

Programa de la asignatura:
Ingeniería de biorreactores II

U1

Reactor biológico rotativo “biodiscos”



DCSBA



BIOTECNOLOGÍA



Reactor biológico rotativo “biodiscos”



Depuradora urbana con biodiscos. Tomado de: <http://www.depuradoras.eu/depuradoras-urbanas-biodiscos.html>



Índice

Presentación.....	4
Propósitos de la unidad.....	5
Competencia específica a desarrollar.....	6
1.1 Sistema de cultivo fijo “Biodiscos” y Biopelículas.....	7
1.1.1 Características del Reactor Biológico Rotativo “Biodiscos”.....	9
1.1.2 Características de las Biopelículas o biofilms.....	13
1.1.3 Tipos de reactores de biopelícula o biofilm.....	19
1.1.4 Transporte y reacción dentro de la biopelícula o biofilm.....	33
1.1.5 Materiales soporte de la biopelícula o biofilm.....	36
1.1.6 Transferencia de oxígeno.....	40
1.2 Diseño de biopelículas y su aplicación.....	41
1.2.1 Ecuación general para el diseño de procesos de biopelícula.....	43
1.2.2 Ecuación de diseño de biofiltros.....	51
1.2.3 Escalamiento de biodiscos.....	53
Cierre de la Unidad.....	58
Para saber más.....	60
Fuentes de consulta.....	62



Presentación

En esta unidad revisaremos la estructura general de un Reactor Biológico Rotativo o “Biodiscos” el cual es un biorreactor de biopelícula o biofilm. A través del estudio de esta unidad se analizará la función y composición de las biopelículas o biofilms, así como la importancia de las mismas y su utilidad en los reactores que emplean enzimas inmovilizadas. Asimismo, nos adentraremos en el funcionamiento de los biorreactores enzimáticos y los procesos que llevan a cabo en los mismos.

Enlaces

Debes tomar en cuenta los conocimientos que has adquirido en las asignaturas en la asignatura de Ingeniería de Biorreactores I, donde realizaste una revisión del proceso de inmovilización enzimática, así como los diferentes métodos de este.

Reactor de enzimas inmovilizadas

Son sistemas de producción continua, consiste en pasar el medio fresco a través de un biorreactor en el que hemos inmovilizado células o enzimas. Las ventajas consisten en que en este sistema se eliminan los problemas de desequilibrio (estabilidad del sistema), también se eliminan los problemas de estabilidad genética del sistema continuo clásico y además el producto resultante está libre de células. Presenta el inconveniente de que no todos los microorganismos pueden inmovilizarse. Este sistema soluciona el problema de la fermentación continua y discontinua.

Ahora comenzaremos el estudio de la asignatura de Ingeniería de Biorreactores II, al finalizar serás capaz de diseñar y escalar biorreactores específicos a partir de parámetros fundamentales y ecuaciones de diseño asociadas... así que... ¡comencemos!



Propósitos de la unidad



- 1 Identificar los elementos que componen un Reactor Biológico Rotativo.
- 2 Distinguir los diferentes tipos de reactores de biopelícula.
- 3 Explicar la transferencia de oxígeno.
- 4 Aplicar las ecuaciones de diseño de escalamiento de biodiscos.



Competencia específica a desarrollar

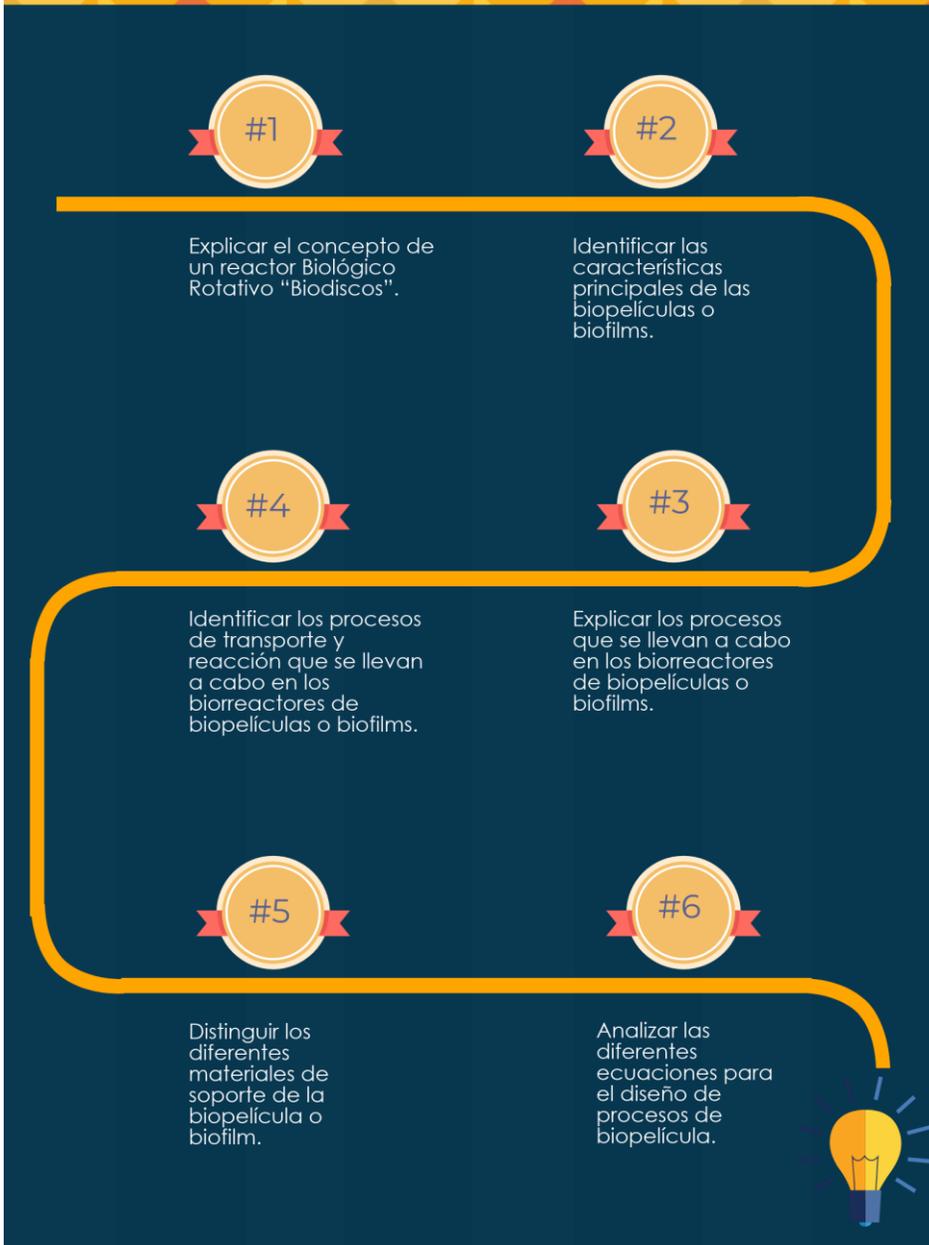


Analizar las características de los procesos de biopelículas, para el escalamiento de biodiscos, mediante la aplicación de ecuaciones matemáticas de diseño de biorreactores.



Ruta de aprendizaje: ¿Qué debo aprender en esta unidad ?

Unidad 1: Reactor Biológico Rotativo "Biodiscos"





1.1 Sistema de cultivo fijo "Biodiscos" y Biopelículas

El sistema denominado RBC (reactores biológicos rotativos de contacto) o "Biodisco" es un sistema de tratamiento de depuración de agua, aplicable a líquidos residuales urbanos o industriales, es un tratamiento biológico aeróbico de **cultivo fijo**, donde los microorganismos se adhieren a la superficie de discos rotarios de material plástico, inerte, que actúan como soporte, formando una **biopelícula** o **biofilms**, el cual es un componente fundamental en dicho proceso.

Biopelícula o biofilm

Se denominan biopelículas aquellas comunidades de células adheridas a una superficie gracias a una matriz extracelular (Echevarría, 2013)

Uno de los ejemplos más claros que conoces sobre biopelículas es la formación de la placa dentobacteriana en los dientes, que es una comunidad de microorganismos que habitan en la superficie de los dientes, cubiertos de saliva y dentro de una matriz de polímeros de origen bacteriano; así cuando cepillas los dientes, eliminas nutrientes, como los carbohidratos fermentables provenientes de tu dieta, que llevan a la producción de ácidos, con la consecuente acidificación de la biopelícula y el incremento de las **bacterias mutans** (*Streptococcus mutans* y *Streptococcus sobrinus*), consideradas como uno de los grupos cariógenos (factores o agentes que conducen al desarrollo de caries dental) más agresivos (Pérez, 2005).

Cultivo fijo

Son los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en gases y tejido celular están fijos a un medio inerte, tal como piedras, escorias o materiales cerámicos y plásticos especialmente diseñados para cumplir esta función. También son llamados procesos de película fija (Guillen Trujillo, 2013).



A continuación, analizaremos este proceso, sus principales características, componentes, los distintos tipos que podemos encontrar, así como la ecuación principal del proceso y diseño de biofiltros.

1.1.1 Características del Reactor Biológico Rotativo

“Biodiscos”

De forma general, el Reactor Biológico Rotativo consiste de baterías de discos de diversos materiales colocados en paralelo que se van sumergiendo secuencial y parcialmente (aproximadamente un 40 %) en un depósito por donde circula el agua a tratar. Lo que estimula a la adherencia de la población microbiológica al material de soporte (discos) y posteriormente se desarrolla una película biológica sobre la superficie del disco, también llamada biopelícula o biofilm, la cual realiza el efecto **depurador** del sistema.

Biodiscos

Son dispositivos de plástico en cuya superficie se desarrolla la biomasa, contruidos con un medio filtrante (generalmente sintético) que se coloca alrededor de un eje provisto de discos formando un cilindro, mismo que se sumerge parcialmente en un estanque de aguas residuales (Compendio de Estadísticas Ambientales, 2010).

Enlaces

Debes tomar en cuenta los conocimientos que has adquirido en las asignaturas en la asignatura de Ingeniería de Biorreactores I, donde estudiamos la definición de biofilm o biopelícula.



El giro de los discos permite que la biopelícula esté en contacto con el agua residual y luego con la atmósfera alternadamente. Cuando la superficie está sumergida, los microorganismos **degradan** los compuestos orgánicos depurando el agua, luego cuando gira el disco y los deja expuestos a la atmósfera se presenta absorción de oxígeno a la biopelícula y posteriormente se transfiere al agua residual para garantizar las condiciones aerobias y se evite anaerobiosis (ausencia de oxígeno) en el proceso (Figura 1). El giro sirve como mecanismo para eliminar el exceso de biomasa adherida en la superficie de los discos mediante el esfuerzo cortante producido por el agua, de este modo parte de la biomasa queda suspendida en el reactor y posteriormente se transporta hasta el sedimentador secundario.

Enlaces

Debes tomar en cuenta los conocimientos que has adquirido en las asignaturas en la asignatura de Ingeniería de Biorreactores I, donde estudiamos la definición de biomasa, aplicado al crecimiento microbiano.

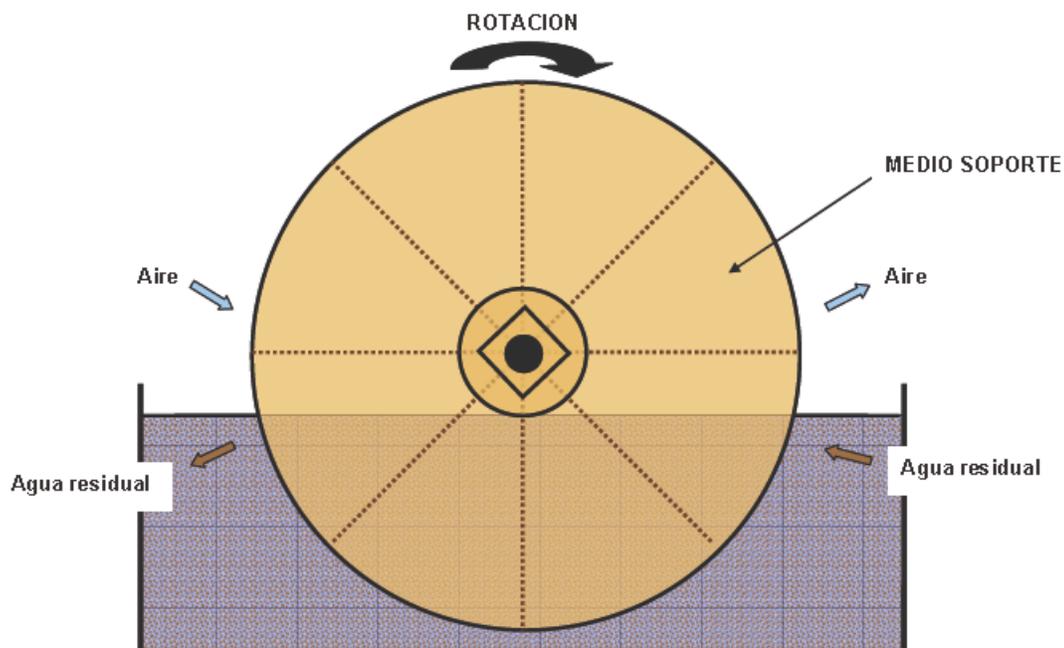


Figura 1. Intercambio de Aire y Agua Residual.

