

## **Aportación de la Química e Ingeniería Química a la disponibilidad de agua de calidad**

Excmo. y Magfco. Sr. Rector, Excmo. Sr. Consejero de Investigación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía, Ilma. Sra. Presidenta del Consejo Social, Ex Rectores, Ilmo. Sr. Alcalde de Córdoba, Ilustrísimas autoridades, compañeros de la Universidad de Córdoba, señoras y señores.

Quiero agradecer al Ilmo. Sr. Decano de la Facultad de Ciencias, así como a la Junta de esta misma Facultad, la invitación para impartir la lección inaugural en el acto de apertura solemne del curso académico 2011/2012, en representación de la Facultad de Ciencias. Esta ocasión me van a permitir transmitirles algunos datos y reflexiones acerca de un recurso estratégico, imprescindible y muy escaso, pese a la creencia generalizada de su aparente abundancia: EL AGUA.

El físico y escritor argentino Ernesto Sábato al observar los derroteros académicos que había tomado la Ciencia afirmaba lo siguiente:

*"Por razones didácticas, pedagógicas, de confort social, el hombre corta en pedazos el flujo fenoménico que constituye nuestro mundo cotidiano, que después clasifica, rotula y coloca en estantes, de modo que ese universo fluyente es curiosamente convertido en una gran despensa<sup>1</sup>".*

El mundo del agua, como otros muchos, es un campo interdisciplinar donde científicos, humanistas y tecnólogos se ocupan no sólo de la gestión, sino de la investigación básica, desarrollo e innovación. Por ello espero se me permita, al menos a modo de excusa, en este Año Internacional de la Química, afrontar el contenido de mi intervención desde la óptica de un químico reconvertido en ingeniero.

Antes de iniciar formalmente la exposición del tema es conveniente aclarar que el termino calidad que figura en el título y contenido de esta intervención, referido al agua, se utiliza en el mismo sentido que lo define el R.D. 1620/2007 sobre reutilización de aguas depuradas, es decir, aquella agua que reúne los requisitos apropiados para la finalidad a que se destina.

### **Introducción**

Pese a su aparente abundancia, el agua es un recurso cada vez más escaso y todas las previsiones apuntan a que esta tendencia se agudizará en el futuro. Según el US Geological Survey

---

<sup>1</sup> Cita tomada de: **Cunningham R.E. y Lombardi J.L.**; Fundamentos del diseño de reactores. Cap. II. EUDEBA. Buenos Aires (1972).

(USGS)<sup>2</sup> el volumen total de agua en el mundo es de 1359 millones de km<sup>3</sup>; pero el 97,5 % de esta cantidad está constituido por las aguas marinas por lo que, debido a su elevada salinidad, no es posible su utilización ni en tareas agrícolas, ni para la alimentación humana, ni para la mayoría de las aplicaciones industriales.

Sólo el 2,5 % del agua total del planeta- unos 35 millones de km<sup>3</sup>-es agua dulce, que a su vez se encuentra distribuida de la siguiente forma (figura 1): 68,7% lo constituyen los hielos polares, 30,1 % son aguas subterráneas, 0,8 % forma parte del permafrost, estando el 0,4 % restante constituido por las aguas superficiales y la humedad atmosférica. En líneas generales sólo unos 100.000 km<sup>3</sup> se encuentran en ríos, lagos y acuíferos fácilmente explotables<sup>3</sup> y, esto es, en términos muy aproximados el agua disponible para satisfacer las diferentes necesidades de la población del planeta.

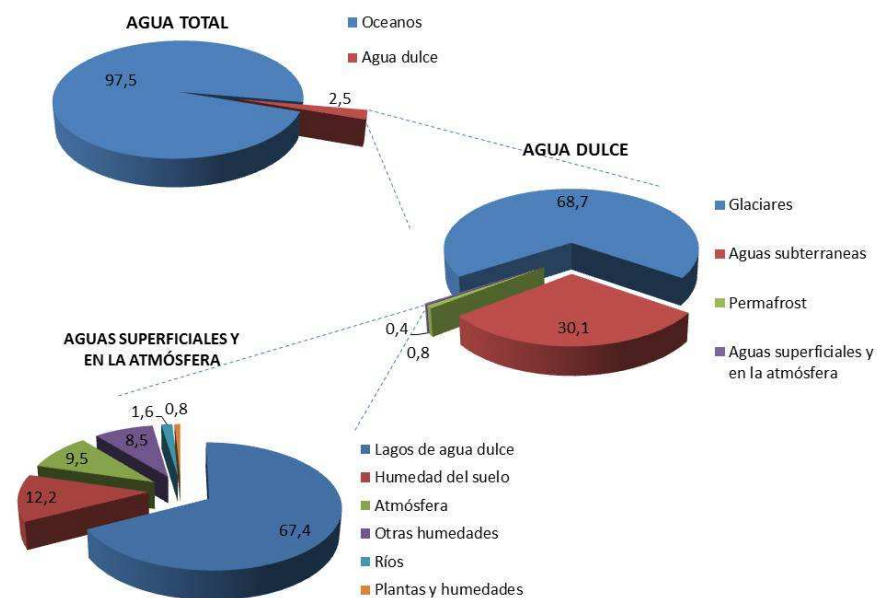
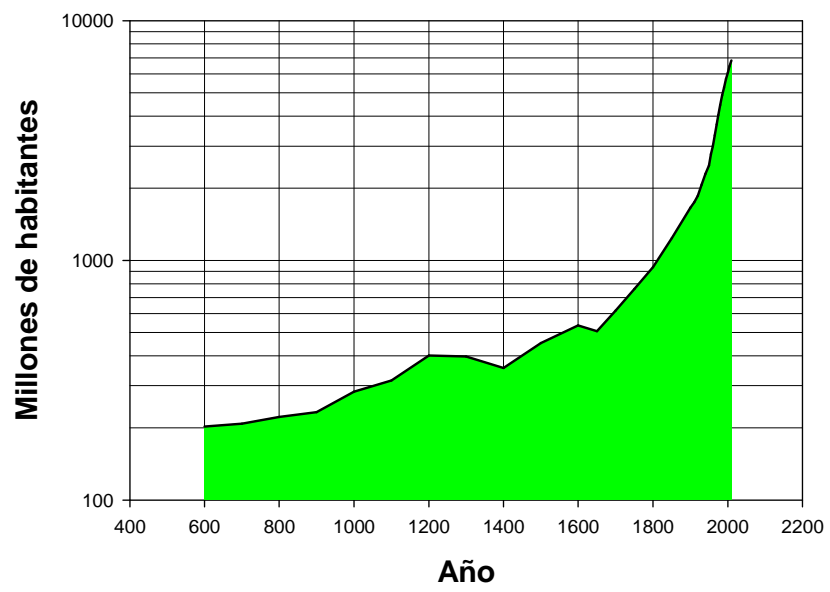


Figura 1.- Distribución del agua en el planeta tierra.

Por otra parte, coincidiendo con el inicio de la Revolución Industrial, en la segunda mitad del siglo XVIII, el crecimiento de la población pasa de ser lineal a exponencial (figura 2). En transcurso del siglo XX, el consumo global de agua aumentó seis veces, más del doble de la tasa de crecimiento de la población. En este crecimiento ha tenido un peso decisivo la agricultura, ya que sus necesidades se han incrementado en un 75 % desde 1960.

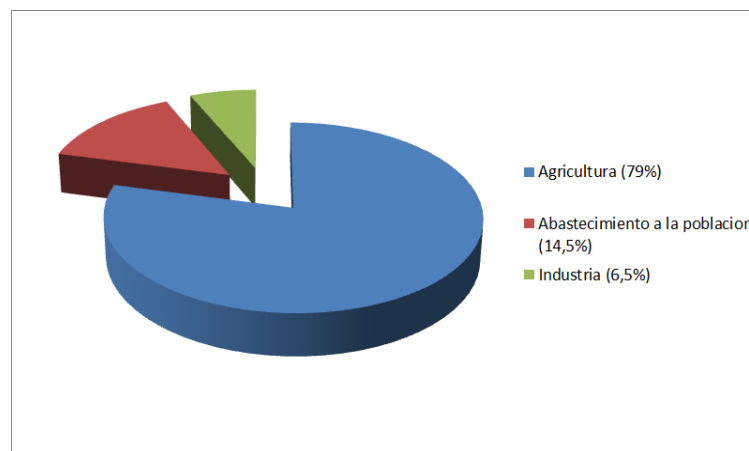
<sup>2</sup> <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

<sup>3</sup> Roldan Cañas J. y Moreno Pérez M.F.; ¿Qué es el agua práctica de la Tierra? en " El Planeta Tierra" Biblioteca BenRosch de divulgación científica y tecnológica. Córdoba. (2011).



**Figura 2.- Evolución temporal de la población mundial.**

En España, la demanda total del sector agrícola supone el 79 % (entre 20.000 y 21.000 hm<sup>3</sup>) frente a un 6,5 % del sector de grandes industrias y centrales térmicas, consumiéndose “únicamente” el 14,5 % para el abastecimiento urbano (figura 3)<sup>4</sup>. En todo el mundo, el regadío es, con diferencia, la actividad que precisa más agua dulce: representa un 70 % del agua que se extrae de los ríos y pozos cada año.



**Figura 3.- Consumo del agua en España por sectores.**

Aunque, como se ha indicado, el sector agrícola es el de mayor consumo de agua, no menos importante es el sector industrial, ya que el agua se utiliza en procesos muy diversos, desde vehículo intermedio para la transmisión de calor en todas las centrales térmicas, con independencia de

<sup>4</sup> EMASAGRA. Hacia una nueva cultura del agua. Granada (2003).

que su combustible sea fósil o nuclear, hasta su utilización como disolvente, reactivo químico o medio de separación en ingeniería metalúrgica. Unos datos cuantitativos no dejan lugar a dudas sobre esta cuestión; por ejemplo, la fabricación de un cuaderno de 100 páginas ha consumido unos 1.000 litros de agua; una camiseta de algodón 2.700; unos pantalones vaqueros 10.850; un kilogramo de manzanas 500; uno de maíz 900 y uno de carne de vacuno la sorprendente cifra de ¡15.500! Esto es lo que ha venido a denominarse "**Agua virtual**": es un agua que consumimos indirectamente, sin que en la mayoría de las ocasiones seamos conscientes de ello.

Una característica esencial del agua es la pérdida de calidad tras el uso, es lo que habitualmente denominamos contaminación. Debido al gran poder disolvente y dispersante del agua, la variedad y cantidad de contaminantes que puede albergar en disolución o suspensión es muy extensa.

Los contaminantes del agua pueden ser: químicos, físicos y biológicos. Los contaminantes químicos comprenden tanto compuestos orgánicos como inorgánicos. La consecuencia inmediata de la contaminación por compuestos orgánicos es la disminución del oxígeno disuelto; esta disminución lleva a perturbaciones indeseables del medio y de la biota en ella asentada. El resultado más importante de la contaminación por compuestos inorgánicos es su posible efecto tóxico, más que la disminución del oxígeno disuelto, aunque este efecto también puede tener lugar en algunos casos. Los contaminantes biológicos son los responsables de la transmisión de diversas enfermedades tales como el cólera, las tifoideas, paratifoideas, etc.<sup>5</sup> así como el deterioro de las instalaciones. Por último, el agua también puede presentar una contaminación radiológica debida a isótopos naturales o artificiales.

Al ser los contaminantes de las aguas residuales mezclas complejas de diversos compuestos, no es práctico ni posible obtener un análisis completo de la mayoría de ellos. Es por ello por lo que se han desarrollado una serie de métodos empíricos para la evaluación de la concentración de contaminantes en aguas residuales cuya aplicación no requiere un conocimiento completo de la composición química específica de las mismas.

En este sentido, como indicadores más notables para medir el grado de contaminación orgánica de una masa de agua, se utilizan dos variables: la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), cuya finalidad es la determinación de la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica presente en una cantidad de agua definida. Indirectamente lo que se mide es la contaminación por materia orgánica, pero en el primer caso la determinación se lleva a cabo por procedimientos químicos en tanto que en el segundo se hace uso, exclusivamente, de procesos biológicos.

---

<sup>5</sup> Ramalho R.S.; Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté. Barcelona (1996).

<b>INDUSTRIA</b>	<b>CONSUMO DE AGUA</b>	<b>PRODUCCIÓN ESPECÍFICA DE AGUA RESIDUAL</b>	<b>VOLUMEN ESPECÍFICO DE CONTAMINANTES</b>	<b>CONCENTRACIÓN EN LOS EFLUENTES</b>
<b>Central lechera</b>	0,7-2 m <sup>3</sup> /t	0,7-1,7 m <sup>3</sup> /t	0,4-1,8 kg DBO <sub>7</sub> /t	500-1500 g DBO <sub>7</sub> /t
<b>Mataderos</b>	-	3- 8 m <sup>3</sup> /t producto	7-16 kg DBO <sub>7</sub> /t producto	500-2000 g DBO <sub>7</sub> /t producto
<b>Fabricación de cerveza</b>	3-7 m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>	3-7 m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>	4-15 kg DBO <sub>7</sub> / m <sup>3</sup>	1000-3000 g DBO <sub>7</sub> / m <sup>3</sup>
<b>Conservas de pescado</b>	8-15 m <sup>3</sup> /t	4-8 m <sup>3</sup> /t	10-50 kg DBO <sub>7</sub> /t	500-10.000 g DBO <sub>7</sub> / m <sup>3</sup>
<b>Industria textil</b>	100-250 m <sup>3</sup> /t	100-250 m <sup>3</sup> /t	100-1000 g DBO <sub>7</sub> / m <sup>3</sup>	100-1000 g DBO <sub>7</sub> / m <sup>3</sup>
<b>Curtido de pieles</b>	20-70 m <sup>3</sup> /t	20-70 m <sup>3</sup> /t	30 -100 kg DBO <sub>7</sub> /t	1000-2000 g DBO <sub>7</sub> / m <sup>3</sup>
<b>Industrias galvánicas</b>	20-200 L/m <sup>2</sup>	3-30 g metales/m <sup>2</sup> 2-20 g CN <sup>-</sup> /m <sup>2</sup>	-	-
<b>Industria azucarera</b>	2-15 m <sup>3</sup> /t remolacha	-	-	2000-4000 g DBO <sub>7</sub> / m <sup>3</sup>
<b>Lavanderías</b>	20-60 m <sup>3</sup> /t	20-60 m <sup>3</sup> /t	20-40 kg DBO <sub>7</sub> /t 10-20 kg P <sub>total</sub> /m <sup>3</sup>	-

**Tabla 1.- Volúmenes de agua consumidos en diversos tipos de industrias y contaminación generada tras su uso<sup>6</sup>.**

En la tabla 1 se presentan diversas características de aguas residuales procedentes de diversas actividades industriales. Nótese los elevados volúmenes de agua necesarios para llevar a cabo la actividad, en algún caso, como es el de la industria textil se pueden llegar a consumir hasta 250 m<sup>3</sup> por cada tonelada procesada.

