Regeneración y reutilización de las aguas residuales

M. Carmen Trapote Forné y Begoña Martínez López

Regeneration and reuse of sewage

Estación Regeneradora de Aguas de Prat de Llobregat (Barcelona). Foto: EMSSA.

RESUMEN

El agua es un recurso escaso y muy necesario. Su ausencia puede ocasionar consecuencias no deseadas. El agua regenerada supone una herramienta más para afrontar la escasez de este recurso. Este tipo de agua surge del aprovechamiento del agua residual que, en lugar de ser devuelta al dominio público hidráulico terrestre o marino es reutilizada. La regeneración consiste en el tratamiento del agua depurada mediante tecnologías avanzadas, de modo que se consigue una calidad mínima, establecida por la legislación vigente para que pueda ser reutilizada en distintos ámbitos. Son muchos los usos y múltiples los beneficios que se derivan de este aprovechamiento. El presente artículo pretende resumir las técnicas de depuración, las tecnologías de reutilización y las principales aplicaciones del agua regenerada.

Encargado: 2 de marzo de 2012
Recibido: 15 de abril de 2012
Aceptado: 27 de abril de 2012

Palabras clave
Agua, aguas residuales, depuración, normativa, calidad, agua regenerada, reutilización del agua

ABSTRACT

The absence of water may cause unintended consequences. Reclaimed water is a key tool to face up to the scarcity of this resource. This type of water arises from the advanced treatment of wastewater, normally returned to public water land or sea. Reclamation consists of purification of water and subsequent treatment using advanced technologies, so as to provide a minimum quality, established by law in order to be reused in different areas. There are many uses and multiple benefits derived from such exploitation. This article aims to summarize the debugging techniques, technologies and key reuse applications for reclaimed water.

Commissioned: March 2, 2012
Received: April 15, 2012
Accepted: April 27, 2012

Keywords
Water, sewage, depuration, rules, quality, reclaimed water, water reuse

El fantasma de la sequía asoma en ocasiones, dejándonos a merced de la meteorología. Según la Agencia Estatal de Meteorología (Aemet), el mes de febrero de 2012 fue uno de los más secos desde el año 2000 con una precipitación media que no llegó al 30% de lo habitual.

Los océanos suponen el 97,5% del agua del planeta. Únicamente el 2,5% es agua dulce. Por su parte, los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce; el agua subterránea, el 19% y el agua de superficie rápidamente accesible, solo el 1%.

En situaciones prolongadas de escasez de agua, son múltiples los sectores que se ven afectados y también las consecuencias económicas derivadas de esta situación. La limitación de este recurso afecta a las reservas hídricas, pantanos, acuíferos y al medio ambiente. En consecuencia, menguan los caudales de los ríos, las reservas de los pantanos y se ve afectado su estado ecológico.

En España ya se han vivido varios episodios de sequía; sólo hay que recordar el que tuvo lugar en el año 2007. El otoño y el invierno de 2007 se presentaron como los más secos de la serie histórica en todo el arco mediterráneo, en la cabecera del Tajo y en la cuenca del Guadalquivir. Ese año la mayoría de los embalses y pantanos alcanzaron un nivel cercano o por debajo de la mitad de su capacidad (Magrama, 2007).

En marzo de 2007 se aprobaron Los Planes Especiales de Actuación en Situaciones de Alerta o Eventual Sequía para cada una de las cuencas hidrográficas, tal como se incluye en el artículo 27 de la Ley 10/2001 del Plan Hidrológico Nacional, con el objeto de minimizar los efectos ambientales, económicos y sociales derivados de posibles situaciones de sequía (Magrama, 2007).

La climatología en España, donde existen zonas de baja pluviometría y largos periodos de sequía, obliga a racionalizar y optimizar la gestión del recurso. Esta condición, junto con el aumento de la demanda, provoca la necesidad de buscar nuevos recursos complementarios o alternativos (Magrama, 2010).

Está claro que la conciencia social sobre el agua como un recurso finito cada vez está calando más en la sociedad, pero esto no parece ser suficiente. Es necesario pues, la búsqueda de alternativas que permitan contar con una herramienta más para mitigar los efectos que presenta la escasez de dicho recurso, entre ellas la regeneración y reutilización de agua depurada.

Precisamente por estas razones, y teniendo en cuenta la problemática que todo esto supone, en este artículo se presenta un tipo de agua que resulta poco conocida para muchos, pero que puede ser clave y una alternativa para otros cuantos.

El ciclo del agua

Para tener una idea de la cantidad de recurso del que se dispone en una zona geográfica concreta, se debe calcular el balance hídrico. El cálculo del balance se obtiene como resultado de la diferencia entre el aporte anual de agua, es decir, las entradas al sistema en forma de precipitación, aportaciones de los ríos, acuíferos y trasvases, y las pérdidas anuales de agua, es decir, agua irrecuperable, cuyo destino es la atmósfera o el mar (Mujeriego, 2005).

Dentro del ciclo habitual del uso del agua, esta ha sido utilizada, depurada y devuelta al río o al mar, de ese modo, el agua vuelve a su origen. Este último paso no supone ningún problema en momentos de abundancia de agua en los que el sistema disfruta de entradas por precipitación y contiene suficientes reservas de acuíferos y embalses, pero cuando el sistema experimenta más salidas que entradas y los recursos hídricos se van agotando, el hecho de cerrar el ciclo, devolviendo el agua depurada al sistema, implica más salidas que entradas y, en consecuencia, la aparición de un déficit que, en situaciones prolongadas, puede llegar al estado de sequía.

Pues bien, si en lugar de cerrar el ciclo, se recupera el agua que ya ha sido utilizada, aumentará la disponibilidad de agua para su aprovechamiento a lo largo del tiempo, y de ese modo se verá amortiguado, en parte, el déficit y retrasará las consecuencias de la falta de este recurso.

La reutilización de aguas residuales es una práctica histórica, necesaria por la escasez estacional y/o estructural de agua en muchas regiones y por la necesidad de gestionar mejor los recursos hídricos disponibles. Con la utilización del agua depurada se obtiene un recurso no convencional que permite liberar agua de mejor calidad para otros usos. Se trata, pues, de potenciar el desarrollo sostenible, proporcionando un recurso escaso y necesario como es el agua, a la vez que se mantiene un equilibrio con la protección de la salud humana y el medio ambiente.

Así pues, se debe entender la regeneración y la reutilización de agua como un incremento real de los recursos hídricos aprovechables en una zona, teniendo en cuenta que, de otro modo, esos recursos se pierden de forma irrecuperable, mediante su vertido al mar o al cauce del río (Mujeriego, 2005).

Conceptos básicos

Agua regenerada, agua depurada y reutilización, tres palabras que vale la pena definir. En el RD 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, se puede encontrar la definición y la diferencia de estos conceptos parecidos.

Se define como aguas depuradas aquellas aguas residuales que han sido sometidas a un proceso de tratamiento que permite adecuar su calidad a la normativa de vertidos aplicable, (RD 509/1996 del 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas). Se entiende como aguas regeneradas aquellas aguas residuales depuradas que han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan. El agua regenerada implica depuración, con el objetivo de volver a ser utilizada, mientras que el agua depurada, a diferencia de la regenerada, no siempre opta a ser reutilizada, sino que su destino es el de ser vertida al dominio público hidráulico o al marítimo terrestre, según convenga.

Llegados a este punto es conveniente definir el concepto de reutilización de agua. Se entiende como reutilización de aguas la aplicación, antes de su devolución al medio, para un nuevo uso privativo, de las aguas, que habiendo sido utilizadas por quien las derivó, se han sometido al proceso o procesos de depuración establecidos necesarios para alcanzar la calidad requerida en función de los usos a que se van a destinar (RD 1620, 2007).

Proceso de depuración

El agua cruda procedente del alcantarillado, una vez entra en la estación depuradora de aguas residuales (EDAR), pasa por una serie de procedimientos comunes, al inicio, por el pretratamiento y tratamiento primario y, posteriormente, según las necesidades y el destino de esta, por el tratamiento secundario, que puede variar en tipología de proceso y cantidad de agua que tratar.