Tomado de: <http://www.tecdepur.com/blog/tecnologias-blandas-2-contactores-biologicos-rotativos-cbr-o-biodiscos>



Los principales elementos que componen un sistema de Biodiscos (Figura 2) se enuncian a continuación con su respectiva finalidad o importancia dentro del proceso (Tabla 1).



Tabla 1. Principales elementos que componen un sistema de Biodiscos (Pérez Aristizábal, 2010)

Elemento	Finalidad o importancia
Ejes	Son los encargados de dar el soporte a los discos y por ende a su rotación la cual es elemental para la operación del reactor, deben ser de material resistente para sostener el peso de los discos sumado al peso de la biomasa adherida al material de soporte.
Medio de Soporte (Discos)	El disco es la superficie donde la población microbiológica se adhiere y se desarrolla para el funcionamiento del sistema de tratamiento.
Mecanismo de Transmisión	Generalmente el mecanismo utilizado para el giro de los discos es mediante la transmisión mecánica, el cual se utiliza un motor y un sistema de poleas para ajustar al giro deseado al eje y por ende a los discos.
Tanque	El tanque es el compartimiento donde está contenida el agua y donde se sumergen parcialmente los discos. Su volumen depende de la carga orgánica superficial y la carga hidráulica a aplicar.
Cerramientos	Normalmente los reactores de Biodiscos son protegidos por una cubierta de plástico reforzado con fibra de vidrio, de igual manera también se ha elegido ubicar los Biodiscos dentro de edificios.
Tanques de sedimentación	Aunque el tanque de sedimentación está separado físicamente del reactor de Biodiscos, se tiene que considerar como parte íntegra del tratamiento secundario pues los procesos biológicos generan biomasa que debe ser retenida y por lo tanto el sedimentador secundario ejecuta esa actividad. Éste sería el último componente del tratamiento biológico y el efluente del sedimentador puede ser descargado a un cuerpo hídrico o llevado a un tratamiento terciario dependiendo de la complejidad del sistema.

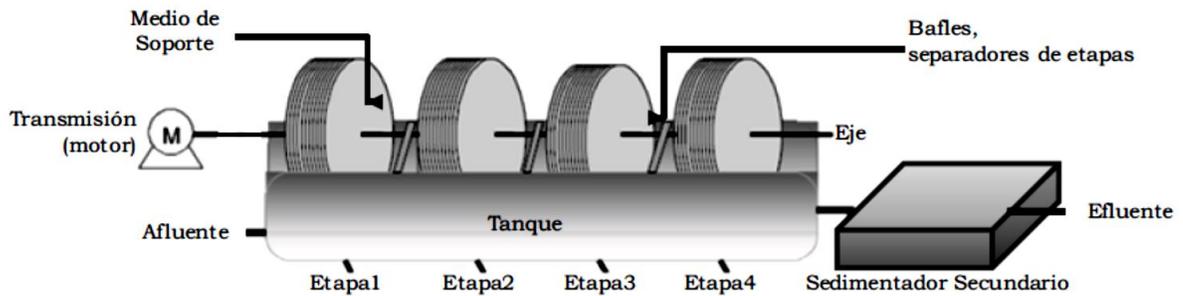


Figura 2. Esquema de un reactor de biodiscos.

Tomado de: Pérez Aristizábal, 2010.

En este tema te has adentrado en el conocimiento y estudio de los principales componentes que conforman un reactor de biodiscos, así como una breve introducción del proceso de depuración que se lleva en estos.

1.1.2 Características de las Biopelículas o biofilms

Hasta ahora se han revisado los conceptos más importantes de los componentes de un reactor de biodiscos y cómo funcionan las biopelículas en estos para el proceso de depuración. Ahora realizaremos una revisión de las características de las biopelículas, debemos considerar que en la naturaleza la mayoría de los microorganismos habitan en este tipo de asociaciones, ya que rara vez viven en colonias aisladas de una sola especie, como sucede en el laboratorio (Figura 3). Las bacterias coordinan sus actividades y se agrupan en comunidades gracias a la denominada “detección de *quorum*” (**quorum sensing**), lo que les permite obtener beneficios similares a los de los organismos pluricelulares (Tortora *et al.*, 2007). Las bacterias tienen la capacidad de comunicarse y coordinarse entre sí, a través de la secreción de moléculas señales, también conocidas como **inductor** (estas moléculas serían el equivalente del lenguaje en los humanos).



Quorum sensing

Fenómeno en el cual la acumulación de moléculas señales permite a una célula individual percibir el número de bacterias que tiene a su alrededor por la detección y reacción con estos compuestos, esto es suficiente para que las bacterias inicien la expresión de genes específicos, lo que implica un cambio en su comportamiento hacia una fase multicelular. Este evento se presenta bajo condiciones apropiadas y cuando están en un número que supera un nivel crítico. Este fenómeno también se conoce como comunicación célula-célula y auto-inducción (Rojas, 2011).

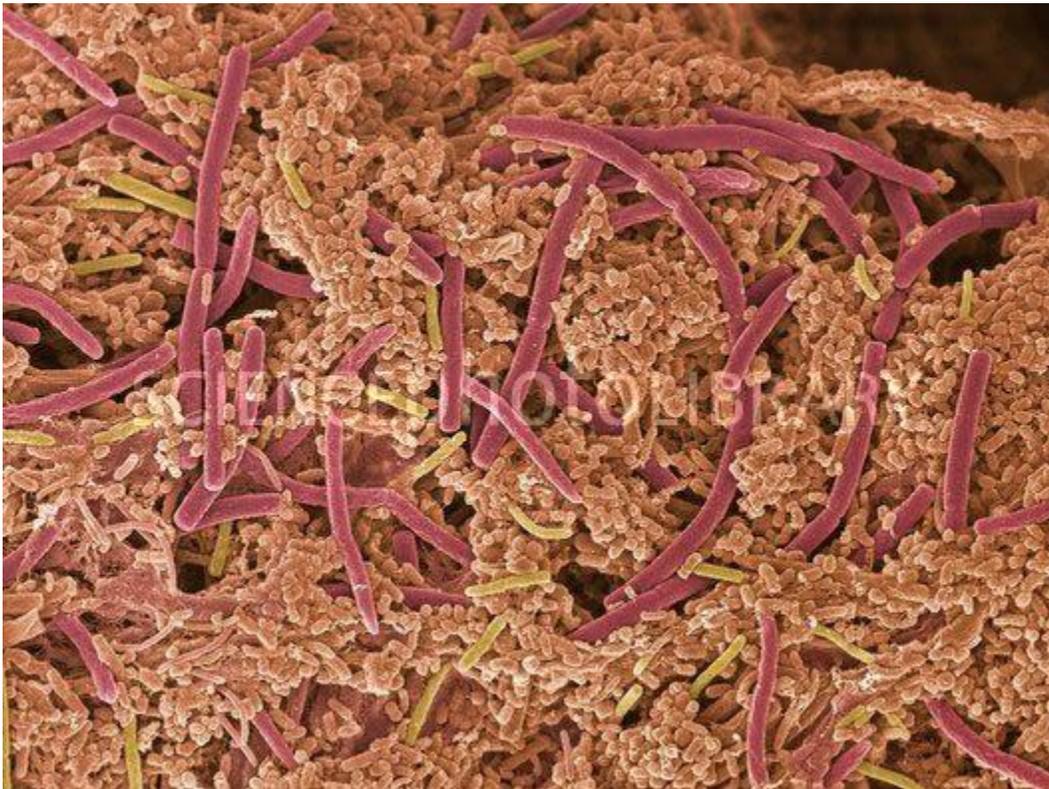


Figura 3. Placa dentobacteriana.

Tomado de: <http://marcianosmx.com/12-cosas-comunes-miedo-bajo-microscopio/>



Estas características les han permitido organizarse en una biopelícula, pero cómo es que se forma, para comprender el desarrollo de esta necesitan reconocerse **cinco** etapas (Tortora *et al.*, 2007).

Etapas para el desarrollo de una biopelícula

- **Etapa 1: Acondicionamiento.** Los microorganismos se adsorben a la superficie de un material por periodos cortos, es decir, existe una asociación débil al soporte (Figura 4).
- **Etapa 2: Adhesión.** Una vez que los microorganismos logran estabilizarse sobre la superficie del soporte, se adhieren irreversiblemente a él, e inicia la división celular, dando lugar a microcolonias (Figura 4).
- **Etapa 3: Síntesis de matriz extracelular.** Cuando existe una densidad de microorganismos suficiente, y la concentración de moléculas señales alcanza una concentración aceptable, se produce la síntesis de la matriz extracelular o exopolímero (Figura 4).
- **Etapa 4: Maduración.** Existen cambios fenotípicos en la comunidad, debido a la cercanía y “comunicación” entre los microorganismos, se observa la formación tridimensional de la biopelícula y el desarrollo de canales por los que se transporta agua y oxígeno (Figura 4).
- **Etapa 5: Dispersión.** Se desprenden células aisladas o la biopelícula, que vuelven a iniciar el ciclo al adherirse a otra superficie (Figura 4).

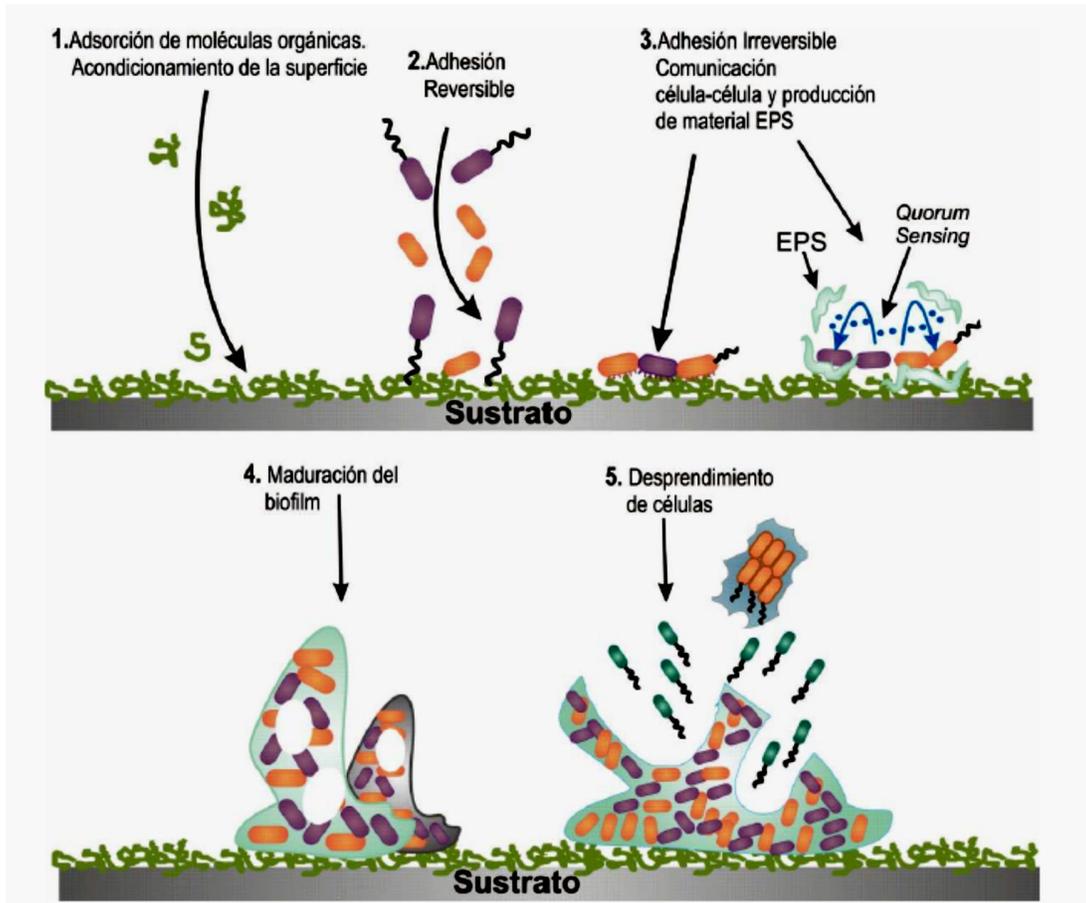


Figura 4. Etapas para el desarrollo de una biopelícula.

Tomado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2685/1_-_Descripci%C3%B3n_de_biofilm_desarrollo_e_importancia_de_su_estudio._Impacto_de_las_t%C3%A9cnicas_de_micro-nanofabricaci%C3%B3n_en_sistemas_biol%C3%B3gicos.pdf?sequence=6

La **biopelícula** permanecerá, siempre y cuando, la velocidad de crecimiento de los microorganismos sea mayor que la tasa de pérdida de biomasa por envejecimiento o por fricción del medio. Los biofilms presentan una serie de características que les confieren sus propiedades relevantes que están relacionadas con elementos como, los fenotipos, heterogeneidad fisiológica, tipos de señales y características adaptativas (Tabla 2).



