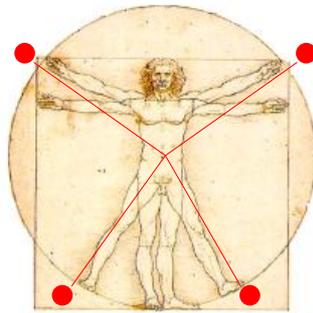


# **TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO**

*Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*

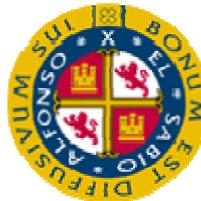
VOLUMEN XII. AÑO 2014

SEPARATA



## **UTILIZACIÓN DE MEMBRANAS COMO TRATAMIENTOS TERCIARIOS PARA REGENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES: MEMBRANAS CERÁMICAS**

**M<sup>a</sup> Teresa Díez González, Cristina de la Macorra García**



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO  
Escuela Politécnica Superior  
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: M<sup>a</sup> Teresa Diez González, Cristina de la Macorra García.  
Mayo, 2014.

<http://www.uax.es/publicacion/utilizacion-de-membranas-como-tratamientos-terciarios-para-regeneacion.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*  
Escuela Politécnica Superior.  
Universidad Alfonso X el Sabio.  
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).  
ISSN: 1696-8085  
Editor: Javier Morales Pérez – [tecnologia@uax.es](mailto:tecnologia@uax.es)

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

# UTILIZACIÓN DE MEMBRANAS COMO TRATAMIENTOS TERCIARIOS PARA REGENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES: MEMBRANAS CERÁMICAS

**M<sup>a</sup> Teresa Diez González (a), Cristina de la Macorra García (b)**

(a) Ingeniera Industrial por la Universidad Alfonso X El Sabio  
Master in Professional Development. Universidad de Alcalá  
email: mgonzdie@myuax.com

(b) Dra Europea en Ciencias Químicas por la Universidad Complutense de Madrid.  
Departamento de Tecnología Industrial de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad  
Alfonso X El Sabio. Tfono: 918105009, email: cdelagar@uax.es

RESUMEN: El agua es un bien común y escaso que es necesario cuidar, por eso en muchas ocasiones, la regeneración del agua resulta indispensable. En función de los usos a los que esté destinada el agua regenerada, y dentro de la tecnología disponible, el tratamiento será uno u otro.

Actualmente existen multitud de tratamientos terciarios de regeneración de agua, aunque entre los más utilizados están la cloración, ozonización, los rayos UV y la tecnología de membrana. En particular, la tecnología de membrana cerámica presenta unas ventajas muy significativas en cuanto a eficiencia y mantenimiento respecto al resto. Aunque en la actualidad es una tecnología en desarrollo que posee unos costes de inversión algo más elevados que el resto, se muestra ya como una de las tecnologías óptimas para estos tipos de tratamientos.

PALABRAS CLAVE: aguas residuales, membranas cerámicas, regeneración, microorganismos.

*ABSTRACT: Water is a common and limited good and care is needed, so in many cases, regeneration of water is essential. Depending on the uses for which it is intended the reclaimed water, and within the available technology, treatment will be one or the other.*

*Currently there are many water tertiary treatments, although the most used are chlorination, ozonation, UV and membrane technology. In particular, the ceramic membrane technology has some significant advantages in efficiency and maintenance respect to other. Although today is a developing technology that has investment costs somewhat higher than the rest, is shown as one of the best technologies for these types of treatments.*

*KEY-WORDS: waste water, ceramics membranes, regeneration, microorganism.*

## 1. Introducción

Las aguas residuales contienen, a la salida de las estaciones depuradoras, microorganismos perjudiciales para el hombre; es normal la presencia de bacterias, virus, amebas, protozoos, helmintos, etc. Para la reutilización de las aguas se hace imprescindible, después de la depuración, eliminar los microorganismos nocivos para el hombre y para el medio ambiente. Para este fin se emplean los tratamientos terciarios de desinfección.

Dependiendo del uso al que esté destinada el agua regenerada, el nivel de desinfección variará respecto al contenido de *Escherichia coli*, Nematodos intestinales y *Legionella spp.*

Según el Plan Nacional de Aguas Regeneradas ([http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/version\\_preliminar\\_pnra231210\\_tcm7-153069.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/version_preliminar_pnra231210_tcm7-153069.pdf)), la presencia de *Escherichia coli* puede variar desde la ausencia de la misma, hasta su nivel máximo, que llega a 10.000 UFC/100 ml. Por este motivo resulta necesario buscar el tratamiento que mejor se ajuste a las necesidades del uso posterior al que irá destinada el tipo de agua.

La desinfección es un proceso de destrucción o inactivación de los microorganismos patógenos. Aunque existen una gran variedad de procesos de tratamiento de aguas, como la filtración, la coagulación-floculación-sedimentación, los cuales pueden llegar a reducir el número de patógenos, éste no es el objetivo principal de dichos tratamientos. Los sistemas de desinfección más utilizados en la actualidad en las aguas residuales son la cloración, ozonización, radiación ultravioleta y el empleo de membranas (Hernández Muñoz, A., 2001). Sin embargo no todos alcanzan los mismos rendimientos, entendiendo por rendimiento el porcentaje de reducción de patógenos, los mismos costes o tienen el mismo proceso de regeneración o limpieza.

Dentro de las posibles tecnologías a utilizar, el empleo de membranas para tratar los efluentes de los procesos de depuración se está convirtiendo en una de las opciones más empleadas debido a la alta calidad de los efluentes tratados (Soriano, 2001). Ciertos usos del agua regenerada requieren la eliminación total de patógenos, lo que hace que se tengan que utilizar tratamientos muy eficientes.

Dentro de todas las membranas que hay en el mercado, el uso de membranas cerámicas se presenta como una alternativa muy eficiente para el tratamiento terciario de

aguas residuales, ya que es un proceso muy robusto que, además, puede ser sometido a lavados y métodos de regeneración extremos.

En este trabajo se pretende repasar los tratamientos terciarios más comúnmente empleados hoy en día, en el tratamiento de aguas residuales, centrándose en el empleo de membranas cerámicas.

