

DISEÑO DE SISTEMAS DE BIOPELÍCULA, PARA TRATAMIENTO AGUAS RESIDUALES.

M. I. David Gómez Salas

CONTENIDO

1. Generalidades
2. Premisas para deducción de una ecuación general de diseño.
3. Ecuación de diseño
4. Requerimientos de área para diferentes procesos de biopelícula
5. Biofiltro
6. Biodiscos
7. Biofiltro aereado sumergido, bas.
8. Película fija sumergida, pfs.
9. Aplicación de la ecuación general de diseño en los sistemas de biofiltro, biodiscos y bas.
10. Referencias

AGRADECIMIENTOS

Doctor Pedro Martínez Pereda
Ing. Miguel Ángel de la Peña
Ing. Mónica López Santos
Delegación Xochimilco, DDF
Nacional de Tecnologías

GENERALIDADES

Los procesos biológicos para tratamiento de aguas residuales denominados de Biopelícula, utilizan un medio plástico para el desarrollo de microorganismos. En este tipo de procesos el medio plástico entra en contacto con el agua residual y crecen microorganismos adheridos a la superficie, formando una capa de microorganismos que constituye una película biológica. Estos microorganismos se alimentan de la materia orgánica disuelta en el agua residual.

Los sistemas aerobios de Biopelícula más conocidos son: Biofiltros, Biodiscos, Biofiltros Aereados Sumergidos (BAS) y Película Fija Sumergida (PFS). Existen más sistemas.

El sistema de Biofiltro, es una torre empacada con medio plástico situado sobre un dren elevado, por lo que todo el medio plástico se encuentra totalmente ventilado. El agua residual se descarga sobre el Biofiltro, por medio de aspersores que rocían la superficie superior del lecho empacado. Todas las gotas escurren por gravedad sobre el medio plástico y caen libremente después por el dren mencionado.

El sistema de Biodiscos, está integrado por un conjunto de discos de plástico que se sostienen por medio de una flecha de acero que va en el centro de dichos discos. La parte inferior de los discos está sumergida en un tanque por el que fluye agua residual y la parte superior se encuentra en contacto con el aire de la atmósfera. Al girar los discos se logra que todas las partes de los discos estén continuamente en contacto con el agua y con el aire. Los microorganismos que crecen adheridos a la superficie de los discos tienen oportunidad de alimentarse con la materia orgánica disuelta en el agua residual (cuando están abajo) y de tomar el oxígeno del aire para respirar (cuando están arriba).

El sistema de Biofiltro Aereado Sumergido (BAS), como su nombre lo indica es un Biofiltro que se encuentra sumergido en un tanque por el que fluye agua residual, por lo que todo el medio plástico se encuentra totalmente dentro del agua y se inyecta aire al tanque para que se desarrolle el proceso aerobio. El aire que se suministra por el fondo del tanque, abajo del medio plástico, asciende entre las separaciones del medio plástico y entra en contacto con los microorganismos que forman la película biológica. El aire proporciona el oxígeno requerido para la respiración endógena de los microorganismos y para la oxidación de la materia orgánica que toman como alimento.

El sistema de Película Fija Sumergida (PFS), es similar al BAS; la diferencia fundamental es que existe mayor contacto de la superficie plástica con el agua residual y el aire inyectado. El medio plástico se encuentra totalmente sumergido en un tanque por el que fluye agua residual y está sometido a una aereación intensa, que evita existan superficies “ociosas”, es decir no existen zonas con bajas tasas de crecimiento de Biopelícula. Las burbujas de aire difundido provocan un movimiento de convección forzada, que favorece el número de choques entre el sustrato(alimento), la película biológica (microorganismos) y el oxígeno contenido en el aire. En otras palabras, el mezclado y suministro de oxígeno son más intensos a los que existe en el sistema BAS.

En todos los procesos de Biopelícula, los microorganismos producidos por la oxidación de la materia orgánica se van adhiriendo inicialmente a las paredes del medio plástico y posteriormente se forman varias capas biológicas sobrepuestas. Esto ocasiona que los microorganismos de la última capa (la exterior) tengan mayor contacto con el alimento y con el oxígeno del aire; en cambio, la capa adherida a la superficie plástica (la interior) cada vez tiene menos contacto con el sustrato y el oxígeno, por lo que en esta zona se dificulta la alimentación y respiración; hasta que muere y se desprende del plástico.