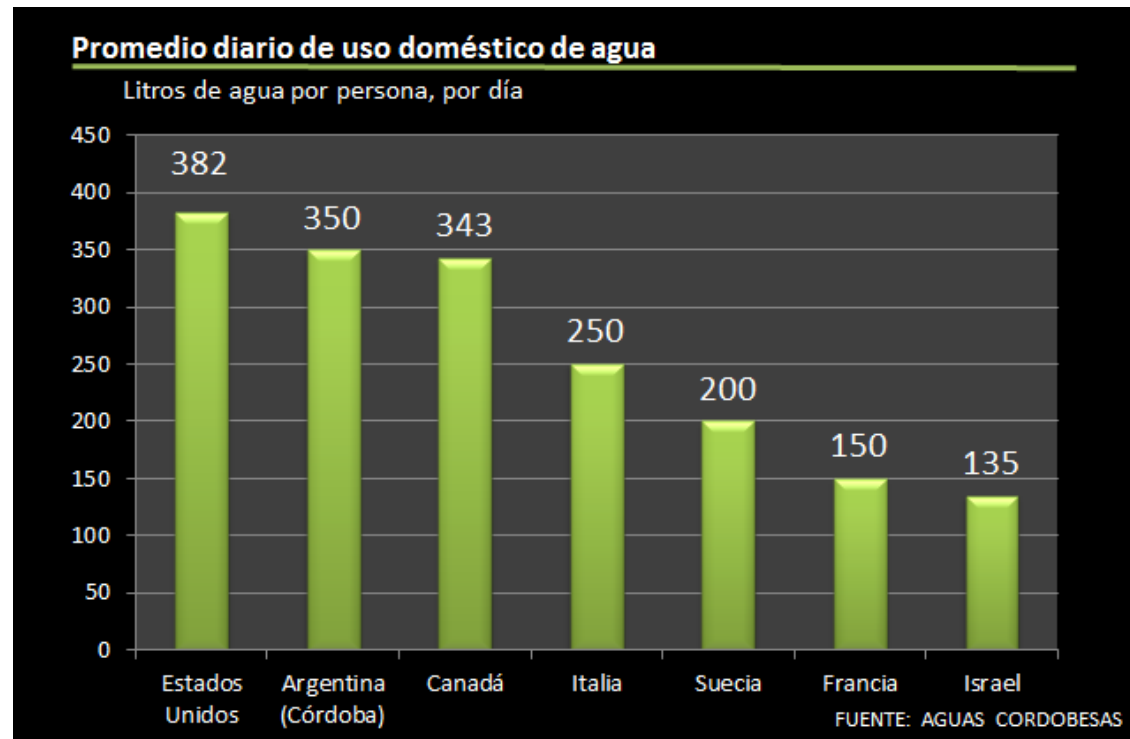
En la última columna, de la citada tabla 1, aparece la DBO<sub>7</sub> de los vertidos<sup>7</sup>. En todos los casos sus valores son elevados pudiendo llegar, en el caso de las conservas de pescado, a cifras tan llamativas como 10.000 g/m<sup>3</sup>. Si tenemos en cuenta que la solubilidad máxima del oxígeno en un agua

<sup>6</sup> Henze M., Harremoës P., La Cour Jansen J. y Arvin E.; Wastewater Treatment. Springer (1997) y elaboración propia.

<sup>7</sup> La determinación de la DBO es un ensayo muy lento y que exige un buen dominio de la técnica, sin embargo aporta mucha información acerca de la biodegradabilidad de la materia orgánica; en muchos casos si se posee información de la evolución en los cinco (DBO<sub>5</sub>) o siete primeros días (DBO<sub>7</sub>) se puede extrapolar el resultado a tiempo infinito.

no contaminada, a la temperatura de 20 °C, es de 9,08 g/m<sup>3</sup> podemos intuir el profundo déficit de oxígeno que se produciría en el medio ambiente con un vertido de las características anteriores.

Unas aguas residuales de características totalmente diferentes a las comentadas, ya que su contaminación es inorgánica, son las procedentes de industrias de recubrimiento de superficies metálicas (industrias galvánicas); aquí la contaminación es debida a metales pesados y a sustancias químicas muy peligrosas como son los cianuros. Este tipo de aguas, como la mayor parte de las aguas industriales, precisan de tratamientos específicos desarrollados ex-profeso.



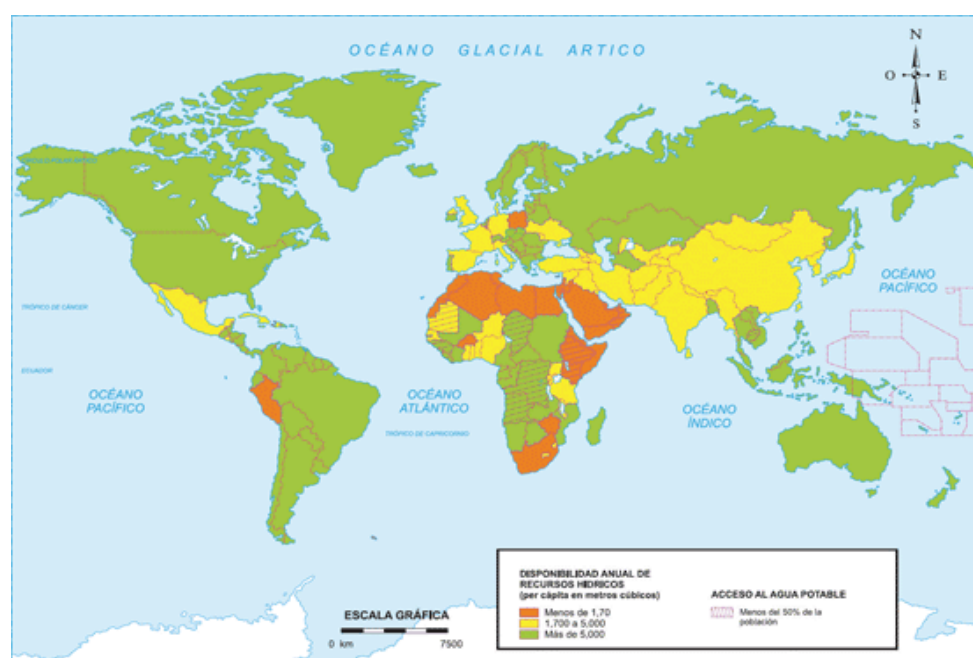
**Figura 4.- Consumo de agua per cápita en diversos países.**

Se ha indicado anteriormente que el consumo humano directo de agua es una fracción reducida del consumo total, no obstante las cifras absolutas son importantes. En la figura 4 se ha recogido el consumo de agua, per cápita, en diversos países del mundo. El consumo, como puede verse, es muy variado oscilando en un factor próximo a 3 entre los E.U. e Israel y depende de factores tales como el nivel de vida, condiciones climáticas, disponibilidad, mantenimiento de la red distribución, educación de la población, etc. Según datos del INE, en 2009, el consumo medio en España fue de 149 L/habitante·día.

Con ser importante el volumen de agua consumido por la población no lo son menos los criterios de calidad que debe reunir y que en el caso de España vienen recogidos por el Real Decreto 140/2003 de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Es tan grande la incidencia que sobre la salud ejerce la calidad del agua que en el Anexo I del citado Real Decreto se especifican los límites máximos para 53 variables diferentes. En la

Comunidad Autónoma Andaluza el R.D. anterior ha sido complementado con el Decreto 70/2009 de 31 de marzo por el que se aprueba el Reglamento de Vigilancia Sanitaria y Calidad del Agua de Consumo Humano en Andalucía.

Ya se ha indicado que, a pesar de lo pudiera parecer a primera vista, el agua dulce es un recurso cada vez más escaso pero además ocurre que no siempre se encuentra donde se necesita (figura 5). Así Canadá tiene mucha agua, mucha más de la que su población precisa, mientras que en Oriente Medio y África del Norte - por sólo citar algunos casos notorios- sufren escasez perpetúa. Incluso dentro de países, tales como Brasil, algunas regiones están inundadas de agua dulce, mientras que otras están afectadas por la sequía. En muchos casos, a pesar de la disponibilidad, son las barreras políticas y económicas las que impiden el acceso al agua, mientras que en otros es la propia contaminación natural o antropogénica la que impide su consumo por la población<sup>8</sup>.



**Figura 5.- Disponibilidad de recursos hídricos en el mundo.**

A la vista de este panorama preocupante nos podemos preguntar: ¿Qué han hecho y sobre todo, qué pueden hacer la Ciencia y Tecnología Químicas para mejorar esta situación?

Para contestar a estas cuestiones tomaremos como referencia algunos de los procesos del ciclo integral del agua, esquematizado en la figura 6. El agua procedente del medio natural es captada para usos urbanos, agrícolas o industriales; para el uso urbano es imprescindible someterla a un proceso de potabilización, cuya finalidad es la mejora de sus parámetros físico-químicos y microbiológicos. Tras el uso urbano, el agua experimenta un proceso de contaminación que obliga a su depuración posterior, con el fin de minimizar el impacto ambiental que produciría su vertido.

<sup>8</sup> <http://news.bbc.co.uk> (acceso 20/9/20011)

## CICLO INTEGRAL DEL AGUA

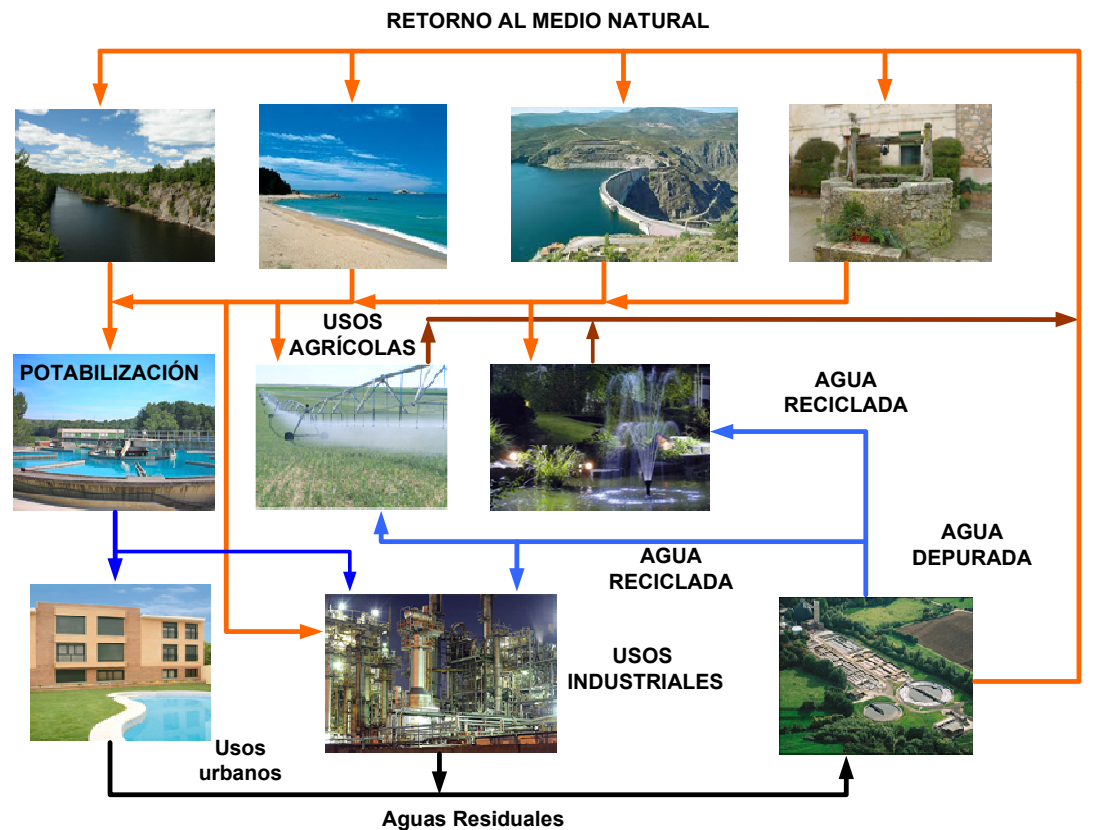


Figura 6.- Ciclo integral del agua.

La utilización industrial exige tratamientos diversos en función del tipo de aplicación, siendo también específicos los procesos de depuración previos al vertido. Con cierta frecuencia se dice que la industria precisa de un traje a medida.