## **2. Tratamientos terciarios de desinfección.**

Existen una gran variedad de agentes que pueden utilizarse para conseguir la inactividad de los microorganismos patógenos presentes en aguas residuales. Estos agentes pueden ser el empleo de concentraciones fuertemente alcalinas, elevadas temperaturas, el empleo de metales pesados como el cobre o la plata, agentes químicos como el permanganato sódico o la presencia de surfactantes, entre otros. Sin embargo se ha comprobado a lo largo de la historia que muchos de los agentes patógenos encontrados en las aguas pueden presentar resistencia a esos agentes de desinfección empleados. Por ello, los más considerados hoy en día son los compuestos de cloro, ozono, radiación ultravioleta y el empleo de membranas (Robles et al., 2011). A continuación se va a llevar a cabo una pequeña definición de los primeros de ellos, centrándose principalmente este trabajo, en el empleo de membranas.

### ***2.1 Cloración***

La desinfección de aguas mediante el empleo de cloro, o compuestos clorados, es el método más comúnmente usado. En este tratamiento se puede emplear cloro gas, comprimido a presión, que se disuelve en agua cuando es aplicado; pero normalmente se emplea hipoclorito de sodio (lejía) por su mayor facilidad de almacenamiento y dosificación.

Las desventajas del uso de cloro y sus derivados, es principalmente su reactividad con la materia orgánica dando lugar a trihalometanos (THM), muchos de los cuales son tóxicos o carcinogénicos (Van Steenderen et al., 1989). Otro de los inconvenientes que presenta este tratamiento es la formación de clorofenoles en aguas que contienen fenoles, lo que da lugar a malos olores. En presencia de amoníaco y compuestos amino nitrogenados, el cloro reacciona dando lugar a las cloraminas; estas formas combinadas del cloro no tienen el mismo efecto biocida en todos los microorganismos, siendo menos

efectiva su potencia en virus y quistes que en coliformes (Calmer et al., 1998). También se ha observado que cuando existe turbidez, los microorganismos adheridos a las partículas quedan protegidos y no son afectados por la acción del cloro (González et al., 2003).

Existen métodos para incrementar la eficacia de la cloración en aguas residuales, el empleo de ultrasonidos (Blume y Neis, 2005), aunque el consumo energético asociado a esta técnica es muy elevado.

## **2.2 Ozonización**

El ozono es otro tipo de tratamiento que permite la eliminación de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, reduciendo el olor, color, sabor y turbidez del agua (Beltran, 2004), así como compuestos refractarios, sustancias tóxicas y compuestos farmacéuticos (Dodd et al., 2006).

La vida media del ozono en agua es muy corta del orden de segundos a minutos, lo que hace que sea necesaria su generación “in situ”. Esto hace que su coste inicial sea alto, y aunque es más eficaz que la utilización del cloro para la desinfección o destrucción de virus y bacterias, la baja dosificación puede no desactivar del todo algunos virus, esporas o quistes.

El proceso de ozonización es una tecnología más compleja que la cloración; se requieren equipos complicados y sistemas de contacto eficientes. Es un reactivo corrosivo, lo que requiere de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable (Vidal, 2003).

Añadiendo otros inconvenientes, hay que destacar que el proceso de ozonización no es económico para las aguas residuales con altas concentraciones de sólidos suspendidos (SS), demanda bioquímica del oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), o carbono orgánico total y el costo del tratamiento puede ser relativamente alto en cuanto a la inversión de capital y a la demanda de energía eléctrica se refiere (Robson and Rice, 1991).

## **2.3 Radiación Ultra violeta (UV)**

La desinfección con ultra violeta es uno de los métodos de desinfección de aguas residuales más prácticos, debido a que es capaz de inactivar bacterias, virus, esporas y quistes de protozoos (Huffman et al., 2000).

Los efectos biocidas de la radiación ultravioleta (UV) han sido ya conocidos estableciéndose que las longitudes de onda corta de los rayos UV eran responsables de la desintegración microbiana asociada con la luz solar (Downes y Blount, 1877).

A pesar de esto, algunas veces los organismos pueden reparar o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante un “mecanismo de reparación”, también conocido como foto reactivación o, en ausencia de radiación, como “reparación en oscuro”.

La turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua residual hacen que la desinfección con luz UV sea ineficaz, por lo que el uso de la desinfección con lámparas UV no es tan efectivo en el caso de efluentes secundarios con niveles de SST mayores a 30 mg/L (Robles et al., 2011)

## **2.4 Membranas**

El empleo de membranas para la eliminación o reducción de microorganismos patógenos de las aguas residuales se ha convertido en una parte importante de la tecnología de separación en los últimos decenios. La fuerza principal de la tecnología de membrana es el hecho de que trabaja sin la adición de productos químicos y con un uso relativamente bajo de energía.

La tecnología de membrana es un término genérico para una serie de procesos de separación diferentes y muy característicos en los que se emplean membranas semi-permeables para tratar aguas subterráneas, superficiales o residuales.

El principio es simple: la membrana actúa como un filtro muy específico que dejará pasar el agua, funciona como una pared de separación selectiva, mientras que los sólidos suspendidos y otras sustancias que no atraviesan la membrana, quedan retenidos. Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana, la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana o la introducción de un potencial eléctrico.

Hay dos factores que determinan la efectividad de un proceso de filtración de membrana: selectividad y productividad. Ambos dependen de la membrana empleada.

- La selectividad se expresa mediante un parámetro llamado factor de retención o de separación (expresado en  $l/m^2 h$ ).

- La productividad se expresa mediante un parámetro llamado flujo (expresado en l/m<sup>2</sup> h). La selectividad y la productividad dependen de la membrana.

En función del tamaño de partícula retenida, la filtración de membrana se puede dividir en micro filtración (MF), ultrafiltración (UF), electrodiálisis (ED), nano filtración (NF) y ósmosis inversa (OI, RO en inglés).

Como indica la Tabla 1, cuando la filtración de membrana se utiliza para retirar partículas más grandes, se aplican la micro filtración y la ultrafiltración. Debido al carácter abierto de las membranas su productividad es alta mientras que las diferencias de presión son bajas. Se utilizan para eliminar turbidez, agentes patógenos y partículas de las aguas brutas.

Cuando se necesita desalinizar el agua, se aplican la nano filtración y la ósmosis inversa. La nano filtración y las membranas de OI no actúan según el principio de porosidad; la separación ocurre por difusión a través de la membrana. La presión requerida para realizar la nano filtración y la ósmosis inversa es mucho más alta que la requerida para la micro y ultra filtración, mientras que la productividad es mucho más baja.

La electrodiálisis se usa para desmineralizar agua salubre y marina y para ablandar aguas duras. (Taylor and Wiesner, 2002.)