Fenotipo

Es cualquier característica detectable de un organismo (estructural, bioquímica, fisiológica o conductual) determinado por una interacción entre su genotipo (información genética) y su medio ambiente. El medio ambiente es el conjunto de componentes físico-químicos, biológicos y sociales capaces de causar efectos directos o indirectos, a corto o largo plazo, sobre los seres vivos y las actividades humanas (Zerón, 2011).



Tabla 2. Principales características de las biopelículas (Enrile de Rojas, 2009)

Elemento	Finalidad o importancia
Heterogeneidad fisiológica	Dentro de la biopelícula se puede observar un rango muy amplio de microambientes, separados unos de otros por mínimas distancias; se pueden encontrar ambientes muy diferentes en cuanto al contenido de nutrientes del medio, tensión de oxígeno, de dióxido de carbono, pH, etc. Por lo tanto, células de la misma especie bacteriana pueden presentar estados fisiológicos muy diferentes (anaerobias, aerobias, microaerobias, entre otras). Esta heterogeneidad explica la mayor resistencia de las bacterias cuando crecen en un biofilm
Fenotipos	Las bacterias, cuando crecen en el biofilm, manifiestan un fenotipo diferente respecto del que manifiestan cuando crecen aisladas; ya que los microorganismos de una biopelícula son más resistentes frente a diversos antimicrobianos y mantienen esta resistencia incluso cuando se desprenden del biofilm
Señales del biofilm	Las bacterias dentro de la biopelícula tienen capacidad para comunicarse entre ellas por medio de señales químicas y mediante transferencia de material genético. Esta capacidad de comunicarse entre las bacterias tiene influencia en la resistencia bacteriana frente a los antimicrobianos, la producción de factores de virulencia o en la estructura del propio biofilm
Capacidad adaptativa	Las biopelículas deben mantener un equilibrio entre el crecimiento en condiciones favorables de aporte de nutrientes, de medio ambiente y el mantenimiento de la estructura de la misma. En condiciones desfavorables, el biofilm puede involucionar a estadios anteriores, pero en casi todas las situaciones se mantiene parte del mismo unido a la superficie, pudiendo volver a desarrollarse cuando las condiciones sean más favorables



Para que una biopelícula permanezca debemos conocer las causas que les otorgan la resistencia necesaria para enfrentar a los antimicrobianos (Enrile de Rojas, 2009), la cual puede deberse a:

- Los antimicrobianos llegan en menores concentraciones (concentraciones no efectivas frente a las bacterias) a las zonas profundas del biofilm.
- Las bacterias, cuando son atacadas con dosis subletales, tienen la capacidad para desarrollar resistencia frente a los antimicrobianos.
- En zonas profundas del biofilm, que tienen un menor aporte de nutrientes, las bacterias estarían en forma quiescente, que es un estado bacteriano no susceptible a los antimicrobianos.
- Las bacterias, estarían protegidas por la matriz de exopolisacárido frente a los antimicrobianos.
- Las bacterias presentes en el biofilm son capaces de sintetizar productos que inactivan antimicrobianos dirigidos contra bacterias de distinta especie residentes en el biofilm.
- La edad del biofilm puede ser un factor para una mayor resistencia frente a los antimicrobianos.

Antimicrobiano

Que combate los microorganismos o evita su aparición. La saliva contiene sustancias antimicrobianas. (RAE, 2016).

Después de la revisión de las características de una biopelícula o biofilm, en el siguiente tema revisaremos los diferentes tipos de biorreactores que utilizan estos sistemas.

1.1.3 Tipos de reactores de biopelícula o biofilm

Ahora que ya hemos revisado las principales características de una biopelícula, podemos comprender su utilización en los **biofiltros**, estos son biorreactores que permiten disminuir la cantidad de contaminantes en las



aguas grises y que brindan a la comunidad la posibilidad de reutilizarlas, favoreciendo así la reducción del consumo de agua potable, implicando, a la vez, una ayuda económica para las familias; y por supuesto, la mitigación de los efectos negativos, como son: la proliferación de plagas, malos olores, contaminación de los cuerpos de agua, la aparición de enfermedades que dañan a la población más vulnerable (Figura 5).

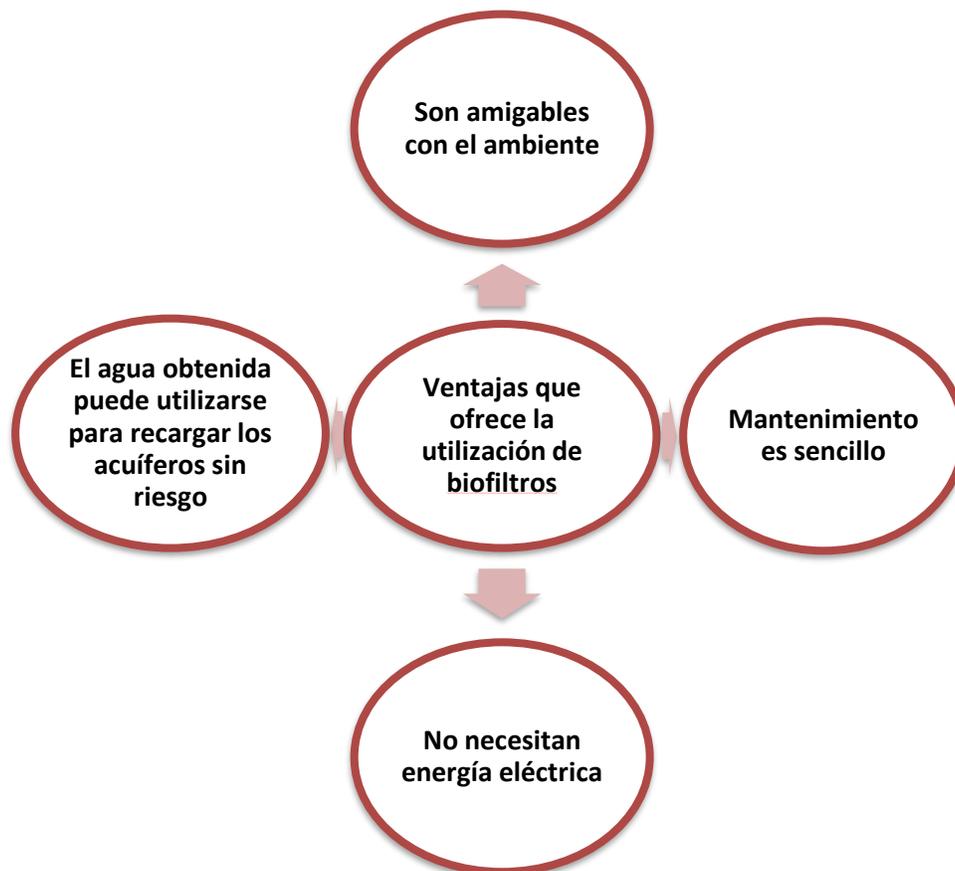


Figura 5. Ventajas de la utilización de biofiltros.

Para el **diseño** de un sistema **de tratamiento de aguas grises** se deben considerar los siguientes aspectos (Figura 6):

- Dos tanques de separación: separan sólidos pesados, sólidos flotantes y grasas del agua.



- b) Un biofiltro: elimina nitratos, fosfatos y materia orgánica.
- c) Un tanque de almacenamiento para riego.

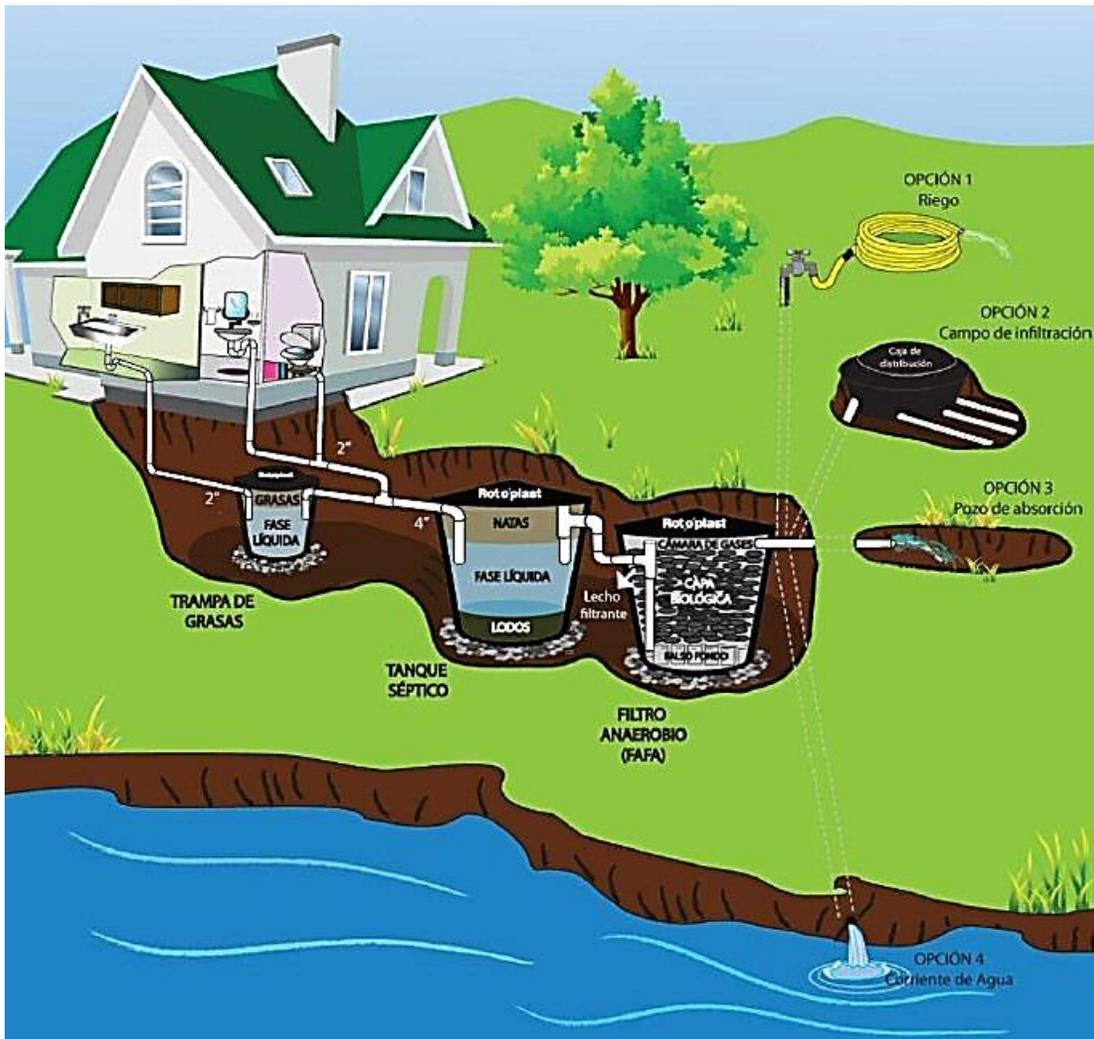


Figura 6. Sistema para el aprovechamiento de aguas grises.

Tomado de: <http://www.rotoplast.com.co/wp-content/uploads/Sistema-septico-domiciliario-diagrama.jpg>

En un proceso que implique el uso de biopelículas y que se lleve a cabo de manera adecuada, se deben proveer condiciones apropiadas de temperatura y nutrientes que permitan el óptimo desarrollo de los



microorganismos. Uno de los elementos más importantes a considerar es la determinación del tiempo de retención hidráulica (**TRH**), esto debido a que es el tiempo en que la biopelícula tiene contacto con el sustrato.

Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Es el periodo que estará en contacto el biofilm y el sustrato, a fin de garantizar el metabolismo de los nutrientes y la generación de los productos deseados (Mosquera-Corral *et al.*, 2007)

Asimismo, se deben tomar en cuenta los siguientes **parámetros** que inciden en el diseño del biofiltro y que se mencionan en la **figura 8**.