Las aguas urbanas e industriales una vez sometidas a los procesos de depuración convencionales pueden, con tratamientos de afino adicionales, reciclarse para su uso agrícola, urbano, industrial o medioambiental, disminuyéndose así el consumo total. Es lo que ha venido a denominarse como **reutilización del agua**.

El uso agrícola del agua natural, no contaminada por ninguna fuente externa, rara vez exige de un tratamiento previo, sólo en aquellos casos en que la salinidad sea incompatible con el cultivo seleccionado es imprescindible su tratamiento previo.

Al final, y por caminos muy diferentes, el agua retorna a la naturaleza, cerrándose así un ciclo que hace posible la vida en el planeta Tierra.

Seguidamente se desarrollan con mayor amplitud los aspectos mencionados.



## **La potabilización**

Tal y como se indica en el R.D. 140/2003 un agua para consumo humano será "salubre y limpia" cuando no contenga ningún tipo de microorganismo, parásito o sustancia, en una cantidad o concentración que pueda suponer un riesgo para la salud humana y cumpla con los requisitos especificados en el anexo I al que ya nos hemos referido.

Las aguas naturales rara vez satisfacen estas especificaciones, por lo que es obligado proceder a efectuar diversos tratamientos físicos y químicos. Los tratamientos físicos, en líneas generales, tienen como misión la eliminación del color, olor y sabor del agua, en tanto que los tratamientos químicos tienden a la destrucción de los posibles organismos patógenos presentes y determinados compuestos inorgánicos. No es posible entrar aquí en la descripción pormenorizada de todos los posibles reactivos utilizados: floculantes, coagulantes, adsorbentes, etc. donde la Química de Síntesis ha tenido una aportación decisiva y cuyo estudio detallado ha dado lugar a la publicación de diversas monografías<sup>9</sup>, pero sí es conveniente resaltar la importancia de un potente microbicida usado diariamente en la potabilización: el cloro y sus derivados.

El cloro es un elemento químico sin el que la civilización actual sería inconcebible; son más de 15.000 los productos, utilizados habitualmente, en los que el átomo de cloro entra en su composición o se utiliza para su síntesis. Entre estos productos se encuentran más del 30 % de los medicamentos, productos utilizados en la protección de las cosechas o diversos tipos de materiales plásticos<sup>10</sup>. Se estima que más del 55 % del volumen de ventas de la Industria Química Europea está relacionada con el sector del cloro.

La desinfección del agua de bebida, por cloro, es un proceso que se remonta a comienzos del siglo XX en la ciudad de Chicago, extendiéndose posteriormente a otras ciudades de los E.U. En 1918 más de 1000 ciudades ya utilizaban el cloro con esta finalidad lo que supuso una reducción drástica de las fiebres tifoideas<sup>11</sup>. Algunos autores afirman que la cloración del agua ha sido, en gran parte, la responsable del aumento de la vida media en los países desarrollados. En la actualidad, más que el cloro se utiliza un derivado del mismo: el hipoclorito sódico, de más fácil manejo y dosificación.

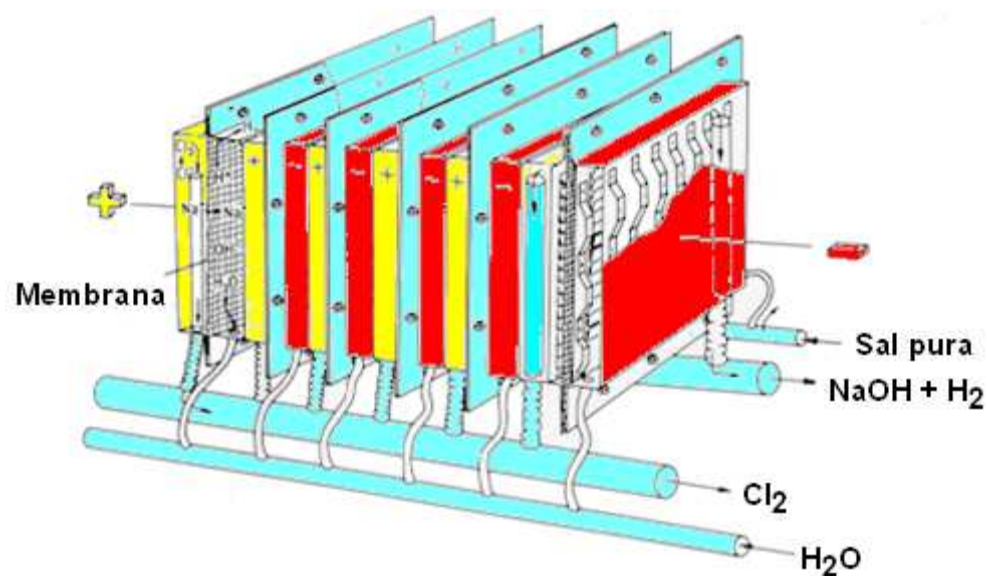
Las consecuencias relacionadas con el consumo de agua no potable provocan cada año **más víctimas mortales** en todo el mundo que **cualquier tipo de violencia, incluida la guerra**, es el dato demoledor difundido por la ONU con motivo de la celebración del Día Mundial del Agua en el pasado 2010. 1,6 millones de personas mueren cada año de enfermedades diarreicas (incluido el cólera), atribuibles a la falta de acceso a un agua potable y al saneamiento básico, siendo un 90% de esas personas menores de 5 años.

---

<sup>9</sup> **Bratby J.**; Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. IWA Publishing. London (2006).

<sup>10</sup> **Duhem D.M.**; La Química Industrial de origen inorgánico. En: La Industria Química en el siglo XXI. Desarrollo sostenible y compromiso de progreso. FEIQUE y Fundación General de la Universidad Complutense (1999).

<sup>11</sup> **American Water Works Association.** Calidad y tratamiento del agua. McGraw-Hill. Madrid (2002).



**Figura 7.- Célula electrolítica para la obtención simultánea de cloro y sosa (NaOH).**

Entre los Objetivos de Desarrollo del Milenio está el garantizar la sostenibilidad ambiental. Una de sus metas ampliada en la Cumbre de Johannesburgo de 2002, está estrechamente vinculada al agua potable y saneamiento básico y propone concretamente: **Reducir a la mitad, para el año 2015, el porcentaje de personas que carezcan de acceso a agua potable y a servicios de saneamiento**<sup>12</sup>.

A pesar de las ventajas innegables de la potabilización de las aguas, con cloro o con sus derivados, se han levantado algunas voces en contra de su uso y ello por dos razones que expondremos sucesivamente. La obtención industrial del cloro (figura 7) tiene lugar mediante electrólisis del cloruro de sodio. Una de las primeras tecnologías, desarrollada en Europa, la electrólisis con cátodo de mercurio da lugar a efectos indeseables de contaminación en aguas y aire. Como alternativa se utilizaron células de diafragma en las que se suprime el mercurio, pero de nuevo aparecen dos inconvenientes: el diafragma que separa los compartimentos anódico y catódico es de amianto (carcinogénico) y los coproductos obtenidos, hidróxido sódico e hidrógeno, no satisfacen los requisitos de calidad exigidos a estas sustancias, si bien el consumo energético del proceso propiamente dicho es inferior, estimándose en unos 3,4 kWh/kg de cloro. Finalmente, con el desarrollo de la tecnología de membranas en los años 70, se solucionaron la mayor parte de los inconvenientes técnicos y ambientales<sup>13</sup>. La tecnología de cátodo de mercurio supone actualmente el 29 % de la capacidad instalada, el 38 % la de diafragma y el 33 % restante la de membrana. La tendencia actual es reducir las emisiones de mercurio en aquellas plantas que aún continúan utilizando esta tecnología y, adicionalmente, disminuir el consumo de energía, pero sobre todo la de transformar, progresivamente, las plantas que utilizan tecnología de mercurio a otras con tecnología de membrana con un límite temporal en el año 2020. La asociación europea del cloro **Euro Chlor** garantiza unas emisiones ambientales inferiores a 2 g Hg/t cloro instalada;

<sup>12</sup> Varó P., Chillón M<sup>a</sup> F. y Segura M.; Manipulación de agua de consumo humano en plantas de ósmosis inversa. Publicaciones de la Universidad de Alicante (2011).

<sup>13</sup> Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volumen A9. VCH (1987).

de hecho en 2009 los valores medios fueron de 0,93 g/t. El desmantelamiento de estas plantas deberá llevarse a cabo de manera que se evite su impacto ambiental durante y después del proceso de cierre, además de proteger la salud humana. Actualmente, las células de mercurio que se utilizan en la producción de cloro en la UE contienen unas 12.000 toneladas de mercurio. Cuando las fábricas se transformen o se cierren, habrá que gestionar este residuo con las mejores técnicas disponibles.

La segunda razón por la que se desconfía del cloro es la siguiente. Siempre hay algo de materia orgánica en las aguas naturales y cuando el cloro entra en contacto con ella reacciona químicamente dando lugar a unos compuestos químicos conocidos con el nombre de trihalometanos (THM); las reacciones químicas que se producen son muy complejas y los riesgos para la salud (salvo para alguno de ellos como es el cloroformo)<sup>14</sup>, no están bien cuantificados. Como medida para reducir el contenido de THM en el agua, sin rebajar las prestaciones higiénicas alcanzadas gracias a la cloración, algunos investigadores sugieren, con toda lógica, la eliminación de la materia orgánica antes de la cloración puede llevarse a cabo mediante ozonización, agua oxigenada o dióxido de cloro<sup>15</sup>, o bien mediante eliminación de la materia orgánica natural, antes de la cloración, por nanofiltración<sup>16</sup>.

Conscientes de los posibles inconvenientes que podrían tener sobre la salud, el R.D. 140/2003 limita la presencia de trihalometanos a un valor máximo de 100 µg/L. Determinar trazas de estos compuestos y de los llamados contaminantes emergentes, a los que nos vamos a referir con posterioridad, ha supuesto un reto analítico de extrema dificultad resuelto gracias a la investigación y la disponibilidad de técnicas instrumentales cada vez más exactas, siendo en la actualidad un campo de investigación extraordinariamente activo .

Según la OMS, los riesgos asociados a la salud de estos subproductos son extremadamente pequeños en comparación con los asociados a una desinfección insuficiente y es importante no limitar la eficacia de la desinfección por intentar controlar la concentración de los mismos.

### **La depuración de las aguas residuales urbanas**

El agua tras su uso en actividades domésticas, industriales y comunitarias experimenta un proceso de contaminación acusado que no aconseja su vertido al medio natural, ya que son múltiples

---

<sup>14</sup> **Drinking Water and Health, Vol. 2.** National Academy of Sciences, Washington, DC. 1980.

<sup>15</sup> **Singer, Philip C.;** Formation and Control of Disinfection By-Products. ESE Notes, Fall 95 Vol. 30, No. 2. Dept. Env.Sci and Engineer., Univ. No. Carolina at Chapel Hill (1995).

<sup>16</sup> **Sentana I., Ruth D.S., Sentana E. y Prats D.;** Reduction of chlorination byproducts in surface water using ceramic nanofiltration membranes. Desalination, 277, 147–155, (2011).

<sup>17</sup> **Ramalho, R.S.;** Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté. Barcelona (1996).

los impactos negativos a que daría lugar<sup>17</sup>. Conscientes de este problema ambiental, por parte de la CEE se estableció la Directiva 91/271/CEE, sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, en la que se establecieron los parámetros de vertido en función de las características del medio receptor y nivel de población. Así mismo, en ella se fijaron los plazos para la puesta en servicio de las depuradoras en función del número de habitantes-equivalentes a que debían prestar el servicio (tabla 2). Los nuevos requisitos establecidos en el R.D. 509/1996, para los vertidos de EDAR en zonas sensibles fijan, tanto para nitrógeno como para fósforo, las concentraciones en 10 y 1 mg/L, respectivamente. La Comisión Europea va a llevar a España ante el Tribunal de Justicia de la UE por haber infringido la Directiva aludida. España, en estos momentos, no garantiza el tratamiento correcto de las aguas residuales procedentes de aglomeraciones de más de 10.000 habitantes que se vierten en zonas ambientalmente sensibles. La falta de sistemas de tratamiento adecuado, que deberían existir desde 1998, representa un riesgo para la salud humana, las aguas continentales y el medio marino. Al menos 39 ciudades de ese tamaño de todo el país vierten sus aguas residuales urbanas en zonas sensibles o potencialmente sensibles desde el punto de vista medioambiental sin un tratamiento adecuado. La Comisión envió a España un dictamen motivado el 1 de diciembre de 2008 instándola a cumplir los requisitos de la citada Directiva. Desde entonces se han registrado progresos, pero transcurridos trece años desde el final del plazo, su cumplimiento global sigue siendo deficiente, por lo que la Comisión ha decidido llevar este asunto ante el Tribunal de Justicia de la UE<sup>18</sup>.