	<b><u>Ósmosis inversa</u></b>	<b><u>nano filtración</u></b>	<b><u>Ultrafiltración</u></b>	<b><u>Micro filtración</u></b>
Membranas	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica
Grueso	150 nm	150 nm	150-250 nm	10-150 nm
Tamaño de poro	0,002 mm	0,002 mm	0,05-0,2 mm	0,2-5 mm
Rechazos	Compuestos de alto peso molecular Compuestos de bajo peso molecular	Compuestos de alto peso molecular Mono, di y oligosacáridos Aniones	Macromoléculas Proteínas Polisacáridos Virus	Partícula, barro Bacterias

	Cloruro sódico Glucosa Aminoácidos Proteínas	polivalentes		
Módulo de membrana	Tubular, en espiral y planas	Tubular, en espiral y planas	Tubular, en espiral, de fibra hueca y planas	Tubular, fibra hueca y planas
Presión	15-150 bares	5-35 bares	1-10 bares	2 bares

Tabla 2.1. Técnicas de membrana según el tamaño de partícula retenida (Robles, F. O., Rojo, J. C. T., & Bas, M. S. (2011). Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes.: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales. Ediciones Díaz de Santos)

En la Tabla 2.2 se esquematizan las ventajas de este tipo de tratamiento, frente a las técnicas usadas comúnmente para la eliminación de microorganismos patógenos.

	<b><u>RENDIMIENTO</u></b>	<b><u>COSTES</u></b>
Cloración	<b>Bajos.</b> Interferencias: turbidez, materia orgánica, amoniacó..	Bajo coste de inversión Bajo coste energético Bajo coste mantenimiento
Ozonización	<b>Bajos</b> No se inactivan virus, esporas y quistes	Alto coste inversión Alto coste energético Alto coste mantenimiento
UV	<b>Altos</b> Interferencias: turbidez	Alto coste de inversión Alto coste energético Alto coste mantenimiento
Membranas	<b>Muy alto</b>	Alto coste inversión Bajo coste energético Bajo coste mantenimiento

Tabla 2.2: Comparativa de rendimientos y costes de los tratamientos terciarios existentes para la eliminación de microorganismos patógenos.

La filtración de membrana tiene bastantes ventajas frente a los tratamientos existentes de purificación del agua:

- Es un proceso que puede ocurrir a baja temperatura. Esto es principalmente importante porque permite el tratamiento de los materiales sensible al calor.
- Es un proceso de bajo coste energético. La mayor parte de la energía requerida es la necesaria para bombear los líquidos a través de la membrana. La cantidad total de energía utilizada es mínima comparada con las técnicas alternativas.

De todos los procesos de membrana, la UF es una operación a presión que emplea normalmente entre 0.5 y 5 bares. Esto permite utilizar bombas de desplazamiento, lo que hace que la instalación pueda construirse de componentes sintéticos, abaratando los costos. Por esto suele ser la técnica de membrana que más se usa para el tratamiento terciario de aguas residuales.

### **3. Tecnologías de membrana por ultrafiltración.**

La ultrafiltración generalmente permite pasar la mayoría de las especies iónicas inorgánicas y retiene partículas discretas de materia, especies orgánicas iónicas y no iónicas, macromoléculas, todo tipo de microorganismos como bacterias, virus y otros tipos de partículas, dependiendo del peso molecular de corte de la membrana (dimensión del poro de la membrana).

En toda técnica de ultrafiltración por membrana, la tipología de la propia membrana es un factor importante en el momento de garantizar la máxima fiabilidad del proceso. El mercado ofrece diversos tipos de membrana que se adaptan cada una a aplicaciones específicas según cuál sea su nivel de filtrado.

Las membranas empleadas para ultrafiltración, son membranas porosas asimétricas (Soriano, 2001).

Una característica de la asimetría de las membranas de ultrafiltración, es la presencia de una fina película en la superficie de filtración. Esta película tienen normalmente un espesor de 0,1 a 1µm y está soportada por una subestructura más abierta; de ahí el adjetivo de asimétrica.

Las membranas porosas, a su vez, pueden dividirse según el tipo de material utilizado y según el tipo de geometría en la que estén dispuestas. Según el material existen dos grandes categorías de membranas:

- Las membranas orgánicas que se obtienen a partir de polímeros orgánicos.
- Las membranas inorgánicas que se obtienen a partir de materiales cerámicos, de vidrios, de carbón o de metales.

Una tercera categoría se está desarrollando a partir de materiales híbridos mineral/orgánicos y se conocen como membranas mixtas orgánicas-inorgánicas (Guizard et al. 2001).

Según la geometría pueden ser:

- Geometría plana: A partir de una geometría plana se pueden fabricar los módulos planos o los espirales.
- Geometría tubular: De una geometría tubular son los módulos tubulares, los capilares o las fibras huecas. Estos se diferencian entre sí por la dimensión de los canales tal y como se observa en la Tabla 3.1

Configuración	Diámetro de los canales (mm)
Tubular	> 10
Capilar o multicanal	0,5 - 10
Fibra hueca	< 0,5

Tabla 3.1 Tamaño de los canales en las diferentes geometrías tubulares de membrana. (Guizard, C., Bac, A., Barboiu, M., & Hovnanian, N. (2001). Hybrid organic-inorganic membranes with specific transport properties: Applications in separation and sensors technologies. Separation and purification technology, 25(1), 167-180).

### ***3.1 Membrana de geometría plana***

La geometría plana es una distribución que por norma general se usa a nivel de laboratorio, aunque existen módulos planos industriales. El principio de funcionamiento se basa en un apilamiento que consta de dos membranas separadas por una rejilla destinada a llevar el fluido de alimentación hasta las membranas (Figura 3.1).