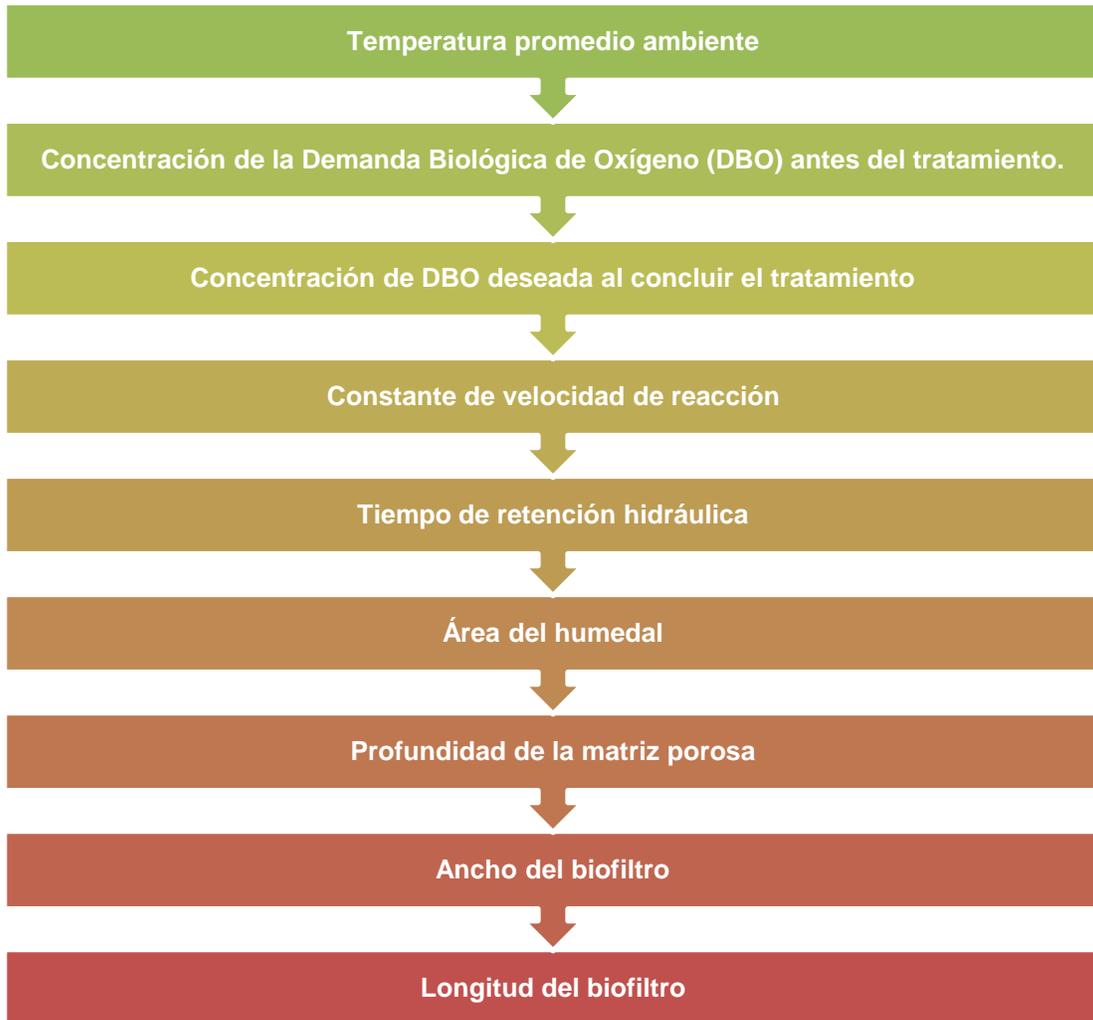


Figura 8. Factores necesarios para el diseño de un biofiltro.

Para el cálculo del tamaño del biofiltro, se determina la **temperatura promedio** (°C) del lugar donde se desea instalar, ya que, a partir de esta, es posible calcular la constante de velocidad de reacción y el TRH. Una opción para monitorear la **temperatura ambiente** es a través de **estaciones meteorológicas portátiles**, por un periodo mínimo de un año; o bien, se puede recurrir a **reportes del clima** que muestran el histórico de la variación de este parámetro.



Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

Se define como DBO de un líquido a la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aeróbicas o anaeróbicas facultativas: *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Aerobacter*, *Bacillus*), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Se expresa en mg / L.

Es un parámetro indispensable cuando se necesita determinar el estado o la calidad del agua de ríos, lagos, lagunas o efluentes (Cricyt, 2016).

Se debe evaluar la DBO del agua a tratar. Este parámetro indica la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica, es decir, para metabolizarla. Para conocer la metodología del análisis puedes consultar la Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001 (CONAGUA, 2016).

La determinación de la DBO del agua a la salida del biofiltro, a fin de ser reutilizada se encuentra basada en la normatividad vigente en México (Tabla 3 y 4). Este valor se elige de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 (Hospital General de México, 2016).

Tabla 3. Resumen de límites máximos permisibles de DBO para el uso del agua con diversos fines (NOM-001-ECOL-1996)

Vertido en: Uso	Ríos		Embalses naturales y artificiales		
	Riego agrícola	Riego urbano	Protección de vida acuática	Riego agrícola	Riego urbano
DBO mg/L	150	150	30	75	30



Tabla 4. Parámetros permisibles de DBO para vertido del agua en suelo (Bebaman *et al.*, 1996)

Tipo de uso de suelo	DBO mg/L
Urbano-residencial y negocios	9
Residencial	15
Agricultura	4
Pastura	6
Bosque	6
Humedales naturales	6
Árido	13



Para **determinar la temperatura y el TRH**, debemos considerar el cálculo de las siguientes ecuaciones:

Proceso para determinar la temperatura y el TRH

Primeramente, debemos revisar el cálculo de la **constante de velocidad de reacción** (K_r) se emplea la siguiente ecuación:

$$K_r = K_{20}(1.06^{(T-20)})$$

Donde:

K_{20} =velocidad de reacción a 20°C (1.1 día⁻¹)

T =temperatura promedio del lugar (°C)

Posteriormente debemos evaluar el **tiempo de retención hidráulica** (TRH), es decir, el tiempo que el agua permanece en el sistema para alcanzar el nivel de DBO deseado, y para que los microorganismos metabolicen la materia orgánica; se calcula mediante la ecuación:

$$TRH = \frac{-Ln\left(\frac{C}{C_0}\right)}{K_r}$$

Donde:

TRH =tiempo de retención hidráulica (días)

C =concentración de DBO deseado (mg/L)

C_0 =concentración inicial (mg/L).

Después de revisar las ecuaciones anteriores, ya conoces las herramientas que te permitirán estimar la temperatura que tendrá el biofiltro y el tiempo que deberá permanecer el sustrato (el agua con nutrientes) en el biorreactor. A continuación, haremos la revisión de cómo se **estiman las dimensiones de un biofiltro con configuración de humedal**.

Analizaremos a continuación los biofiltros con **configuración de humedal artificial** (Figura 9), los cuales son una zona construida por el hombre en la



que se reproducen, de manera controlada, los procesos físicos, químicos y biológicos de eliminación de contaminantes que ocurren normalmente en los humedales naturales o en los cuerpos de agua superficiales (IMTA, 2013).

Estos sistemas se constituyen por (IMTA, 2013):

- A) **Un soporte o material granular:** permite la fijación de la biopelícula bacteriana que interviene en la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes presentes en las aguas a tratar.
- B) **La vegetación:** principalmente compuesta por macrófitas emergentes (plantas cuya raíz esta fija al soporte y sus tallos, hojas y órganos reproductores se encuentran fuera del agua del humedal) que contribuyen a la oxigenación del soporte a nivel de la rizosfera, a la eliminación de nutrientes por absorción/extracción y al desarrollo de la biopelícula bacteriana.
- C) **El agua a tratar o influente:** circula a través del soporte y la vegetación.

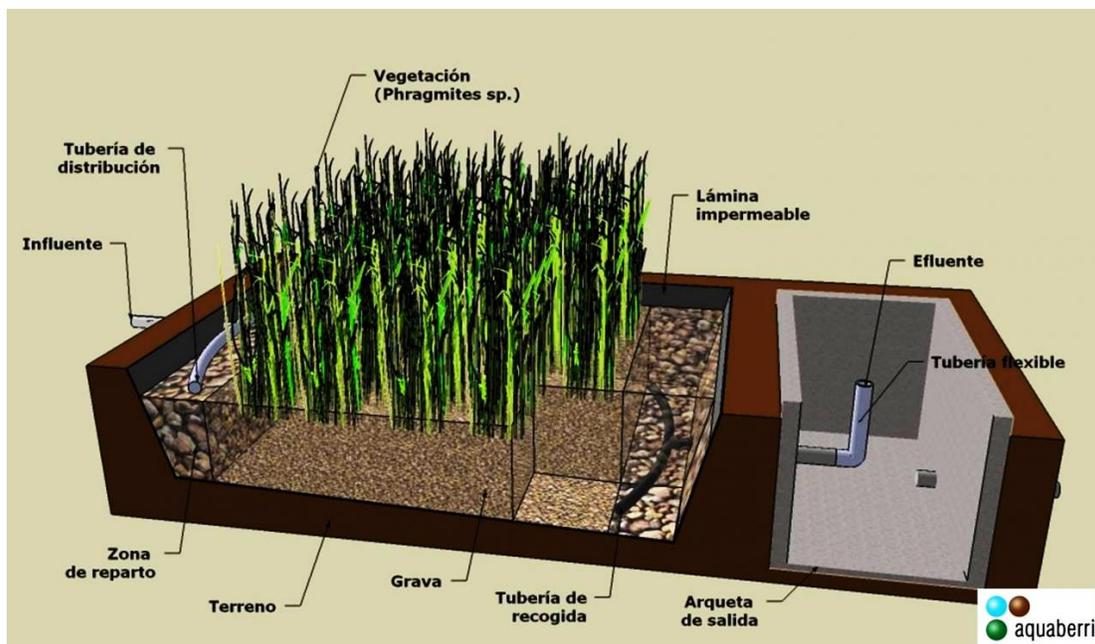


Figura 9. Humedal artificial.

Tomado de: <http://aquaberry.com/Dispositivos/Humedales-Artificiales/>



Los mecanismos por los que este tipo de sistemas son capaces de depurar (eliminar contaminantes) las aguas residuales se basan en los siguientes principios (Atl, 2013):

1. **Eliminación de sólidos en suspensión** gracias a fenómenos de filtración que tienen lugar entre el soporte y en las raíces.
2. **Eliminación de materia orgánica** gracias a la acción de los microorganismos (principalmente bacterias). Los microorganismos que se desarrollan pueden ser aerobios (en presencia O₂) o anaerobios (en ausencia de O₂).
3. **Eliminación de nitrógeno** por acción directa de las plantas o por procesos de nitrificación-desnitrificación desarrollados por los microorganismos antes mencionados.
4. **Eliminación de fósforo** principalmente debido a los fenómenos de adsorción sobre los componentes del soporte.
5. **Eliminación de patógenos** mediante la adsorción sobre partículas del soporte, la toxicidad producida por las raíces de las plantas y la acción depredadora de bacteriófagos y protozoos.

Para estimar el **área para la construcción del humedal**, se considera el material del soporte (Tabla 5). Su cálculo se realiza mediante la ecuación:

$$A = \frac{(Q)(TRH)}{(\eta)(d_w)}$$

Donde:

A=área (m²)

η =porosidad

d_w =profundidad de la matriz porosa (m)

Q=flujo diario medio (m³/día)



Tabla 5. Diámetro de partícula y porosidad de diversos materiales de soporte (Yocum, 2007)

Sustrato	Diámetro de partícula (mm)	Porosidad
Arena (media)	1	0.3
Arena (gruesa)	2	0.32
Arena con grava	8	4
Grava (mediana)	32	6
Grava (gruesa)	128	6

El **flujo diario medio**, es el volumen que pasa por un área dada en un lapso de tiempo.

La **profundidad de la matriz porosa** (d_w) debe ser de 0.4-0.85 m, para evitar, que con profundidades mayores se generen condiciones anóxicas (sin oxígeno) que impidan la oxidación de la materia orgánica.

El **ancho** del biofiltro, se calcula considerando el área (A) y la proporción longitud/ancho (R_A) cuyo valor debe oscilar entre 2:1 y 4:1.

$$W = \left(\frac{A}{R_A}\right)^{1/2}$$

Donde:

W =ancho del biofiltro (m)

R_A =proporción longitud/ancho

Finalmente, la **longitud** (L) se calcula mediante la expresión:

$$L = \frac{A}{W}$$



Donde:

L =longitud del biofiltro (m).

Una alternativa para este tipo de sistemas es que la **matriz porosa o soporte**, puede rellenarse por dos o más soportes, por ejemplo: arena fina, gruesa y grava. La **matriz** funciona como soporte para las plantas sembradas. En la superficie de las raíces, de los tallos y de la matriz misma, se desarrollan comunidades de microorganismos que contribuyen a la degradación de la materia orgánica y a la eliminación de los patógenos. La formación de esta película tarda alrededor de 30 días, sin embargo, la propagación de las raíces de las plantas requiere de 2 a 3 meses (Figura 10).

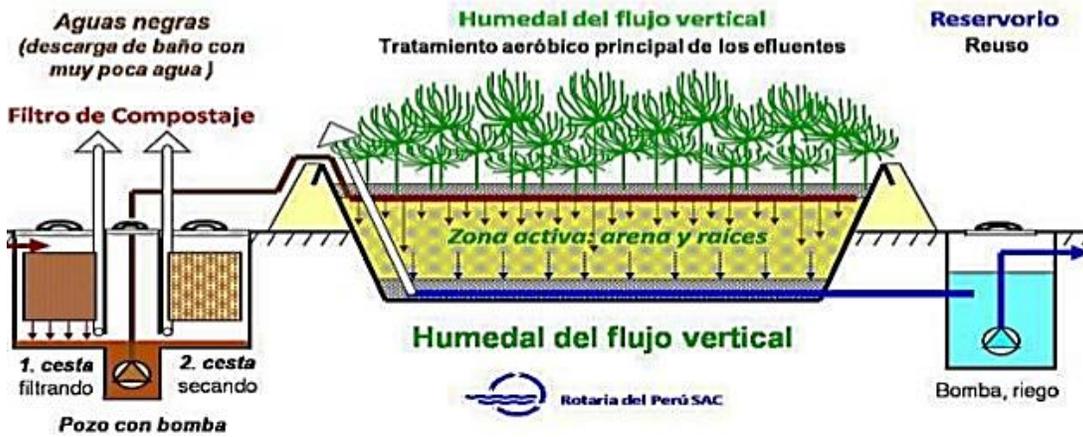


Figura 10. Biofiltro para el tratamiento de aguas grises.