		REGIONES DE ALTA MONTAÑA	AGUAS COSTERAS	ESTUARIOS O AGUAS DULCES	ZONAS SENSIBLES
< 2,000 habitantes	DBO <sub>5</sub>				
	DQO				
	S.S.				
2,000 – 10,000 habitantes	DBO <sub>5</sub>	> 40%		25 mg/L > 19-90%	25 mg/L > 19-90%
	DQO	125 mg/L > 75%	“Tratamiento adecuado”	125 mg/L > 75%	125 mg/L > 75%
	S.S.	60 mg/L > 70%		35 mg/L > 70%	35 mg/L > 70%
10,000 – 15,000 habitantes	DBO <sub>5</sub>	> 40%	25 mg/L > 19-90%	25 mg/L > 19-90%	25 mg/L > 19-90%
	DQO	125 mg/L > 75%	125 mg/L > 75%	125 mg/L > 75%	125 mg/L > 75%
	S.S.	60 mg/L > 70%	35 mg/L > 70%	35 mg/L > 70%	35 mg/L > 70%
	N <sub>total</sub>				15 mg/L > 70-90%
	P <sub>total</sub>				2 mg/L > 80%
15,000 – 100,000 habitantes	DBO <sub>5</sub>	> 40%	25 mg/L > 19-90%	25 mg/L > 19-90%	25 mg/L > 19-90%
	DQO	125 mg/L > 75%	125 mg/L > 75%	125 mg/L > 75%	125 mg/L > 75%
	S.S.	60 mg/L > 70%	35 mg/L > 70%	35 mg/L > 70%	35 mg/L > 70%
	N <sub>total</sub>				15 mg/L > 70-90%
	P <sub>total</sub>				2 mg/L > 80%
> 100,000 habitantes	DBO <sub>5</sub>	> 40%	25 mg/L > 19-90%	25 mg/L > 19-90%	25 mg/L > 19-90%
	DQO	125 mg/L > 75%	125 mg/L > 75%	125 mg/L > 75%	125 mg/L > 75%
	S.S.	60 mg/L > 70%	35 mg/L > 70%	35 mg/L > 70%	35 mg/L > 70%
	N <sub>total</sub>				15 mg/L > 70-90%
	P <sub>total</sub>				2 mg/L > 80%

Tabla 2.- Directiva del Consejo de la UE 91/271/CEE.

<sup>18</sup> Línea editorial de la revista InfoEnviro. Vol 65, pag. 3 (2011).

El cumplimiento de la directiva exige conocer la composición media del agua residual urbana para así poder diseñar el proceso más adecuado. En la figura 8 se presenta la composición aproximada de unas aguas urbanas.

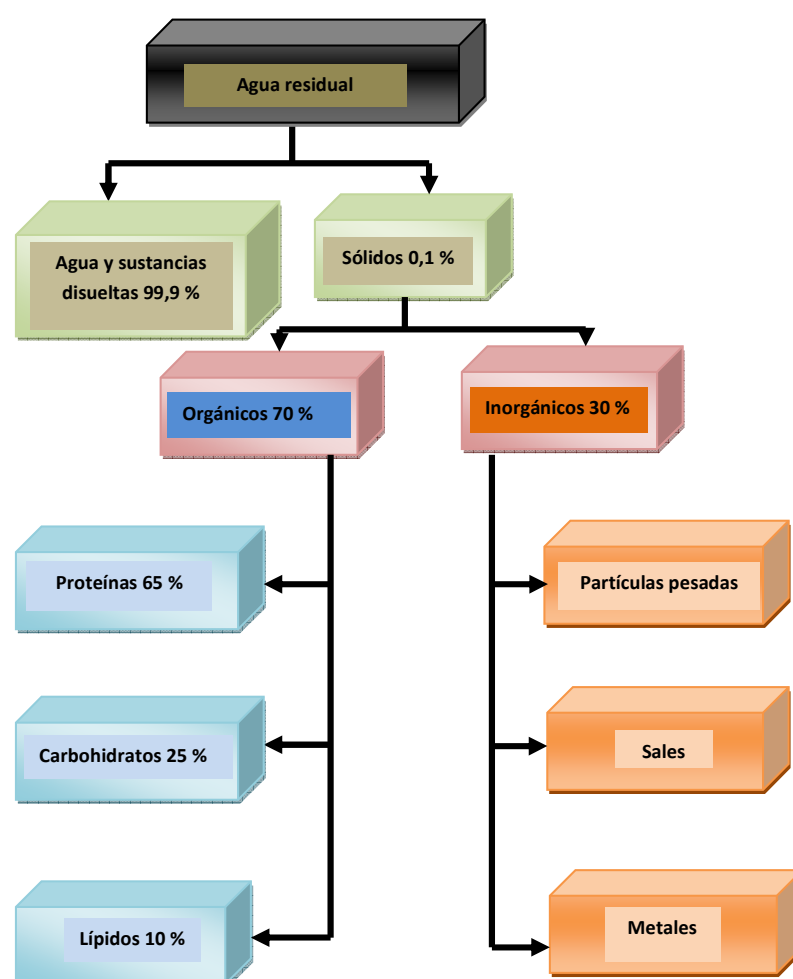


Figura 8.- Composición de las aguas residuales urbanas.

Las aguas urbanas presentan dos grandes tipos de contaminantes: disueltos y en suspensión; aunque desde el punto de vista cuantitativo no son cantidades elevadas, su incidencia sobre el medioambiente sí lo es, ya que provocan deterioro en el paisaje, impiden la penetración de los rayos solares en los cursos de agua y la materia orgánica consume la débil concentración de oxígeno disuelto pero que, sin embargo, permite el complejo equilibrio vital del medio acuático.

Los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales urbanas responden a un esquema semejante al que se presenta en la figura 9. En esencia, mediante una serie de procesos físicos, se retiran del agua la mayor parte de los contaminantes sólidos no disueltos y mediante un proceso biológico complejo, conocido con el nombre de "lodos activos"<sup>19</sup>, una parte de la materia orgánica se

<sup>19</sup> Metcalf & Eddy. Ingeniería de Aguas Residuales. McGraw-Hill. Madrid (1996).

oxida a anhídrido carbónico y el resto se transforma en biomasa celular. Como resultado de las separaciones físicas y del crecimiento celular, en todas las depuradoras se genera un enorme volumen de residuos sólidos (lodos de depuradora) cuya gestión es uno de los problemas económicos y ambientales con que deben enfrentarse los técnicos encargados de la explotación de cualquier planta depuradora<sup>20</sup>.

La oxidación de la materia orgánica por la microbiota presente en el agua es un proceso extraordinariamente complejo, ya que el oxígeno del aire tiene que disolverse previamente para que pueda ser transferido al interior del citoplasma celular. Si se tiene en cuenta la baja solubilidad del oxígeno en agua pura (9,08 mg/L a 20 °C) y la lenta velocidad con que se produce su disolución, podremos comprender la dificultad que tiene la eliminación de la materia orgánica que contamina un agua residual. Es un caso típico donde un proceso físico controla a otro biológico. Esta misma situación tiene lugar en muchos procesos biotecnológicos como por ejemplo en la producción industrial de la penicilina<sup>21</sup>.

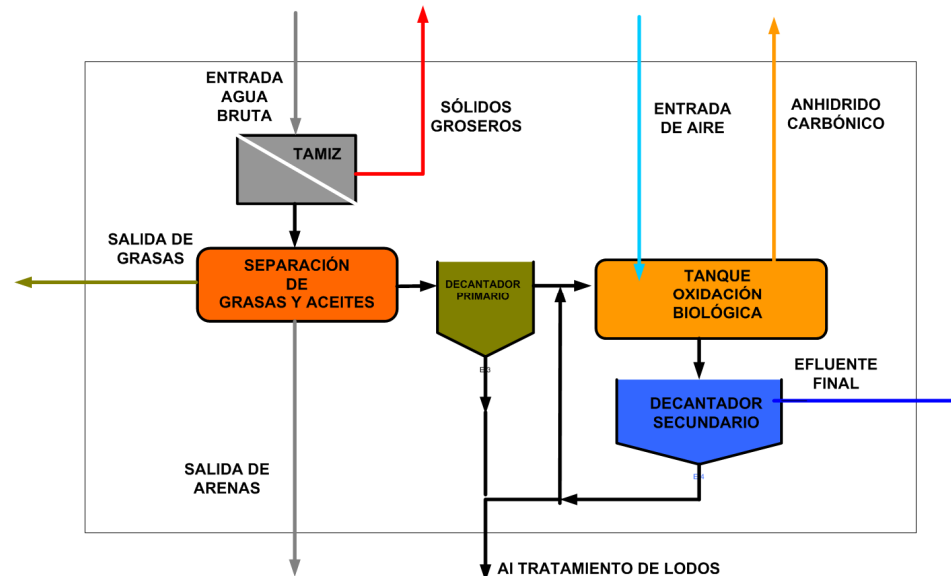


Figura 9.- Esquema simplificado de una depuradora convencional de aguas residuales urbanas.

El suministro de oxígeno para la aireación supone el mayor consumo energético en una planta de lodos activos, representando entre un 50 y 90 % del total de los requerimientos energéticos<sup>22</sup>,

<sup>20</sup> Fernández L.A. y Nebot E. (Editores).; Valorización de los lodos de EDAR: De la teoría a la práctica industrial. Martínez encuadernaciones A.G., S.L. Cádiz (2010).

<sup>21</sup> García-Ochoa F. y Gómez E.; Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. Biotechnology Advances, vol 27, 153-176 (2009).

<sup>22</sup> U.S. Environmental Protection Agency. Fine Pore Aeration Systems. Design Manual. Cincinnati, OH (1989.)

lo que ha llevado a un intenso estudio del fenómeno así como de los dispositivos utilizados en la práctica para la transferencia de oxígeno.

Si al final de los procesos descritos el agua depurada cumple los requisitos exigidos por la Directiva 91/271 podrá ser evacuada a cauce público. En la fotografía de la figura 10 se muestra la entrada a una depuradora convencional de aguas residuales urbanas y la salida del vertedero del decantador secundario antes de su incorporación al canal de evacuación. Obsérvese la claridad y limpieza aparente del efluente, sobre todo si se compara con el aspecto que tiene el agua a la entrada de la depuradora.

Sin embargo, esta impresión no puede ser más engañosa. A pesar de respetarse la legislación de forma escrupulosa, de nuevo, la disponibilidad de instrumentación y técnicas analíticas de última generación permiten detectar muy bajas concentraciones de compuestos orgánicos no degradados, cuya incidencia sobre el medio acuático pudiera ejercer efectos adversos. Parte de los contaminantes no degradados son los denominados **prioritarios**, que están incluidos en la Directiva Marco del Agua de la UE y clasificados como tales debido a sus potenciales efectos sobre el medio acuático.

Por otra parte están los contaminantes **emergentes**, que son un amplio grupo de sustancias, todavía no reguladas por la legislación, pero sometidas a múltiples estudios en todo el mundo para caracterizar sus efectos adversos, como potencial capacidad de alteración de las funciones endocrinas en los seres vivos.



**Figura 10.-Vista de la entrada y salida del agua en una planta depuradora de aguas urbanas.**

Inicialmente la presencia de estos compuestos se achacaba a vertidos industriales, pero se ha demostrado que se encuentran estrechamente vinculados a productos utilizados en el hogar, tales como productos de limpieza, residuos de medicamentos y productos del cuidado personal; incluso aparecen nanomateriales, restos del consumo de drogas ilegales y residuos del tráfico urbano<sup>23</sup>. Su concentración es tan pequeña que ninguna normativa regula su nivel. En algunos casos es difícil

---

<sup>23</sup> R. Marín, Martín M<sup>a</sup> A. y Martín A.; Non conventional pollutants in spanish wastewater. VII ANQUE International Congress. Oviedo (Spain) (2010).

detectarlos, pero el problema es el desconocimiento del riesgo asociado a estos microcontaminantes. Por ejemplo, algunos podrían ser bioacumulativos. Es difícil evaluar el riesgo y de momento es un tema de investigación. Sin embargo, el desconocimiento no debe instar a un exceso de preocupación social, ya que estamos hablando de nanogramos por litro, lo que equivale a considerar, como jocosamente comenta un compañero, el peso del gorro del capitán del Titanic dentro del peso total del buque.

Todos estas sustancias provocan pérdidas de eficiencia en las depuradoras, pérdidas de calidad para futuros aprovechamientos de los lodos, ya que una parte de ellos se adsorbe sobre los mismos y, finalmente, restricciones para una posible reutilización del agua<sup>24, 25</sup>. Esta problemática ha llevado a la UE a establecer la Directiva 2008/105/CE sobre normas de calidad ambiental (NCA) para sustancias prioritarias con objeto de conseguir un buen estado químico de las aguas superficiales incorporada a la legislación española a través del Real Decreto 60/2011 sobre normas de calidad ambiental, así como en diferentes normas autonómicas y ordenanzas municipales de vertidos de diferentes puntos de España.

### **La reutilización del agua depurada**

Aunque la implantación material de la Directiva 91/271 ha supuesto, en la UE, un avance considerable hacia un medio ambiente más limpio, en la mayor parte de los casos no se consigue un agua con la calidad adecuada para llevar a cabo los múltiples usos posibles; se precisan pues tratamientos adicionales en función del destino final del agua. El R.D. 1620/2007 de 7 de diciembre, que desarrolla el artículo 109 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (RDL 1/2001) establece el régimen jurídico para la reutilización de las aguas depuradas y en él se:

- Define el concepto de reutilización.
- Introduce la **denominación de aguas regeneradas**, más allá de aquellas que han superado un proceso de tratamiento de aguas.
- Determina los **requisitos** necesarios **para** llevar a cabo **la actividad** de utilización de aguas regeneradas.
- Detalla los **procedimientos para** obtener **la concesión** exigida en la Ley.
- Enumera los **usos** admitidos y las exigencias de calidad precisas en cada caso.
- Define los **criterios de calidad** mínimos obligatorios exigibles para la utilización de las aguas regeneradas según los usos.

---

<sup>24</sup> Stevens-Garmon J. et al.; Sorption of emerging trace organic compounds onto wastewater sludge solids. Water Research 45, 3417-3426 (2011).

<sup>25</sup> Schriks M. et al.; Toxicological relevance of emerging contaminants for drinking water quality. 44, 461-476 (2010).