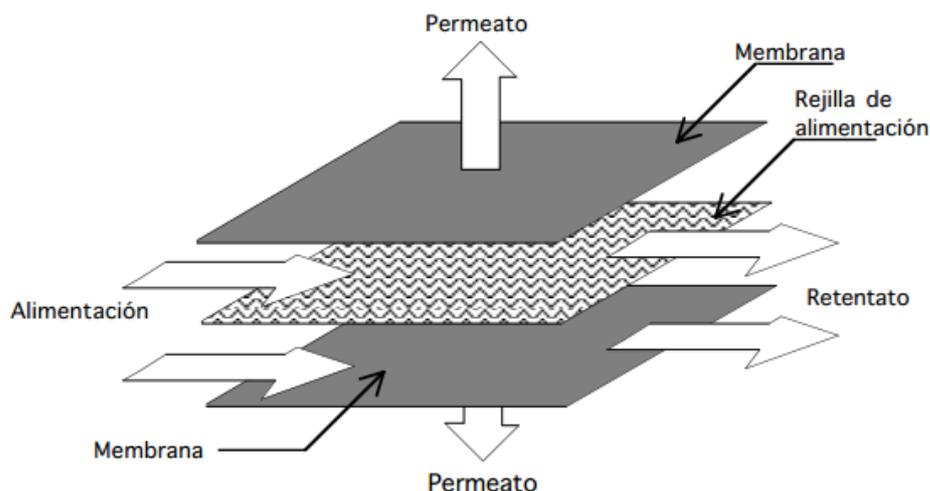


Figura 3.1. Esquema de funcionamiento de una membrana plana. (Guizard, C., Bac, A., Barboiu, M., & Hovnanian, N. (2001). Hybrid organic-inorganic membranes with specific transport properties: Applications in separation and sensors technologies. Separation and purification technology, 25(1), 167-180)

La parte filtrada (permeato) se recoge de un lado y otro de las membranas por otras dos rejillas. Retentato: agua impura, concentrada en partículas retenidas en la membrana. Para obtener el área deseada se superpone este apilamiento tantas veces como sea necesario. La relación superficie/volumen está en este caso entre 100 y 400  $\text{m}^2/\text{m}^3$ .

### 3.2 Membrana en espiral

El módulo en espiral es la evolución lógica de un módulo plano. Con esta disposición se permite mejorar considerablemente la relación superficie/volumen que está, en este caso, comprendido entre 300 y 1000  $\text{m}^2/\text{m}^3$ . El principio de fabricación de estos módulos consiste en enrollar sobre sí mismo, alrededor de un tubo central, un apilamiento de base como el descrito para los módulos planos (Figura 3.2).

El flujo de alimentación pasa por las rejillas enrolladas previstas para ello, siguiendo una dirección paralela al tubo central. La parte filtrada se drena radialmente por las rejillas de recuperación y es evacuada por el tubo central.

Debido a su diseño compacto y su magnitud de área de membrana por elemento, este tipo de membranas se suelen utilizar típicamente para aplicaciones de alto flujo, con cantidades mínimas de sólidos en suspensión. Su ventaja reside en su bajo material y coste operativo, aunque su principal desventaja es su gran ensuciamiento y dificultad de lavado (Cuartas, 2008.).

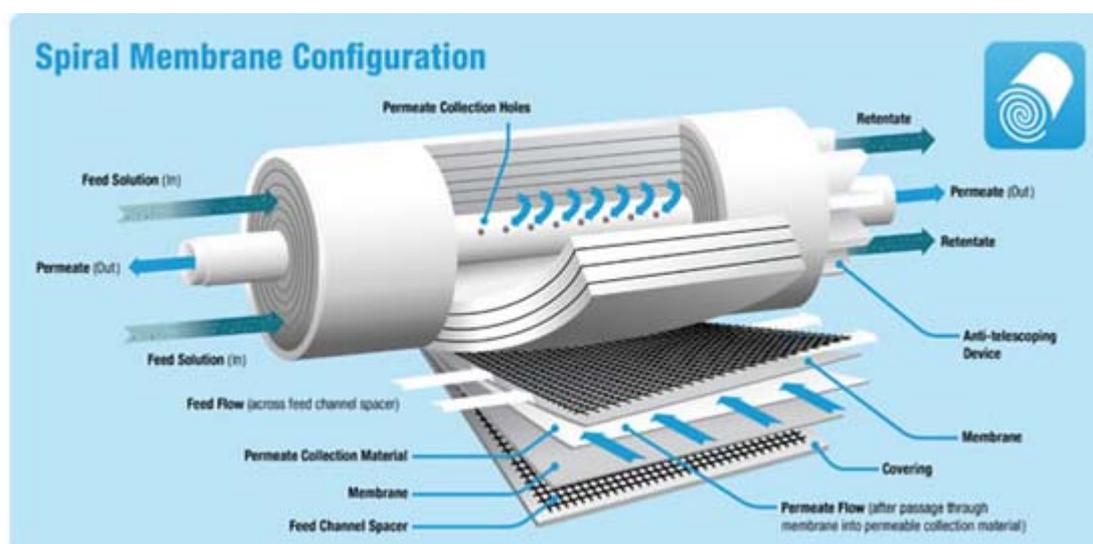


Figura 3.2. Diagrama de funcionamiento de membrana en espiral (www.acsmedioambiente.com)

### 3.3 Membrana tubular

Es la configuración más simple. La membrana se moldea sobre la pared interior de un tubo soporte poroso de distintas longitudes. Sus diámetros interiores están entre 3 y 40 mm. La capa activa en este tipo de membranas suele encontrarse en la superficie interior del tubo. El resto del espesor presenta una estructura porosa. La de diámetro de 13 mm es la más usada en el tratamiento de aguas residuales. Son menos propensas a ensuciarse que las membranas en otras configuraciones, ya que proporcionan un camino hidrodinámico simple al flujo, se limpian mecánicamente de una manera más sencilla.

Las membranas tubulares se disponen en paralelo cuando se necesitan altas velocidades de circulación (3m/s) y para reducir las pérdidas de carga a lo largo de las membranas y se conectan en serie cuando se necesitan velocidades de circulación menores (1m/s).

Los módulos tubulares están constituidos por un conjunto de elementos filtrantes, auto-soportados de geometría tubular o multicanal. Estos módulos (Figura 3.3) funcionan en filtración tangencial con el fluido a tratar presionado en el interior del tubo, mientras que el filtrado pasa al exterior del elemento filtrante. El filtrado que sale de los diferentes elementos filtrantes se recoge en la envoltura del módulo. Estos módulos presentan la ventaja de ser muy resistentes y de aceptar casi cualquier fluido prácticamente sin pre tratamiento.