En el caso del Biofiltro, el agua que escurre por gravedad arrastra la biopelícula parcialmente muerta. En el caso del Biodisco, la fuerza de fricción que se produce al girar los discos dentro del agua hace más eficiente el desprendimiento de la Biopelícula parcialmente muerta. En el caso de BAS y PFS, el aire al ascender por el medio plástico, favorece el desprendimiento y arrastre de la biopelícula parcialmente muerta. A mayor turbulencia mayor fuerza de arrastre.

En todos los casos, en la superficie plástica que queda libre al desprenderse la película envejecida, se inicia el crecimiento de una nueva película. Es un proceso dinámico repetitivo.

El efluente de los sistemas de Biopelícula, que contiene flóculos de biopelícula parcialmente muerta, se conduce a un tanque de sedimentación, en donde, por la fuerza de gravedad, los flóculos caen al fondo, y el agua clarificada se obtiene por la parte superior.

PREMISAS PARA DEDUCCIÓN DE UNA ECUACIÓN GENERAL DE DISEÑO, PARA PROCESOS DE BIOPELÍCULA.

La concentración de DBO en el agua residual varía a lo largo del reactor. La concentración de DBO disminuye en el sentido del flujo. El movimiento de cada partícula es siempre hacia adelante y no hay mezcla retrograda. La cinética de reacción es de segundo orden e irreversible. El reactante **A** es la materia orgánica expresada como DBO (alimento) y del reactante **B** son los microorganismos que se alimentan de la materia orgánica. La concentración del reactante **B** depende del área del medio plástico y condiciones del proceso. El producto de la reacción es el incremento de biomasa de los microorganismos, que es a la vez es el reactante **B**. (No incluye otros subproductos resultantes del metabolismo de los microorganismos). La relación $M = \text{reactante B} / \text{reactante A}$, varía continuamente en el tiempo. Los reactantes A y B, no se alimentan de acuerdo a alguna relación estequiométrica (Siempre existirá reactante **B** para cualquier concentración del reactante **A**). El medio en que se realiza el proceso (aguas residuales) es de densidad constante, por lo que se puede ignorar la variación de volumen del caudal por el efecto de la temperatura. Se considera únicamente el comportamiento del proceso en régimen estacionario (no se aborda la etapa en que no se han alcanzado dichas condiciones). Si disminuye el gasto masa de DBO que alimenta al proceso de Biopelícula, se dificulta la alimentación de los microorganismos, se favorece el desprendimiento de la biopelícula del medio plástico y disminuye la concentración de **B** en el reactor. Si aumenta el gasto masa de DBO alimentado al reactor, se favorece la alimentación y crecimiento de los microorganismos, y aumenta la concentración de **B** en el reactor.

ECUACIÓN DE DISEÑO

Tomando en cuenta el marco conceptual mencionado, se definen las variables y relaciones siguientes:

- Fa = Gasto de masa de entrada del reactante A, DBO mg/s.
- Xa = Fracción del reactante A convertida en producto, adimensional.
- r_a = Velocidad de reacción del reactante A, basada en volumen de fluido
- V = Volumen total del reactor
- dV = Diferencial de volumen

El balance de materia, se expresa:

Entra = sale + degrada (oxida)

En donde los componentes del balance, son:

Entra = Fa (gasto masa de entrada)

Sale = Fa + dFa (gasto masa con la fracción convertida en producto)

Degrada = - r_a dV (desaparece por reacción)

Substituyendo:

Fa = (Fa + dFa) + (- r_a) dv

dFa = r_a dv

La variación diferencial del gasto masa del reactante A en términos de la fracción convertida

Fa = Fa_o - FaoXa

Fa = Fao (1 - Xa)

dFa = d { Fao(1 - Xa) }

dFa = -Fao d Xa = r_A dV

$$\frac{dV}{F_{ao}} = \frac{dX_a}{-r_a}$$

$$\int_0^V \frac{dV}{F_{ao}} = \int_0^{X_a} \frac{dX_a}{-r_a}$$

Por lo tanto:

$$\frac{V}{F_{ao}} = \int_0^{X_a} \frac{dX_a}{-r_a}$$

C_{ao} = Concentración inicial del reactante A, en mg/l

Q = Gasto volumétrico del fluido, l/s

$$F_{ao} = C_{ao}Q$$

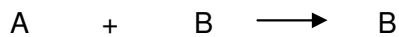
$$\frac{V}{C_{ao}Q} = \int_0^{X_a} \frac{dX_a}{-r_a}$$

Por lo tanto:

$$\frac{V}{Q} = C_{ao} \int_0^{X_a} \frac{dX_a}{-r_a} = t_r$$

t_r = Tiempo de retención o residencia, aparente.