En el R.D. 1620/2007 se definen cinco usos: agrícolas, urbanos, industriales, recreativos y ambientales y la Ley 1/2001 en su artículo 60 cita expresamente la ordenación preferente de los mismos. En cuanto a las exigencias de calidad, se fijan unos parámetros generales de: Turbidez, Sólidos en Suspensión, Nematodos intestinales y *Escherichia coli*. Adicionalmente, en función del uso se fijan otros complementarios, como son el contenido en especies nitrogenadas, fósforo total y *legionella* spp.

Estas exigencias han supuesto un reto tecnológico que ha podido afrontarse con éxito mediante la combinación de diversos tratamientos terciarios tales como filtración, desinfección con rayos ultravioletas, electrodiálisis, etc. o de una forma más simple con los denominados **Reactores Biológicos de Membrana (MBR)**<sup>26</sup>. El término **MBR (Membrane Bio-Reactors)** se aplica a un dispositivo integrado por dos partes esenciales que son: la unidad biológica responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual y un módulo de membranas encargado de llevar a cabo la separación física del licor de mezcla presente en el reactor biológico.

Unas palabras acerca de las membranas. Una membrana - figura 11- es un medio sólido que separa dos fases y actúa como barrera selectiva al transporte de materia. Aunque el poder separador de las membranas es conocido desde mediados del siglo XVIII, no es hasta final del siglo XX donde comienza su aplicación a escala industrial en el campo de la obtención de agua potable<sup>27</sup>. Esto ocurre a partir del año 1971 cuando Hoehn y Richter consiguen patentar una membrana de fibra hueca (figura 12) fabricada con una poliamida aromática. No se detiene aquí la búsqueda de nuevos materiales y en 1981 Cadotte, mediante una técnica denominada policondensación interfacial prepara lo que hoy conocemos como membranas compuestas de capa fina (figura 13).

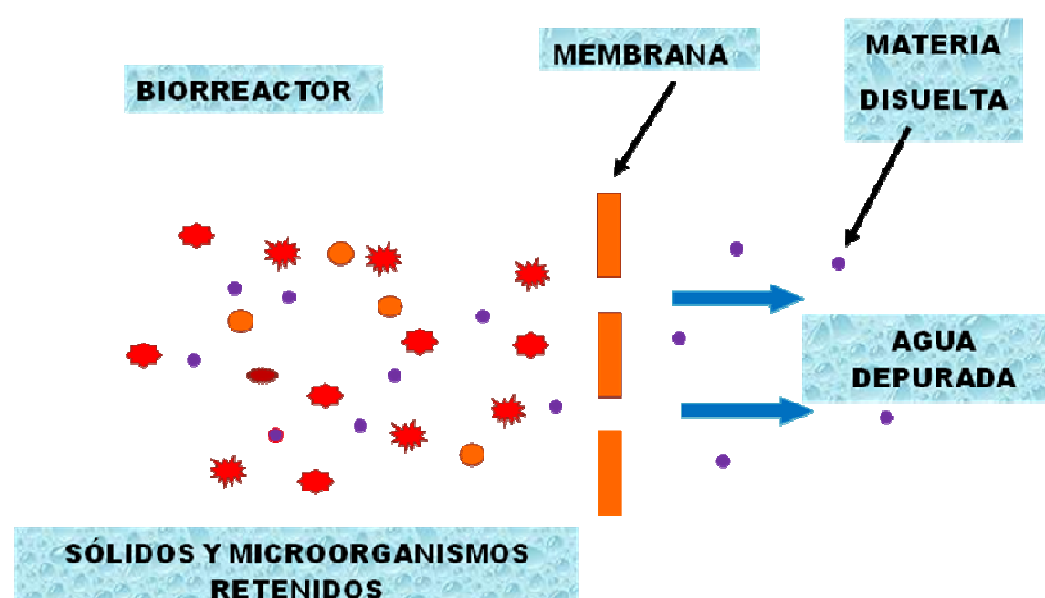


Figura 11.- Esquema del funcionamiento de una membrana.

<sup>26</sup> Judd S.; The status of membrane bioreactor technology. Trends in Biotechnology, 26, 109-116 (2008).

<sup>27</sup> Fariñas M.; Ósmosis Inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones. Mc-Graw Hill. Madrid (1999).



Figura 12. Vista macroscópica de las membranas de fibra hueca.

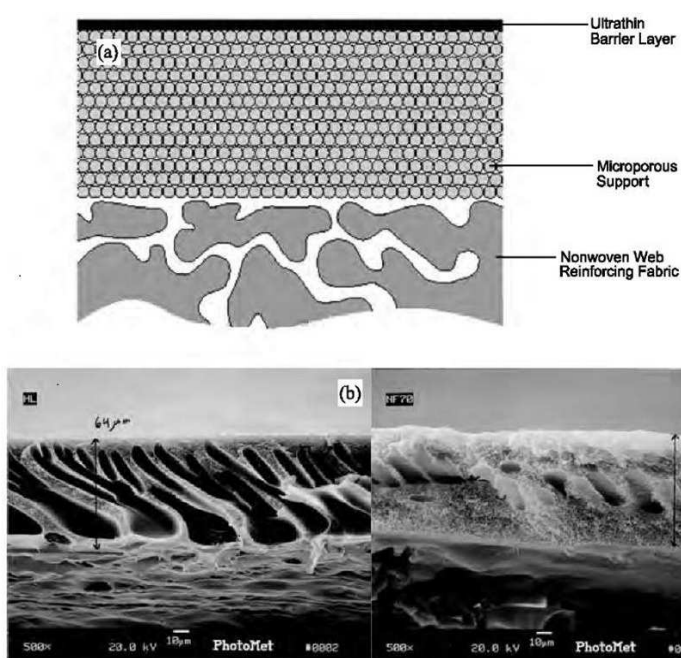


Figura 13.- Sección transversal de una membrana compuesta de capa fina.

En este tipo de membrana la capa activa es de polímero sintético de espesor extraordinariamente pequeño - unos  $0,2 \mu\text{m}$  - depositada sobre un lecho poroso y finalmente este conjunto se soporta sobre un material que confiere la resistencia mecánica.

Los materiales utilizados en la fabricación de membranas son muy variados, pudiendo ser orgánicos o inorgánicos y su elección depende del tipo de separación deseada y de la resistencia química exigible. En general predominan los polímeros orgánicos derivados de celulosa, polisulfonas, poliamidas

y fluoruros de polivinilo<sup>28</sup>. Las membranas orgánicas presentan dos limitaciones importantes que reducen su campo de aplicación: su estabilidad química y su resistencia a la temperatura; la solución a estos problemas ha llegado de la mano de las membranas construidas a base de materiales cerámicos que sin embargo poseen una menor resistencia mecánica.

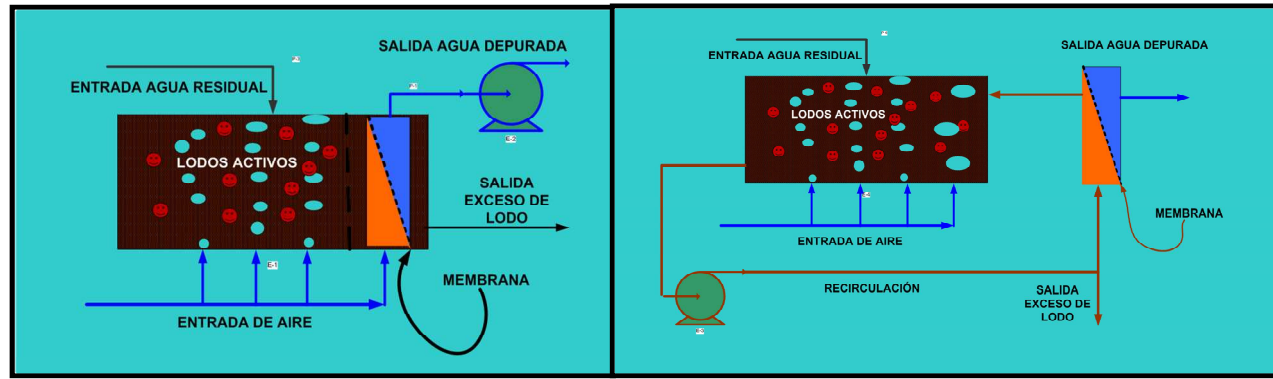


Figura 14.- Tipos de configuración de MBR.

En la práctica las membranas se pueden implementar de dos formas diferentes: bien sumergidas dentro del propio birreactor o en el exterior del mismo (figura 14). En el segundo caso es necesario bombear de forma continua el agua, lo que conlleva mayor consumo energético pero se facilita tanto su limpieza como su reemplazo. A pesar de esta ventaja se ha impuesto la configuración sumergida dado su menor consumo de energía. En cualquiera de los dos casos los avances efectuados en relación con el consumo energético han sido considerables (figura 15).

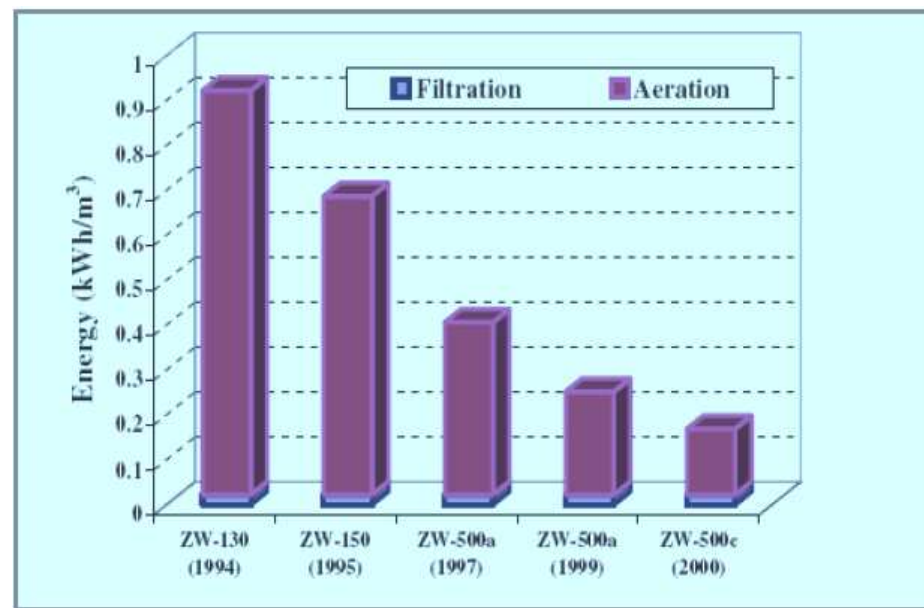


Figura 15.- Evolución del consumo de energía para la aeración y filtración en MBR<sup>29</sup>.

<sup>28</sup> Cheryan M.; Ultrafiltration and microfiltration handbook. Technomic Publishing. Lancaster.E.U. (1998).

<sup>29</sup> Ben Aim R.. How to control MBR: Biological aspects. Hydrodynamic aspects. COE course. Hokkaido University, Sapporo, Japan. July (2004).

Hay una serie de ventajas asociadas a esta tecnología cuando se compara con el proceso convencional de lodos activos:

- Eficaz retención de sólidos en suspensión y de muchos compuestos solubles dentro del biorreactor, lo que proporciona un efluente de excelente calidad capaz de cumplir requisitos muy rigurosos de vertido.
- Retención de bacterias y virus obteniéndose, en muchos casos, un efluente estéril, lo que elimina la necesidad de posterior desinfección.
- Se elimina la potencial peligrosidad asociada a los subproductos de desinfección cuando la misma se realiza con cloro u ozono.
- Disminución de tamaño de la instalación entre un 25 y un 50 % y el número de componentes de la misma, en particular el decantador secundario.
- Facilidad de automatización.

En la tabla 3 se presentan los datos facilitados por General Electric Power & Water relativos a las características del efluente de un MBR que procesa aguas residuales urbanas.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO</b>	< 2 mg/L
<b>SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN TOTALES</b>	< 2 mg/L
<b>NITRÓGENO AMONIACAL</b>	< 0,5 mg/L
<b>NITRÓGENO TOTAL</b>	< 3 mg/L
<b>TURBIDEZ</b>	< 0,2 NTU
<b>COLIFORMES FECALES</b>	< 10 UFC/100 mL
<b>FÓSFORO TOTAL</b>	< 0,05 mg/L *

*\* Con diseño apropiado y/o adición de reactivos químicos*

**Tabla 3.- Calidades medias a la salida de un MBR.**

A la vista de estos resultados puede concluirse que estas aguas pueden ser utilizadas para todas las actividades previstas en el Real Decreto sobre Reutilización excepto para usos residenciales y recarga de acuíferos. En estos dos casos se precisaría un tratamiento adicional de desinfección, que incluso podría llevarse a cabo con una membrana adicional con el tamaño de poro adecuado, ya que algunos virus atraviesan las membranas de microfiltración que más adelante definiremos.

Uno de los mayores inconvenientes de este sistema es la facilidad de ensuciamiento de las membranas (figura 16), bien por un tratamiento deficiente en los decantadores previos, bien por la adhesión de las biopelículas que provocan sobre las mismas las Sustancias Poliméricas Extracelulares (EPS); esta situación obliga a frecuentes retrolavados y periódicamente a un tratamiento químico, generalmente, con hipoclorito sódico.