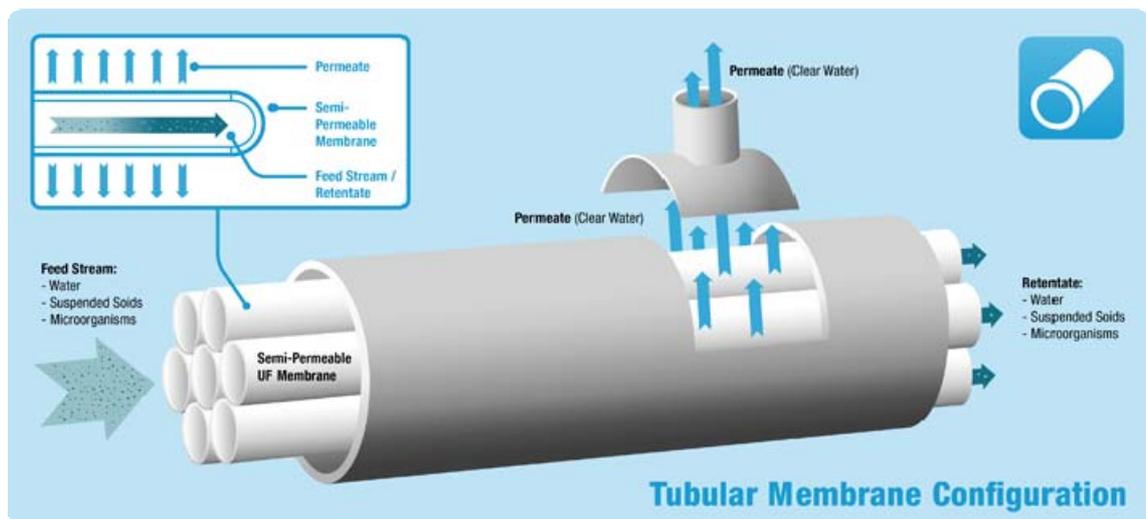


Figura 3.3 Esquema de funcionamiento de una membrana tubular (www.acsmedioambiente.com)

Una ventaja operacional importante es que las membranas tubulares pueden soportar cargas mucho mayores de materia en suspensión que cualquier otra configuración y pueden emplearse con un pre tratamiento del agua relativamente sencillo (Cuartas, 2008). Sin embargo, la relación superficie/volumen es baja y no pasa de  $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Las desventajas de esta configuración son su coste y baja densidad de empaquetado de los módulos de membrana.

Aunque existen membranas orgánicas tubulares, esta geometría se da sobre todo en membranas inorgánicas, de tipo cerámico. Además, las cerámicas utilizadas para la filtración tangencial se prestan a una geometría tubular con la que ofrecen un máximo de resistencia mecánica y sistemas de hermeticidad de los módulos muy eficaz. (Guizard et al., 2001)

### 3.4 Membrana de fibra hueca y capilares

Estos dos tipos de módulos se basan en la misma concepción, se diferencian sólo por el tamaño del canal central que es mucho más pequeño en las fibras huecas (< 1 mm) que en las capilares (> 1 mm). Esta diferencia se encuentra también en la relación superficie/volumen que puede llegar a 30000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> en los módulos de fibras huecas mientras que está entre 600 y 1200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> para los módulos capilares (Guizard et al., 2001), lo que las hace muy compactas. Las fibras están reunidas en un haz de miles o incluso millones. (Figura 3.4).

Las velocidades de trabajo son normalmente bajas.

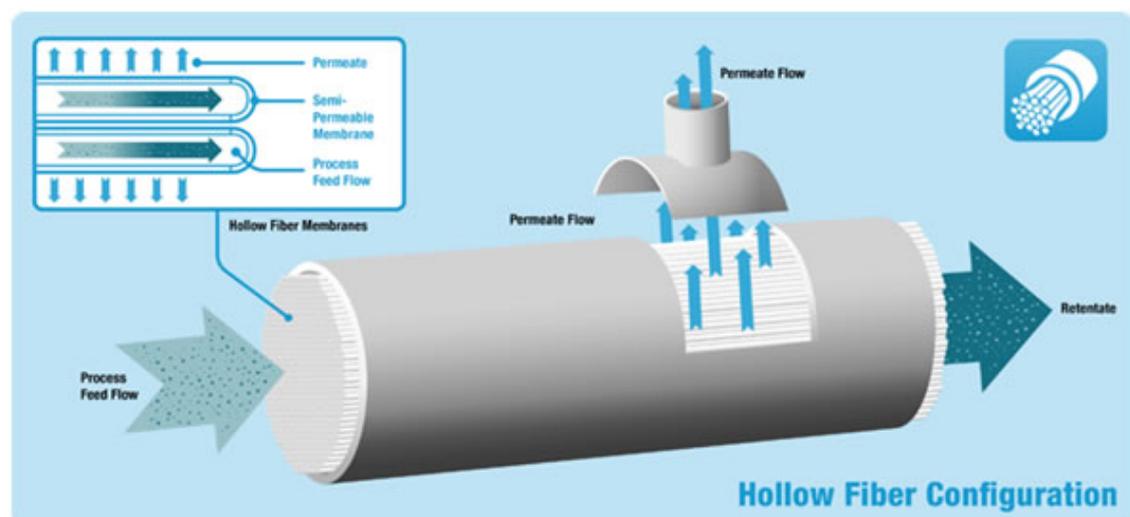


Figura 3.4. Diagrama de funcionamiento de membrana de fibra hueca. (www.acsmedioambiente.com)

### ***3.5 Membranas orgánicas***

Este tipo de membranas se obtienen a partir de diferentes polímeros amorfos, acetato de celulosa o plásticos no celulósicos (polímeros sintéticos) como acrilatos o polisulfonas. Los tipos de membranas de retención salina se fabrican, generalmente, de materiales relativamente más hidrofílicos, mientras que los materiales hidrófobos son más adecuados cuando se someten, las membranas, a tensiones mecánicas y térmicas.

Son membranas económicamente asequibles pero presentan graves deficiencias en lo que se refiere a resistencias mecánica, térmica y química.

### ***3.6 Membranas inorgánicas***

Existen diferentes tipos de membranas inorgánicas, éstas pueden ser (Quero, 2007):

- Membranas de vidrios porosos: Para su fabricación se emplea un vidrio que contenga un determinado porcentaje de sólidos ácidos (sílica) y básicos. El vidrio se lleva a una temperatura lo suficientemente alta como para que funda pero sin que cambie su forma. En estas condiciones se separan dos fases, una ácida y otra básica. Esta separación sucede a escala microscópica de modo que se forma un retículo de fase ácida, en un "mar" básico. Si se añade un ácido capaz de disolver los álcalis de la fase básica, queda al final el retículo de vidrio ácido (básicamente sílice). El tamaño de los poros puede ser fijado controlando el tiempo en que se permite la separación de fases.
- Membranas metálicas: Se obtienen a partir de pequeñas partículas metálicas que son sinterizadas, es decir unidas entre sí por efecto de la presión o la temperatura. Destacan por su diseño rugoso, especialmente efectivo para aplicaciones que demandan condiciones de procesamiento extremas, o filtración de productos con elevadas partículas sólidas y alta viscosidad.
- Membranas cerámicas: Son las más importantes de este grupo. Las membranas cerámicas se fabrican a partir de materiales como el óxido de zirconio, óxido de titanio, carburo de silicio, mezclas de ambos o alúmina. Son membranas mucho más caras que las orgánicas, pero poseen unas mayores resistencias, tanto química, mecánica y térmica. Su mayor robustez

hace que se pueda trabajar a elevadas velocidades de flujo. Las numerosas ventajas de las membranas cerámicas hacen que éstas sean muy superiores a las orgánicas, pero su elevado precio limita notablemente su uso.

