

REACTORES BIOMEMBRANA PARA LA DEPURACIÓN BIOLÓGICA AEROBIA DE LAS AGUAS RESIDUALES

IÑAKI TEJERO

Catedrático de Tecnologías del Medio Ambiente
Universidad de Cantabria

ALFREDO JÁCOME

Profesor asociado
Universidad de La Coruña

EMILIO EGUÍA y TOMÁS VIDART

Profesores titulares
Universidad de Cantabria

JUAN JOSÉ OSA e INMACULADA LORDA

Doctorandos
Universidad de Cantabria

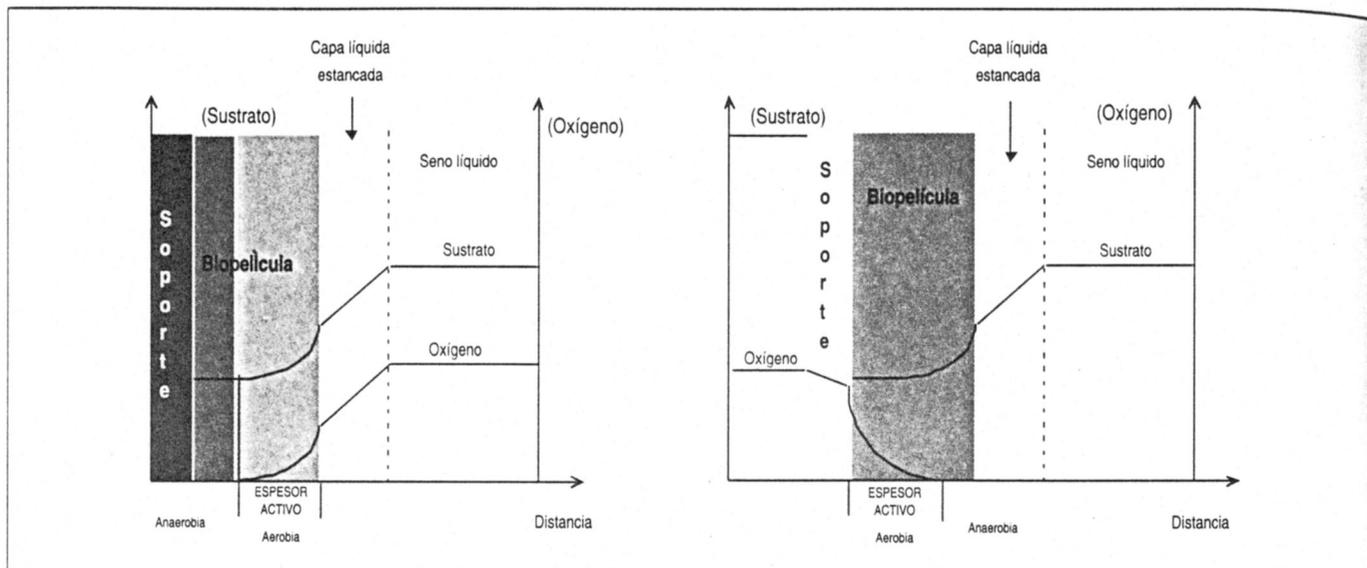
SUMMARY: Various biofilm membranes reactors using flat membrane (Eguía, 1991 and Vidart, 1992), hollow fiber membrane (Jácome, 1995), and tubular membrane (Osa, 1995), for wastewater treatment, developed by the Biofilm Group of the University of Cantabria, Spain, are herein described. All reactors worked with synthetic wastewater based on glucose, and aeration based on pure oxygen, pressurized air and air at atmospheric pressure. In this reactors, a membrane is used as substratum and aeration device at the same time. Several authors have studied this process, and have developed different configurations: Timberlake et al. (1988), Omishi et al. (1982), Abdel-Warith et al. (1990) and Wilderer (1995). The performance of the flat membrane reactor is very high, reaching organic load removals up to 180 g COD/m².d, showing removal kinetics according to Monod and Blackman type.

The reactor has been operated under organic loadings up to 600 g COD/m².d, but at organic loads over 200 g COD/m².d, better performance is not reached. When using pressurized air and pure O₂, COD removals up to 75 and 90% can be reached respectively. This reactor has also achieved nitrification rates of 47 g NH₄+/m².d. While operating with pure oxygen, nitrification rates were observed at 11 g NH₄+/m².d.

En este artículo se presenta una aplicación reciente de las membranas microporosas hidrófobas: los reactores biomembrana. El Grupo Biopelícula de la Universidad de Cantabria viene desarrollando una línea de investigación en la aplicación de los reactores biomembrana sobre soporte permeable a gases a la depuración biológica aerobia de las aguas residuales. En una primera parte se describen las características generales de este tipo de biopelículas. Se ha experimentado con cuatro reactores, dos de ellos de membrana plana y los otros dos de membrana tubular. En todos los casos se ha alimentado a los reactores con agua residual sintética. Para la oxigenación se ha empleado aire a presión atmosférica, aire presurizado y oxígeno puro a presión. Aunque la capacidad de oxigenación resultó ser muy baja, se han conseguido rendimientos de eliminación de hasta el 90%. La eliminación de nitrógeno también ha resultado muy elevada, y además la eliminación de carbono y nitrógeno se producen simultáneamente. También se ha comprobado que este tipo de reactores son capaces de funcionar con costo de oxigenación cero, si bien con rendimientos menores.

Introducción

Existen numerosas aplicaciones de membranas en separaciones fluido/fluido en campos tales como la medicina, biotecnología, hidrometalurgia y el tratamiento de aguas. Las aplicaciones más comunes en el tratamiento de aguas son la microfiltración y ultrafiltración, la ósmosis inversa, la extracción no dispersiva y las membranas líquidas. Existen también tratamientos biológicos de aguas residuales que emplean este tipo de membranas como soporte de la biopelícula. Puede considerarse que el conjunto de la membrana y la biopelícula compone una membrana de dos capas: una biológicamente inerte y la otra activa. Al conjunto membrana-biopelícula se le denomina *biomembrana*, y a los reactores de este tipo se les conoce como *reactores biomembrana*.