Para reacción de segundo orden se tiene:



$$r_a = r_b = k C_a C_b$$

$$k = \text{Constante cinética, día}^{-1} \cdot (\text{mg/l})^{-1}$$

$$C_b = \text{Concentración de microorganismos, mg/l}$$

$$C_a = \text{Concentración del sustrato, mg/l}$$

$$tr = C_{ao} \int_0^{X_a} \frac{dx}{-k C_a C_b}$$

Se define: $M = \frac{C_b}{C_a}$

Por lo tanto: $C_b = M C_a$

Para: $M \neq 1$

Al integrar y sustituir límites, se obtiene:

$$tr = \frac{1}{k C_{ao} (M-1)} \ln \frac{M - X_a}{M(1-X_a)}$$

$$tr = \frac{1}{k C_{ao} (M-1)} \ln \frac{1 - X_a/M}{1 - X_a}$$

Tomando en cuenta que la relación M se expresa en la forma:

$$M = \frac{C_{bo}}{C_{ao}}$$

En esta relación:

C_{ao} = Concentración inicial de DBO en mg / l

C_{bo} = Concentración de microorganismos en el reactor en mg/l

La concentración C_{bo} en mg/l, es el peso de la biopelícula (W_p) en mg, dividido entre el volumen del reactor (V_r) en litros.

$$C_{bo} = W_p / V_r, \text{ en mg/ l}$$

W_p = Peso de la biopelícula, en mg

V_r = Volumen del reactor, en litros

El peso de los microorganismos W_p en mg, es el volumen de la biopelícula V_p en cm^3 multiplicado por el peso específico de la biopelícula Y_p en mg/cm^3 .

$$W_p = V_p \times Y_p, \text{ en mg}$$

$$V_p = \text{Volumen de la biopelícula, en cm}^3$$

$$Y_p = \text{Peso específico de la biopelícula, en mg / cm}^3$$

El volumen de la biopelícula V_p en cm^3 , es el área de la biopelícula A_p en cm^2 multiplicada por el espesor medio de la biopelícula E_p en cm.

$$V_p = A_p \times E_p \text{ en cm}^3$$

$$A_p = \text{Area de la biopelícula en cm}^2$$

$$E_p = \text{Espesor medio de la biopelícula en cm}$$

Sea la relación M:

$$M = \frac{C_{bo}}{C_{ao}} = \frac{A_p \cdot E_p \cdot Y_p / V_r}{C_{ao}}$$

$$D = \text{Densidad del medio} = \text{área para película / volumen del reactor} = \frac{A_p}{V_r} \text{ (cm}^2 / \text{litro)}$$

$$M = \frac{D \cdot E_p \cdot Y_p}{C_{ao}}$$

Se define una constante de proporcionalidad, denominada P, para el producto de multiplicar el espesor medio de la biopelícula por el peso específico de ella.

$$P = E_p \cdot Y_p \text{ (cm. mg/cm}^3 = \text{mg/cm}^2\text{)}.$$

M se puede expresar de la forma siguiente:

$$M = \frac{P \cdot D}{C_{ao}}$$

La concentración inicial $C_{ao} = S_o$ (concentración de DBO inicial)

M se puede expresar de la forma siguiente:

$$M = \frac{P \cdot D}{S_o}$$

Sustituyendo C_{ao} por S_o y M por la expresión anterior en la ecuación del tiempo de retención, se obtiene:

$$tr = \frac{1}{k S_o (PD/S_o - 1)} \ln \frac{1 - X_a S_o / PD}{1 - X_a}$$

Análisis dimensional:

$$tr = \frac{1}{(\text{día}^{-1} \cdot (\text{mg/l})^{-1} \cdot \text{mg/l} [(\text{mg/cm}^2) \cdot (\text{cm}^2 / \text{litro}) / (\text{mg/l}) - \text{adim}]} = \text{días}$$