La Tabla 3.2 muestra un resumen de las ventajas e inconvenientes que presentan las diferentes membranas en función de su geometría y materiales.

MEMBRANAS	VENTAJAS	INCONVENIENTES
PLANA		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja relación superficie/volumen</li> </ul>
EN ESPIRAL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta relación superficie/volumen: 300-1000m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup></li> <li>• Tratamiento alto de flujo</li> <li>• Bajo coste operativo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificultad de lavado</li> </ul>
TUBULAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificil ensuciamiento</li> <li>• Fácil lavado</li> <li>• Resistentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado coste</li> <li>• Baja relación superficie/volumen</li> <li>• Alto consumo energético</li> </ul>
FIBRAS HUECAS Y CAPILARES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo consumo energético</li> <li>• Elevada relación superficie/volumen: 600-30000m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificil limpieza</li> </ul>
ORGÁNICAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baratas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja resistencia mecánica, térmica y química</li> </ul>
INORGÁNICAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayores resistencias mecánicas, térmicas y químicas</li> <li>• Soportan grandes velocidades de flujo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caras</li> </ul>

Tabla 3.2: Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de membranas.

#### 4. Membranas cerámicas

Las membranas cerámicas son membranas hechas por sinterización de materiales orgánicos. Son membranas de calidad y duraderas, resistentes a fluidos difíciles y

capaces de operar en un amplio espectro de condiciones. Aportan las siguientes ventajas, comparadas con las membranas sintéticas ([www. Likuidnanotek.com](http://www.Likuidnanotek.com)):

- Calidad óptima del permeado; la utilización de soportes de alta calidad junto con el propio proceso de impregnación de múltiples capas, permite obtener siempre la calidad de permeado adecuada, evitando la aparición de grietas o microroturas que pudieran contaminar el permeado.
- Fiabilidad; la fabricación de las membranas se hace siguiendo un riguroso control de calidad, utilizando polvos de granulometría controlada y consiguiendo una homogeneidad muy elevada en el paso de poro.
- Mínimo ensuciamiento; gracias al material cerámico y a las últimas técnicas de fabricación, se consigue obtener el grado de hidrofiliidad adecuado en las membranas, de manera que se minimicen los procesos de adherencia de moléculas y bacterias, sobre la superficie activa, minimizando así los fenómenos de fouling o ensuciamiento. El ensuciamiento solamente se puede resolver con agresivos lavados químicos que permiten la continuidad del proceso en el tiempo; por tanto es fundamental que los materiales de construcción de la membrana y de la planta, resistan las condiciones a las que se le somete, como ocurre con las membranas cerámicas.
- Fácil regeneración; los materiales cerámicos empleados permiten realizar limpiezas químicas de recuperación agresivas, con sosa cáustica, ácidos y otros productos específicos a elevadas temperaturas, hasta 140°C. De este modo, colmataciones severas generadas en procesos de regeneración de aguas depuradas, pueden ser recuperadas eficazmente, alargando la vida media de la membrana y minimizando el mantenimiento (bajo coste de mantenimiento)

Como ya se ha visto con anterioridad existen diversas disposiciones para las membranas cerámicas; para el tratamiento de aguas depuradas, la filtración tangencial se presta a una geometría tubular con la que se ofrece un máximo de resistencia mecánica y sistemas de hermeticidad de los módulos muy eficaces (Figura 4.1). La estructura típica de una membrana cerámica porosa corresponde a un sistema multicanal, estructuras asimétricas que constan de un soporte macroporoso. Este soporte posee el tamaño de

poro más grande de la estructura (mayor de  $1\mu\text{m}$ ) y espesores de milímetros, lo que en su conjunto da resistencia mecánica al compuesto. Sobre este soporte se deposita una capa intermedia, con tamaño de poro menor que el del soporte, lo que impide la infiltración de la última capa en el soporte. Por último se deposita la membrana cerámica que podrá ser de diferentes materiales. En función del proceso de preparación de membrana, estas tendrán distintos tamaños de poro (Tabla 4.1)

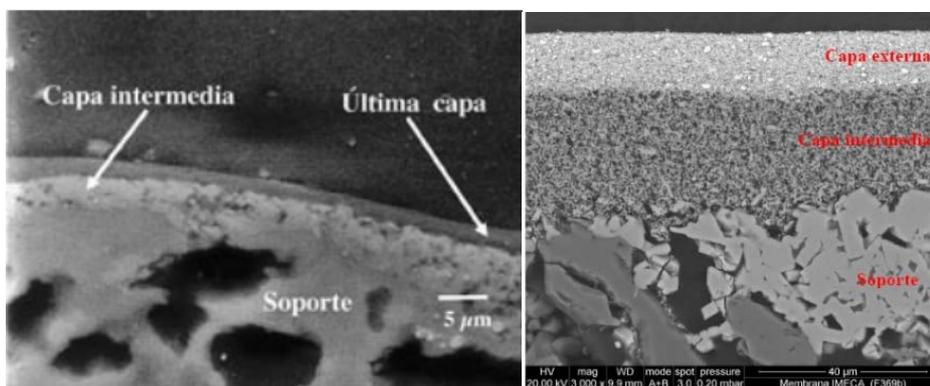


Figura 4.1: Fotografía de microscopía electrónica de barrido de la sección de una membrana cerámica típica de geometría tubular. (Benito, J. M., Conesa, A., & Rodríguez, M. A. (2004). Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 43(5), 829-842.)