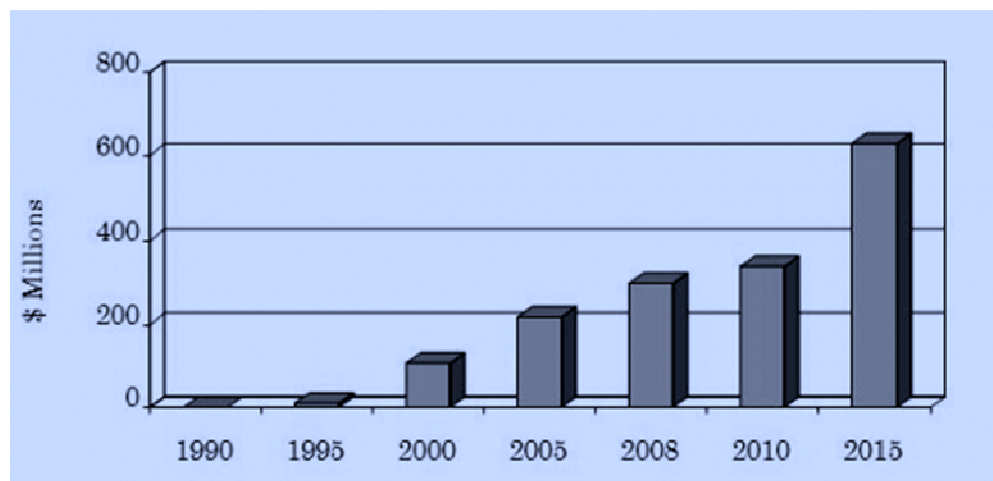


**Figura 16.- Ensuciamiento de unas membranas de fibra hueca y plana respectivamente.**

Hoy día el estudio del mecanismo y causas del ensuciamiento de las membranas constituye un campo de investigación muy activo, con centenares de publicaciones tanto científicas como comerciales<sup>30</sup>.

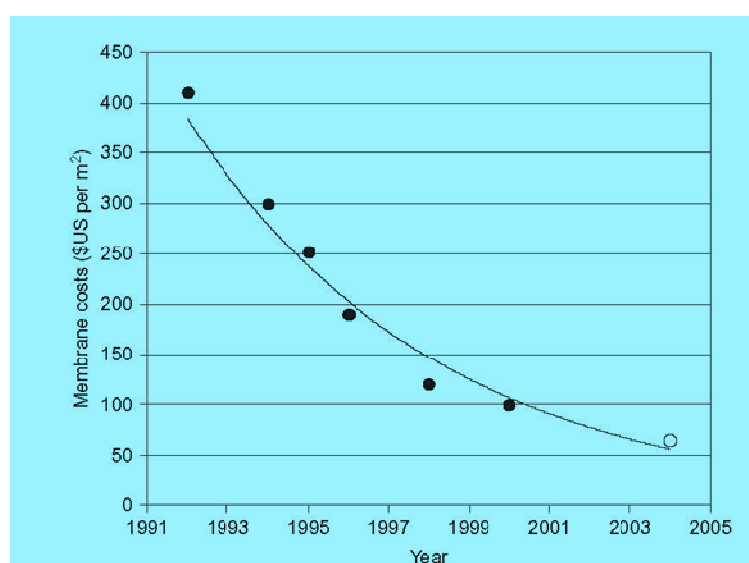
---

<sup>30</sup> Van Gluwe S., Braeken L. y Van der Bruggen; Ozone oxidation for the alleviation of membrane fouling by natural organic matter: A review. Water Research, 45, 3551-3570 (2011).



**Figura 17.- Evolución de las ventas de MBR.**

Dadas las especificaciones cada vez más estrictas, bien en los vertidos o en el agua reutilizada, el mercado mundial de biorreactores de membrana se encuentra en fase de crecimiento exponencial<sup>31</sup> con una tasa de crecimiento superior al 10% acumulado, estimándose, para el año 2015 unas ventas de 627 Millones de dólares (ver figura 17); hoy día utilizan esta tecnología unas 6000 plantas en todo el mundo.



**Figura 18.- Evolución del coste de las membranas.**

La fabricación de membranas a gran escala, así como el perfeccionamiento de los métodos de síntesis ha llevado a una disminución drástica de los precios. En la figura 18 se ha representado la evolución del coste<sup>32</sup> - expresado en \$/m<sup>2</sup> - frente al año de venta, poniéndose de manifiesto una reducción próxima al 700 % entre los años 1991 y 2004. Esta tendencia, aunque, lógicamente, en menor cuantía, continua en la actualidad.

<sup>31</sup> <http://www.bccresearch.com/report/membrane-bioreactors-markets-mst047b.html>

<sup>32</sup> Z.F. Cui and H.S. Muralidhara Editores; Membrane Technology. Elsevier. Amsterdam (2010).

Respecto a los costes asociados al proceso que estamos describiendo, si nos ceñimos a plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas, se puede indicar que en lo relativo al proceso biológico hay que restar entre un 20 y un 25 % correspondiente a la supresión de las etapas de decantación y recirculación, además de la correspondiente disminución de espacio. Por otra parte, en la partida de costes, hay que sumar la implantación de las membranas, estimándose su coste en el rango de 320 a 950 euros/m<sup>3</sup>·día<sup>33</sup>. Otros autores dan cifras algo diferentes (figura 19). Como costes de operación significativos hay que añadir el coste de los reactivos de limpieza de las membranas - entre 0,015 y 0,030 euros/m<sup>3</sup> - y el de la energía 0,06-0,11 euros/m<sup>3</sup>. Por otra parte se disminuye drásticamente el coste derivado de la gestión de lodos ya que la mayor parte de ellos se oxidan en el MBR<sup>34</sup>.

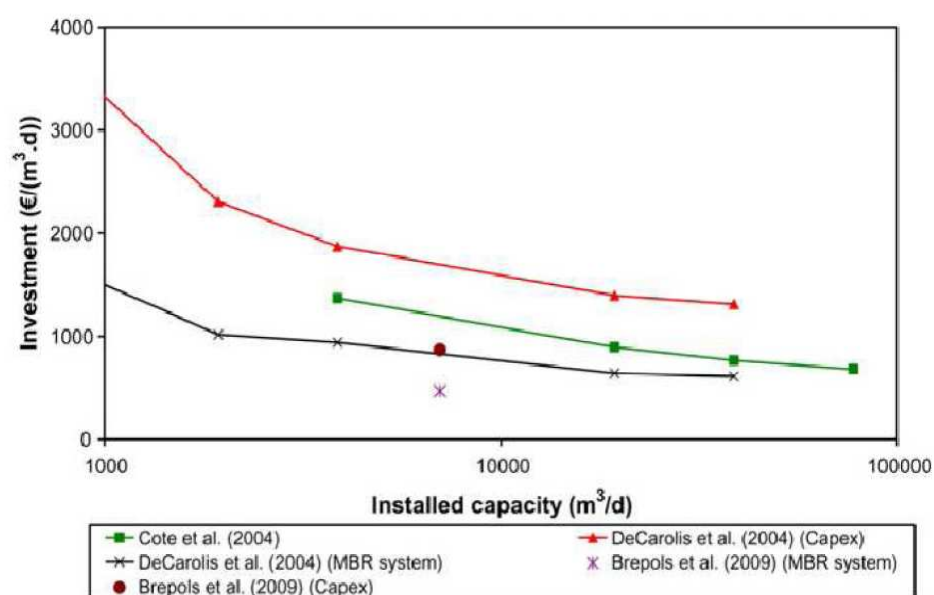


Figura 19.- Necesidades de inversión específica en función de la capacidad instalada.

*Basada en datos bibliográficos (adapted from McAdam and Judd, 2008).*

<sup>33</sup> Prats D. y Melgarejo J.; Desalación y reutilización de aguas. Situación en la provincia de Alicante. Fundación COEPA (2006).

<sup>34</sup> McAdam, E., Judd, S.; Immersed membrane bioreactors for nitrate removal from drinking water: cost and feasibility. Desalination 231, 52-60.( 2008).

Se debe añadir que, en España, las previsiones para disponer de aguas depuradas regeneradas espera multiplicarse por tres en la década actual, pasando de unos 368 hm<sup>3</sup>/año en 2010<sup>35</sup> a unos 1200 hm<sup>3</sup>/año, siendo la agricultura, el riego de los campos de golf, la limpieza de calles y el regado de jardines sus principales consumidores (figura 20).

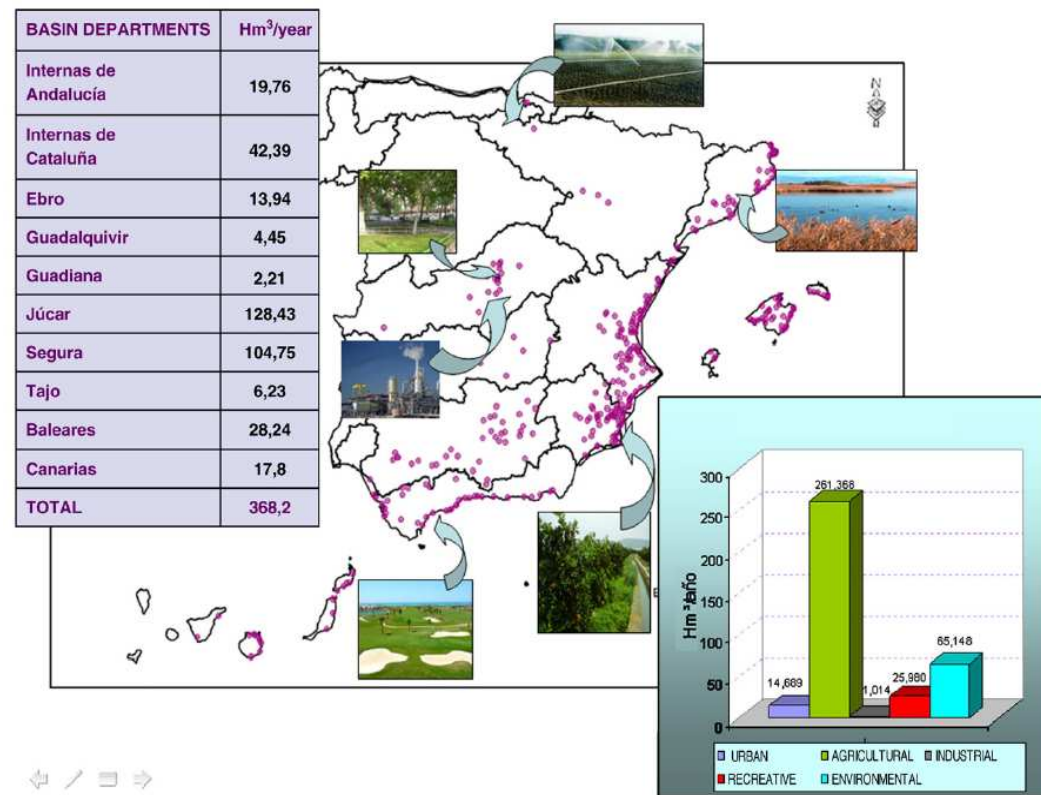


Figura 20.- La regeneración de aguas en España.

### La desalación

En la primera parte de esta intervención se ha indicado que el agua dulce es un recurso limitado y con disponibilidad relativa decreciente debido al crecimiento de la población humana ¡y no sólo ello! Además, está mal distribuido.

Desgraciadamente la distribución de la población no coincide con la del agua, por lo que son muchas las zonas del planeta donde no se alcanza la cifra de 1000 m<sup>3</sup>/habitante-año, cifra que se considera el límite a partir del cual una zona se encuentra en estrés hídrico. Se estima que una población de 700 millones distribuida en 43 países ya lo padece. Algunas de estos lugares se encuentran

<sup>35</sup> Iglesias R., Ortega E., Batanero G. y Quintas L.; Water reuse in Spain: Data overview and costs estimation of suitable treatment trains. Desalination 263, 1–10 (2010) .



en zonas costeras y por ello es posible acudir al agua de mar o bien a los acuíferos salinizados, como recurso externo de naturaleza no convencional, para satisfacer las necesidades de la población, mediante un proceso físico de eliminación de las sales disueltas conocido como desalación.

Aunque la desalación propiamente dicha comenzó a finales del siglo XIX con el aprovechamiento del vapor de las calderas de los pequeños barcos para su consumo humano, en el propio ciclo hidrológico del agua existe el fenómeno de la desalación en el proceso de evaporación del agua del mar o de los continentes. Todos los procesos de desalación hasta tiempos muy recientes han estado relacionados con la evaporación, a veces utilizando la energía solar, en pequeñas instalaciones, pero en las plantas de gran capacidad se ha utilizado siempre energía fósil en conjunción con la tecnología del múltiple efecto o la de evaporación flash, tan extendidas en el campo de la Ingeniería Química. A partir de los años 60 comenzó a imponerse tímidamente la tecnología de membranas y ello por una razón fundamental: al ser un proceso sin cambio de fase, al contrario de lo que ocurre en la evaporación, se produce un ahorro energético extraordinariamente significativo con todo lo que ello significa: menor consumo de recursos, menores costes y menores impactos ambientales.

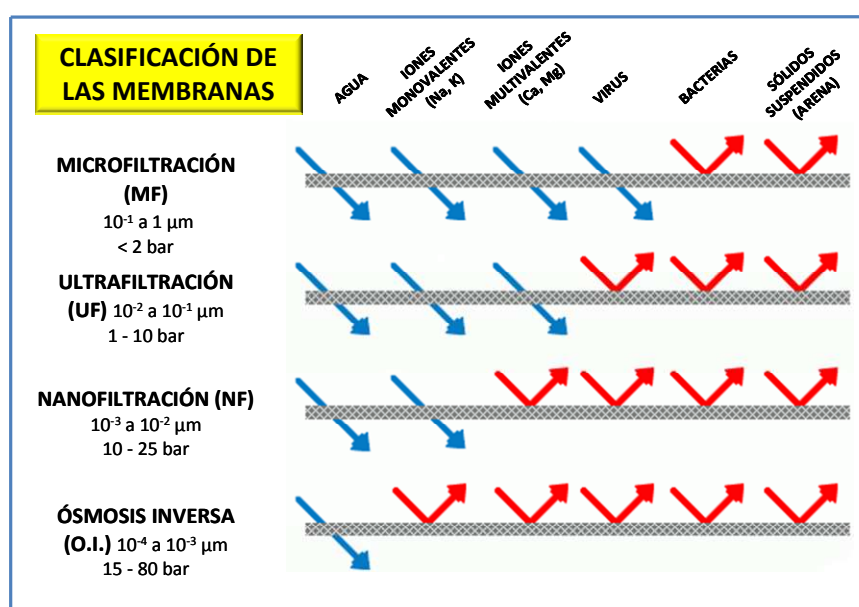


Figura 21.- Clasificación de los diferentes tipos de membranas<sup>36</sup>.