Figuras 1 y 2. Perfiles de oxígeno y sustratos en una biopelícula convencional y en una biopelícula sobre soporte permeable.

En algunos de estos tratamientos, la membrana cumple otra función además de la de soporte. En unos casos, puede funcionar como filtro de sustancias disueltas en el agua residual, que pueden resultar tóxicas para la biomasa presente en la biopelícula, que de no separarse previamente impedirían la degradación biológica del o los compuestos a eliminar. En nuestro caso, la membrana funciona como sistema de oxigenación de la biopelícula al poner en contacto a la biopelícula con un espacio gaseoso que puede contener diferentes mezclas de oxígeno con otros gases, desde oxígeno puro hasta aire. Por ello, para diferenciarlos de otros tipos de reactores biomembrana, los denominamos *reactores biomembrana de soporte permeable a gases*. En la bibliografía, hay varios diseños de este último tipo de reactores (1, 2, 8, 11, 12, 16, 18).

Biopelículas sobre membranas permeables a gases

En reactores biopelícula convencionales (lechos bacterianos, biodiscos, biofiltros, etc.) la biopelícula se halla fijada a un soporte inerte e inactivo. Además el flujo de reactantes (donadores y aceptores de electrones de la reacción biológica) se produce en la misma dirección y sentido, es lo que denominamos un flujo *co-corriente*. Por ejemplo, en biopelículas aerobias el flujo de materia orgánica carbonosa, nutrientes y oxígeno

se produce en la misma dirección y sentido. En lo sucesivo se designará como sustrato a la materia orgánica carbonosa y los nutrientes.

En cambio, en un reactor biopelícula sobre soporte permeable a gases en el que, el soporte, cumple además la función de sistema de oxigenación, el flujo de oxígeno se produce a través del soporte en sentido hacia la biopelícula, mientras que el flujo de sustratos se produce en sentido opuesto, desde el seno del líquido, hacia la biopelícula, por tanto, el flujo de sustratos y oxígeno es *contracorriente*.

En un reactor biopelícula el rendimiento del proceso se ve limitado por la transferencia de reactivos al interior de la biopelícula y la evacuación de subproductos de la misma. El proceso de transferencia de sustratos hacia el interior de la biopelícula puede darse por 3 fenómenos: transporte advectivo, difusión mole-

cular y/o difusión turbulenta. Según la teoría de la doble capa, las resistencias difusionales más importantes se dan en la capa líquida estancada en contacto con la biopelícula y en el interior de la biopelícula, donde la transferencia se produce exclusivamente por difusión molecular. En un reactor de mezcla completa la concentración de los sustratos se mantiene constante en todo el seno líquido, disminuyendo a medida que atraviesa la capa líquida estancada y la biopelícula. En el caso de que en ninguna parte de la biopelícula la concentración de sustrato y oxígeno sea cero, tanto los sustratos como el oxígeno se difunden hasta el soporte, es a lo que se denomina biopelícula totalmente penetrada. En el caso contrario, biopelícula parcialmente penetrada. En estas últimas puede definirse un espesor activo, que por ejemplo, desde el punto de vista de la degradación biológica aerobia, correspondería al espesor de

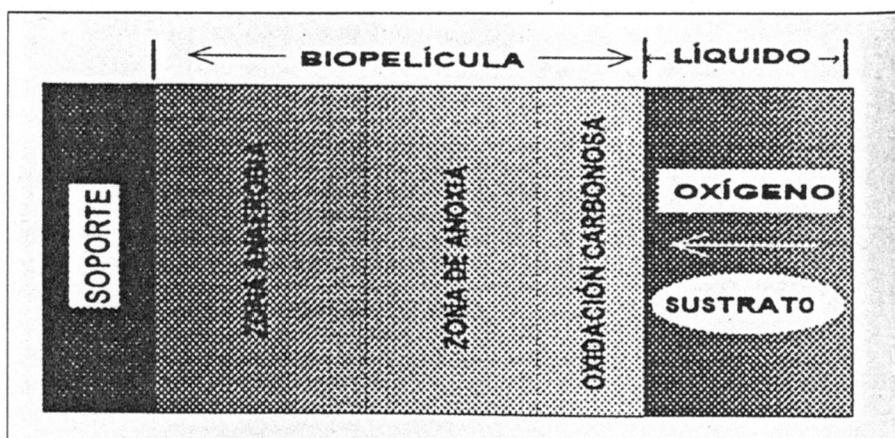


Figura 3. Zonificación teórica de una biopelícula gruesa convencional.

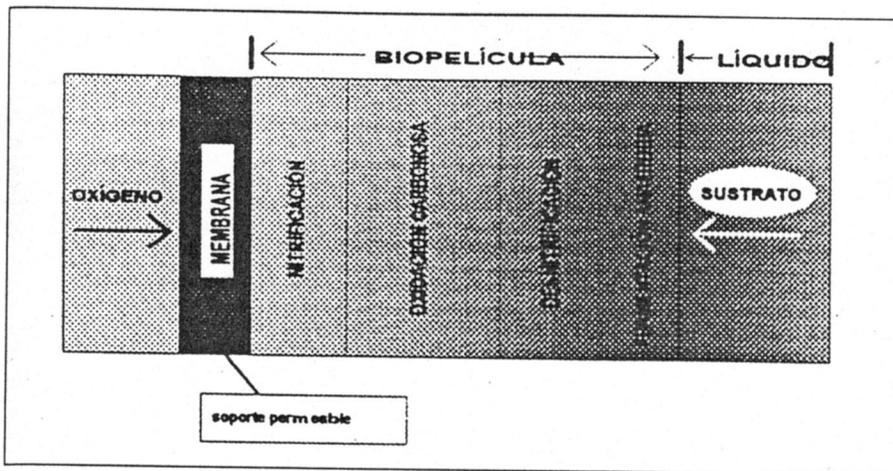


Figura 4. Zonificación teórica de una biopelícula gruesa sobre membrana permeable a gases.

biopelícula a través del cual es capaz de difundirse el oxígeno y la materia orgánica (figura 1). Obsérvese que la capa activa estaría en la zona más externa de la biopelícula y que las concentraciones más elevadas de oxígeno y de sustratos se corresponden en el espacio, al igual que las concentraciones más bajas. Generalmente el espesor hasta el cual se difunde la materia orgánica es superior a la que se difunde el oxígeno, dado que la concentración del oxígeno en el seno líquido es mucho menor y las resistencias difusionales son las mismas. El que una biopelícula se encuentre parcial o totalmente penetrada depende del espesor de la misma.