Pretratamiento

El pretratamiento comprende una serie de tratamientos físicos que pretenden separar, del agua residual, aquellos sólidos más groseros que, posteriormente pueden acarrear complicaciones mecánicas en la planta, ya sea por tratarse de sólidos de gran volumen o arenas pesadas de baja granulometría que sedimentan en canales y conducciones. Estos últimos pueden erosionar aparatos mecánicos; por eso es necesaria su eliminación previa.

Es conveniente que, en primer lugar, la EDAR posea un pozo para la separación de grandes sólidos que irá seguido de rejas colocadas en serie, cuya separación entre barrotes disminuye a medida que el agua avanza, es decir, pasando de rejas a tamices. Para eliminar arenas se habla de desarenadores, que consisten en canales por los cuales circula el agua a una determinada velocidad (en algunos casos con aireación) y que se ayudan de elementos mecánicos (tipo bombas o rasquetas) que eliminan las arenas que se van acumulando en el fondo.

Tratamiento primario

A continuación, se encuentra el tratamiento primario, que tiene como finalidad principal la reducción de sólidos en suspensión (SS). Este proceso está compuesto por decantadores primarios en los que el agua proveniente del pretratamiento, permanece durante un tiempo, diferente para cada caso, pero que suele comprender entre 1,5 y 2,5 horas. (Metcalf & Eddy, 2000). El rendimiento de este tipo de tratamientos se mide en reducción de SS, y es conveniente que esta se sitúe en entre el 50% y el 70% (Metcalf & Eddy, 2000). Se ha de tener en cuenta que, junto con los SS, se elimina parte de la materia orgánica que se encuentra agregada a los sólidos.

Tratamiento secundario

Llegados a este punto, el agua, continúa hacia el tratamiento secundario, que tiene como fundamento acelerar el proceso biológico que se daría en la naturaleza. Cada EDAR, en función de diferentes criterios, costes de construcción, costes de explotación, calidad requerida en el efluente, capacidad de tratamiento necesaria, aspectos socio-económicos, debe escoger la tecnología que mejor se adapte.

A continuación, se muestran las tecnologías de tratamiento biológico más utilizadas.

La más conocida de ellas es el tratamiento mediante fangos activos. Este consiste en mezclar, en un reactor, agua residual que depurar con la biomasa suspendida mediante agitación y aireación. La acción depuradora de los microorganismos es la que lleva a efecto el trabajo. Por tanto, es importante controlar las condiciones del reactor con el objetivo de asegurar que el proceso se lleva a cabo correctamente. En este tipo de procesos se debe asegurar el control de la entrada de contaminantes tóxicos, o condiciones que puedan desplazar las bacterias depuradoras, ya que esto puede desequilibrar totalmente el proceso. La etapa final es un decantador en el que agua clarifica completamente. Existen diferentes configuraciones de este mismo proceso, pero la variante más conocida es el flujo pistón. En este tipo de reactores la geometría es alargada y el reactor se encuentra compartimentado, de tal manera que la materia orgánica se va degradando a medida que avanza. Vale la pena mencio-

nar también los sistemas MBR (biorreactor de membranas). Estos son sistemas en los que la etapa de decantación ha sido sustituida por una filtración, normalmente, con membranas de microiltración o ultrafiltración. Estas filtran el agua eliminando el resto de contaminantes y nutrientes que los microorganismos no hayan eliminado previamente. La calidad de agua derivada de este proceso resulta superior a la de los fangos activos convencionales. Los SBR (Sequencing Batch Reactor) consisten en un sistema de tratamiento de fangos activos cuyo funcionamiento se basa en la secuencia de tratamiento llevada a cabo en ciclos de llenado, depuración y vaciado. La diferencia principal con los fangos activos es que el tratamiento ocurre secuencialmente en el mismo tanque. Ocupan muy poca superficie y generan un efluente de buena calidad.

También se encuentran, dentro del tratamiento secundario, las tecnologías que utilizan la fijación de biopelículas para llevar a cabo este tratamiento biológico. Estos son los sistemas IFFAS (Integrated Fixed Film Activated Sludge), filtros percoladores y biodiscos.

En los sistemas IFFAS, la biomasa se encuentra fijada en piezas de aproximadamente 2,5 cm de diámetro, normalmente circulares, y diseñadas específicamente para que la adhesión de la biomasa y su efecto sea el mejor posible. Estas piezas se encuentran suspendidas en el reactor que suele estar agitado mediante aireación.

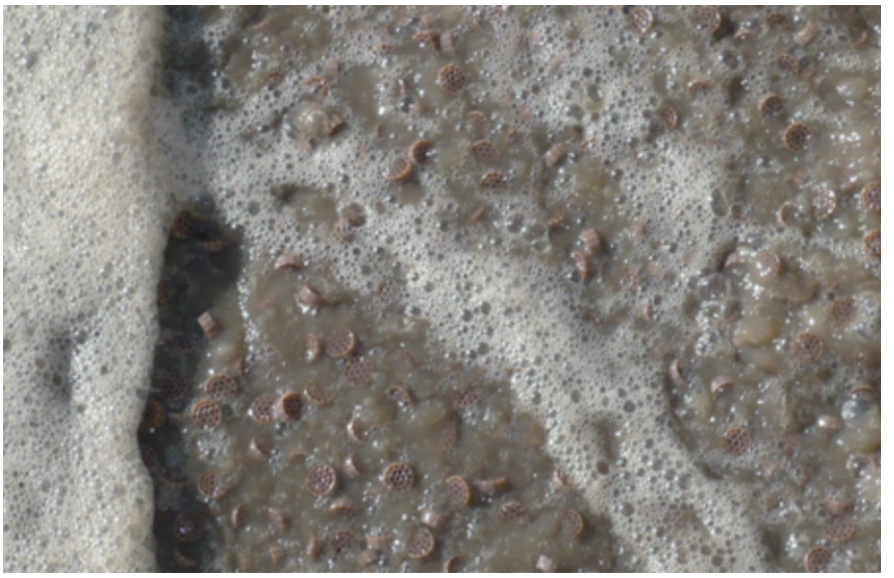


Figura 1. Tratamiento de agua residual mediante el sistema IFFAS. (imagen facilitada por EMSSA).

En los filtros percoladores, a diferencia de los sistemas IFFAS, los materiales de relleno se encuentran fijos. La biopelícula los recubre y el agua se infiltra a lo largo de la disposición de este relleno. Durante el paso del efluente los microorganismos llevan a cabo su función. Por último, cabe destacar que los biodiscos son una buena opción para aquellas estaciones en las que el caudal que depurar no es muy grande, ya que resulta un sistema compacto y fácil de

Tabla 1. Resumen de las características de los tratamientos secundarios.
He: habitante equivalente. Equivale a la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO_5) de 60 g de oxígeno por día, utilizado para dimensionar EDAR.

		Fangos activos	MBR	IFFAS	Filtros percoladores	Biodiscos	Lagunaje	Filtros verdes	Infiltración percolación modificada	Zonas húmedas
Tipo de tecnología		Sistema convencional. Biológico	Sistema convencional, filtración con membrana. Biológico	Sistema convencional. Biológico	Sistema convencional. Biológico. Medio de soporte fijo. Tratamiento aerobio	Sistema Convencional. Biológico. Tratamiento Aerobio. Cultivo fijo sobre un soporte giratorio	Sistema no convencional	Sistema no convencional	Sistema no convencional	Sistema no convencional
Características de la biomasa		Biomasa suspendida	Biomasa suspendida	Biomasa fijada / suspendida	Biomasa fijada	Biomasa fijada	Biomasa suspendida	Biomasa fijada	Biomasa fijada	Biomasa fijada
Capacidad (he)		> 1.500	> 1.500	> 1.500	300-2.000	300-2.000	100-2.000	100-400	200-1.300	50-1.000
Extensión (m^2/he)		0,2-1	> 1	0,2-1	0,2-0,7	0,5-0,7	10-15	8-40	1,2-3	2-6
Tiempo de retención (h)		5-8	10-17	6-9	Horas	1-4	Desde 38 días hasta 226 días	Días	Horas/días	Días
Límites de eliminación	DBO_5 (mg/l)	> 25	8	5	20-30	20-35	30-40	< 5	25	20-25
	SS (mg/l)	> 25	8	15	20-35	30	30-100	< 5	30	20-30

manejar. En estos sistemas la biomasa se encuentra fijada en unos discos montados sobre un eje rotatorio, dispuestos horizontalmente. Mediante la rotación, el conjunto de discos situados en paralelo, está expuesto alternativamente al aire y al agua que depurar. El paso del agua a lo largo de la disposición de los discos y el giro de los mismos con los microorganismos adheridos llevan a cabo la depuración.