Tomado de: <http://es.slideshare.net/EdgardoSalomon/diseo-de-humedales>

Para la **selección de la planta** a sembrar, se consideran especies locales que estén adaptadas a las condiciones climáticas del lugar donde se establecerá el biofiltro. El tule, los juncos y los céspedes de caña, son algunas de las opciones más utilizadas con este fin. Para el diseño de este tipo de sistemas, se deben considerar diversos elementos (Figura 11).

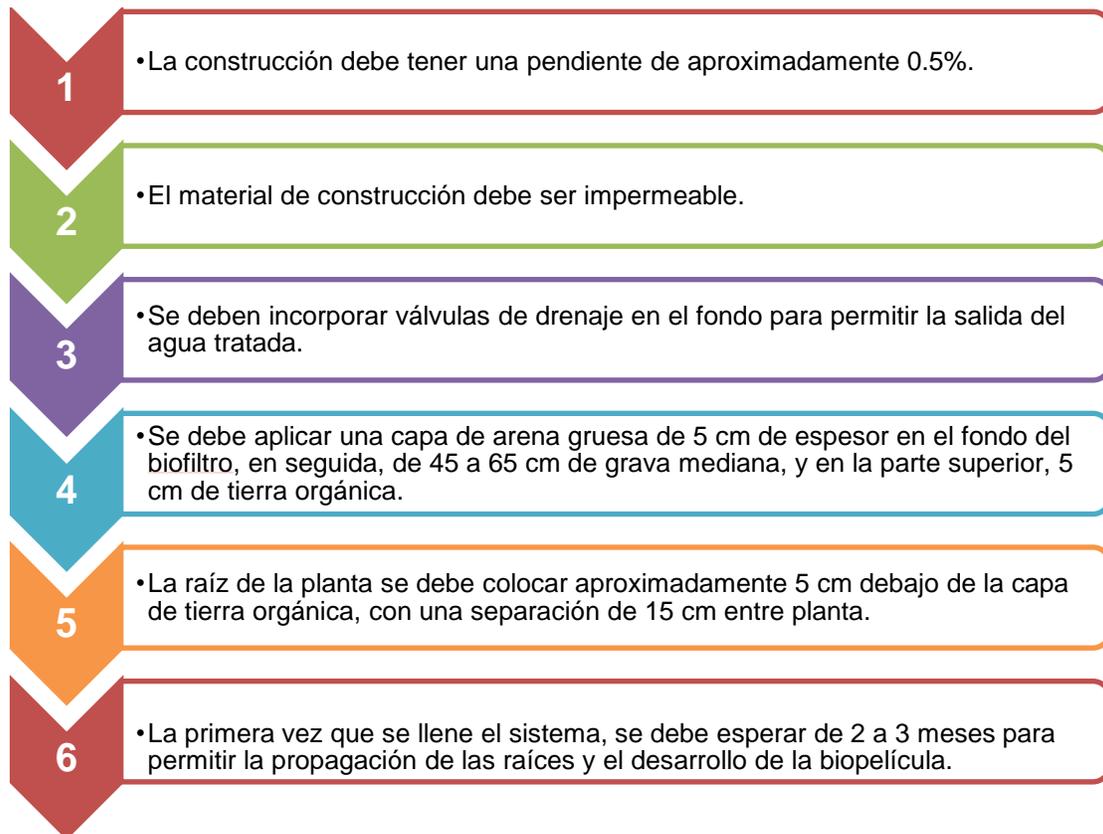


Figura 11. Elementos que deben considerarse para el diseño de biofiltros con una configuración de humedal artificial.

El agua así tratada deberá pasar a un depósito, donde se almacene y sea utilizada para riego, o para el fin que hayas decidido darle. Es importante reconocer que no sólo los biofiltros emplean biopelículas, existen **diversos tipos de reactores** que la utilizan y que se pueden resumir en la tabla 6, donde se describen de forma general.



Tabla 6. Diferentes tipos de reactores que utilizan biopelícula o biofilm (Gómez, 2008)

Tipo de reactor	Descripción
Biofiltros	Son torres empacadas situadas sobre un dren elevado. El medio líquido escurre por gravedad. La materia orgánica disuelta es adsorbida, en la superficie del lecho, y degradada por la película biológica
Sistema de biodiscos o RBC	Está formado por un conjunto de discos de plástico, en los que crece la biopelícula, sujetos mediante un eje de acero inoxidable. La parte inferior de los discos es sumergida en un tanque reactor, mientras que la parte superior se encuentra en contacto con el aire
Sistema de biofiltro aereado sumergido o BAS	En estos reactores el biofiltro se encuentra totalmente sumergido en el tanque reactor. Se suministra oxígeno mediante burbujeo en la parte inferior del dispositivo
Sistema de película fija sumergida o PFS	Existe mayor contacto del biofiltro, que se encuentra totalmente sumergido en el tanque reactor, con el medio que contiene los sustratos y el aire inyectado. Existe un mayor mezclado y suministro de oxígeno que 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, ocasionando 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. Para 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 (Gómez, 2008).

Después de haber revisado los componentes principales de un biofiltro que como vimos es un tipo de biorreactor de biopelícula, así como los principales parámetros para su diseño, así como una breve descripción de otros tipos de biorreactores de este tipo, ahora revisaremos como sucede el transporte y reacción del oxígeno en la biopelícula.

1.1.4 Transporte y reacción dentro de la biopelícula o biofilm

Los microorganismos mediante su metabolismo, transfieren electrones desde un donador, tal como la glucosa, a un aceptor de electrones (Moreno, 2011). Generalmente, la **materia orgánica o el ion amonio** sirven como donadores de electrones y el **oxígeno** como aceptor. De acuerdo a Eguia (1991), una vez transportados el donador y el aceptor de electrones a la superficie de la biopelícula, es necesario que penetren en su interior donde reaccionan. Estos fenómenos de transporte y reacción son simultáneos. Por lo que el carácter gelatinoso de la matriz del biofilm contribuye al transporte convectivo de los constituyentes reactivos en el seno de la comunidad y permitiendo así su difusión.

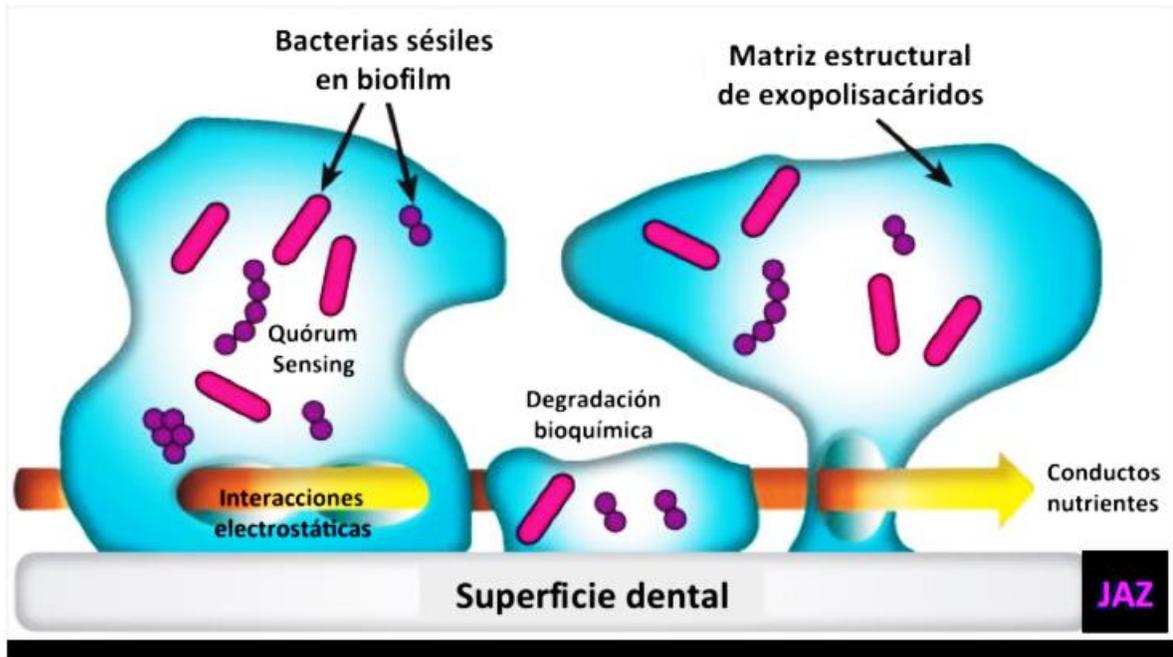


Figura 11. Matriz de un biofilm.

Tomado de: <http://www.odontologiaactual.com/nueva-vision-en-periodontologia-prevencion-o-curacion/>

Enlaces

Considera que en la asignatura de **Química** ya estudiaste distintos tipos de reacciones entre ellas las de óxido-reducción y otros conceptos generales relacionadas con las mismas en la asignatura **de Balances de materia y energía**, las cuales te ayudaran a comprender este tema.



Difusión

Es un fenómeno físico, cuando un soluto (sustancia minoritaria) es transportado por el movimiento de las moléculas de alrededor. Este movimiento es hacia la zona más concentrada para la menos concentrada, tratando de encontrar un equilibrio (Gama Fuentes, 2004).

La difusión en una biopelícula depende de **cinco** aspectos principales (Eguia, 1991; Figura 12).

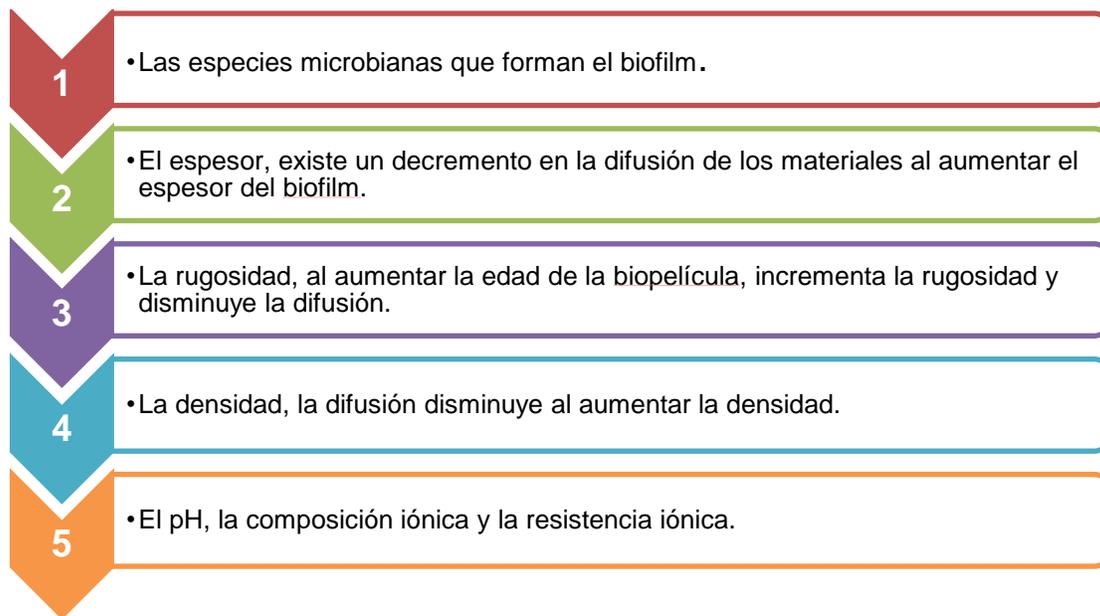


Figura 12. Características principales para la difusión en una biopelícula.

Las **reacciones** que se suceden dentro de la biopelícula son controladas por la concentración de los donadores y aceptores de electrones. Si la concentración de uno es mucho mayor que la del otro, entonces sólo controla un constituyente. Dichas reacciones se relacionan con la tasa de crecimiento del biofilm. Existen dos teorías que permiten explicar este fenómeno (Eguia, 1991):



- **Teoría no interactiva:** sostiene que la tasa de crecimiento específico de los microorganismos que forman el biofilm, sólo puede ser limitada por un sustrato en el tiempo.
- **Teoría interactiva:** establece que, si dos sustratos están presentes en concentraciones más bajas que las de saturación, entonces los dos afectan a la tasa de crecimiento específico de los microorganismos.

En este subtema hemos revisado de forma teórica como se da el proceso de difusión en la biopelícula aspectos que es muy importante para el establecimiento de las comunidades microbianas.