Proceso	Material	Diámetro de poro
Sinterización de polvos	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , $\text{ZrO}_2$ , $\text{TiO}_2$	$\approx 100\text{ nm}$
Sol-gel	$\text{SiO}_2$ , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , $\text{ZrO}_2$ , $\text{TiO}_2$	1-50 nm
Deposición química en fase vapor	$\text{SiO}_2$	$< 1\text{ nm}$
Tratamiento hidrotermal	Zeolita	$< 1\text{ nm}$
Oxidación anódica	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (amorfa)	$\approx 10\text{ nm}$
Lixiviación	$\text{SiO}_2$	$\approx 4\text{ nm}$

Tabla 4.1: Procesos de obtención de membranas cerámicas (Benito, J. M., Conesa, A., & Rodríguez, M. A. (2004). Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 43(5), 829-842.)

De todos los materiales, el más empleado en la obtención de membranas cerámicas para desinfección de aguas residuales es la alúmina,  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ , por la estabilidad de sus propiedades en los procesos de filtración a altas temperaturas y principalmente por su estabilidad en ambientes ácidos químicamente agresivos (se emplean ampliamente en la desinfección de aguas residuales radiactivas procedentes de procesos nucleares) (Ariza et al. 2002)

El inconveniente que presentan este tipo de membranas es su baja resistencia a elevados pH, lo que se ha compensado con el desarrollo de membranas cerámicas de circonia (óxido de circonio) o titania (óxido de titanio) (Benito et al 2004), aunque estas se emplean más en la industria alimentaria y textil.

Con el empleo de la alúmina, y en función de los procesos de obtención (Benito et al., 2004):

- Cuando se emplea la sinterización de polvos para obtener membranas, se emplean polvos con diferentes diámetros de partícula de varias micras. Estos polvos se transforman en membranas de distintas configuraciones mediante extrusión, colaje o colaje en cinta. Se consiguen membranas con tamaño mínimo de poro de 0,1 micras, lo que hace que este tipo de membranas se destinen a soportes, en los cuales se depositarán otras capas.
- A partir de procesos sol-gel, las membranas de óxidos metálicos se depositan sobre otras de tamaño de poro superior y se dejan gelificar y secar. Se consiguen tamaños de poro de nanómetros.

Una ventaja adicional que presenta este tipo de membranas es que la acumulación de materia, por adsorción de la suciedad a las paredes del poro, incrementa la resistencia de la membrana con el paso del tiempo. Se produce la formación de una torta, que actúa como filtro y retienen partículas más pequeñas. Pero esto se convierte en una ventaja ya que funciona como una segunda membrana a través de la cual pasa el agua permeada (Soriano, 2001).

Los conceptos básicos de funcionamiento de la membrana cerámica fueron examinados por Stefan Panglisch (1999). Stefan mostró datos que indicaban que las membranas cerámicas lograban un mejor rendimiento que las poliméricas en materia de estabilidad de flujo y calidad del agua tratada. La estabilidad del rendimiento parece ser debido al diámetro del canal más ancho, lo que da una mejor uniformidad hidrodinámica (Hofs et al., 2011).

Estas membranas también permiten el uso de un procedimiento de lavado a contracorriente explosiva, con altas velocidades y altas presiones de aire para expulsar el concentrado de lavado. Además, la cerámica presenta la ventaja de tener una superficie hidrófila, y ésta parece ser la razón de la mejora en la calidad del agua tratada, ya que facilita una mejor eliminación de los compuestos orgánicos disueltos (Hofs et al., 2011)

Debido a la gran porosidad y superficie más hidrófila que tienen estas membranas inorgánicas, presentan una resistencia mecánica, química y térmica mejor que las orgánicas, lo que permite una mejor recuperación del rendimiento de la membrana. Además, su mayor robustez permite trabajar a elevadas velocidades de flujo (Hernández et al. 1999).

En la Figura 4.2 se puede realizar la comparación gráfica de la imagen de la micro morfología superficial de los dos tipos de membrana, orgánica y cerámica. La membrana cerámica tiene una superficie más lisa que la orgánica, cosa que explica que las membranas cerámicas tengan una menor tendencia a ensuciarse. Este hecho ayuda a reducir costes de operación y un gran ahorro de energía. Se harán menos regeneraciones, tras su utilización en depuración de aguas residuales, lo que consigue una vida útil más larga y menor inversión de mantenimiento.

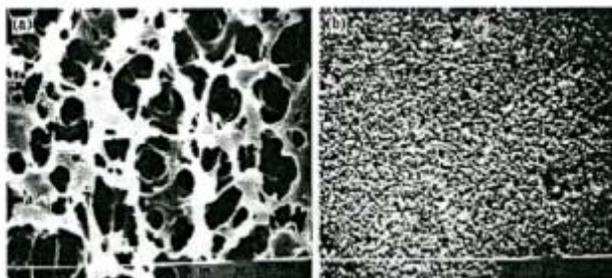


Figura 4.2: Comparativa de membranas orgánicas (izquierda) y cerámicas (derecha) (Hofs, B., Ogier, J., Vries, D., Beerendonk, E. F., & Cornelissen, E. R. (2011). Comparison of ceramic and polymeric membrane permeability and fouling using surface water. *Separation and Purification Technology*, 79(3), 365-374).

A pesar de las ventajas de las membranas cerámicas hay que señalar algunas desventajas, las membranas cerámicas son quebradizas y sus costes específicos varían en una amplia gama, dependiendo del tipo de módulo y el tamaño de poro.

En EE.UU. se realizaron unas ponencias por parte de Scott (1995) y Gilbert (Biagini et al., 2013), en las que se discutían experiencias en plantas piloto y la economía de las

instalaciones recientes. Scott, mostró que el coste total del agua tratada cada vez es más competitivo en esta tecnología, ya que el precio de la membrana cerámica ha caído a alrededor de dos veces el de las membranas poliméricas. Gilbert describió una oferta competitiva en Watsonville, California, en el que las membranas cerámicas ganaron contra los materiales poliméricos.

En base a los precios actuales y a las probables disminuciones de costes, a medida que aumentan los volúmenes de mercado, las membranas cerámicas podrían provocar un cambio radical en el mercado en poco tiempo. Si la cerámica puede alcanzar una estrecha competitividad con los demás precios, el futuro indica un potencial y significativo volumen de mercado para esta tecnología en el uso de regeneración de agua en tratamientos terciarios (Hofs, y col, 2011).

## **5. Conclusiones**

Para la elección del tratamiento terciario de una estación depuradora de aguas residuales, es necesaria la realización de un estudio detallado de la tecnología que actualmente está en el mercado, para poder seleccionar, en función de los requisitos impuestos, la mejor opción.