A diferencia de las tecnologías anteriormente citadas, denominadas tecnologías convencionales, se puede recurrir a otro tipo de tecnologías adaptadas fundamentalmente a pequeñas comunidades. Son las denominadas tecnologías naturales (también conocidas como extensivas, blandas o de bajo coste energético). Entre ellas se encuentrn los sistemas de lagunaje. Se basan en hacer pasar el agua a través de lagunas en serie con geometrías y funciones específicas en las que se desarrollan interacciones entre el agua y el ecosistema. Es el sistema de depuración más antiguo y conocido (CSIC, 2008). Los filtros verdes o sistemas suelo-planta acuífero utilizan un terreno sobre el que se establece un cultivo vegetal determinado y al que se le aplica el agua residual, de modo que el efecto filtro del terreno y de las plantas son los que llevan a cabo la depuración.

También cabe mencionar la infiltración percolación modificada, que es un sistema de depuración aerobio con biomasa fijada y de alimentación secuencial que consiste en infiltrar de forma controlada aguas residuales a razón de algunos centenares de litros por metro cuadrado y día. Está compuesto por un macizo filtrante de 1,50 m de profundidad de arena aportada (el 98% de granulometría y < 1 mm de diámetro).

Son comunes también las zonas húmedas, o también llamados humedales construidos, son sistemas de depuración construidos por lagunas o canales poco profundos (de menos de 1 m) plantados con vegetación propia de zonas húmedas y en los que los procesos de depuración tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos y la vegetación enraizada.

En la tabla 1 se muestra un resumen de los tratamientos biológicos y sus características más relevantes.

El tipo de tratamiento y diseño de una EDAR se determina en función de la carga contaminante, estimada a partir de los habitantes equivalentes.

Los rendimientos que cada tecnología ofrece, deben ser estudiados con especial interés con la finalidad de alcanzar las calidades de vertido.

Figura 2. Esquema de una estación depuradora de aguas residuales (imagen facilitada por EMSSA).

Para llevar a cabo el proceso de regeneración y cumplir con las calidades establecidas, es necesario tratar el efluente de salida de la EDAR. La calidad exigida en el efluente de una estación depuradora está legislada tanto en Europa como en España. Los documentos clave son la directiva 91/271 CE y el RD 509/1996 y tienen en cuenta los parámetros de las tablas 2a y 2b:

Tratamientos avanzados

El proceso de tratamiento necesario para que un agua depurada pueda ser reutilizada se denomina regeneración.

Para la regeneración de aguas las calidades establecidas por el RD 509/1996

Tabla 2a. Resumen de los requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas. Se aplica el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetro	Concentración	Porcentaje de reducción mínimo
DBO	25 mg/l O_2	70-90 40 (en regiones de alta montaña)
DQO	125 mg/l	75
Total de sólidos en suspensión	35 mg/l (para más de 10.000 he) 65 mg/l (de 2.000 hasta 10.000 he)	90 90 (para regiones de alta montaña hasta 10.000 he) 70 (en regiones de alta montaña de 2.000 hasta 10.000 he)

Tabla 2b. Resumen de los requisitos de los vertidos de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles cuyas aguas sean eutróficas o tengan tendencia a serlo en un futuro próximo. Según la situación local, se podrá aplicar uno o ambos parámetros. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetro	Concentración	Porcentaje de reducción mínimo
Fósforo total (P)	2 mg/l (de 10.000 hasta 100.000 he) 1mg/l (más de 100.000 he)	80
Nitrógeno total (N)	15 mg/l (de 10.000 hasta 100.000 he) 10 mg/l (más de 100.000 he)	70-80

antes mencionadas no son suficientes. El RD 1620/2007 establece, en su anexo I, las calidades requeridas en función del uso de destino. En todos los usos descritos es necesario someter al efluente de salida de la EDAR a tecnologías avanzadas, muchas de las tecnologías utilizadas actualmente derivan de tecnologías existentes en el tratamiento de aguas potables. La selección de los procesos y tecnologías necesarias para la regeneración de las aguas residuales implica el conocimiento previo del tipo de efluente que tratar, su calidad en el tiempo y la calidad exigida al agua regenerada (Asano, 1998).

A continuación se presentan los tratamientos avanzados más utilizados para la regeneración de agua.

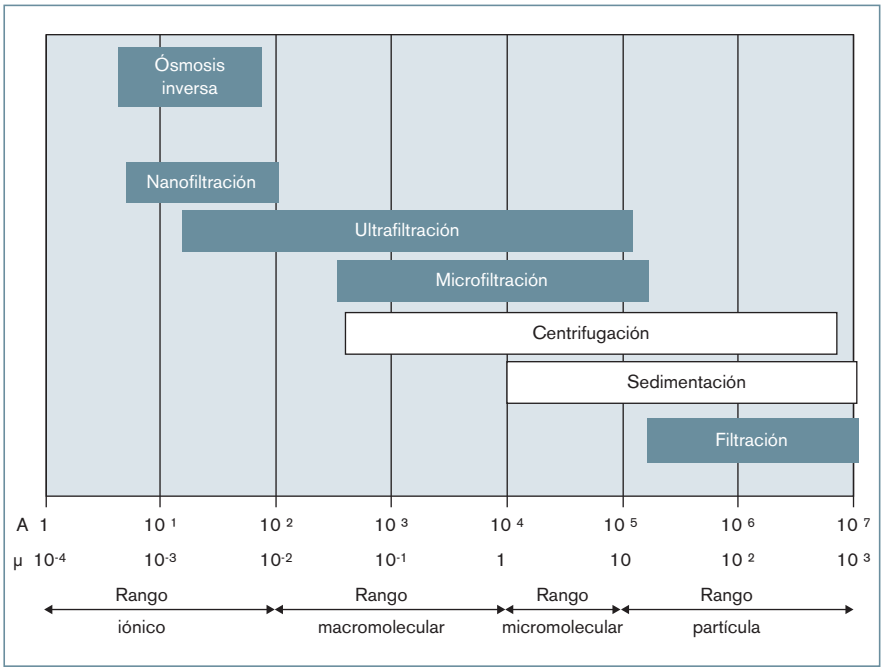


Figura 3. Rangos efectivos de separación (modificada de UdG, 2007).

Coagulación-floculación

Este tratamiento se basa en la adición de sustancias químicas combinadas con la acción física de un decantador. Es un proceso en el que las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamadas flóculos, con el fin de que su peso específico supere el del agua y así puedan precipitar.

El agua depurada se trata en primer lugar con un coagulante. En este proceso la materia disuelta que no se ha podido decantar con anterioridad pasa a ser una sustancia no soluble. El efecto más importante del coagulante es la formación de puentes químicos que provocan la adsorción de coloides. Una agitación lenta favorece este proceso. Los productos más utilizados como coagulantes son sales metálicas, como policloruro de aluminio, sulfato de aluminio o cloruro férrico (este último da un color rojizo al agua). Es importante tener en cuenta la sensibilidad que estas sales tienen hacia variaciones de pH, si no se aplican dentro del rango adecuado la clarificación es pobre y el hierro o el aluminio pueden solubilizarse.

A continuación, se añade un floculante que se caracteriza por poseer una larga cadena de moléculas cargadas, capaz de agregar los coloides anteriormente formados. Las moléculas, ya desestabilizadas, entran en contacto, agrandando los flóculos y facilitando más la precipitación. La separación flóculo-agua se realiza mediante decantación.

Filtración

Se utilizan también los tratamientos de filtración a través de soportes convencionales, estos son: los filtros de arenas, filtros de anillas y filtros tamiz. El principio en que se basan es el paso del efluente a través de arena, anillas o tamices filtrando el agua y reteniendo partículas y sólidos en suspensión. Dependiendo de la tipología de filtro que se escoja para el tratamiento, la eliminación de sustancias y SS variará. Sus resultados dependerán del efluente de entrada, del mantenimiento y del sistema de lavado del que dispongan.