A diferencia de los tipos de membranas empleadas en los procesos de reutilización de aguas residuales, las membranas de Ósmosis Inversa, (OI o su acrónimo anglosajón RO), que son las utilizadas en desalación, poseen dos características diferentes: un tamaño de poro mucho menor que las utilizadas en el tratamiento de aguas residuales (unos cuatro órdenes de magnitud) y su operación a

<sup>36</sup> El tamaño de poro de las membranas se suele expresar en micrómetros (μm) o nanómetros (nm); 1 μm = 10<sup>-6</sup> m; 1 nm = 10<sup>-9</sup> m. La presión de operación se suele expresar en bar; 1psi = 14,5 bar

presiones muy elevadas. En la figura 21 se presenta la clasificación usual para las membranas así como su presión de operación, tamaño de poro y naturaleza del rechazo producido

Como se observa en la figura las membranas de OI rechazan las sales disueltas en el agua, los diferentes tipos de microorganismos y los posibles sólidos en suspensión, pero dejan pasar el agua. El rango de presión de operación más frecuente, en el caso de agua de mar, de las membranas de OI está comprendido entre 60 y 80 bares dependiendo el valor concreto de la concentración de sales disueltas.

En esencia una planta de desalación, por Ósmosis Inversa, (figura 22) consta de un sistema de captación de agua de mar o agua salobre que seguidamente es sometida a diversos pretratamientos de eliminación de la materia en suspensión y esterilización. Estas etapas son fundamentales a fin de evitar el ensuciamiento de las membranas, bien por partículas, bien por microorganismos y así poder alargar tanto los periodos de operación, como la vida de las membranas.

El agua tratada se somete a una elevación de presión y se le fuerza a circular por un modulo de membranas planas de arrollamiento en espiral (figura 23) caracterizado por su gran área de filtración por unidad de volumen, por lo que las instalaciones resultan muy compactas.

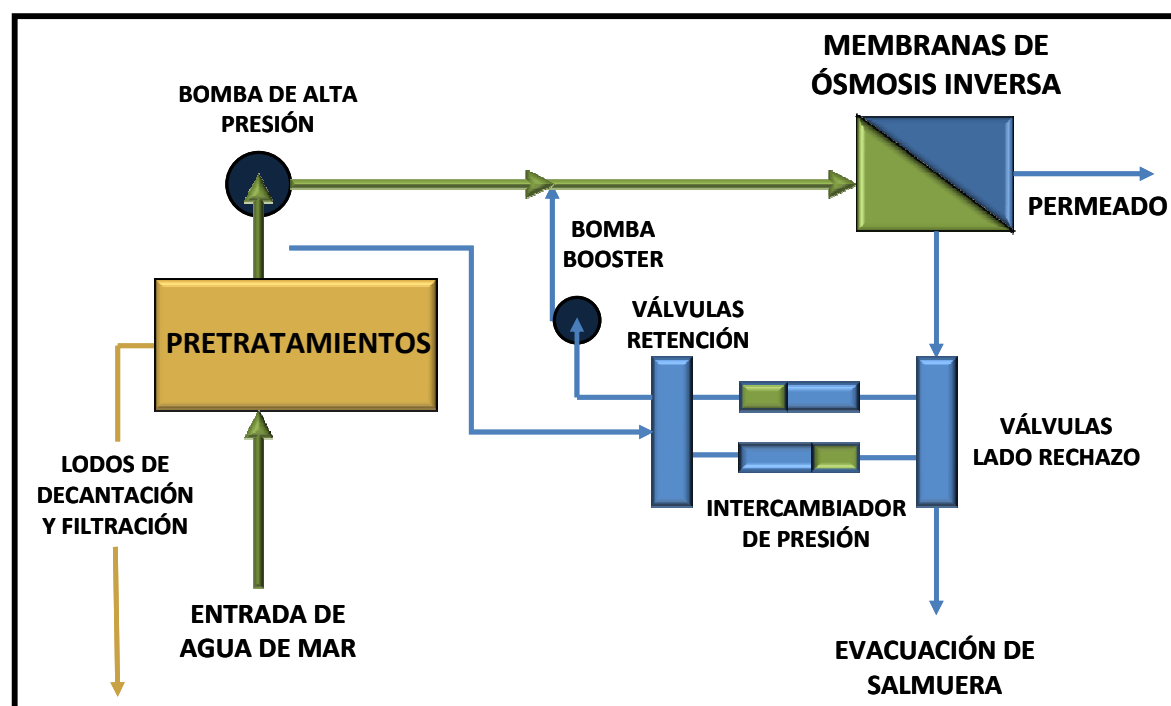


Figura 22.- Esquema simplificado de una planta de desalación por OI.

La membrana de OI fracciona la corriente de entrada en agua desalada, conocida usualmente como permeado, y una salmuera cuya concentración depende del grado de conversión de la instalación.

A la salida de las membranas la salmuera posee una presión ligeramente inferior a la de entrada por lo que resulta imprescindible aprovechar su contenido energético.

Es tan elevada la eliminación de las sales disueltas que a la salida el permeado debe someterse a una remineralización y dosificación con hipoclorito sódico para disminuir la agresividad del agua y adaptarla a la Reglamentación Técnica Sanitaria.

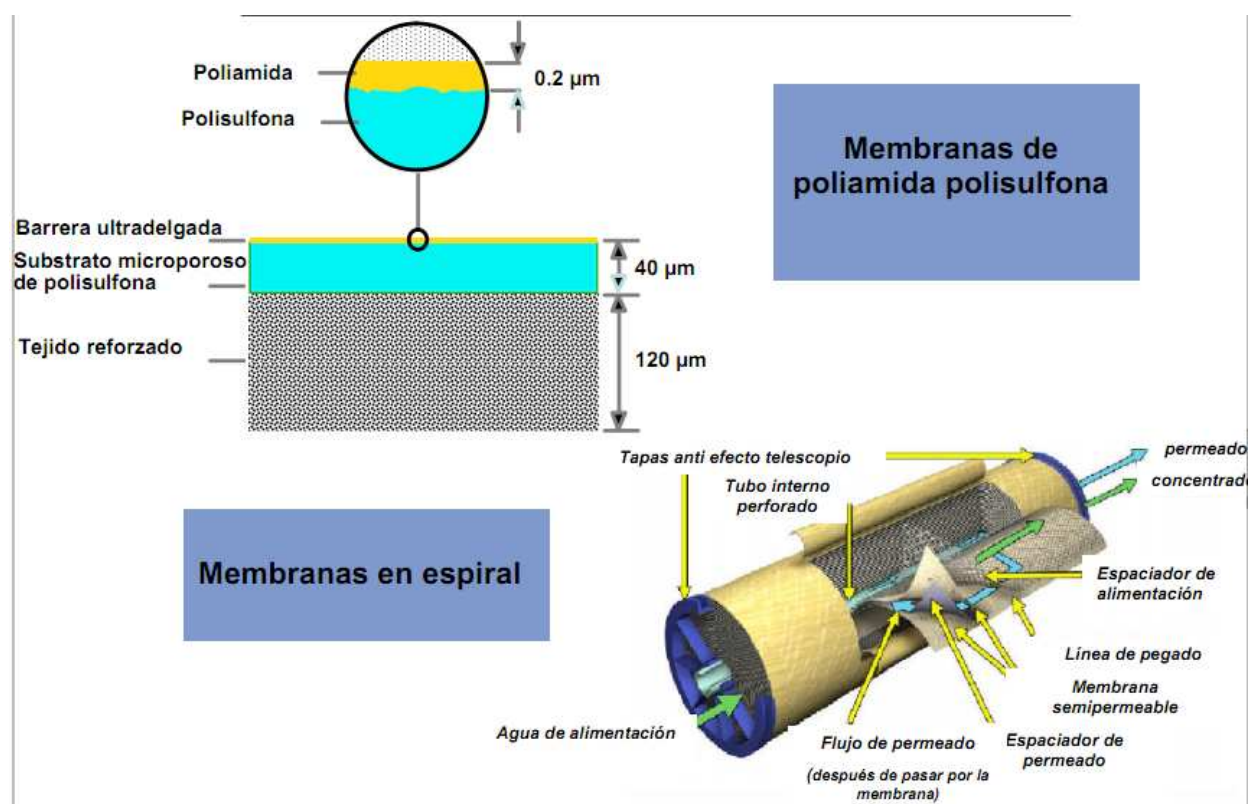


Figura 23.- Membrana de OI de configuración en espiral.

Para recuperar la energía de presión contenida en la salmuera que abandona la instalación se han utilizado diversos dispositivos, desde las clásicas turbinas Pelton hasta los modernos intercambiadores de presión<sup>37</sup>. La recuperación de la energía de presión de la salmuera y la disponibilidad de membranas de mayor permeabilidad han supuesto una mejora notable en la disminución del consumo total de energía en el proceso de desalación pasando de 20 kWh/m<sup>3</sup> en la década de los 70, cuando se utilizaban procesos de destilación a los 3,5 kWh/m<sup>3</sup> en los modernos procesos de OI con recuperación de energía (figura 24). Todavía queda margen para alguna mejora pero ya nos estamos aproximando al límite teórico estimado en algo menos de 1 kWh/m<sup>3</sup>.

En paralelo a esta disminución en el consumo energético, en España, y en el resto del mundo se ha venido produciendo un aumento en la capacidad instalada. En 2007 ya había instaladas

<sup>37</sup> Fariñas Iglesias M.; Reducción del consumo específico de energía en las desalinizadoras de agua de mar de nueva generación. Congreso Nacional de Medio Ambiente. Madrid. (2008).

más de 12.000 plantas de desalación repartidas en entre 155 países con una capacidad de producción diaria de 47 millones de metros cúbicos y con previsión de aumentar a 30 millones más para el año 2015<sup>38</sup>.

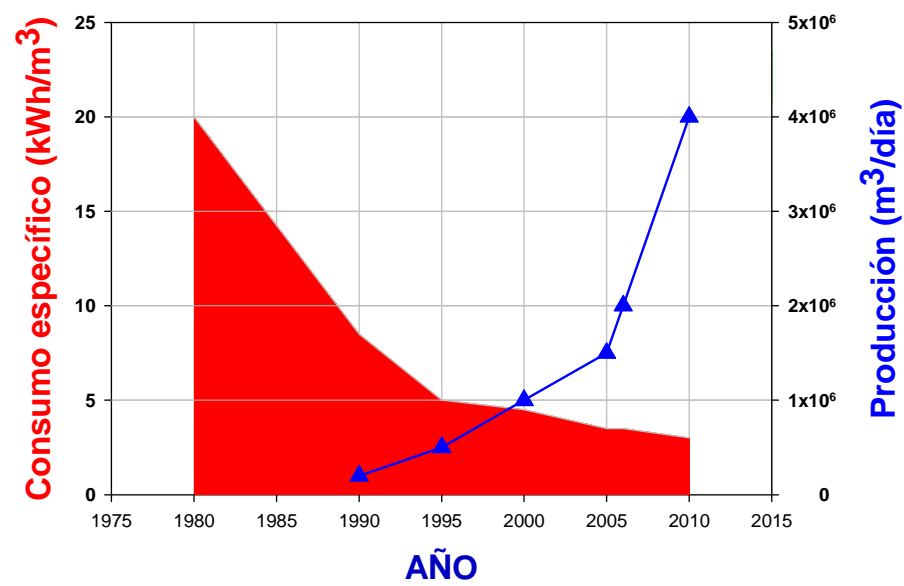


Figura 24.- Evolución del consumo de energía y la producción en los procesos de desalación.

### Impacto ambiental de la desalación

A pesar de las ventajas innegables de la desalación, su instalación da lugar a tres impactos ambientales de cierta importancia que conviene atenuar:

- Emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> como consecuencia del uso de energías fósiles para la generación de la corriente eléctrica utilizada en el bombeo del agua y para vencer la pérdida de presión en la instalación.
- Vertido de salmueras a concentraciones elevadas
- Contaminación de las salmueras con los diferentes productos químicos utilizados en los pretratamientos.

Es tal la dimensión internacional que ha tomado la desalación que la OMS ha preparado un manual para la Evaluación del Impacto Ambiental para la confección de los proyectos de este tipo de plantas<sup>39</sup>

---

<sup>38</sup> Cajigas A.; Desalación y reutilización: Nuevos recursos para un abastecimiento sostenible. *Infoenviro*. 28, 57-63 (2007)

En relación con las emisiones de CO<sub>2</sub>, como ya ha quedado apuntado, se han efectuado avances muy importantes en cuanto a la disminución del consumo energético recuperando, con diversos tipos de dispositivos, la energía de presión contenida en la salmuera (figura 25).