En un reactor biopelícula sobre soporte permeable a gases los sustratos (materia orgánica carbonosa y nutrientes) se transfieren a la biopelícula del mismo modo que en un reactor biopelícula convencional, pero el oxígeno se transfiere en sentido opuesto a través de la membrana a la biopelícula. Este cambio hace que los perfiles del oxígeno y sustratos se crucen. Cuando la biopelícula se encuentra parcialmente penetrada el espesor activo se encuentra en la capa más interna de la misma. Además el lugar de la biopelícula con mayores concentraciones de oxígeno se encuentra pegado al soporte y es éste el lugar de la biopelícula donde la concentración de sustrato es menor (figura 2).

Las diferencias en el funcionamiento de los distintos tipos de reactores biológicos se debe a que sus características inducen unas condiciones ambientales específicas, que determinan el tipo de organismos

que van a predominar y por tanto, el tipo de reacciones que se van a producir. En un reactor biopelícula pueden generarse además diferentes ambientes en la dirección normal al soporte en función de las concentraciones de sustratos en el exterior de la biopelícula y de las resistencias difusionales, que determinarán los perfiles de concentraciones de los reactantes. Así, la disponibilidad de oxígeno va a determinar teóricamente la existencia de varias capas con ambientes distintos. En un reactor biopelícula convencional, estas capas, desde el seno líquido hasta el soporte, serán: aerobia, anóxica y anaerobia. Mientras que en un reactor biopelícula sobre soporte permeable el orden de las capas se invierte, y en el caso particular de que en el seno líquido haya oxígeno, el orden de las capas será: aerobia, anóxica, anaerobia, anóxica y aerobia. La distribución del sustrato también puede definirse de forma teórica en diferentes

capas. Tanto en los reactores convencionales como en los de membrana permeable a gases, el flujo de sustratos, se produce desde el seno líquido, a través de la biopelícula, hacia el soporte. Por lo tanto, la mayor disponibilidad de sustrato se dará en la capa de la biopelícula en contacto con el seno líquido, disminuyendo hacia el soporte.

En función de las diferentes concentraciones relativas de reactantes en el interior de la biopelícula se podrán diferenciar varias capas en las que se produzcan diferentes procesos. De este modo en un reactor biopelícula convencional en la zona más próxima al seno líquido, donde tanto la concentración de oxígeno como la de sustrato es elevada, se producirá la oxidación de la materia orgánica carbonosa, mientras que, en función de las concentraciones relativas de oxígeno y sustrato, en las capas más interiores de la biopelícula se producirá la degradación anaerobia, la nitrificación, o la digestión anaerobia de la biopelícula (figura 3). En un reactor biopelícula de membrana permeable a gases, en la capa más profunda, donde la concentración de oxígeno es alta, la concentración de materia orgánica carbonosa puede ser baja (porque todo él puede haberse eliminado en las capas más exteriores) y el nitrógeno amoniacal puede estar disponible, pueden darse las condiciones idóneas para los organismos nitrificantes. En las capas más alejadas del soporte donde accede el oxígeno disuelto, puede haber una alta disponibilidad de carbono que será utilizado por los organismos heterótrofos, dominando

Tipo de reactor	Suministro de gas	Caudal máximo de gas disponible (L/d)	K_a (d^{-1})	Capacidad de oxigenación específica ($gO_2/m^2/d$)
	Sin membrana	-	0,34	0,08
	Aire atmosférico	-	2,92	0,7
Membrana plana	Aire a presión regulable	10	13,16	3,14
		21	24,15	5,86
		43	42,8	10,22
		58	57,1	13,64
Tubular (1)	Aire atmosférico	-	6,52	2,17
Tubular (2)	Aire atmosférico	-	2,64	6,07
	Aire a presión	-	2,69	6,2
	Oxígeno a presión	-	5,32	12,24

Tabla 1. Capacidad de oxigenación de los reactores experimentados.

éstos sobre los nitrificantes. Más hacia el seno líquido, donde no llega el oxígeno disuelto habrá un suministro de nitratos desde el interior de la biopelícula y un suministro de carbono desde el exterior produciéndose condiciones idóneas para la desnitrificación. Si el espesor de la biopelícula lo permite en las capas más exteriores pueden llegar a darse condiciones adecuadas para el desarrollo de bacterias anaerobias (figura 4).

Capacidad de Oxigenación

En un proceso biológico aerobio la capacidad de depuración queda determinada por la capacidad de oxigenación, por ello, es de suma importancia determinar la capacidad de oxigenación del sistema. Los resultados obtenidos, por el método no estacionario (o del sulfito), con nuestros reactores a escala de laboratorio indican una baja capacidad de oxigenación (tabla 1). Este hecho se debe a que el área interfacial gas/líquido es mucho menor que en un sistema de oxigenación con burbujas o con agitación superficial. También se ha observado que la capacidad de oxigenación se incrementa al aumentar la agitación del seno líquido o la presión parcial de oxígeno en el lado gaseoso de la membrana. La agitación del seno líquido disminuye el espesor de la capa líquida estancada y por tanto, la resistencia difusional. Y una mayor presión parcial de oxígeno en el gas hace que aumente la concentración de equilibrio dada por la ley de Henry y por ello se incrementa la capacidad de oxigenación.

Tipo de reactor	Tipo de suministro	$K_L a$ (d ⁻¹)	Capacidad de oxigenación específica (gO ₂ /m ² /d)	Carga orgánica eliminada máxima (gDQO/m ² /d)
membrana plana	aire a presión	57,1	13,64	180
tubular (1)	aire atmosférico	6,52	2,17	140
tubular (2)	aire atmosférico	2,64	6,07	17

Tabla 2. Comparación entre la capacidad de oxigenación y la carga orgánica eliminada.