El caudal del influente Q se expresa en m³/d, para obtener el volumen del reactor en m³.

$$V_r = Q \cdot tr$$

$$V_r = m^3/d \cdot d = m^3$$

Para obtener el área total de contacto At (medio plástico) en metros cuadrados, se aplica el valor de la de la densidad del medio en m²/m³.

$$D \text{ en } m^2/m^3 = \frac{D \text{ en } cm^2/l}{10}$$

$$A_t = V_r \cdot D$$

$$A_t = m^3 \cdot m^2/m^3 = m^2$$

k, es la constante cinética. Por ser una reacción con cinética de segundo orden se expresa en $\text{Tiempo}^{-1} \cdot \text{Concentración}^{-1}$. En este caso, $\text{día}^{-1} \cdot (\text{mg/l})^{-1}$. El valor determinado experimentalmente para PFS a temperatura de 20 °C, $k = 0.016 \text{ días}^{-1} \cdot (\text{mg/l})^{-1}$

P, es proporcional a la concentración de microorganismos en la superficie de medio plástico, depende del espesor de la biopelícula y su peso específico. Y_p (cm. $\text{mg/cm}^3 = \text{mg/cm}^2$). El valor determinado experimentalmente para PFS a temperatura de 20 °C, $P = 2.3 \text{ mg} / \text{cm}^2$.

REQUERIMIENTOS DE ÁREA PARA DIFERENTES PROCESOS DE BIOPELICULA

Para mostrar las diferencias de requerimientos de área entre diferentes sistemas de biopelícula, se presenta como ejemplo, un influente unitario (1l/s) con DBO de 200 mg/l, y se calculan las áreas de contacto para niveles de remoción de 0% a 90 %. En la figura 1 se presentan los resultados. Las ecuaciones aplicadas se presentan a continuación.

BIOFILTRO

Ecuación de Germaín. Altura empacada, $Z = \frac{\ln (S_o/S_e) * q^n}{k}$

S_o = DBO del influente en mg/l = 200 mg/l
 S_e = DBO del efluente en mg/l = Es función de la remoción.
 q = Caudal específico m³/hr/m² = 1.8
 n = Constante del empaque = 0.5
 K = Constante cinética = 0.09
Área transversal del biofiltro, $A_t = Q/q$
 Q = Caudal del influente en m³/hr = 3.6
Área de contacto, $A = A_t .Z. D$
 D = Densidad del empaque m²/m³ = 88

BIODISCOS

1. Ecuación de Kinkanon Stove $A = \frac{Q S_o}{\frac{K_1 * S_o}{S_o - S_e} - K_2}$

K_1 = Constante = 3.403
 K_2 = Constante = 3.37
 S_o = DBO del influente en mg/l = 200
 S_e = DBO del efluente en mg/l = Función de la remoción
 Q = Caudal del influente en l/s = 1

2. Ecuación de Popel $A = \frac{Q(S_o - S_e)}{K(S_e)^{1/2}}$

K = Constante = 2.3
 Q = Caudal del influente en m³/d = 86.4
 S_o = DBO del influente en mg/l = 200
 S_e = DBO del efluente en mg/l = Función de la remoción

BIOFILTRO AEREO SUMERGIDO, BAS.

Ecuación Rusten Bjorn: $r DQO = 273 * BDQO / (BDQO + 360)$

BDQO.- Carga orgánica aplicada en g DQO/m²/d

$r DQO$.- Tasa de remoción en g DQO removidos/m²/d

La relación entre la concentración de la DQO y la DBO, la expresa en la forma siguiente:

$DBO = 0.381 DBO - 8.8$ en mg/l

PELÍCULA FIJA SUMERGIDA, PFS.