1.1.5 Materiales soporte de la biopelícula o biofilm

Como hemos visto en los reactores con biopelícula, los procesos metabólicos son realizados por poblaciones mixtas de microorganismos, formadas predominantemente por bacterias inmovilizadas al adherirse a un medio de soporte, dando lugar a una película sobre la superficie expuesta y en las cavidades del mismo.

Es necesario considerar que las **colonias** no se establecen de igual manera en el soporte por lo que considerando esto podemos reconocer que se clasifican en dos tipos, según su función en la biopelícula (Millan, 2005):

- a) Las **activas** que se encuentran situadas en la interfase de la capa externa de la biopelícula-líquido (son las responsables de metabolizar el sustrato)
- b) Las **inactivas**, localizadas hacia la parte interna de la biopelícula, responsables de su espesor.

Se necesita un área de contacto grande entre la capa de líquido/aire y la biopelícula, con la finalidad de aumentar la transferencia de nutrientes y oxígeno a los microorganismos. Así, que los **soportes** para facilitar el establecimiento de las colonias de microorganismos (Figura 13) deben presentar las siguientes **características** (Iwai & Kitao, 1994; Millan, 2005):

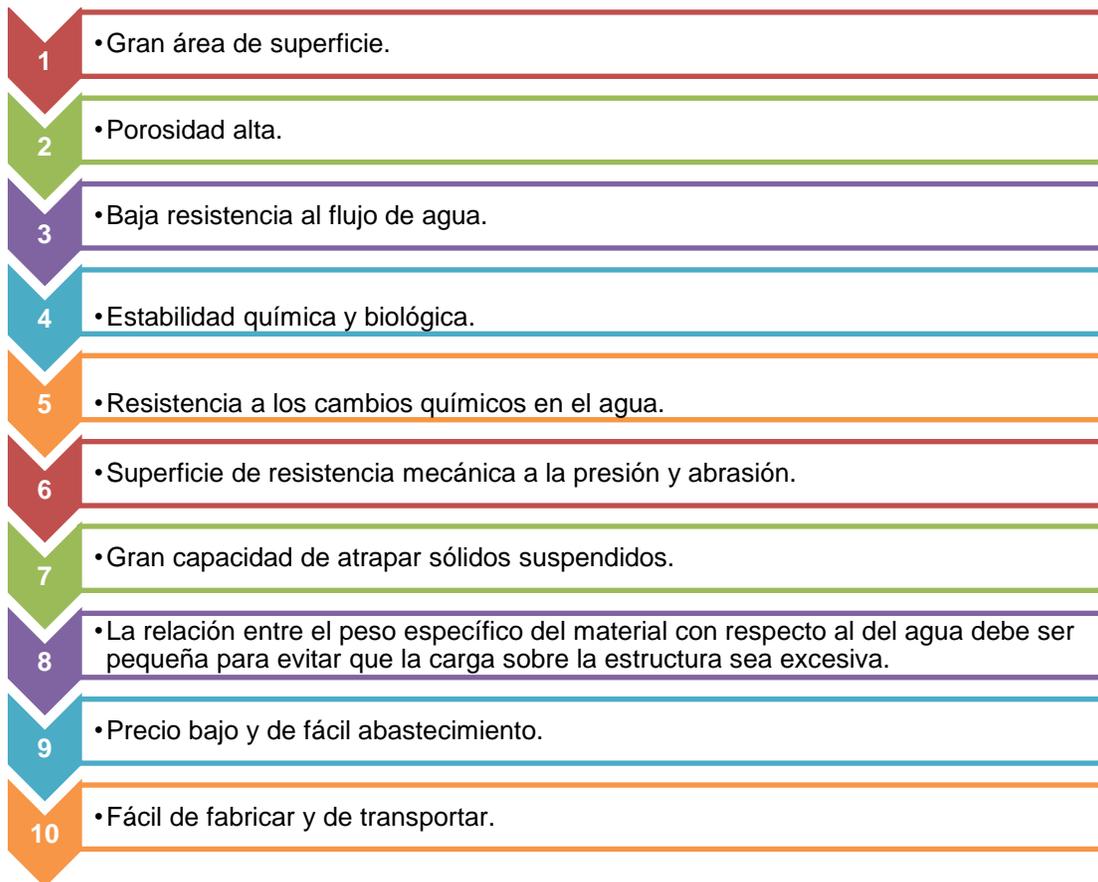


Figura 13. Características principales de los soportes.

Se debe considerar que es difícil encontrar un medio de soporte que reúna todas las características anteriormente enunciadas. El **tezontle** (Figura 14), por ejemplo, cumple con algunas de ellas ya que presenta una gran porosidad, es rugoso, presenta gran área superficial, disponibilidad en el mercado y es económico. Los medios de soporte orgánicos presentan una gran porosidad y superficie de contacto, lo que permite que la biopelícula metabolice altas cargas orgánicas (Millan, 2005).



Figura 14. Soporte para biopelículas.

Tomado de: http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=32

Entre los materiales que funcionan como soporte para el desarrollo de las biopelículas, se encuentran los mencionados en la tabla 7.



Tabla 7. Materiales utilizados como soporte para el desarrollo de biopelículas (Millan, 2005; Valdivia, 2005)

Medios/Materiales	Ejemplos
Naturales	Estómago de animales, superficie de las plantas, madera, superficies de los cráteres, entre otros.
Granulares irregulares	Roca volcánica, arena, piezas de madera, plástico, corcho, carbón, etc.
Granulares regulares	Anillos de poliuretano y las esferas de cerámica.
En forma de disco	Rugosos, de madera y corrugados de plástico.
En forma de plato	De madera y corrugados de plástico.
Con forma de lazos	Ramas de árbol y barras de madera.
Con forma de bloque poroso	Tubos porosos de plástico.

Para lograr una **correcta adhesión** de los microorganismos a la superficie del soporte se debe considerar su porosidad y su área superficial específica. La **porosidad** indica la irregularidad volumétrica del material, y se expresa como el porcentaje del volumen vacío con respecto al volumen total del material. Este parámetro es importante porque está directamente relacionado con el tiempo de retención hidráulica y con la cantidad de biomasa retenida en el biorreactor (Valdivia, 2005).

Porosidad

La porosidad de un material representa un porcentaje que relaciona el volumen que ocupan los poros en un volumen unitario de roca; esto es si la porosidad es del 50 % significa que la mitad de la roca está constituida por poros y la otra mitad por partículas sólidas (UCM, 2016).



El **área superficial** específica determina la cantidad de película biológica, es una de las características directas y de las más importantes en el funcionamiento de los reactores con biopelículas. Si se tiene gran área específica se tiene la ventaja de que las partículas en suspensión colisiones con mayor frecuencia con las partículas que conforman el lecho logrando una mayor eficiencia en la remoción de sólidos (Valdivia, 2005).

En este subtema hemos revisado las características de diferentes tipos de soportes para las colonias de microorganismos, así como las características principales que debe de presentar para una correcta adhesión.

1.1.6 Transferencia de oxígeno

Los procesos que se llevan a cabo en la biopelícula podemos clasificarlos en aerobios o anaerobios, sin embargo, aún en los tratamientos en presencia de oxígeno existen microorganismos anaerobios y facultativos. La coexistencia de los diferentes tipos de bacterias se debe a que el espesor que puede alcanzar la biopelícula dificulta la entrada de oxígeno disuelto, el cual penetra por difusión sólo cerca de la superficie del biofilm, dando lugar a zonas anóxicas lejos de la superficie (Millan, 2005).

Aerobio y anaerobio

Aerobio: Dicho de un ser vivo: Que necesita oxígeno para subsistir (RAE, 2016).

Anaerobio: Dicho de un ser vivo: Que puede vivir sin oxígeno (RAE, 2016).

Al hacer referencia a las biopelículas aerobias es necesario mencionar la necesidad de que el sistema en el cual se desarrollen cuente con un dispositivo para suministro de oxígeno. En el caso de los filtros rociadores, el oxígeno llega a la biopelícula por medio de una corriente de aire que se forma, de manera convectiva, dentro de la cama empacada, provocada por la diferencia de temperaturas entre el aire y el agua (Millan, 2005). En los biodiscos, al girar el cuerpo de plástico corrugado, la biopelícula entra en



contacto, de forma alternada, con los nutrientes que contiene el medio y con el oxígeno al salir de él (Millan, 2005).

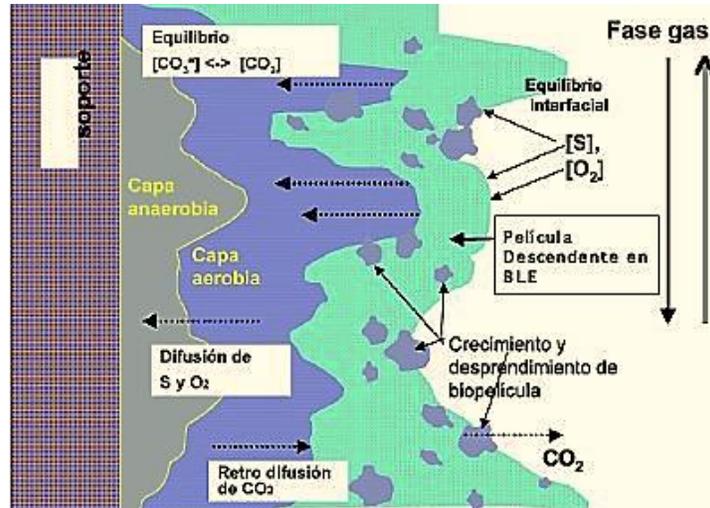


Figura 15. Difusión de oxígeno en una biopelícula.

Tomado de:

<https://espanol.groups.yahoo.com/neo/groups/asohazmatinternational/conversations/topics/3786>

Es importante que los filtros sumergidos estén provistos de difusores de aire que produzcan burbujas desde el fondo del tanque para que, al atravesar el sistema de soporte, el oxígeno se difunda hacia el agua y posteriormente a la biopelícula (González, 1998; Millan, 2005). El oxígeno disuelto se difunde a través de los poros de la membrana, el cual es consumido por los microorganismos (Figura 15).

La revisión general de este tema nos permitirá aplicar estos conocimientos al diseño de las biopelículas, ya que el conocer cómo se difunde el oxígeno a través de la membrana, nos permitirá mantener las comunidades biológicas y proponer un diseño viable de biorreactor.

1.2 Diseño de biopelículas y su aplicación

Como hemos visto la biopelícula o biofilm es una comunidad de microorganismos que se mantienen unidos, entre ellos y a un soporte,



gracias a que producen polímeros extracelulares, en este subtema se hablará acerca de su diseño. Debemos reconocer que las biopelículas son ampliamente utilizadas para el tratamiento de aguas residuales. En este tipo de tratamiento, los microorganismos se adhieren a la superficie de un medio plástico, que entra en contacto con el agua residual, permitiendo que estos se alimenten de la materia orgánica disuelta, favoreciendo su degradación.

No obstante, en este proceso, 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 (Gómez, 2008). Este fenómeno y el valor de la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), se toman en cuenta para el diseño de un proceso de biopelículas (Figura 16).

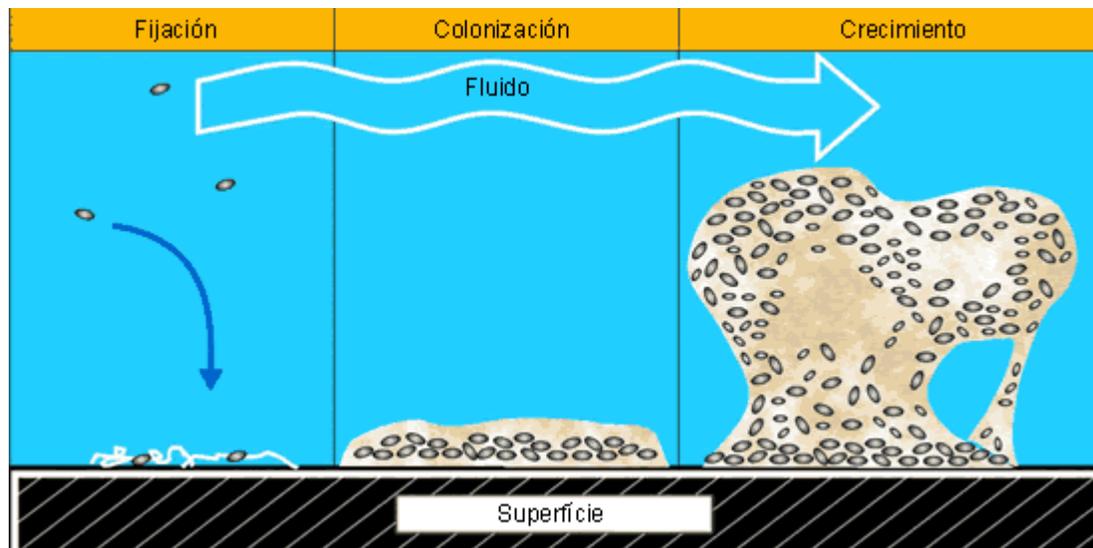


Figura 16. Diagrama de las etapas de la formación de la biopelícula.