	Eguía (R1)	Vidart (R2)	Jácome	Osa (R3)
Volumen líquido (L)	10,7	1,5	1,6	0,97
Superficie del soporte (cm ²)	628,32	628,32	360	36,85
Superficie específica (m ² / m ³)	5,872	41,888	22,5	3,799
Tipo de membrana	plana	plana	fibra hueca	tubular
Marca	Milipore	Milipore	AKZO	AKZO
Modelo	PTFE -FGLP	PTFE -FGLP	Accurel®PP	Accurel®PP
Material	politetra-fluoroetileno	politetra-fluoroetileno	polipropileno	polipropileno
Tamaño de poro nominal (µm)	0,2	0,2	0,2	0,2
Tamaño máximo de poro (µm)			≤ 0,65	≤ 0,65
Porosidad media	70%	70%		
Punto de burbuja (bar)	≥ 0,91	≥ 0,91	≥ 0,95	≥ 0,95
Grosor medio (µm)	175	175	450	1500
Diámetro interno medio (µm)	-	-	1800	5500

Tabla 3. Características de los reactores utilizados.

Estos resultados son poco alentadores y parecen indicar que en este tipo de reactores se conseguirán rendimientos muy inferiores a los convencionales. Pero, la determinación de la capacidad de oxigenación por el método no estacionario se realiza sin biomasa, es decir, sin biopelícula en el reactor, y con agua de grifo. Cuando la biopelícula crece sobre la membrana las condiciones varían. La mem-

brana ejerce resistencia a la transferencia de oxígeno, pero al estar la biopelícula adherida al soporte es previsible que no exista capa líquida estancada. Por tanto, como la resistencia difusional de la membrana es menor que la de la capa líquida estancada, la transferencia de oxígeno será mayor.

Realizando balances de masas con los resultados obtenidos con los reactores a escala de laboratorio, con agua residual sintética, y suponiendo que toda la materia orgánica se elimina de forma aerobia se determina que el oxígeno consumido es mayor que la capacidad de oxigenación cuantificada por el ensayo de oxigenación (tabla 2). Pero la hipótesis de que no se producen fenómenos de degradación anaerobia es muy fuerte. Por ello, se ha desarrollado un procedimiento para medir de forma directa el consumo de oxígeno por la biopelícula. Los resultados de esta medida nos sugieren que el consumo de oxígeno por la biopelícula varía con la carga orgánica aplicada, con la carga orgánica eliminada, y con el espesor de la biopelícula. En función de estas variables el

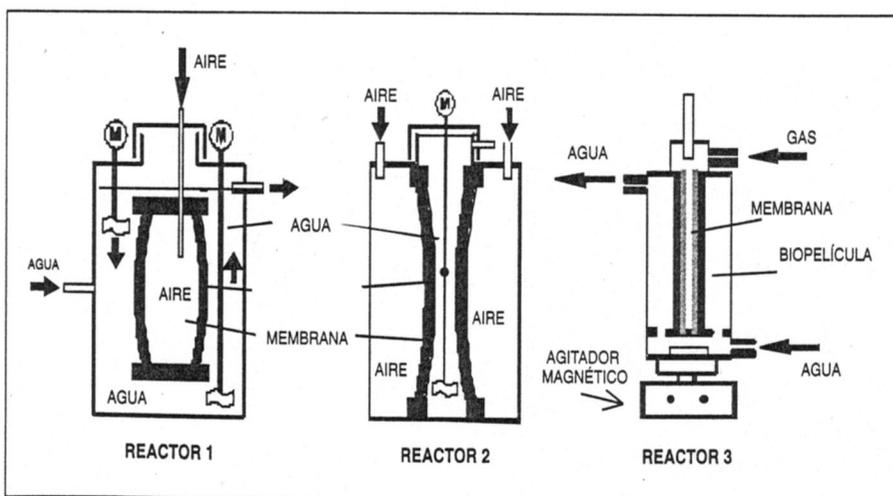


Figura 5. Esquema de los reactores.

consumo de oxígeno puede ser mayor, igual o menor que la capacidad de oxigenación determinada con el método no-estacionario. Por lo tanto, independientemente del caudal de aire suministrado, la biopelícula, consume sólo el oxígeno que necesita. Y por último, los fenómenos de degradación anaerobia son importantes cuando el espesor de la biopelícula es grande. De todos modos la precisión de la medida es mejorable.

Plantas Piloto

En el Grupo Biopelícula de la Universidad de Cantabria hemos desarrollado varios reactores a escala de laboratorio empleando diferentes tipos de membrana y diversas configuraciones (Figura 5). En dos de ellos emplearon membranas planas (2 y 18), en los otros dos se utilizaron membranas tubulares (8 y 12). Las características de las plantas piloto empleadas en la experimentación se muestran en la tabla 3.

Funcionamiento de los reactores biopelícula sobre soporte permeable a gases

Eliminación de carbono

La capacidad de depuración de estos sistemas varía con el tipo de

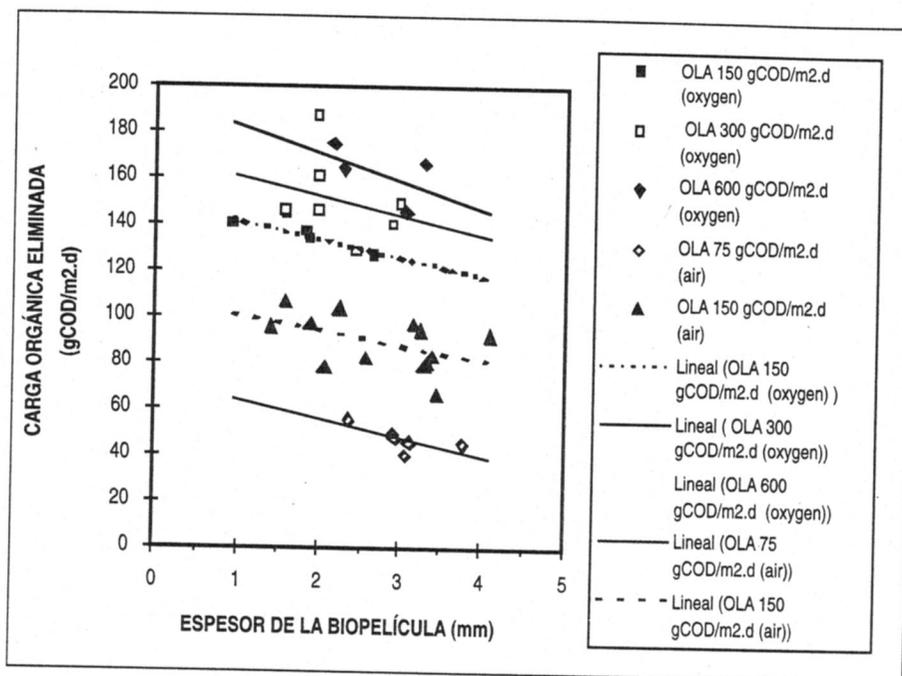


Figura 7. Influencia del espesor de la biopelícula sobre la capacidad de depuración (carga orgánica eliminada). Biopelícula sobre membrana utilizando aire y oxígeno.

membranas utilizado, la configuración del reactor, etc.