En este artículo se ha presentado una breve recopilación de las tecnologías utilizadas en la actualidad para la regeneración, en el tratamiento terciario, de agua previamente depurada, y más en detalle, de la que concierne al tratamiento con membranas. Tras presentarse los diferentes tipos de membrana para el tratamiento al que está destinado, es decir, aguas residuales, se han detallado las ventajas y desventajas de las membranas cerámicas. Éstas resultan ser una óptima tecnología ya sea por motivos de limpieza de las membranas, por la regeneración de las mismas, o por el gran caudal que se trata en una depuradora y las impurezas que suelen presentar este tipo de aguas.

En cuanto al impacto ambiental que presenta la incorporación a la E.D.A.R de un tratamiento terciario de este tipo, éste sólo aplica efectos positivos. La tecnología de membrana con materiales cerámicos tiene unos costes de mantenimiento sumamente bajos, además de ser un material limpio para el medio ambiente. No utiliza químicos como la cloración ni supone un riesgo en ningún momento del proceso. La regeneración que se consigue con la ultrafiltración de membrana cerámica es excelente, lo que posibilita el uso posterior del agua devolviéndola al medio ambiente en condiciones compatibles con él.

## 6. Bibliografía

- ARIZA, M. J., CAÑAS, A., CASTELLÓN, E. R., CABEZA, A. y BENAVENTE, J. (2002). “Modificación de una membrana de alúmina ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): Caracterización mediante parámetros electroquímicos y espectroscopia de fotoelectrones de rayos”. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 41(1), 122-125.
- BELTRÁN, F. J. (2004). “Ozone reaction kinetics for water and wastewater systems”. CRC Press. [www. books.google.com](http://www.books.google.com)
- BENITO, J. M., CONESA, A. y RODRÍGUEZ, M. A. (2004). “Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización”. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 43(5), 829-842.
- BIAGINI, B., GILBERT, E., MACK, B., CAPPELLE, M., and DAVIS, T. A. (2013). “Membrane Technologies: A Clear Choice for Water Reuse (PDF)”. *Opflow*, 39(2), 10-13.
- BLUME, T. and NEIS, U. (2005). “Improving chlorine disinfection of wastewater by ultrasound application”. *Water Science & Technology*, 52(10-11), 139-144.
- CALMER, J., NEETHLING, J. B. and MURBACH, D. (1998). “Nitrification effects on chlorination and disinfection”. In *Proceedings of the Conference Disinfection '98, Spec. WEF Conference, Baltimore, MD, USA* (pp. 19-22).
- CUARTAS Uribe, B. E. (2008). “Estudio del proceso de nano filtración para la desmineralización del lacto suero dulce”. Tesis. [www. dspace.cc.upv.es](http://www.dspace.cc.upv.es)
- DODD, M. C., BUFFLE, M. O. and VON GUNTEN, U. (2006). “Oxidation of antibacterial molecules by aqueous ozone: moiety-specific reaction kinetics and application to ozone-based wastewater treatment”. *Environmental science & technology*, 40(6), 1969-1977.
- DOWNES, A., and BLOUNT, T., ( 1877), “Research o the Effects of Light upon Bacteria and Other Organism”. *Proceeding of the Royal Society of London*, 26:488.

- GONZÁLEZ, F. J., GÓMEZ, M. Á., MORENO, B., GONZÁLEZ-LÓPEZ, J. y HONTORIA, E. (2003). “El papel de las nuevas tecnologías en la propuesta española de normativa sobre reutilización de aguas”. *Ingeniería Civil*, (131), 105-109.
- GUIZARD, C., BAC, A., BARBOIU, M. and HOVNANIAN, N. (2001). “Hybrid organic-inorganic membranes with specific transport properties: Applications in separation and sensors technologies”. *Separation and purification technology*, 25(1), 167-180.
- HERNÁNDEZ MUÑOZ, A. (2001). *Depuración y desinfección de aguas residuales*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Quinta edición. España.
- HERNÁNDEZ, A., PRÁDANOS, P., CALVO, J. I. y PALACIO, L. (1999). “Membranas cerámicas y su utilidad en procesos de separación”. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 38(3), 185-192.
- HOFS, B., OGIER, J., VRIES, D., BEERENDONK, E. F. and CORNELISSEN, E. R. (2011). “Comparison of ceramic and polymeric membrane permeability and fouling using surface water”. *Separation and Purification Technology*, 79(3), 365-374.
- HUFFMAN, D. E., SLIFKO, T. R., SALISBURY, K. and ROSE, J. B. (2000). “Inactivation of bacteria, virus and *Cryptosporidium* by a point-of-use device using pulsed broad spectrum white light”. *Water Research*, 34(9), 2491-2498.
- PANGLISCH, S., DEINERT, U., DAUTZENBERG, W., KIEPKE, O., and GIMBEL, R. (1999). “Monitoring the integrity of capillary membranes by particle counters”. *Water supply*, 17(1), 349-56.
- Plan Nacional de reutilización de aguas: Ministerio de Medio Ambiente y medio rural y marino:  
[http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/version\\_preliminar\\_pnra231210\\_tcm7-153069.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/participacion-publica/version_preliminar_pnra231210_tcm7-153069.pdf)

QUERO Maroto (2007): “Comparativa de ampliación EDAR mediante reactor biológico convencional o MRB”. Universidad Politécnica de Cataluña. Obtenido en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/4432>.

ROBLES, F. O., ROJO, J. C. T., and BAS, M. S. (2011). “Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes.: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales”. Ediciones Díaz de Santos.

ROBSON, C. M., and RICE, R. G. (1991). “Wastewater ozonation in the USA: history and current status” *Science & engineering*, 13(1), 23-40.

SCOTT, K. (1995). *Handbook of industrial membranes*. Elsevier.

SORIANO Bartolo, A. (2001). *Investigación sobre el empleo de membranas en tratamientos terciarios de desinfección (Doctoral dissertation, Caminos)*.

TAYLOR, J.S and WIESNER, M. (2002) “Calidad y tratamiento del agua”. *Manual de suministros de agua comunitaria*. American water works asociation. Capítulo 11. Membranas. Ed. McGraw-Hill, 5ª Edición.

VAN STEENDEREN, R. A., PIETERSE, M. J., and BOURNE, D. (1991). “THM formation in potable waters with reference to related variables and health data bases”. *Water S. A.*, 17(4), 269-272.

VIDAL, F. J. R. (2003). “Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización”. Ediciones Díaz de Santos..

<http://www.likuidnanotek.com>. “Membranas”.

<http://www.acsmedioambiente.com>: “Sistema para tratamientos de agua”.