Ecuación de David Gómez : Ecuación de este artículo.

$$k = 0.016 \text{ días}^{-1} \cdot (\text{mg/l})^{-1}$$

$$P = 2.3 \text{ mg / cm}^2.$$

$$D = \text{Densidad del empaque} = 330 \text{ cm}^2/\text{l}$$

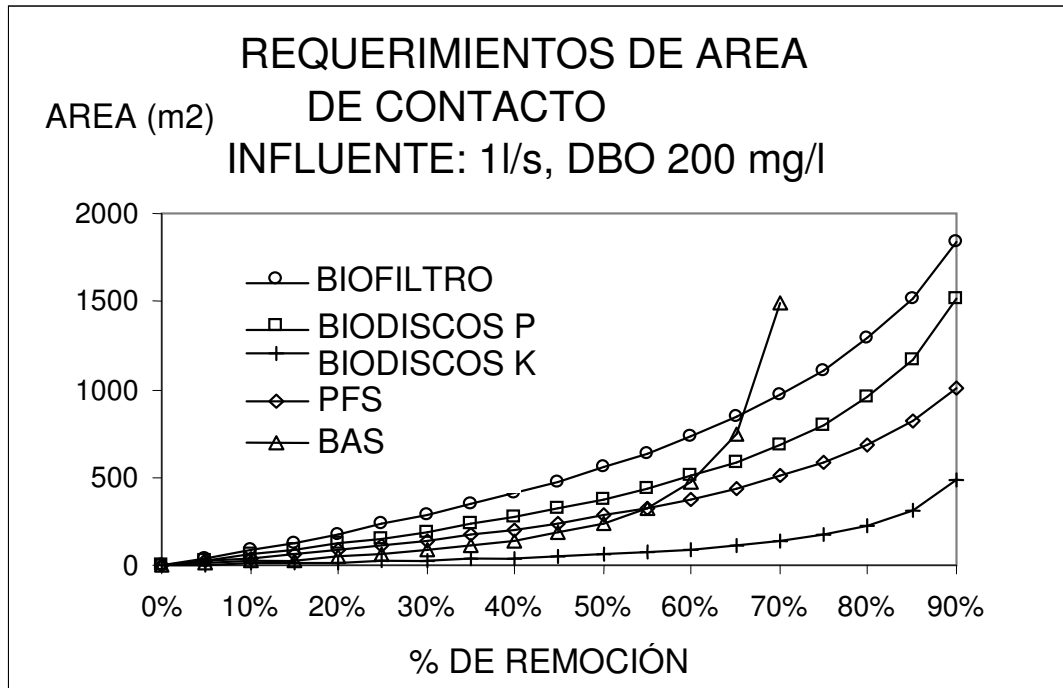


Figura 1. Ejemplo de requerimientos de área para BIOFILTRO (Germaín), BIODISCOS (kinkanon), BIODISCOS (Popel), BAS (Rusten) y PFS (Gómez)

APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE DISEÑO EN LOS SISTEMAS DE BIOFILTRO, BIODISCOS Y BAS.

La ecuación general de diseño presentada en este artículo, deducida originalmente para el sistema de Película Fija Sumergida (PFS), puede aplicarse también para el diseño de Biofiltros, Biodiscos y Biofiltro Aereado Sumergido (BAS), aplicando valores de los parámetros P y K, que reflejen las características de estos sistemas.

Teóricamente el valor del parámetro P será menor para los sistemas que tienen menos superficie plástica activa, cuando hay menor contacto entre la biopelícula y la materia orgánica disuelta en el agua residual; cuando hay menor contacto de la Biopelícula con el oxígeno; y cuando son más débiles las fuerzas que remueven la biopelícula envejecida, parcialmente muerta.

Teóricamente el valor del parámetro k será menor en los sistemas en que se desarrollen microorganismos con menor capacidad para oxidar la materia orgánica disuelta en el agua residual.

A continuación se presentan ejemplos para Biofiltro y Biodiscos que corresponden a un caudal unitario de 1 l/s, concentración inicial de DBO de 200 mg/l, y niveles de remoción de 10% a 90%. El ejemplo del sistema BAS, presenta concentraciones de 100 mg/l a 360 mg/l., para comparar con la ecuación de Rusten Bjorn, que se basa en la carga orgánica por unidad de superficie plástica.

Para aplicar la ecuación general de diseño al sistema de Biofiltro, los valores de P, k y D son los siguientes: $P = 3.275 \text{ mg / cm}^2$. $k = 0.006 \text{ días}^{-1} \cdot (\text{mg/l})^{-1}$. $D = 880 \text{ cm}^2/\text{l}$. Los cálculos del área de contacto con las ecuaciones de Germain y de Gómez, dan resultados similares, según se muestra en la figura 2.