Con los reactores de membrana plana se consiguen eliminaciones de hasta 180 gDQO/m²/día. Este valor es un orden de magnitud superior a los valores utilizados para el diseño de biodiscos. La carga orgánica eliminada sigue globalmente una cinética de tipo Monod o Blackman respecto a la carga orgánica aplicada (COA). Por lo tanto, con cargas orgánicas aplicadas superiores al valor de

saturación, que se encuentra entre 150 y 200 gDQO/m²/d, no se consiguen eliminaciones superiores. El valor de saturación o carga máxima eliminable está influido por la disponibilidad de oxígeno (figura 6). Estos reactores pueden trabajar con COAs superiores al valor de saturación. Se ha trabajado con COAs de hasta 600 gDQO/m²/d sin detectarse problemas en su funcionamiento.

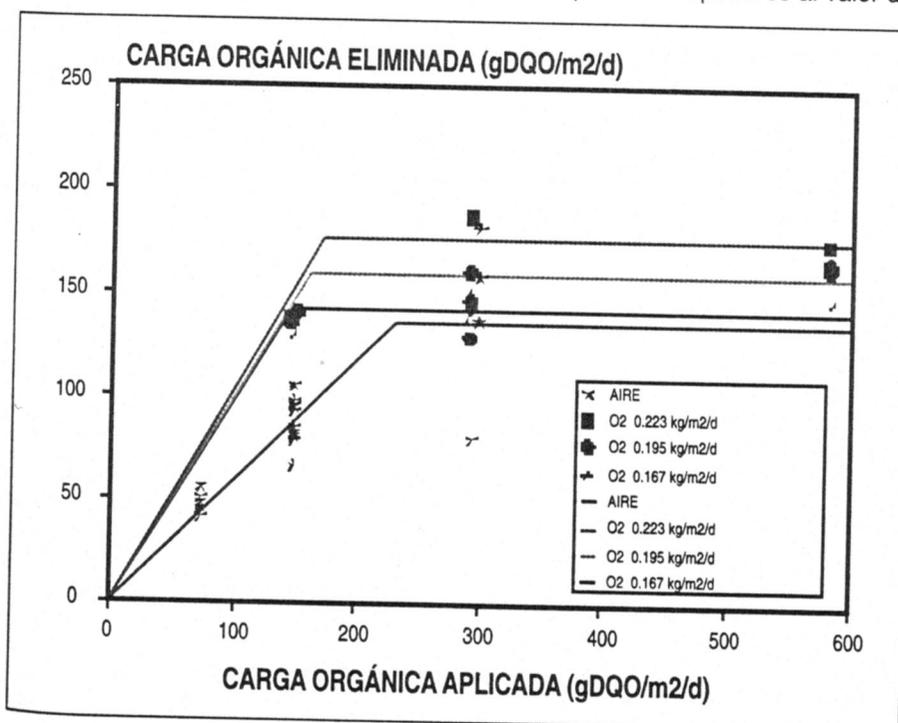


Figura 6. Carga orgánica eliminada frente a carga orgánica aplicada, en un reactor de membrana plana, empleando aire y oxígeno. Influencia de la disponibilidad de oxígeno.

En el caso de utilizar como gas de alimentación oxígeno puro, cuando la carga orgánica aplicada es menor o igual a la carga máxima eliminable, se pueden alcanzar rendimientos del 90% o superiores.

En el caso de utilizar como gas de alimentación oxígeno puro, cuando la carga orgánica aplicada es menor o igual a la carga máxima eliminable, se pueden alcanzar rendimientos del 90% o superiores. En el caso de utilizar aire para la alimenta-

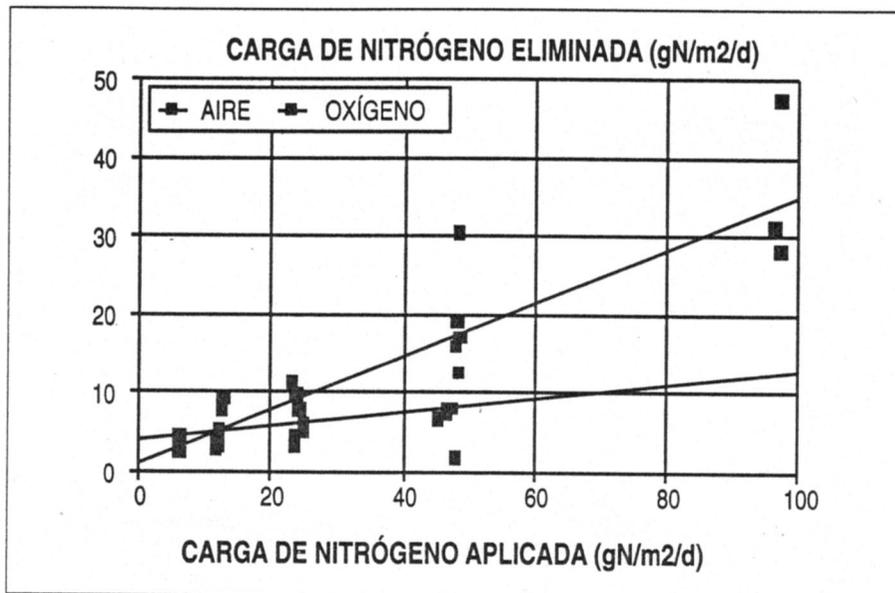


Figura 8. Comparación del funcionamiento de la biopelícula sobre membrana, respecto a la eliminación de nitrógeno, utilizando oxígeno o aire.