Procesos de membrana

Los procesos de membrana son una tecnología de vanguardia y están siendo muy utilizados en los tratamientos avanzados del agua. Son tecnologías no destructivas, basan el tratamiento del agua en la separación de los contaminantes / microcontaminantes mediante el paso selectivo del agua a través de membranas semipermeables (CSIC, 2008). Los sólidos presentes en el agua no siempre aparecen como materia en suspensión; también pueden aparecer como materia coloidal que debe ser eliminada, y para su remoción la tecnología convencional no es suficiente.

Los procesos de membrana más conocidos para el tratamiento de aguas son la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF) y nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (OI).

En la figura 3 se presentan los rangos efectivos de separación de los procesos de membrana y se comparan con otras técnicas de separación.

Se observa que dependiendo de la tecnología empleada se pueden separar desde sólidos hasta compuestos solubles. Una de las grandes dificultades que se suelen encontrar en los procesos de membrana es la baja transferencia de masa por unidad de área de membrana.

En el caso de las filtraciones (MF, UF y NF) las partículas y los coloides se separan según la medida del poro aplicando una presión elevada. Así pues, la diferencia entre estas técnicas es la medida del poro.

La microfiltración elimina los sólidos en suspensión de tamaño superior a 0,1 μm. Es efectiva eliminando patógenos de gran tamaño, como *Gyardia* o *Cryptosporidium*. Se puede emplear cuando la concentración de sólidos totales en suspensión en el efluente no es problemática. También se utiliza como pretratamiento de sistemas con membranas más delicadas como la ósmosis inversa o la nanofiltración. La presión de trabajo se encuentra entre 0,4 y 2 atm. La ultrafiltración elimina esencialmente todas las partículas coloidales y alguno de los contaminantes disueltos más grandes (0,01 μm) y también la mayor parte de microorganismos patógenos. Estos sistemas, del mismo modo que la MF, se suelen utilizar como pretratamiento para sistemas de nanofiltración u ósmosis inversa. El agua tratada mediante este sistema tiene una turbidez prácticamente nula. La presión de trabajo en este caso es de 0,8-3,5 atm. La nanofiltración elimina los contaminantes de tamaño superior a 0,001 μm. Se emplea cuando se quiere eliminar prácticamente la totalidad de los sólidos disueltos. Se eliminan también los iones de calcio y magnesio, que son los que aportan la dureza al agua. Por

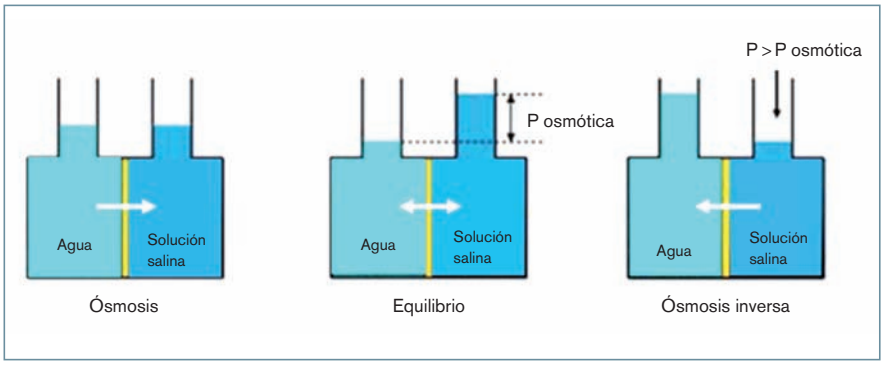


Figura 4. Secuencia de imágenes que explican el proceso de ósmosis inversa (UdG, 2007).

Figura 5. Vista general de bastidores de ósmosis, módulos de membranas en espiral (imagen cedida por EMSSA).

este motivo también se puede oír hablar de ablandamiento por membrana en lugar de nanofiltración. Los iones con dos cargas positivas se eliminan más efectivamente que aquellos que tienen solo una, como el sodio, el potasio y el cloro, entre otros. La presión de operación en este caso es mayor que las filtraciones anteriores llegando hasta 3,5 y 10 atm.

En la tabla 3 se muestran, de manera resumida, los contaminantes que se pueden separar con estas de las tecnologías de membrana.

La ósmosis es un proceso físico natural que consiste en el paso de un fluido, agua en este caso, a través de una membrana semipermeable, es decir, deja pasar moléculas de pequeño tamaño y no solutos de mayor tamaño. Es un proceso espontáneo y reversible que se produce a temperatura ambiente. La membrana selectiva permite el paso del solvente en un porcentaje mucho más elevado que los sólidos disueltos. Cuando dos fluidos están separados por una membrana semipermeable, el fluido que contiene menor concentración se mueve a través de la membrana hacia el fluido que contiene mayor concentración. Este movimiento del solvente (agua) a través de la membrana, para buscar el equilibrio, es conocido como ósmosis. Pasado un tiempo el nivel de agua es mayor en uno de los lados de la membrana. A esta diferencia de altura se le denomina presión osmótica.

Si se aplica en la columna del fluido más concentrado una presión superior a la osmótica, se obtiene el efecto inverso, es decir, el fluido es presionado de vuelta a través de la membrana, pero los sólidos disueltos permanecen en la columna. Este fenómeno se aprecia en la figura 4, y es el principio en el que se basa la ósmosis inversa.

Una de las principales aplicaciones de la ósmosis inversa es la desalación de aguas. La presión osmótica que es necesario aplicar depende de la concentración en sales de la solución. Para la mayoría de los casos de aguas depuradas, en los que la concentración en sales se encuentra entre 1.000 y 10.000 mg/l la presión se encuentra entre 1 y 15 bares. En la ósmosis inversa el agua se bombea a alta presión hacia la membrana. Este proceso da lugar a una corriente de solvente que se difunde a través de la membrana denominado permeado. Por otro lado, existe otra corriente concentrada en sales que contiene el soluto y solvente que no ha atravesado dicha membrana y que se denomina salmuera o rechazo.

Las membranas de ósmosis inversa se componen de una fina capa de material polimérico depositada sobre un soporte. Se ha de considerar la permeabilidad de la membrana al agua y a los iones, teniendo en cuenta que el transporte de agua debe ser muy superior al de los iones. La estabilidad a cambios de pH y temperatura, además de la capacidad de soportar elevadas presiones, son parámetros muy importantes a la hora de escoger una membrana.

Existen diferentes tipos de configuraciones para este proceso; los más habituales son los módulos en espiral y los módulos de fibra hueca. Los módulos en espiral poseen una elevada superficie por unidad de volumen.

Tabla 3. Resumen de características principales de la MF, UF, NF y OI.

		Microfiltración (MF)	Ultrafiltración (UF)	Nanofiltración (NF)	Ósmosis inversa (OI)
Presión (atm)		0,4-2	0,8-3,5	3,5-10	> 10
Tamaño de poro (µm)		0,1-20	0,001-0,1	0,001-0,01	< 0,001
Contaminantes	Sólidos en suspensión	Sí	Sí	Sí	Sí
	Sólidos disueltos	No	No	Algunos	Sí
	Bacterias y protozoos	Sí	Sí	Sí	Sí
	Virus	No	Sí	Sí	Sí
	Materia orgánica disuelta	No	No	Sí	Sí
	Hierro y manganeso	Sí, si se oxida	Sí, si se oxida	Sí	Sí
	Dureza	No	No	Sí	Sí

En ocasiones, es importante llevar a cabo un tratamiento previo para adecuar la solución influente.

Electrodiálisis reversible

Otra tecnología habitualmente utilizada es la electrodiálisis reversible (EDR). Es un proceso de separación electroquímico en el cual los iones son transferidos a través de membranas de una solución menos concentrada a otra de mayor concentración, como resultado de una corriente eléctrica continua.

Las membranas que hacen de ánodo y las que hacen de cátodo se disponen de manera alterna tal como se observa en la figura 6. En los extremos de estas pilas se encuentran los electrodos que son los responsables de aplicar la diferencia de potencial.