% DE REMOCIÓN	BIOFILTRO ÁREA DE CONTACTO, m ²	
	Germain	Gómez
0.0	0.0	0.0
0.1	55.6	50.7
0.2	110.3	107.8
0.3	176.2	173.0
0.4	252.4	248.8
0.5	342.5	339.0
0.6	452.8	450.3
0.7	594.9	594.8
0.8	795.3	800.0
0.9	1,137.8	1,153.4

BIOFILTRO Q = 1 L/S

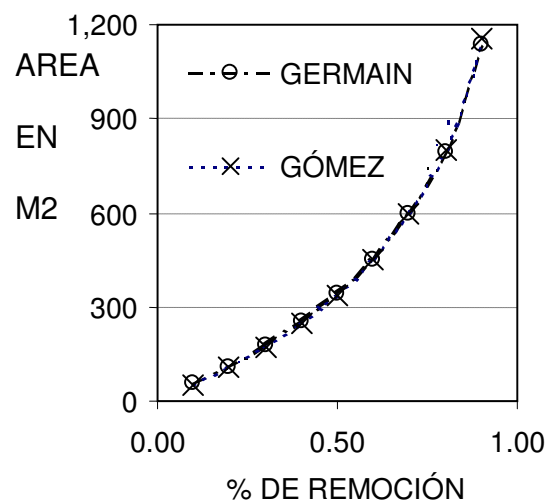


FIGURA 2

Para aplicar la ecuación general de diseño al sistema de Biodiscos, los valores de P, k y D son los siguientes: $P = 2.105 \text{ mg / cm}^2$. $k = 0.016 \text{ días}^{-1} \cdot (\text{mg/l})^{-1}$. $D = 150 \text{ cm}^2/\text{l}$. Los cálculos

del área de contacto con las ecuaciones de Germain y Gómez, dan resultados similares, según se muestra en la figura 3.

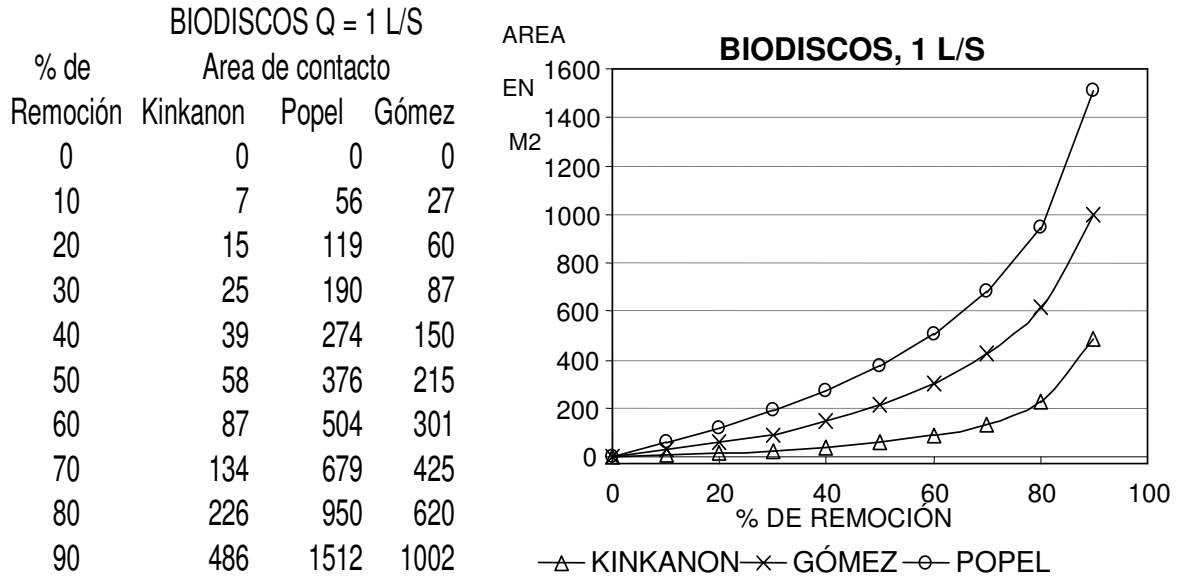


FIGURA 3

Para aplicar la ecuación general de diseño al sistema de Biofiltros Aereados Sumergidos (BAS), los valores de P, k y D son los siguientes: P = 0.615 mg / cm². k = 0.016 días⁻¹ . (mg/l)⁻¹ . D = 880 cm²/l. El cálculo del área de contacto con las ecuaciones de Germain y Gómez, dan resultados similares, según se muestra en la figura 4.