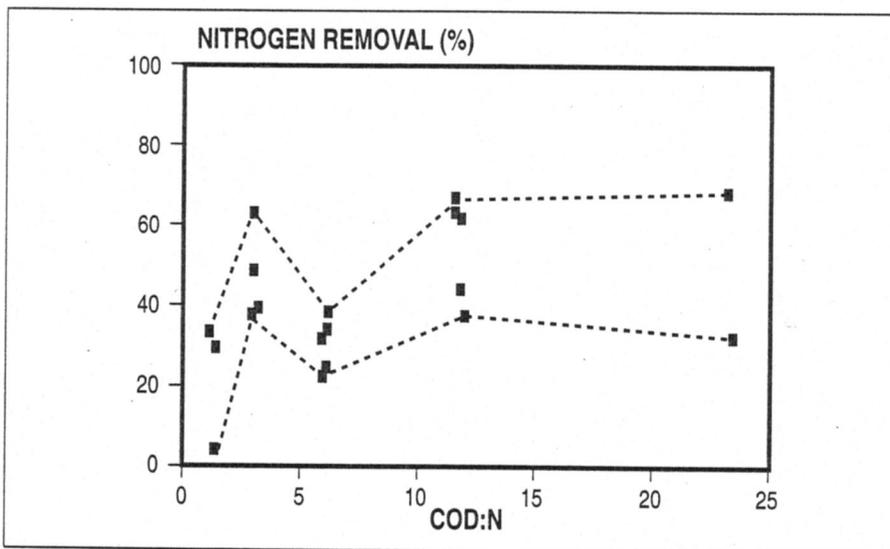


Figura 9. Influencia de la relación DQO/N de la alimentación sobre el rendimiento de eliminación de nitrógeno por una biopelícula sobre membrana utilizando aire.

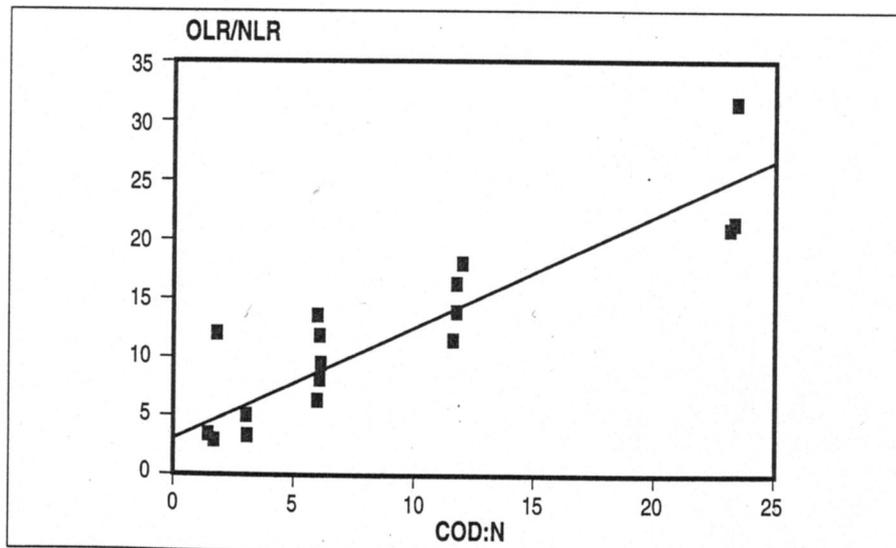


Figura 10. Efecto de la relación DQO/N de la alimentación sobre la proporción de carga orgánica / carga de nitrógeno eliminados por una biopelícula sobre membrana utilizando aire.

ción del reactor se consiguen grandes capacidades de depuración pero los rendimientos no superan el 75%.

Al analizar la capacidad de depuración respecto al espesor de la biopelícula, se detecta, en todos los casos, una disminución de la capacidad de eliminación de carbono al aumentar el espesor de la biopelícula (figura 7). Este hecho, cuya justificación teórica se ha realizado en apartados anteriores, se debe al incremento de la longitud difusional del sustrato que se produce al aumentar el espesor de la biopelícula.

Con los reactores de fibra hueca se han alcanzado valores puntuales de capacidad de eliminación de

En los reactores de membrana plana, utilizando aire, la relación carbono/nitrógeno en el agua afluyente influye de forma irregular en el rendimiento de eliminación de nitrógeno. En dicho caso, la relación carbono/nitrógeno en el afluyente, sí determina la proporción en la que el carbono y el nitrógeno se eliminan en el sistema.

hasta 192 gDQO/m²/día. Pero, aunque la cinética es similar a la de los reactores de membrana plana, los rendimientos conseguidos rara vez superan el 80%, manteniéndose prácticamente siempre por debajo del 50%. Suponemos que se debe a que en estos reactores el espesor de la membrana es mucho mayor y por tanto también lo son las limitaciones difusionales y como consecuencia la disponibilidad de oxígeno es menor.

Eliminación de nitrógeno

En los reactores de membrana plana, utilizando agua residual sintéti-

ca con concentraciones equivalentes al agua residual urbana, las concentraciones de nitritos y nitratos en el efluente han sido despreciables. La capacidad de eliminación de nitrógeno, utilizando aire como gas de alimentación, ha llegado a valores extraordinarios de hasta 47 g N/m²/d (figura 8). Estos valores tan elevados se deben a que en este tipo de reactores se produce la nitrificación y desnitrificación simultáneamente. Al emplear oxígeno puro la carga máxima eliminada de nitrógeno no supera los 11 g N/m²/d. Este hecho se explica por la inhibición, por altas concentraciones de oxígeno, de los organismos nitrificantes, que como se ha visto anteriormente se encuentran en la capa en contacto con la membrana.

En los reactores de fibra tubular la tasa máxima de nitrificación alcanzada es de 4,66 g N/m²/d, y la tasa máxima de desnitrificación 6,69 g N/m²/d.

