, se muestra en la tabla 9.

Los tiempos de retención utilizados en el sistema, contribuyeron a incrementar la remoción entre un 2,7 y 5 %. Resultados similares fueron obtenidos por Fang & Yeong [5,6], para un amplio rango de tiempos de retención de (4-14 h).

Como puede apreciarse en los resultados, el empleo de una mayor área específica de empaquetadura solo ofrece incrementos entre 0,4 y 1,7 en la eficiencia de remoción. Este parámetro puede tener más influencia para cargas mayores.

Con respecto al área específica de empaquetadura puede también estar sucediendo que al aumentar aproximadamente al triple la misma, para volúmenes iguales de los reactores, el espacio vacío o volumen efectivo disminuye desde un 90 % a un 80 %, este último inferior al espacio vacío sugerido por la literatura (85 %). Es de esperar entonces que la selección de una superficie específica muy grande para las cargas orgánicas empleadas produzca una disminución del área inicialmente diseñada por el sobrecrecimiento de la biopelícula en la estructura del soporte, y como consecuencia una menor transferencia de oxígeno hacia el interior de la misma, resultados que concuerdan con lo planteado por la literatura.

La tabla 10 refleja cómo en el efluente hay una tendencia de los sólidos suspendidos totales a aumentar con la concentración inicial, a pesar de que la producción de lodos en los sistemas de película fija no obedece a un desprendimiento continuo. Además, se aprecia que los valores más altos aparecen en los experimentos impares que corresponden a la mayor área específica de empaquetadura, que origina una mayor cantidad de biomasa en el interior del reactor.

Referencias	[m ³ /(h.m ²)]	(%) Remoción
Biotechnology	5-15	
Bjorn Rusten	0,054 3 - 0,089	70-75
Experimentado	0,064 - 0,36	80-95

Reactor 1			Reactor 2		
Exp	DQO _o (mgL ⁻¹)	SST (mgL ⁻¹)	Exp	DQO _o (mgL ⁻¹)	SST (mgL ⁻¹)
1	540,43	21,2,5	2	505,40	30,67
3	505,40	370,67	4	519,25	75,33
5	525,75	490,5	6	521,8	64
7	521,8	343,33	8	530,14	56,5
9	993,05	756,67	10	993,05	78
11	1 116,17	980.33	12	1 116,17	72
13	1 048,50	880	14	1 048,50	240
15	1 044,83	923,33	16	1,044,83	74

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo un modelo que describe el porcentaje de remoción de la DQO para filtros sumergidos aireados en función de la concentración inicial del residual, flujo de aire, tiempo de retención y área específica de la empaquetadura, con un coeficiente de ajuste del 96,933 7 %.

2. En los rangos en que se trabajaron las variables independientes, la influencia de las mismas sobre el porcentaje de remoción sigue el siguiente orden decreciente:

a) Concentración inicial del residual.

Afecta negativamente al incrementar la concentración de 500 a 1 000 mg/L, llegando en las corridas realizadas hasta un 8,31%.

b) Flujo de aire.

Produce incrementos en el porcentaje de remoción al variar entre 90 y 170 L/h llegando hasta 6,48%.

c) Tiempo de retención.

Produce incrementos en el porcentaje de remoción cuando se varía de 6 a 12 h llegando hasta un 5,08 %.

d) Área específica de empaquetadura.

Produce incrementos en el porcentaje y la remoción cuando se varía de 175 a 520 m²m³ llegando hasta 1,74 %.

3. Los resultados obtenidos permiten establecer que una disminución en el porcentaje de remoción, producida por un incremento de la concentración inicial del residual, puede ser contrarrestada a través de un aumento del flujo de aire empleado, manteniendo constante el área específica de empaquetadura y el tiempo de retención.

4. En el efluente hay una tendencia de los sólidos suspendidos totales a incrementarse con el aumento de la con-

centración inicial, a pesar que la producción de lodos en los sistemas de película fija no obedece a un desprendimiento continuo. También se aprecia que los valores mayores aparecen en el reactor que tiene la empaquetadura de mayor área específica, debido a que se origina una mayor cantidad de biomasa en el interior del mismo.

REFERENCIAS

1. **DÍAZ, M. y MONTESINO, M. A.** "Filtros sumergidos aireados", *Revista Ingeniería Hidráulica. Ciudad de La Habana: Cujae. n° 1, vol. XXIV, 2003.*
2. **BEACHELER, V. J.; ZAMBRANO, M. E. y URRUTIA, H. B.** "Estudio de la cinética de crecimiento de biopelícula bacteriana aplicada en el tratamiento de riles". En XIV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 2001, Santiago de Chile.
3. **BEYENAL, H. and LEWANDOWSKI, Z.** "Internal and External Mass Transfer in Biofilms Grown at Various Flow Velocities". *Biotechnology Program. 2002, vol.18, p.55-61.*
4. **CASTAÑEDA, E.** "Sedimentación y nitrificación en los tratamientos biológicos por lodos activados". Tesis de Maestría. Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba, 1999.

5. **FANG, H. H. P. et al.** "Removal of COD and Nitrogen in Wastewater Using Sequencing Batch Reactor with Submerged Fibrous Parking". En *IAWPRC. Regional Conf. (Asian Waterqual 1991), 1991.*
6. **FANG, H. H. P. and YEON, C. L. Y.** "Biological Wastewater Treatment in Reactor with Fibrous Parking". *Journal of the Environmental Engineering. 1993, vol. 119, n° 5.*
7. "Environmental Processes I. Submerged Fixed Bed Reactor". *Biotechnology. Second Completely Revised Edition. 2002, vol. 11, 350-363.*

AUTORES

Miguel A. Díaz Marrero

Ingeniero Químico, Máster en Ingeniería y Saneamiento Ambiental, Profesor Auxiliar, Centro de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

Farah de Armas Machado

Ingeniera Química, Agencia de Medio Ambiente, Ciudad de La Habana, Cuba

Modelling of Submerged and Aerated Filters

Abstract

Biofilm processes have been profusely used during the last ten years. This, due to the more and more rigorous standards for wastewater treatment and the necessity of a better use of the space. Biofilm processes include the "submerged fixed bed reactors". Such reactors are characterized by their high buffer capacity as a consequence of the organic load fluctuations originated by the high capacity of adsorption of the biofilm. This paper shows the modeling of an aerated fixed bed submerged reactor at pilot plant scale, for the treatment of a synthetic substrate. An experiment design was used. Operational variables used were organic matter concentration as COD, hydraulic retention time, packing area and aeration level.

Key words: biofilm, wastewater treatment, aerated submerged fixed bed reactors