Tomado de: <http://panachlor.com/que-es-el-biofilm-biocapa/>



Para el diseño general de la biopelícula, debemos adentrarnos en el análisis y parámetros utilizados en la ecuación general para el diseño de biopelículas, aspectos que desarrollaremos en el siguiente subtema.

1.2.1 Ecuación general para el diseño de procesos de biopelícula

Para que un **proceso biológico**, a través de biopelículas, se lleve a cabo, se requiere de un **soporte**, en el cual se fijan los microorganismos mediante un exopolímero secretado por ellos, por lo que es un elemento que debemos considerar, pero no es el único. Por lo que además, de acuerdo a Gómez (2008), para **deducir la ecuación general** de diseño de un proceso de biopelícula se deben tomar en cuenta las siguientes premisas:



- 1 • La concentración de DBO varía a lo largo del reactor y disminuye en el sentido del flujo.
- 2 • El movimiento de cada partícula es siempre hacia adelante y no hay mezcla retrograda.
- 3 • La cinética de reacción es de segundo orden e irreversible.
- 4 • 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 de las condiciones del proceso.
- 5 • 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).
- 6 • La relación $M = \text{reactante B} / \text{reactante A}$, varía continuamente en el tiempo.
- 7 • Los reactantes A y B, no se alimentan de acuerdo a alguna relación estequiométrica (siempre existirá reactante B para cualquier concentración del reactante A).
- 8 • El medio en que se realiza el proceso es de densidad constante, por lo que se puede ignorar la variación de volumen del caudal por el efecto de la temperatura.
- 9 • Se considera únicamente el comportamiento del proceso en régimen estacionario (no se aborda la etapa en que no se han alcanzado dichas condiciones).
- 10 • 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.
- 11 • 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.





A partir de lo anterior, se definen las variables y relaciones siguientes:

F_a =Gasto de masa de entrada del reactante A, DBO mg/s

X_a =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

Gómez (2008) propone la siguiente deducción para la ecuación general de diseño de un proceso de biopelícula.

El balance de materia, se expresa como:

$$\textit{Entra} = \textit{sale} + \textit{degrada (oxida)}$$

En donde los componentes del balance, son:

$$\textit{Entra} = F_a (\textit{gasto masa de entrada})$$

$$\textit{Sale} = F_a + dF_a (\textit{gasto masa con la fracción convertida en producto})$$

$$\textit{Degrada} = -r_a dV (\textit{desaparece por reacción})$$

Substituyendo se tiene:

$$F_a = (F_a + dF_a) + (-r_a)dV$$

$$dF_a = r_a dV$$

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

$$F_a = F_{a_0} - F_{a_0} X_a$$

$$F_a = F_{a_0}(1 - X_a)$$

$$dF_a = d[F_{a_0}(1 - X_a)]$$

$$dF_a = -F_{a_0} dX_a = r_a dV$$



$$\frac{dV}{Fa_0} = \frac{dX_a}{-r_a}$$

Por lo tanto:

$$\int_0^V \frac{dV}{Fa_0} = \int_0^{X_{af}} \frac{dX_a}{-r_a}$$

$$\frac{V}{Fa_0} = \int_0^{X_a} \frac{dX_a}{-r_a}$$

Sí se considera que:

Ca_0 =concentración inicial del reactante A, en mg/L
 Q=gasto volumétrico del fluido, en L/s

$$Fa_0 = Ca_0Q$$

$$\frac{V}{Ca_0Q} = \int_0^{X_a} \frac{dX}{-r_a}$$

Por lo tanto:

$$t_r = \frac{V}{Q} = Ca_0 \int_0^{X_a} \frac{dX}{-r_a}$$

Donde t_r =tiempo de retención o residencia aparente.

Para una reacción de segundo orden se tiene:



$$r_a = r_b = kC_a C_b$$

Donde:

k =constante cinética, en día⁻¹.(mg/L)⁻¹

C_b =concentración de microorganismos, en mg/L

C_a =concentración del sustrato, en mg/L

$$t_r = C a_0 \int_0^{X_a} \frac{dX}{-kC_a C_b}$$

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:

$$t_r = \frac{1}{k C a_0 (M - 1)} \ln \frac{M - X_a}{M(1 - X_a)}$$

$$t_r = \frac{1}{k C a_0 (M - 1)} \ln \frac{1 - X_a/M}{1 - X_a}$$

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

$$M = \frac{C b_0}{C a_0}$$

En esta relación:



C_{a_0} =concentración inicial de DBO, en mg/L

C_{b_0} =concentración de microorganismos en el reactor, en mg/L

La concentración C_{b_0} , en mg/L, es el peso de la biopelícula (W_p), en mg, dividido entre el volumen del reactor (V_r), en litros.

$$C_{b_0} = \frac{W_p}{V_r}$$

El peso de los microorganismos W_p , 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 .

$$W_p = (V_p)(Y_p)$$

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.

$$V_p = (A_p)(E_p)$$

Sea la relación M :

$$M = \frac{C_{b_0}}{C_{a_0}} = \frac{A_p E_p Y_p / V_r}{C_{a_0}}$$

Sí se considera que D =densidad del medio (en cm^2/L)=área para película/volumen del reactor:

$$D = \frac{A_p}{V_r}$$

Entonces:

$$M = \frac{(D)(E_p)(Y_p)}{C_{a_0}}$$



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.

$$P = (E_p)(Y_p) \quad \left(cm \frac{mg}{cm^3} = \frac{mg}{cm^2} \right)$$

M se puede expresar de la forma siguiente:

$$M = \frac{(P)(D)}{Ca_0}$$

La concentración inicial $Ca_0 = S_0$ (concentración de DBO inicial)

M se puede expresar de la forma siguiente:

$$M = \frac{(P)(D)}{S_0}$$

Sustituyendo Ca_0 por S_0 y; M por la expresión anterior en la ecuación del tiempo de retención, se obtiene:

$$t_r = \frac{1}{kS_0 \left(\frac{PD}{S_0 - 1} \right)} \ln \left[\frac{1 - X_a S_0 / PD}{1 - X_a} \right]$$

El caudal del influente Q , en m^3/d , para obtener el volumen del reactor, en m^3 .

$$V_r = Qt_r$$

Para obtener el área total de contacto A_t (medio pástico), en m^2 , se aplica el valor de la densidad del medio, en m^2/m^3 .

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



$$A_t = (V_r)(D)$$

k, es la constante cinética.

Por ser una reacción con cinética de segundo orden se expresa en T^{-1} . concentración $^{-1}$. En este caso, día $^{-1}$.(mg/L) $^{-1}$. El valor determinado experimentalmente para PFS a temperatura de 20°C, $k=0.016$ días $^{-1}$.(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. $E_p \cdot Y_p$ (cm.mg/cm 3 =mg/cm 2). El valor determinado experimentalmente para PFS a temperatura de 20°C, $P=2.3$ mg/cm 2 .

Después de analizar las principales ecuaciones de proceso en la biopelícula en general, podemos pasar al siguiente subtema que nos permite conocer las diferentes ecuaciones de diseño aplicadas a los diversos biorreactores de biopelícula.

1.2.2 Ecuación de diseño de biofiltros

Para mostrar las diferencias de requerimientos de área entre diferentes sistemas de biopelícula, se presenta como ejemplo, un influente unitario (1 L/s) con DBO de 200 mg/L, y se calculan las áreas de contacto para niveles de remoción de 0% a 90 %. A continuación, se presentan las ecuaciones aplicables a los diferentes biorreactores que hemos estado analizando (Gómez, 2008):

BIOFILTRO

Ecuación de Germaín



$$Z = \frac{\text{Ln}\left(\frac{S_0}{S_e}\right)(q^n)}{k}$$

Donde:

Z=altura empacada

S₀=DBO del influente, en mg/L=200 mg/L

S_e=DBO del efluente, en mg/L=es función de la remoción

q=caudal especófico, en m³/hr)m²=1.8

n=constante de empaque=0.5

k=constante cinética=0.09

$$At = \frac{Q}{q}$$

Donde:

At=área transversal del biofiltro

Q=caudal del influente, en m³/hr=3.6

D=densidad del empaque, en m²/m³=88

Ecuación de Kinkanon Stove

$$A = \frac{QS_0}{\frac{K_1 S_0 K_2}{S_0 S_e}}$$

Donde:

K₁=constante=3.403

K₂=constante=3.37

S₀=DBO del influente, en mg/L=200 mg/L

S_e=DBO del efluente, en mg/L=es función de la remoción

Q=caudal del influente, en L/s=1

Ecuación de Popel



$$A = \frac{(Q)(S_0 - S_e)}{(K)(S_e)\left(\frac{1}{2}\right)}$$

Donde:

K =constante=2.3

Q =caudal del influente, en $m^3/d=86.4$

S_0 =DBO del influente, en $mg/L=200 mg/L$

S_e =DBO del efluente, en mg/L =es función de la remoción

BIOFILTRO AEREO SUMERGIDO (BAS)

Ecuación de Rusten Bjorn

$$r DQO = \frac{(273)(BDQO)}{BDQO + 360}$$

Donde:

$BDQO$ =carga orgánica aplicada, en $DQO/m^2/d$

$r DQO$ = tasa de remoción, en $g DQO removidos/m^2/d$

La relación entre la concentración de la DQO y la DBO , se expresa como:

$DBO=0.381DBO-8.8$, en mg/L

En este subtema hemos aplicado valores para diferentes sistemas de biopelícula y poder reconocer la variación que se presenta en sus requerimientos, lo cual nos permitirá fundamentar la elección del sistema más adecuado cuando se desarrolle el diseño y el escalamiento de este tipo de biorreactores en los temas siguientes.

1.2.3 Escalamiento de biodiscos

Una de las principales aplicaciones de los biodiscos es para el tratamiento de aguas residuales, donde la biopelícula formada, es la responsable de la



degradación de la materia orgánica disuelta y la disminución de la concentración de patógenos.

Escalamiento

Es el proceso mediante el cual se desarrollan los criterios y las reglas de asignación numérica que determinan las unidades de medida significativas para llevar de un tamaño dado a otro tamaño mayor o menor una operación u objeto.

Escalar un proceso o equipo es convertirlo de su escala de investigación (laboratorio o piloto) a escala industrial (producción), (Durand-Anaya & Pedroza-Flores, 2008).

Los biodiscos, dentro del reactor, giran a bajas velocidades, lo que facilita la formación de la biopelícula. La rotación del disco tiene como finalidad:

1. El mezclado en el tanque.
2. Permite que la biomasa este en contacto con el oxígeno.
3. Mantiene en suspensión los sólidos arrastrados, facilitando su separación en un clarificador secundario.

Para mantener un buen rendimiento en un sistema de depuración de aguas residuales, es importante el control de los siguientes factores:

- a) **Temperatura:** Se recomienda trabajar con la temperatura óptima de los microorganismos presentes, a fin de intensificar el proceso biológico.
- b) **Velocidad de giro de los biodiscos:** Se recomiendan velocidades entre 1 y 5 rpm.
- c) **Precipitaciones verticales:** Se recomiendan que las instalaciones del biorreactor se encuentren cubiertas, a fin de evitar el desprendimiento de la biopelícula de los discos por causa de la lluvia, granizo o cualquier otro factor externo que pueda dañarla.



Figura 17. Disco Biologico en Plataforma de Concret.

Tomado de: http://www.rodelca.com.ve/plan_biodisco.htm

Generalmente, un sistema de biodiscos consta de: un tanque sedimentador primario, un tanque reactor, discos de acrílico, un termostato digital y un tanque de sedimentación secundaria.

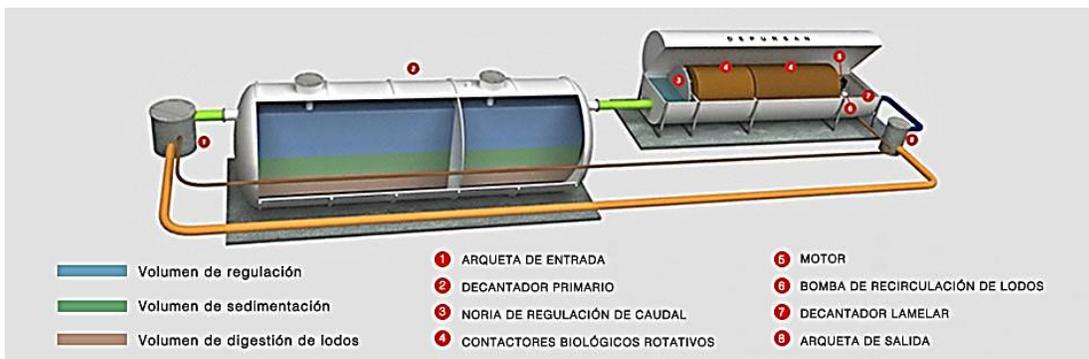


Figura 18. Planta de contactores biológicos rotativos (RBC).