Tanto en los reactores de membrana plana como en los de fibra tubular, la eliminación de materia orgánica carbonosa, nitrificación y desnitrificación se producen simultáneamente en la misma biopelícula, debido a que, como se ha expuesto anteriormente, los perfiles de oxígeno y sustrato generan diferentes ambientes, produciéndose la estratificación de organismos heterótrofos, nitrificantes y desnitrificantes en la biopelícula.

En los reactores de membrana plana, utilizando aire, la relación carbono/nitrógeno en el agua afluente influye de forma irregular en el rendimiento de eliminación de nitrógeno (figura 9). En dicho caso, la relación carbono/nitrógeno en el afluente, sí determina la proporción en la que el carbono y el nitrógeno se eliminan en el sistema (figura 10). También se ha observado que la capacidad de desnitrificación depende de la concentración de nitratos. Así, al alimentar al reactor con concentraciones crecientes de nitrógeno en forma de nitratos (hasta 60 mg/l N-NO₃), aumenta la concentración de nitritos en el efluente, llegando hasta concentraciones de 23 mg/l N-NO₂ (9).

Características de la biopelícula

Las membranas desarrolladas sobre soporte permeable a gases han sido espesas y densas. Bajo las condiciones de carga experimenta-

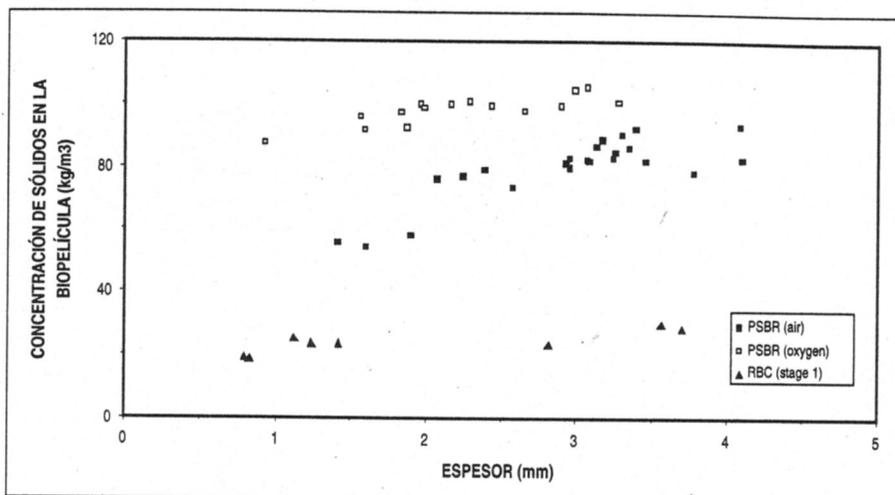


Figura 11. Concentración de sólidos de la biopelícula con respecto a su espesor, para biopelícula sobre membrana empleando aire y oxígeno.

Las aplicaciones más comunes en el tratamiento de aguas son la microfiltración y ultrafiltración, la ósmosis inversa, la extracción no dispersiva y las membranas líquidas. Existen también tratamientos biológicos de aguas residuales que emplean este tipo de membranas como soporte de la biopelícula.

les, la concentración de sólidos en la biopelícula (density) se ha mantenido en un rango de 80 a 105 Kg/m³, que iguala a los valores máximos para biopelículas convencionales muy delgadas (100 µm), mientras que en nuestro caso estas concentraciones se han dado para espesores medidos de entre 1 y 4 mm. Para estos valores de espesor las biopelículas convencionales presentan normalmente concentraciones de sólidos comprendidas entre 20 y 30 Kg/m³ (figura 11). Esta diferencia puede explicarse por la forma de crecer la biopelícula. Mientras que en un reactor convencional la biopelícula crece en la superficie, que es donde se encuentran las bacterias heterótrofas aerobias, en reactores sobre soporte permeable a gases, la biopelícula crece desde dentro. También se ha observado que la edad de la biopelí-

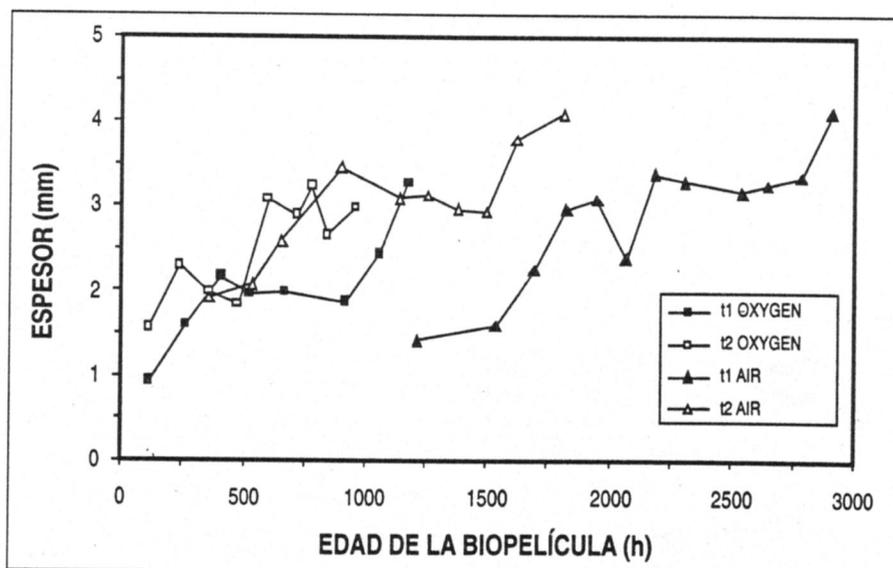


Figura 12. Influencia de la edad de la biopelícula sobre su espesor para biomembrana utilizando oxígeno o aire y un RBC en la 1ª etapa.



cula influye en el espesor de la misma (figura 12).

Producción de fangos y sólidos en suspensión en el efluente

La concentración de sólidos en suspensión (SS), en el efluente, sin decantar, ha resultado baja (5 a 33 mg SS/l), lo que ha hecho pensar en la posibilidad de que, en algunos casos, pueda prescindirse de la decantación secundaria. La baja contaminación del efluente por SS se debe a la baja producción de fangos del sistema (0,10 a 0,30 g SS/g DBO eliminada), explicable por el hecho de la digestión aerobia y anaerobia de la biomasa que se produce en el interior de la biopelícula.