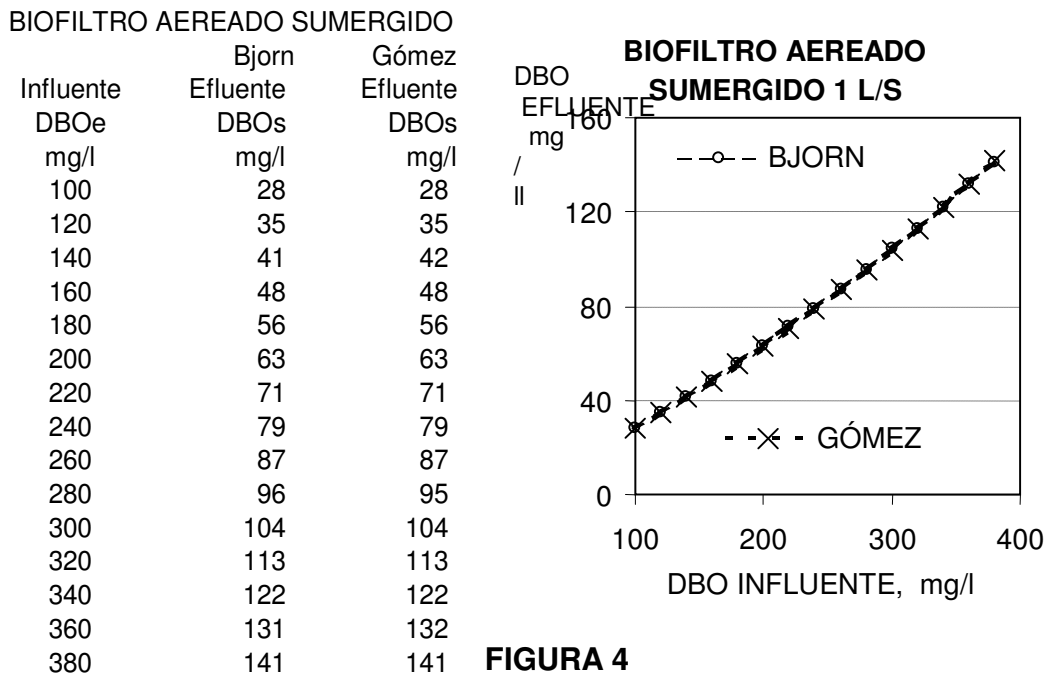


FIGURA 4

El lector podrá observar que la ecuación general es aplicable a los Sistemas de: Biofiltro, Biodiscos, Biofiltro Aereado Sumergido y Película Fija Sumergida, utilizando los valores de los parámetros P y k , que en este artículo se señalan. Los valores de densidad (D) del material plástico que se aplicaron, son los más comunes y comerciales que se fabrican para Biofiltro, Biodiscos, BAS y PFS.

REFERENCIAS

Levenspiel O. (1980). Chemical Reaction Engineering. Illinois Institute of Technology. John Wiley. López S.M. (1994). Desarrollo del sistema denominado "placas Biológicas" en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis Facultad de Química UNAM, México.

D.Gómez S. Ecuación de diseño para PFS, XII Congreso Nacional 2000. FEMISCA.

Benfield L.D., Wetzel E.D., Heidman J. (1988). Activated sludge systems with biomass particle Support Structures. Bioengineering, Vol. 31, págs. 682-695.

Rusten B. (1984). Wastewater treatment with aerated submerged biological filters. Journal WPCF. Volumen 56. No. 5, págs. 404-431.

Stensel H.D. Brener R.C., Lee K.M., Meker H. y Raknes K. (1988). Biological Aerated Filter Evaluation. Journal of Environmental Engineering. Vol. 114. No. 3, págs. 655-671.

Walas S.M.(1980). Cinética de Reacciones Químicas. Universidad de Kansas. Editorial Aguilar.

López S.M. (1994). Desarrollo del sistema denominado "placas Biológicas" en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis Facultad de Química UNAM, México.

Nicol J. P., Benfield L.D., Wetzel E.D., Heidman J. (1988). Activated sludge systems with biomass particle Support Structures. Bioengineering, Vol. 31, págs. 682-695.