Las membranas catiónicas solo permiten el paso de iones positivos y las aniónicas de iones negativos. El resultado es la obtención de un efluente concentrado y uno diluido (permeado). La purificación del agua se realiza únicamente en lo que a su contenido en sales se refiere. El grado de purificación que se desee depende del potencial eléctrico aplicado. Para que la membrana sea eficiente es habitual que la polaridad de los electrodos se invierta cada cierto tiempo (diferente según las características de la membrana). Es lo que se conoce como electrodiálisis reversible.

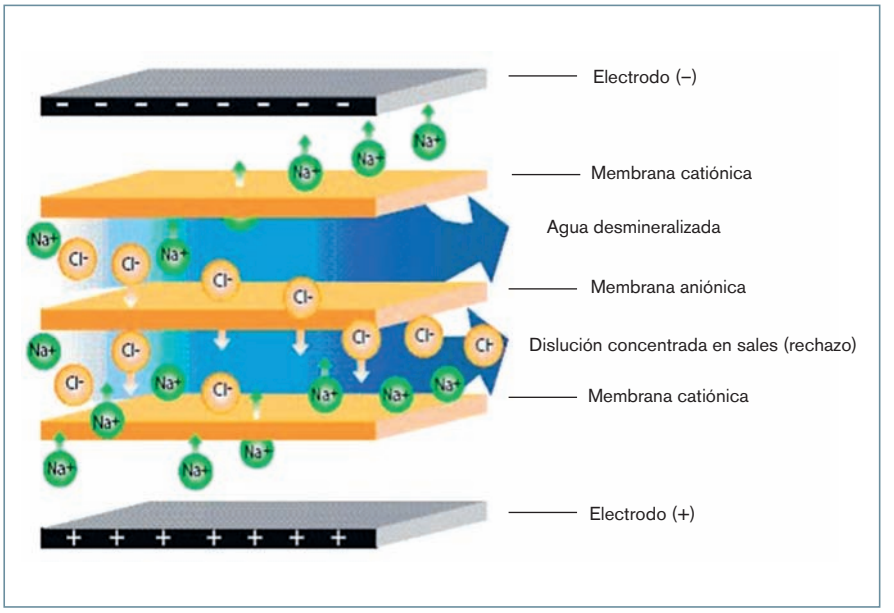


Figura 6. Esquema de una pila de electrodiálisis reversible (Ionics, 2012).

Desinfección

Finalmente, y con el objetivo de garantizar la seguridad y la calidad del agua regenerada, se llevan a cabo diferentes procesos de desinfección en función del objetivo de calidad.

El agua regenerada debe llegar a su destino en las condiciones de calidad y desinfección exigidas. Es responsabilidad del productor de agua regenerada que esta llegue al usuario final en las condiciones establecidas por la ley. La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos que producen enfermedades (Metcalf & Eddy, 2000).

Las características que se han de tener en cuenta para elegir un buen mecanismo de desinfección son:

1. Eficacia: debe ser capaz de desinfectar en la medida que se necesita (una menor eficiencia en la desinfección no sería aceptable).

2. Asequible económicamente: no es viable la utilización de un método excesivamente caro de desinfección.

3. Disponible: el suministro y almacenamiento deben estar garantizados.

4. Ausencia de subproductos: no debe dejar en el agua características no deseadas (olores, sabores...).

5. Carácter residual: indica el mantenimiento de un nivel de desinfección correcto (Magrama, 2010).

La desinfección la pueden llevar a cabo agentes químicos, de los cuales destacan los productos químicos oxidantes. La utilización de derivados de cloro es la opción más empleada y entre ellos el más conocido es el NaClO (hipoclorito de sodio). Suele estar valorado muy positivamente por su facilidad de manipulación y por su carácter residual (remanente de cloro en el agua).

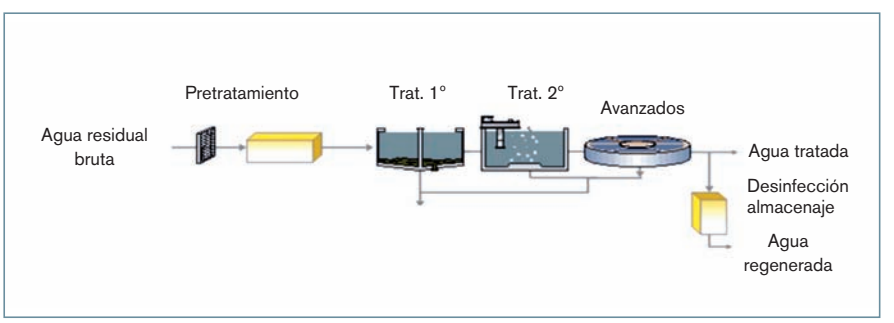
Se utiliza a pesar de generar subproductos, tales como trihalometanos en presencia de materia orgánica.

Como alternativas destacadas, existe el empleo de Cl_2O (dióxido de cloro), que es un oxidante efectivo y que empleado en aguas con fenoles elimina los problemas de olores. Sin embargo, al mismo tiempo, tiene el inconveniente de que oxida un gran número de compuestos e iones, como hierro, manganeso y nitritos. Se tiene que generar in situ debido a su inestabilidad y no genera subproductos en cantidad apreciable. Se considera un buen biocida. Al contrario que el hipoclorito, no tiene carácter residual.

En el caso de la ozonización, lo habitual es que el ozono se produzca in situ, debido a su intensidad, mediante un generador. Dependiendo de si la alimentación se hace con aire seco u oxígeno, el porcentaje en volumen de ozono respecto al oxígeno varía; es mayor para el segundo caso (CSIC, 2008). Las microburbujas de ozono reaccionan con la materia orgánica, oxidándola y creando una reacción con radicales. De este modo, actúa principalmente contra virus y bacterias. Al mismo tiempo, reduce los olores, no genera sólidos disueltos adicionales y aumenta la oxigenación del efluente. Se recomienda para efluentes con baja concentración de materia orgánica, a pesar de no poseer carácter residual.

La desinfección también puede llevarse a cabo mediante agentes físicos, los

Figura 7. Esquema resumen de la línea de agua de una estación depuradora de aguas residuales (UdG, 2007).



País	Localización	Tipo de instalación	Descripción	Capacidad de terciario m^3/día
España	Adeje Arona, Tenerife	Desaladora	Se está llevando a cabo la segunda fase de incremento de agua de tratamiento terciario. El agua tratada se destinará a uso agrícola	16.000
	El Chorrillo, Tenerife	EDAR	Nueva EDAR con 8.000 m^3/día de capacidad de tratamiento terciario	8.000
	Los Letrados, Tenerife	EDAR	Nueva EDAR, con tecnología dedicada al tratamiento terciario	No especificada
	San Agustín de Guadalix, Madrid	EDAR	Aumento de la capacidad del tratamiento terciario. El agua regenerada se destinará a uso municipal	2.500
Israel	Drom Sharon Mizrachi	EDAR	Mejora y aumento de la EDAR existente con incorporación de tratamiento terciario. El agua del terciario se destinará a agricultura	12.000
	Na'am Industrial Park	EDAR	Mejora y aumento de la EDAR existente con incorporación de tratamiento terciario. El agua del terciario se destinará a agricultura y riego de jardines urbanos	27.397
India	Solapur	EDAR	Construcción de 3 nuevas EDAR	75.000; 15.000; 12.500
	Koyambedu Ro, Tamil Nadu	EDAR	Incorporación de ósmosis inversa a la planta para tratar agua que se destinará a usos industriales	45.000

Tabla 4. Algunos de los proyectos de regeneración previstos en diferentes partes del mundo.

tratamientos con membranas, anteriormente mencionados, también pueden considerarse un sistema de desinfección. Otro tratamiento de desinfección mediante agentes físicos es la radiación ultravioleta (UV). A diferencia de los anteriores, que son métodos químicos, este es físico, lo cual implica la ausencia de carácter residual. La luz ultravioleta es la más energética del espectro de luz con longitudes de onda entre el visible (400 nm) y los rayos X (100 nm) (CSIC, 2008). Se basa en la acción de una parte del espectro electromagnético sobre ácidos nucleicos y proteínas. De este modo, los microorganismos y los patógenos que se encuentren en el agua resultan inactivados. Se emplea la radiación a 253,7 nm que se considera la más adecuada. Es activo especialmente contra bacterias y virus. Se debe evitar cualquier tipo de coloración en el agua y los sólidos en suspensión del efluente deben estar en bajas concentraciones, ya que, de esta forma, la penetrabilidad de la luz es mayor para la lámina de agua que se quiere tratar y se consigue un mejor mantenimiento de las lámparas. Las fuentes de radiación UV habituales son lámparas de vapor de mercurio de baja o media presión y lámparas de arco de xenón (CSIC, 2008).