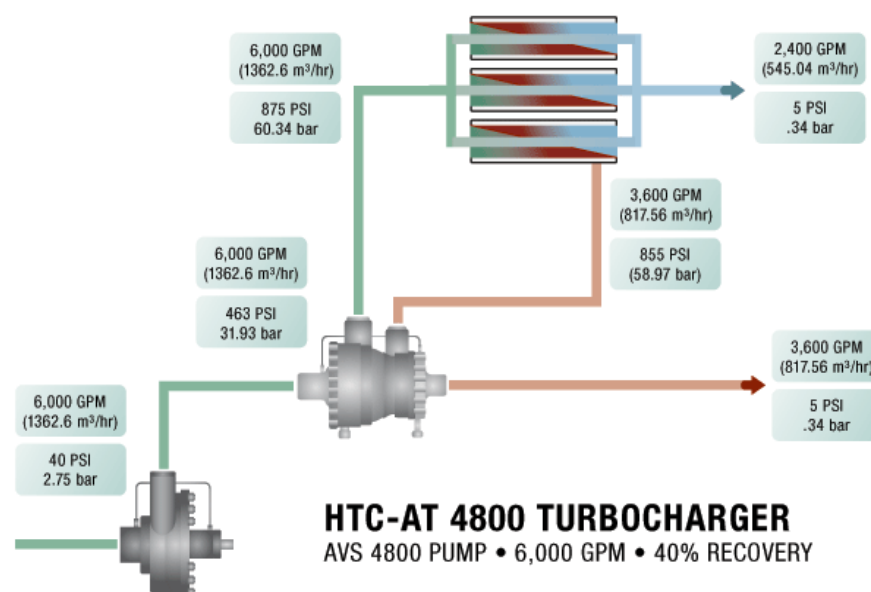


Figura 25.- Dispositivo para la recuperación de la energía de presión de la salmuera.

En este campo todavía se pueden esperar mejoras importantes conforme se adquiera más experiencia, en plantas de capacidad elevada que es hacia donde se ha dirigido el mercado; hoy día es posible conseguir consumos tan bajos como 2 kWh/m<sup>3</sup> (40, 41). Por otra parte, la utilización de las membranas de última generación permiten presiones de operación un 20% más bajas. En la tabla 4 se muestra el consumo específico de energía en una de las primeras desaladoras construidas en nuestras costas donde la recuperación de energía de la salmuera se efectúa a través de la clásica turbina Pelton que se puede considerar, en este campo, como tecnología de primera generación; aún así el consumo específico de la desalación propiamente dicha es de 3,1 kWh/m<sup>3</sup>.

<sup>39</sup> **Lattemann S.**; WHO Guidance on Desalination: Results of the Work Group on Environmental Impacts. IDA World Congress-Maspalomas, Gran Canaria –Spain October 21-26, (2007).

<sup>40</sup> **Valbjørn A.**; Energy Recovering Devices for Small SWRO Plants. IDA World Congress-Maspalomas, Gran Canaria –Spain October 21-26, (2007).

<sup>41</sup> **Subramani A. et al.**; Energy minimization strategies and renewable energy utilization for desalination: A review. Water Research. 45, 1907-1920 (2011).

Punto de consumo	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )	Porcentaje (%)
Captación y pretratamiento	0,63	15,4
Desalación (O.I.)	3,10	76,0
Pérdidas y varios	0,12	3,0
Total a pie de desalinizadora	3,85	94,4
Bombeo al exterior	0,23	5,6
Total en la balsa de entrega	4,08	100,0

**Tabla 4.-Desglose del consumo específico de la energía de la desalinizadora de Carboneras.**

Otro aspecto relacionado con la minimización del consumo de energía es el dotar a los múltiples sistemas de bombeo con variadores de frecuencia para adaptar, de modo dinámico, el consumo de energía a las variaciones de caudal, temperatura, pérdida de presión o edad de las membranas; se estima que los ahorros con esta medida pueden estar comprendidos entre 0,11 y 0,29 kWh/m<sup>3</sup> <sup>(42)</sup>.

Con independencia de los diferentes valores que se dan sobre la producción de CO<sub>2</sub> por kWh o por m<sup>3</sup> de agua producida se estimaba, en 2007, que en España todas las desaladoras juntas eran responsables, a caudal total de producción, de 1 millón de toneladas año de CO<sub>2</sub> cuando las emisiones totales alcanzaban la cifra de 400 millones t/año.

Con el fin de producir agua potable para pequeños núcleos aislados de consumidores, se comienzan a popularizar las plantas de unos pocos decenas de metros cúbicos al día, alimentadas por energía fotovoltaica o eólica <sup>43, 44, 45</sup>. Una de las principales dificultades de diseño se encuentra en que la producción de energía por fuentes renovables es variable, así como el consumo de agua de estos pequeños núcleos, por lo que se precisa un gran uso de baterías y generadores diesel auxiliares, para compensar los desajustes entre producción y demanda. A todo ello se une la falta de personal técnico cualificado y la alta necesidad de productos químicos. En la actualidad existe un proyecto de demostración, en Túnez, centrado en la automatización de este tipo de plantas; como materia prima utiliza agua salobre con 16.000 STD, su producción es de 24 m<sup>3</sup>/día y como fuentes de energéticas utiliza la energía eólica, la fotovoltaica y el apoyo de un motor diesel.

<sup>42</sup> Desaladora del Bajo Almanzora. InfoEnviro, 65,19-33 (2011).

<sup>43</sup> Palacín L.G., Tadeo F. Salazar J. y Prada C.; Ósmosis inversa en instalaciones remotas con energías renovables. InfoEnviro, 65,42-45 (2011).

<sup>44</sup> Qingfen Ma., Hui Lu; Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art. Desalination 277, 274–280 (2011).

<sup>45</sup> Davies P.A.; A solar-powered reverse osmosis system for high recovery of freshwater. Desalination 271, 72-79 (2011).

En cualquier proceso de desalación, una fracción muy importante del agua capturada introducida en la planta necesariamente es rechazada y devuelta normalmente al reservorio original de donde se aportó el agua bruta. El problema de estos vertidos debe tratarse cuidadosamente dependiendo del tipo de proceso utilizado, y de las características del reservorio donde se elimina la salmuera de rechazo es pues, necesario, abordar de forma separada la desalación de aguas marinas y de aguas salobres, porque son dos problemáticas completamente diferentes ya que afectan a medios naturales distintos<sup>46</sup>.

Las plantas desaladoras de agua salobre, como la instalada en el Campus de la Universidad de Alicante en 1997 y que suministra toda el agua consumida excepto la de consumo humano, generalmente se nutren de acuíferos cuya calidad se ha ido degradando paulatinamente con su extracción para el riego. En general, la degradación de los acuíferos se debe al uso de fertilizantes nitrogenados y otros agentes agrícolas, infiltración de aguas residuales, disolución de terrenos solubles, intercomunicación de diferentes acuíferos estratificados e incluso la intrusión marina en los acuíferos cercanos al mar. Desalar agua salobre permite a este tipo de aguas su uso agrícola e incluso humano. En general aguas de 4.000 ppm devuelven el rechazo en torno a los 16.500 ppm, considerando una conversión media del 75% en este tipo de plantas. A continuación se describen las diferentes soluciones aportadas actualmente para la evacuación de este tipo de salmueras<sup>47</sup> haciendo una valoración cualitativa de cada una de ellas:

- Vertido directo a ramblas o cauces cercanos. Es una solución común pero poco recomendable porque puede salinizar dichos cauces y los suelos adyacentes, afectando incluso a la población asentada aguas abajo de dicho cauce.
- Vertido al mar en el caso de cercanía al mismo. Debe estudiarse, ya que en este caso la salinidad es menor que la marina y puede afectar a la diversidad biológica en ese tramo costero.
- Inyección en acuíferos más profundos incluso que el de aporte. Es una solución altamente peligrosa, ya que puede afectar a acuíferos cercanos y además los convierte en inservibles para su uso futuro.
- Instalación de balsas de evaporación o incluso salinas para obtener sal. La extensión necesaria para este tipo de solución suele disuadir a los propietarios de las explotaciones, pero es de las más adecuadas aunque desaparece todo caudal posible de retorno a la cuenca hidrográfica.
- Creación de colectores de vertido o "salmueroductos" que recojan los rechazos de una o varias plantas desaladoras próximas hasta el mar. Parece la solución más aceptable, aunque con coste algo superior a otras opciones, y además debe estudiarse el punto exacto de vertido en el mar para no alterar las condiciones biológicas de la fauna y flora marinas. Debe tenerse en cuenta también, que excepto la segunda y última opciones, los vertidos de salmuera retornan

---

<sup>46</sup> CIRCE- Universidad de Zaragoza. La desalación como alternativa al PHN. Informe realizado a requerimiento del Gobierno de Aragón (2001).

<sup>47</sup> Latorre, M. Evacuación de salmueras. Aspectos medioambientales. I Congreso AEDyR, Murcia (2000).

finalmente a la cuenca hidrográfica de donde se extrajo el agua salobre con lo que deberían rechazarse a priori.

Respecto al vertido de rechazos de agua marina, una planta de conversión media del 45% y un agua marina de aporte de 38.000 ppm debe verter al mar una salmuera con alrededor de 70.000 ppm. **Se sabe que la fauna marina no queda afectada significativamente por la existencia de emisarios de esta agua** (gracias por supuesto a su movilidad), incluso hay experiencias de una mayor cuota de captura pesquera alrededor de desagües de plantas desaladoras.

**Sin embargo hay que tratar con especial atención la flora marina existente en el litoral mediterráneo**, en concreto las praderas de **“Posidonia Oceánica”**, una fanerógama marina que recubre los fondos con un calado de 5 a 30 metros (dependiendo de la transparencia del agua y la granulometría de los fondos) de extraordinaria productividad y diversidad, pero a su vez de extraordinaria rareza. Tanto es así que aparece en la lista de hábitats naturales de interés comunitario que es preciso proteger (Directiva del Consejo 92/43/CEE del 21 de Mayo de 1992). Aunque no se sabe a ciencia cierta el efecto de los vertidos de salmuera en las praderas de **Posidonia Oceánica**, lo que sí es cierto es que es necesario realizar una serie de medidas de protección para no dañar dichas praderas, con una capacidad de producción de oxígeno incluso mayor que la selva amazónica.

De entre las posibilidades de actuación en cuanto a la evacuación de la salmuera al mar, no hay soluciones concluyentes, sobre todo en cuanto a la cuantificación del efecto de cada una de ellas sobre la flora marina; se muestran aquí las soluciones comúnmente adoptadas:

- Vertido directo al mar a través de ramblas y cauces. **Esta posibilidad puede ser la más adecuada en zonas de corrientes y vientos considerables**, ya que en zonas cercanas a la costa los oleajes y la mayor temperatura de las aguas favorecen la mayor dilución de las descargas de salmuera.
- Construcción de emisarios submarinos que sobrepasen la pradera de **Posidonia**. No está muy claro si el efecto de la obra necesaria para construir el emisario va a ser más perjudicial para la pradera que su vertido en la costa. Además, se han realizado estudios sobre la dilución de los emisarios submarinos construidos específicamente para una mejor mezcla con el agua marina, pero la experiencia de laboratorio ha demostrado grandes diferencias con respecto a la dilución real en los fondos marinos, debido fundamentalmente al efecto de las corrientes marinas, oleaje, condiciones del fondo, etc., difícilmente reproducibles en condiciones de laboratorio <sup>48</sup>.
- Utilización de emisarios ya existentes de aguas residuales. Se sabe que las aguas residuales urbanas (ARU) tienen un efecto más pernicioso para la flora marina que los rechazos de plantas

---

<sup>48</sup> Ruiz, A. El vertido al mar de las aguas de rechazo de las plantas desaladoras. I Congreso AEDyR. (2000).



desaladoras. Por lo tanto un mal menor puede ser verter dichos rechazos a colectores residuales o lugares anejos a ellos, en zonas ya previamente degradadas por el efecto de las ARU.

### **Otros vertidos**

Aunque no tienen la misma importancia que los vertidos de salmuera, gracias a la ínfima relación de volúmenes evacuados (la suma total de ellos no supone más del 1% del total), existen otro tipo de posibles vertidos en una planta desaladora por OI, que se resumen aquí:

- Agua de lavado de los filtros de arena: constituyen un agua muy cargada de arenas y materia orgánica.
- Productos de limpieza de las membranas. Su frecuencia depende del tipo de membrana, pero en general se realiza al menos una vez al año con detergentes de naturaleza biodegradable.
- Aditivos provenientes de los pretratamientos del agua bruta tales como floculantes, antiincrustantes, anticorrosivos y biocidas. Su carácter poco degradable hace que deban ser controlados.

A fin de que los efluentes cumplan con los requerimientos impuestos por la legislación vigente para su autorización de vertido conjuntamente con la salmuera, las modernas plantas desaladoras se han dotado de las instalaciones necesarias para su tratamiento: balsas de neutralización y tratamientos fisico-químicos de floculación-sedimentación con gestión adecuada de los fangos generados.

Y termino. A lo largo de esta intervención se ha puesto de manifiesto cómo la Química ha realizado una de las mayores contribuciones a la salud pública con la puesta a disposición de la sociedad de diferentes agentes de potabilización entre los que destacan el cloro y sus derivados; también ha sido capaz de detectar y corregir sus efectos adversos. La Química de Síntesis, en necesaria simbiosis con la Ingeniería Química, ha permitido no sólo regenerar el agua utilizada, sino lo que parecía imposible hace varias décadas: obtener elevadas cantidades de agua dulce a partir de agua de mar con un consumo mínimo de energía. No podemos detenernos aquí, se precisan nuevas aportaciones, como por ejemplo, integrar, a gran escala, los sistemas de desalación con energías renovables y ello sin olvidar la necesaria solidaridad con millones de seres de humanos que cada día se ven privados de la mínima cantidad de agua necesaria para su supervivencia.