Tomado de: <http://www.depursan.com/depuradoras/funcionamiento>



Ejemplo diseño del sistema de biodiscos

El **primer paso** consiste en el **cálculo del volumen del reactor**, el cual se determina conociendo las dimensiones del tanque.

Considera que se dispone de un tanque de radio=0.30 m, con una altura de 0.95 m; entonces el volumen será:

$$V = \pi r^2 h$$

$$V = \pi(0.30m)^2(0.95 m) = 0.269 m^3 = 269 L$$

Donde:

V=volumen del reactor (L)

r=radio del tanque (m)

h=altura (m)

Sin embargo, para determinar el **volumen real del tanque**, se debe considerar el porcentaje de inmersión del biodisco y la separación entre el borde de los discos y el fondo del tanque, que se considera de aproximadamente del 31%, por lo tanto, el volumen del tanque será de 83.39 L:

$$(0.31)*(269L)=83.39 L$$

El **segundo paso** consiste en el cálculo del **caudal**, cantidad de fluido que pasa un área en un determinado intervalo de tiempo, el cual debe ser constante para este tipo de casos. Si se considera que el tiempo necesario de depuración es de 36 h, se tiene:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0.08339 m^3}{1.5 \text{ días}} = 0.0556 \frac{m^3}{día}$$

Donde:

Q=caudal (m³/día)

V=volumen real del reactor (m³)

t=tiempo necesario para la depuración (días)

Cs=carga superficial (m/día)

Q=caudal (m³/día)

A=área del tanque (m²)



Ejemplo diseño del sistema de biodiscos (continuación)

En **tercer lugar**, se calcula la **tasa de carga superficial** del tanque sedimentador primario, el cual favorece la remoción de sólidos sedimentables y el material flotante del agua residual.

Si se supone que las dimensiones del tanque son de 0.50 m de largo por 0.40 m de ancho; con un sistema de filtro y un espacio de 0.20 m de alto por 0.40 m de ancho para la sedimentación de lodos, se tiene:

Area:

$$A = (0.50\text{m}) \cdot (0.40\text{m}) = 0.2$$

Carga superficial:

$$C_s = \frac{Q}{A} = \frac{0.0556 \text{ m}^3/\text{día}}{0.1824 \text{ m}^2} = 0.204 \frac{\text{m}}{\text{día}}$$

Donde:

C_s =carga superficial (m/día)

Q =caudal (m³/día)

A =área del tanque (m²)

En **cuarto lugar**, se calcula el **número de discos** necesarios para el diseño. Para ello, es preciso conocer las medidas y la separación entre ellos. Si se considera que:

- Las medidas de los discos son de 0.40 m de diámetro, con espesor de 0.005 m, de superficie rugosa.
- Los discos se encuentran unidos a un eje central de acero inoxidable de 0.90 m de longitud, que atraviesa el tanque reactor de forma longitudinal a 0.05 m de distancia a partir de la base.
- Los discos se fijan al eje a intervalos regulares.
- Para mantener la distancia entre los discos se coloca un corcho de 3 cm.

$$N = \frac{L}{S + \beta} = \frac{0.90 \text{ m}}{0.03 \text{ m} + 0.005 \text{ m}} = 28$$

Donde:

N =número de discos

L =largo del eje (m)

S =distancia entre discos (m)



Ejemplo diseño del sistema de biodiscos (continuación)

Finalmente, se realiza el cálculo del **área de los discos** acorde con el diámetro del tanque reactor (0.60 m), de acuerdo a:

$$A = \pi r^2 = \pi(0.30)^2 = 0.283 \text{ m}^2$$

$$A_d = AN = (0.283 \text{ m}^2)(28) = 7.924 \text{ m}^2$$

Donde

A_d =área de los discos (m^2)

r =radio de los discos

N =número de discos

A =área de un disco (m^2).

Durante este tema te has introducido al proceso de escalamiento que es un elemento que desarrollarás y aplicarás durante tus actividades profesionales, ya que, como ingeniero en Biotecnología, tendrás la responsabilidad de escalar varios procesos y que te permitirán fundamentar la toma de futuras decisiones en plantas de proceso nuevas o ya existentes.

Cierre de la Unidad

Llegaste al final de esta unidad, donde adquiriste los conocimientos que te permitirán identificar un Reactor Biológico Rotativo y el papel de las biopelículas o biofilm que forma parte esencial en este tipo de biorreactor. Asimismo, te permitió reconocer los diferentes procesos que llevan a cabo en las biopelículas, así como introducirte a las ecuaciones de diseño para el escalamiento de biodiscos utilizando ejemplos donde aplicaste estas ecuaciones y que te ayudaron a su mejor comprensión. Estos conocimientos te darán las bases para continuar con la siguiente unidad.





Para saber más



Tratamiento de aguas residuales - biodiscos, sedimentación. Disponible en:

<https://www.youtube.com/watch?v=JVYKmeluKRI>



Romero, J.M., Sánchez, J. A., Welter, A. B., Ascar, G.I., Grumelli, Y.A. (2015). Modelos matemáticos para biodiscos. Universidad Católica de Córdoba, Campus Universitario, Facultad de Ingeniería. Disponible en:

<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/argentina14/romero.pdf>



AQUALAI (2011). Depuración. Grupo Aqualai-Dynamics. S.L.U. Disponible en:
<http://www.aqualai.com/residual/biodiscos.html>



Fuentes de consulta



- Anaya-Durand, A., H. Pedroza-Flores. 2008. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. Ciencia Ed. (IMIQ) 23(1): 31-39. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48223105>
- Atl (El portal del agua desde México). (2013). Los humedales artificiales: componentes y tipos. Fecha de última consulta: 30/mayo/2013. Recuperado de: http://www.atl.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=5954:los-humedales-artificiales-componentes-y-tipos&catid=119:investigacion-y-agua&Itemid=462
- Bebaman, J., Armstrong, N., Maidment, D. (1996). Modeling of Dissolved Oxygen in the Houston Ship Channel Using Wasp5 and Geographic Information Systems. Recuperado de: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/6750>
- Behling, E.; Marín, J.C.; Gutiérrez, E.; Fernández, N. (2003). Tratamiento aeróbico de dos efluentes industriales utilizando reactores biológicos rotativos de contacto. Multiciencias, 3(2): 1-16. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/904/90430205.pdf>
- Compendio de Estadísticas Ambientales. Glosario. (2010). Recuperado de: http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlet8434.html
- CONAGUA, (2013). Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166771/NMX-AA-028-SCFI-2001.pdf>



- Cricyt (2016). Recuperado de:
<https://web.archive.org/web/20171125223643/http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/DBO.htm>
- Echevarría, L.G. (2013). Técnicas y métodos de uso de las biopelículas en la búsqueda de procesos de biorremediación. Scientific International Journal, 10(3): 32-43. Disponible en
<http://www.nperci.org/L.%20Echevarria-Biopeliculas-V10N3.pdf>
- Eguia, L. E. (1991). Capítulo 2: Estado actual de los conocimientos. Desarrollo de la biopelícula en medio soporte permeable. Escuela Superior de la Marina Civil. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria. 1: 14-209.
- Enrile de Rojas, F., Fuenmayor, F. V. (2009). Manual de higiene bucal. 1era. Edición. Editorial: Médica Panamericana. Buenos Aires. ISBN: 978-84-9835-137-8.
- Gama Fuentes, M.A. 2004. Biología I. 2ª Edición. Ed. Pearson. Recuperado de:
<https://books.google.com.mx/books?id=1R9FQ1xF3iEC&pg=PA105&lpq=PA105&dq=difusion+en+biologia&source=bl&ots=Kl8mzOn7Ty&sig=4ONvOGW7NSOX87Dt2fyH6Hi8ZnE&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi9-4rcgofTAhVnwYMKHZISAqk4ChDoAQhCMAc#v=onepage&q=difusion%20en%20biologia&f=false>
- Guillen Trujillo, H. 2013. Apuntes de la materia: procesos biológicos. Universidad Autónoma de Chiapas Facultad de Ingeniería. Disponible en:
<http://cecodes.net/files/APUNTES%20DE%20PROCESOS%20BIOLÓGICOS.pdf>
- Gómez, S.D. (2008). Ecuación general de diseño para procesos de biopelícula. Foro del agua. 12(48):29-34. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/236841522_Ecuacion_general_para_diseno_de_procesos_de_Biopelicula_Tratamiento_de_aguas_residuales
- Hospital General de México. (2016). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Recuperado de:
https://web.archive.org/web/20150213063832/http://www.hgm.salud.gob.mx/descargas/pdf/noticias/programa_mercurio/marco/norma_001.pdf



- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2013). Humedales artificiales: una alternativa al tratamiento de las aguas residuales para pequeñas localidades. Recuperado de: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/congreso-imta-2013/files/assets/basic-html/page116.html
- Iwai, S., Kitao, T. (1994). Wastewater treatment with microbial films. Technomic Publishing Company Inc. USA. Pp. 89-92.
- Millan, S.T.C. (2005). Filtración biológica aerada de aguas residuales en un lecho profundo. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 12-35. Recuperado de: <http://132.248.9.195/pd2005/0602309/Index.html>
- Moreno, B. L. D. (2011). Celdas microbianas de biocombustible: origen, avances y aplicaciones para la generación de energía. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 8-9.
- Mosquera-Corral, A., Campos, J.L., Vidal, G., Méndez, R. (2007). Efluentes líquidos de curtidos: parámetros de caracterización y de operación de las unidades de depuración. En: Méndez P.R. Vidal S.G. Lorber K.E., Márquez R.F. Producción limpia en la industria de curtiembre. Universidad de Santiago de Compostela, 21-42 pp. Recuperado de: http://www.eula.cl/giba/images/contenidos/educacionambiental/Producci%C3%B3n_limpia_en_la_industria_de_curtiembre.pdf
- Nadal, A.A. (2010). Introducción. En: Estudio del estado del proceso de depuración de la EDAR de Cullera mediante técnicas de respirometría. Tesis. Universidad Politécnica de Valencia. 7-21 pp. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/9164/ESTUDIO%20DEL%20ESTADO%20DEL%20PROCESO%20DE%20DEPURACION%20DE%20LA%20EDAR%20DE%20CULLERA%20MEDIANTE%20TECNICAS%20DE%20RESPIROMETRICAS%20ANGLICA%20Nadal%20Alf~1.pdf>
- Pérez Aristizábal J.D. (2010). Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos (RBC o biodiscos) a escala laboratorio como tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la pradera. Tesis. 23-29 pp. Recuperado de: [http://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/44/Aplicacion%20y%20evaluacion%20de%20un%20reactor%20de%20contactores%20biologicos%20rotativos%20\(RBC%20o%20biodiscos\)%20a%20escala%20laboratorio%20como%20tratamiento%20de%20los%20lixiviados%20generados%20en%20el%20relleno%20sanitario%20de%20la%20pradera.pdf](http://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/44/Aplicacion%20y%20evaluacion%20de%20un%20reactor%20de%20contactores%20biologicos%20rotativos%20(RBC%20o%20biodiscos)%20a%20escala%20laboratorio%20como%20tratamiento%20de%20los%20lixiviados%20generados%20en%20el%20relleno%20sanitario%20de%20la%20pradera.pdf)



[ctor%20de%20contactores%20biol%C3%B3gicos%20rotativos%20\(RBC%20o%20biodiscos\)%20a%20escala%20laboratorio%20como%20tratamiento%20de%20los%20lixiviados%20generados%20en%20el%20relleno%20sanitario%20de%20La%20Pradera.pdf?sequence=3&isAllowed=y](#)

- Pérez, L. A. G. (2005). La biopelícula: una nueva visión de la placa dental. Rev. Estomatológica Herediana. 15(1):82-85.
Recuperado de:
<http://www.upch.edu.pe/vrinve/dugic/revistas/index.php/REH/article/view/1984/1981>
- RAE (2016). Real Academia Española. Recuperado de:
<http://www.rae.es/>
- Rojas, B. M. M. (2011). Quorum sensing en la asociación beneficiosa de las bacterias con las plantas. Rev. Colomb. Biotecnol. 13(2):135-143. Recuperado de:
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/articulo/download/27959/28663>
- UCM. (2016). Universidad Complutense de Madrid. Recuperado de:
https://web.archive.org/web/20171008001033/http://pendiente-demigracion.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc_sub_porosidad.html
- Tortora, G. J., Funke, B. R., Case, C. L. (2007). Introducción a la microbiología. 9a. Edición. Editorial Médica Panamericana. Buenos Aires. ISBN: 978-950-06-0740-7.
- Zerón, A. 2011. Biotipos, fenotipos y genotipos. ¿Qué biotipo tenemos? (Segunda parte). Revista Mexicana de Periodontología, 2(1): 22-33. Recuperado de:
<https://www.medigraphic.com/pdfs/periodontologia/mp-2011/mp111g.pdf>
- Yocum, D. (2007). Manual de diseño: humedal construido para el tratamiento de las aguas grises por biofiltración. Bren School of Environmental Science and Management. University of California. Santa Barbara. 1:1-16. Recuperado de:
http://www2.bren.ucsb.edu/~keller/courses/GP_reports/Diseno_Humedal_AguasGrises.pdf