Contexto legal

No existe legislación europea sobre reutilización de aguas regeneradas. La única referencia europea es el artículo 12, de la directiva 91/271 sobre tratamiento de aguas residuales. En este se indica que el agua residual tratada será reutilizada cuando sea apropiado; sin embargo, no específica qué se entiende por apropiado.

La directiva 91/271 es una disposición normativa de derecho comunitario que vincula a los Estados miembros a cumplir una serie de objetivos en un plazo determinado, dejando a las autoridades internas competentes, la elección de la forma y los medios adecuados para tal fin.

Hay diversos Estados miembros que disponen de legislación al respecto. Uno de ellos, España, con el RD 1620/2007, otros como Francia, se basan en recomendaciones, que siguen en esencia las establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Son variadas las formas y estándares que se consideran dentro de los diferentes Estados que componen la Unión Europea. En Italia, por ejemplo, se establecieron nuevos estándares para la reutilización mediante la elaboración de un decreto ministerial. Este resulta bastante restrictivo y en algunos casos la calidad exigida es la misma que para el agua potable. En cambio, en otros países, como Estados Unidos, la regeneración y la reutilización de agua residual están perfectamente implantadas. California, es uno de los Estados pioneros en este campo.

En 2004 se publicó la actualización del manual editado por la EPA (Environmental Protection Agency) sobre la reutilización de aguas residuales. No hay una legislación específica en Estados Unidos, cada Estado puede establecer sus propias limitaciones. Para el caso de California, estas limitaciones son bastante estrictas (Huertas, 2009).

Otros países como Israel, donde el agua es un bien muy escaso, la aparición de su primera legislación con relación a la reutilización, tuvo lugar en 1948 (Huertas, 2009).

Actualmente, son muchos los países que consideran la reutilización de agua una herramienta más para la gestión de este recurso y que disponen de las instalaciones y la tecnología para llevarlo a cabo. Afortunadamente, también son muchos aquellos países que se plantean la reutilización y que están llevando a cabo proyectos de implementación de tecnologías, ampliación de estaciones ya existentes e instalación de procesos destinados a ello. En la tabla 4, se muestra a modo de ejemplo, alguno de los proyectos que se están llevando a cabo o que se encuentran en fase de elaboración en diferentes partes del mundo.

En España: El RD 1620 y las calidades exigidas

En el ámbito comunitario, en la Directiva Marco de Aguas (DMA) se incluye la reutilización del agua entre las medidas complementarias que se pueden

Uso	Descripción	Nematodos intestinales (huevos/10 l)	E. Coli (UFC/100 ml)	SS (mg/l)	Turbidez (UNT)
Urbano	Riego de jardines privados	1	Ausencia	10	2
	Riego de zonas verdes urbanas	1	200	20	10
Agrícola	Riego de productos con contacto directo con la parte comestible de la planta (consumo no fresco)	1	1.000	35	No se fija límite
	Riego de productos agrícolas en que el agua tenga contacto directo con la parte comestible de la planta	1	100	20	10
Industrial	Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria	No se fija límite	10.000	35	15
	Torres de refrigeración y condensadores evaporativos	1	Ausencia	5	1
Recreativo	Riego de campos de golf	1	200	20	No se fija límite
Ambiental	Recarga de acuíferos por percolación localizada a través de terreno	No se fija límite	1.000	35	No se fija límite
	Recarga de acuíferos por inyección directa	1	0	10	2

Tabla 5. Resumen de algunos de los usos más comunes y calidades para aguas regeneradas (RD 1620/2007). UFC: unidades formadoras de colonias. UNT: unidades nefelométricas de turbidez.

incluir en el programa de medidas a aplicar en cada demarcación hidrográfica con el fin de cumplir los objetivos establecidos en el artículo 4 de la DMA (Magrama, 2010).

El 7 de diciembre de 2007 se aprueba en el Consejo de Ministros, el Real Decreto 1620, por el que se establece el régimen jurídico de aguas regeneradas, y el Ministerio de Medioambiente, Medio Rural y Marino publica su *Guía Práctica de Aplicación* en el año 2010.

En el artículo 2 de este RD se definen una serie de conceptos ya mencionados en la introducción del presente documento que facilitan la comprensión del texto. Destaca la definición de reutilización y la introducción del concepto de agua regenerada.

En esta norma se tratan también los aspectos relativos al régimen jurídico, tales como el título requerido para su uso, los procedimientos de obtención de la concesión y/o autorización y los contratos de cesión de derechos. Finalmente, establece las condiciones de calidad que debe cumplir el agua para su uso, indicando los usos permitidos y los prohibidos y el régimen de responsabilidades con relación al mantenimiento de la calidad (Magrama, 2010).

El anexo I, del RD, fija los valores máximos admisibles de los parámetros en función de los usos a los que está destinada el agua regenerada. En la tabla 5, se muestran algunos de los usos más comunes y sus parámetros de calidad. Se distinguen 5 grandes grupos: urbano, agrícola, industrial, recreativo y ambiental.

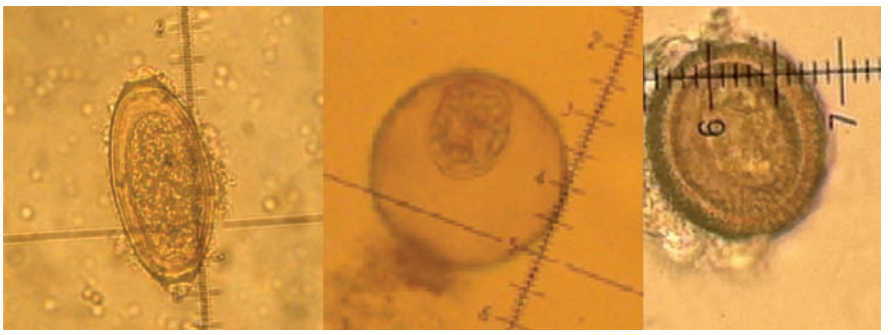


Figura 8. Huevos de helminto en aguas residuales: *Trichuris, Hymenolepis, Taenia.*

En este mismo anexo, se establece, además, la frecuencia y los métodos de análisis de los parámetros para valorar el cumplimiento de los requerimientos de calidad y establecen los criterios de conformidad y las medidas de gestión frente a incumplimientos (Magrama, 2010).

En el anexo II, del RD, se incluye el modelo de solicitud y autorización, que recoge toda la documentación requerida para poder reutilizar el agua.

Además de los valores mostrados en la tabla anterior, para cada uno de los usos, se especifican, en el anexo I.A, otros criterios que atienden a las particularidades de cada uso, como la ausencia de *Legionella spp* en usos en que el agua sea susceptible de crear aerosoles.

También se establecen, en este RD, los usos para los que el agua regenerada tiene prohibido su uso. Estos son:

- Consumo humano (salvo catástrofe).
- La mayoría de usos para industria alimentaria y refrigeración.
- Usos hospitalarios.
- Cultivo de moluscos filtradores.
- Agua de baño.
- Fuentes y láminas ornamentales.

Usos del agua regenerada en España

Se puede afirmar que el gran impulso de la depuración en España se produjo como consecuencia de la directiva 91/271/CEE, que obliga a la depuración del agua residual de los núcleos urbanos a partir de cierto número de habitantes (CSIC, 2008).

En la actualidad, prácticamente todas las grandes ciudades españolas disponen de depuradoras. Siguiendo la directiva mencionada, todas las poblaciones mayores de 2.000 habitantes equivalentes que viertan a aguas continentales y estuarios, y mayores de 10.000 que viertan a aguas costeras, quedaban emplazadas a garantizar la correcta recogida y tratamiento de sus aguas residuales urbanas antes de su vertido y antes de 2005 (CSIC, 2008).