Resumen y Conclusiones

En resumen, en relación a los reactores biomembrana sobre soporte permeable a gases puede decirse que:

- Al aumentar el espesor, ven disminuida su capacidad de depuración debido al aumento de la resistencia difusional de la propia biopelícula.
- La capacidad de oxigenación del sistema, con biopelícula, es mucho mayor que sin biopelícula, debido al fenómeno de la transferencia biológica de oxígeno.
- No es necesario aportar oxígeno a la biopelícula artificialmente a través de la membrana, ya que ésta lo toma del aire a través de la membrana.
- Tienen elevada concentración de sólidos (density), y pueden tener simultáneamente grandes espesores, debido a la forma de crecimiento desde el interior de la biopelícula.
- Tienen muy baja tasa de desprendimiento de sólidos (baja producción de fangos) debido a la digestión simultánea aerobia-anaerobia de la matriz de la biopelícula.
- Tienen una elevada capacidad de eliminación de carbono y nitrógeno (nitrificación-desnitrificación), que se produce de forma simultánea, pudiendo tratar aguas residuales decantadas

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado, en parte, por la Comisión Interminis-

terial de Ciencia y Tecnología (CICYT) Ref. AMB94-0879. Agradecemos a la casa AKZO el material suministrado para esta investigación de forma gratuita. Parte de este trabajo ha sido desarrollado por Alfredo Jácome, becario FPI por convenio con la empresa PRIDESA.

Bibliografía

- (1) ABDEL-WARITH, A.S.; WILLIAMSON, K.J.; STRAND, S.E. (1990). Substratum aerated biofilm reactor. *National Conference of Environmental Engineering*. ASCE (New York). 360-365.
- (2) EGUÍA, E. (1991). Desarrollo de la biopelícula en medio soporte permeable. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- (3) EGUÍA, E.; TEJERO, I. (1992). Biopelícula sobre soporte permeable: eliminación conjunta de carbono orgánico y nitrógeno. *V Congreso de Marina Civil* (Cádiz).
- (4) EGUÍA, E.; TEJERO, I. (1993). Application of a permeable support biofilm reactor (PSBR) to ships. (BULGARIA).
- (5) EGUÍA, E.; VIDART, T.; JÁCOME, A.; TEJERO, I. (1993). Removal of carbonaceous organic matter by a biofilm process with support permeable to oxygen. *Second International Specialized Conference on "Biofilm Reactors"*, (Paris) pp 827-828.
- (6) JÁCOME, J.A. (1990). Evaluación preliminar del funcionamiento de la biopelícula en un reactor de soporte permeable (RSP). Tesis de Magister. Universidad de Cantabria.
- (7) JÁCOME, J.A.; EGUÍA, E.; TEJERO, I. (1993). Development of biofilm on permeable membrane support. *Chemical Industry and Environment*. Volume II, Water. Universitat Politècnica de Catalunya, Universitat de Girona, Societat Catalana de Tecnologia (Ed: J. Amados y P. Mutjé), pp. 107-114 (Girona).
- (8) JÁCOME, J.A.; EGUÍA, E.; VIDART, T.; TEJERO, I. (1995). Depuración de las aguas residuales con un reactor biopelícula. *Ingeniería Química*, Nº 309, pp. 137-141.
- (9) LOLMEDE, PH.; VIDART, T.; EGUÍA, E.; JÁCOME, J.A.; TEJERO, I. (199). Effect of high concentrations of nitrates on a permeable support biofilm reactor. *Biofilm Systems*, Nº1 febrero, pp.11-13.
- (10) LOLMEDE, PH.; VIDART, T.; EGUÍA, E.; TEJERO, I. (1993). Effect of high concentrations of nitrates on a biofilm process with support permeable to gases using air. *Second International Specialized Conference on "Biofilm Reactors"*, (Paris) pp 801-802.
- (11) ONISHI, H.; NUMAZAWA, R. (1982). Biochemical process for purifying contaminated water. European patent application 0 049 959.
- (12) OSA, J.J. (1995). Transferencia biológica de oxígeno en biopelículas. Tesis de Magister. Universidad de Cantabria.
- (13) ROTHERMUND, C.; CAMPER, A.; WILDERER, P. (1994). Biofilms growing on gas permeable membranes. *Wat. Sci. Tech.* Vol 29, nº 10-11, pp. 447-454.
- (14) TEJERO, I.; VIDART, T.; EGUÍA, E.; AMIEVA, J.J.; BEZANILLA, J.A.; JÁCOME, A.; LORDA, I. (1994). Biofilm thickness and density: effects and influences. *Biofilms Systems*, (En prensa).
- (15) TEJERO, I.; VIDART, T.; EGUÍA, E.; AMIEVA, J.J.; BEZANILLA, J.A.; JÁCOME, A.; LORDA, I. (1994). Biofilm thickness and density: effects and influences. *IAWQ 17th Biennial International Conference* (Budapest).
- (16) TIMBERLAKE, D.L.; STRAND, S.E.; WILLIAMSON, K.J. (1988). Combined aerobic heterotrophic oxidation, nitrification and denitrification in a permeable support biofilm. *Wat. Res.*, Vol. 22, nº12, pp.1513-1517.
- (17) VALENZUELA, H.C. (1993). Estudio de difusividad de sustratos en una biopelícula crecida en un RBSP. Estudio preliminar. Tesis de Magister. Universidad de Cantabria.
- (18) VIDART, T. (1992). Biopelícula en medio soporte permeable con aportación de aire. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- (19) VIDART, T.; EGUÍA, E.; JÁCOME, A.; TEJERO, I. (1993). Biofilm process with a support permeable to gases using air. *Second International Specialized Conference on "Biofilm Reactors"*, (Paris) pp. 821-826.
- (20) WILDERER, P.A. (1995). Technology of membrane biofilm reactors operated under periodically changing process conditions, *Water Science and Technology*, vol. 31, nº 1, pp. 173-183.
- (21) ZAMORA, M.P. (1996). Factores que influyen en la transferencia biológica de oxígeno en biopelículas. Tesis de Magister. Universidad de Cantabria.