Dado que la mayor parte de las depuradoras de las ciudades españolas ya están construidas, el suministro de materia prima para la regeneración y su posterior reutilización parece garantizado. Por tanto, la reutilización debería poder potenciarse siempre que se consiga una mentalización adecuada.

En cuanto a proyectos llevados a cabo en España, podemos mencionar:

– La reutilización agrícola en Vitoria, activa desde hace más de 10 años.

– La reutilización agrícola y de recuperación de la Albufera en Valencia.

– La reutilización en el llano de Palma, que incluye riego de jardines urbanos y campos de golf, riego agrícola y recarga de acuíferos.

– La Costa Brava, con una red municipal de distribución exclusiva en el municipio de Tossa de Mar (Girona).

– El proyecto de reutilización en Madrid, para riego de parques y jardines, campos de golf y otros usos.

– Los grandes proyectos de las islas Canarias, para riego agrícola y de campos de golf.

– El gran sistema de regeneración y reutilización de la depuradora de El Prat de Llobregat de Barcelona (CSIC, 2008).

A continuación, se explica más detalladamente las acciones que se llevan a cabo en la Estación Regeneradora de Aguas (ERA) de El Prat de Llobregat, a modo práctico y como ilustración de un proceso de regeneración.

El Área Metropolitana de Barcelona (AMB) comprende 600 km^2 e incluye 36 municipios. El AMB es la primera zona industrial de España y la segunda en términos de población, con una densidad de población media de 5.800 habitantes/km^2, (Mujeriego et al, 2008). EMSSA (Empresa Metropolitana de Sanejament, SA) es la empresa pública del AMB encargada de gestionar el saneamiento y dispone de siete estaciones depuradoras, cuatro de las cuales, disponen de ERA (Estación Regeneradora de Aguas), distribuidas por todo el territorio metropolitano. Diariamente en el conjunto de instalaciones gestionadas por EMSSA, se tratan 1.050.000 m^3 de aguas residuales, lo que comporta una población equivalente de 5.700.000 habitantes, el 55% de toda Cataluña. La elevada cantidad de población afecta directamente a los recursos hídricos de la zona, y el río Llobregat es uno de los más afectados. Para paliar la escasez de agua cuantitativa y cualitativa de esta zona desde el año 2006, EMSSA dispone de una ERA en la EDAR del Llobregat.

El influente de la ERA se destina a diferentes usos según los tratamientos a los que se someta, entre ellos cabe destacar: agua para riego agrícola, agua para el mantenimiento del caudal ecológico del río Llobregat, restauración de zonas húmedas, agua para riego de jardines (en la zona de Montjuïc, en Barcelona) y la inyección de agua para frenar la intrusión salina en el delta del Llobregat.

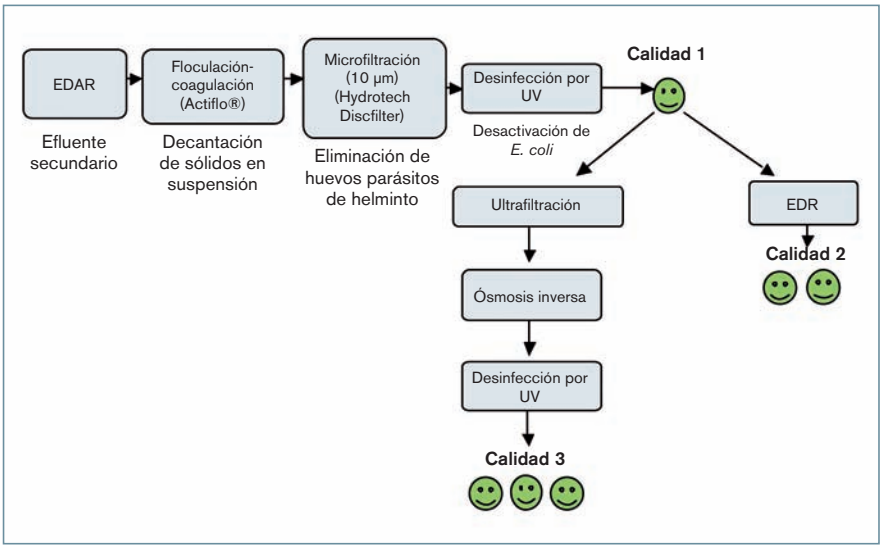


Figura 9. Esquema ERA del Llobregat.

La ERA del Llobregat sigue el siguiente que se detalla en la figura 9.

La EDAR del Llobregat tiene una capacidad de 420.000m^3/día, de los cuales el tratamiento de regeneración puede tratar 300.000 m^3/día dando una calidad 1 que se detalla en la tabla 6.

Los usos para los que esta calidad es apta son:

– Restauración del caudal ecológico del río Llobregat (175.000 m^3/día).

– Restauración de zonas húmedas (40.000 m^3/día).

– Riego de jardines (10.000 m^3/día).

La capacidad de la estación de electrodiálisis reversible es de 55.000 m^3/día de agua producto (47.000 m^3/día agua desalada) y su uso está destinado al riego agrícola. El agua de salida de la EDR (como en la mayoría de los casos de desalación) contiene una concentración de sales muy baja (~800 µS), lo cual implica

Tabla 6. Calidades de la ERA El Prat de Llobregat según el tratamiento aplicado.

	DBO_5	SS	Turbidez	Huevos helmintos parásitos	Conductividad
	mg/l O_2	mg/l	NTU	Uds/l	µS
Calidad 1	≤10	≤5	≤5	≤1	~ 3000
Calidad 2 (EDR)	≤10	≤5	≤5	≤1	800 (agua desalada) 1.300 (agua producto)
Calidad 3 (ósmosis inversa)	≤10	~ 0	~ 0	≤1	0 (agua desalada) < 1.500 (agua producto)

Figura 10. Visión de las reutilizaciones llevadas a cabo por la Estación Regeneradora de Aguas El Prat de Llobregat (Imagen: EMSSA)

que el agua desalada debe ser remineralizada, mediante la mezcla con agua de calidad 1, hasta encontrar el valor de conductividad deseado, que en este caso es de 1.300 µS (valor similar a la conductividad del agua del río Llobregat). En la tabla 6, pueden observarse las calidades que resultan de este proceso.

La recarga artificial de acuíferos se incluye en el RD 1620/2007, como un uso de agua ambiental. En la tabla 5, se muestran las calidades requeridas para la recarga según el método utilizado. La recarga de acuíferos supone una reserva de los recursos hídricos, de forma que pueden ser utilizados en épocas de falta de agua, o también puede ser un método efectivo para luchar contra la intrusión salina. Un ejemplo de este proceso es el que se lleva a cabo en el acuífero principal del delta del Llobregat. El acuífero del delta del Llobregat tiene un descenso piezométrico bajo el nivel del mar desde principios de la década de 1970, producto de la sobreexplotación. Ello ha comportado, entre otros factores, la aparición y el avance de la intrusión marina en el acuífero y el empeoramiento progresivo de la calidad de agua (Ortuño Govern et al, 2009). En la ERA del Llobregat existe una planta desaladora, construida con el fin de inyectar agua en este acuífero. Está constituida por cinco trenes de ultrafiltración, seis bastidores de ósmosis inversa y tres canales de desinfección por UV. La ultrafiltración supone un tratamiento previo, con el fin de preservar las membranas de ósmosis inversa ya que éstas son propensas al ensuciamiento. La planta está diseñada para la inyección de 15.000m^3/día de agua producto. El agua de salida de la ósmosis inversa se mezcla con agua ultrafiltrada para conseguir la conductividad deseada.

Existen 14 pozos de inyección distribuidos formando una barrera en paralelo al litoral. En la figura 10 se observan las ubicaciones de cada uno de los puntos de reutilización del agua regenerada en la ERA El Prat de Llobregat.

Riesgos

El agua en condiciones no adecuadas es la causa de numerosas enfermedades, incluso en países desarrollados.

Los peligros que puede presentar un agua son básicamente de dos tipos: biológicos y químicos. Los biológicos se originan por la presencia de microorganismos patógenos en el agua, mientras que los peligros químicos se deben a la presencia de productos químicos o metales pesados procedentes de la industria o la agricultura.

Es conveniente aclarar la diferencia entre riesgo y peligro, ya que muchas veces son conceptos que se confunden. Un peligro es un agente que puede ocasionar un efecto nocivo para la salud, mientras que un riesgo, es una función que permite valorar la probabilidad de que se produzca un efecto adverso sobre la salud y con una determinada gravedad.

Aunque la utilización de aguas regeneradas para la producción directa de agua potable es una alternativa generalmente descartada, la calidad sanitaria del agua regenerada es un factor muy importante para cualquier uso. La reutilización de agua regenerada implica riesgos sanitarios que es imprescindible controlar.

Una herramienta para establecer procedimientos de autocontrol eficaces es la utilización del sistema de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (APPCC) en inglés conocido como Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP), el cual, bajo fundamentos científicos y con un carácter sistemático, permite identificar los peligros específicos y establecer medidas para su control. Este sistema se basa en la prevención, en lugar de basarse únicamente en el control de la calidad del producto final. El APPCC, es una herramienta que debe adaptarse permanentemente a los cambios y modificaciones en el diseño del equipo o instalaciones y a los cambios en los procedimientos de aplicación y producción (UdG, 2007).

Este método fue desarrollado inicialmente por la NASA (National Aeronautics and Space Administration), los laboratorios del ejercito Natiki y la Compañía Pillsbury. El objetivo era asegurar que los alimentos de los astronautas estuvieran libres de contaminación. Para ello diseñaron un método basado en la observación de cada etapa del proceso que les permitiera detectar aquello que podía fallar e investigar las causas y los efectos más probables del posible fallo. El sistema ha tenido muchas revisiones y actualmente muchas autoridades sanitarias de diferentes países recomiendan o incluso obligan a su implantación (UdG, 2007).

El APPCC consta de 12 etapas. Las dos más importantes son el análisis de los peligros y la determinación de los puntos de control crítico (PCC), que son las fases del proceso dedicadas a controlar la eliminación de un determinado peligro. Para el caso del tratamiento de aguas, los PCC suelen coincidir con las etapas de desinfección, almacenamiento y distribución.

La aplicación del APPCC en la regeneración de agua aportaría diversos beneficios, tales como un mejor control de los riesgos sanitarios asociados al agua regenerada, disminución de la frecuencia de muestreo del agua regenerada y, por tanto, la reducción de los costes deriva-

dos del sistema de muestreo establecido. Aparte de los beneficios más directamente cuantificables, la implementación de uno de estos sistemas aporta al organismo, empresa o responsable de la regeneración el reconocimiento de la calidad, tanto del sistema utilizado como del producto obtenido.

Conclusiones

Una vez visto el proceso de regeneración de aguas residuales y sus características y peculiaridades, vale la pena destacar ciertos aspectos e ideas que se han ido presentando a lo largo de este documento.

La regeneración se debe plantear como un proceso destinado a obtener un producto de calidad, de modo muy similar al que se adopta en las instalaciones de potabilización de agua de abastecimiento, es decir, los procesos que conforman la regeneración son asimilables a los de potabilización. Estos difieren en la calidad que se exige para cada una de estas aguas. Es evidente que para el caso del agua potable las exigencias sanitarias son más estrictas, pero no se debe olvidar que la utilización del agua regenerada también implica el cumplimiento de la legislación vigente, que establece los parámetros de calidad exigidos para cada uno de los usos establecidos. El proceso de reutilización permite disponer de un aporte de agua adicional que se traduce en la posibilidad de reservar el agua de mayor calidad para usos más exigentes, como la producción de agua potable.

Es también importante el dimensionamiento de las plantas de regeneración en función de los usos actuales y necesidades futuras, entendiendo que el agua regenerada es un recurso al alza y que aporta mayor fiabilidad y regularidad de caudal que los cauces naturales, en las zonas semiáridas españolas. El flujo y la calidad del agua depurada son, generalmente, conocidos y constantes.

La implementación de un sistema APPCC en el proceso de regeneración del agua permitiría un mejor control de los riesgos sanitarios asociados. Este sistema implica el reconocimiento de la calidad del procedimiento utilizado y del producto obtenido.

El mantenimiento de los ecosistemas es un claro ejemplo de una reutilización acertada y con resultados visibles. La recarga de acuíferos, además de suponer un mantenimiento ecológico de la zona, supone un almacén natural de agua disponible para épocas de sequía, con la ventaja de que el almacenamiento tiene lugar de forma natural y no es necesaria la construcción de infraestructuras. Además de los beneficios intrínsecos de cada uno de los usos, el ahorro del recurso natural es común para todos ellos. Se debe recordar que es la escasez del recurso hídrico la que lleva a poner en boga la reutilización. Son ya muchos los países que están llevando a cabo la implantación de sistemas de regeneración y que están reutilizando sus aguas residuales. En muchos otros, la cultura de regeneración ya formaba parte de la gestión de sus aguas desde tiempos más lejanos, sobre todo en zonas donde la falta de agua es la normalidad (zonas áridas y semiáridas).

Agradecimientos

Las autoras agradecen a la Dra. Montserrat Folch, de la Universidad de Barcelona, su contribución directa en muchos de los datos que se han recogido en el presente artículo y su soporte técnico. También a EMSSA (Empresa Metropolitana de Sanejament S.A.) y en especial a Pere Aguiló, director de Explotación de EMSSA, y a Joaquín Bosque, jefe de Planta de la EDAR El Prat de Llobregat, por su ayuda técnica y por facilitarnos los datos relacionados con la EDAR El Prat, que han sido utilizados para la elaboración de este documento.

Bibliografía

Asano, T (1998). *Wastewater Reclamation and Reuse. Vol. 10.* CRC Press Technomic Publishing Company, Inc. USA.

Balager MD, Puig MA, Salgot M, Sánchez- Marre M, Turón C (2007). *Gestió i Tractament d'Aigües Residuals.* Universitat de Girona. ISBN: 978-4-845-260-1 (libro en soporte digital).

BOE (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Disponible en: http://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf. (Consultado el 1 de abril 2012.)

BOE (1996). Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del real decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas. Disponible en: http://www.boe.es/boe/dias/1996/03/29/pdfs/A12038-12041.pdf. (Consultado el 1 de abril 2012.)

Conill C, Gullón M, Aguiló P (2011). Water reclamation plant of El Prat de Llobregat and water reuse management in the Metropolitan Area of Barcelona. Water Reuse conference International Water Association, Barcelona 2011. Disponible en: http://www.waterbcn2011.org/download/Water%20Reuse%20Project%20of%20Barcelona%20Metropolitan%20Area.pdf. (Consultado el 2 de abril 2012.)

Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC (2008). *Aguas continentales. Gestión de recursos hídricos, tratamiento y calidad del agua.* Cyan Proyectos y Producciones Editoriales, Madrid. ISBN 84-00-08454-3.

Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (2007). *Agua Potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas.* Disponible en: *http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Prologo.pdf.* (Consultado el 30 de marzo 2012.)

Global Water Intelligence (2012). Global water reuse tracker. GWI, monitoring service charting the progress of major water reuse projects around the world. *Global Water Intelligence.* Volume 13:58-66.

Huertas Hidalgo E (2009). Regeneració i reutilització d'aigües residuals. Tecnologia, control i risc. Disponible en: http://www.tdx.cat/handle/10803/31979. (Consultado el 8 de abril 2012.)

Ionics: Jornadas Técnicas: *Membranas en el tratamiento de aguas*. E.U.P. Sevilla. Disponible en: http://prueba2.aguapedia.org/master/jornadas/ionics/ionics.pdf. (Consultado el 13 de abril de 2012.)

Metcalf & Eddy (2000). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización.* Mc Graw Hill, Madrid. ISBN 84-481-1607-0.

Mujeriego R, Compte J, Cazurra T, Gullón M (2008). The water reclamation and reuse project of El Prat de Llobregat, Barcelona, Spain. *Water Science & Technology.* 57.4:567-574.

Magrama: Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (2010). *Guía para la Aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas*. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/eu/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/GUIA_RD_1620_2007_tcm9-178027.pdf. (Consultado el 28 de marzo de 2012.)

Magrama: Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (2007). *Perfil Ambiental de España. Informe basado en indicadores.* Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/informacion-ambiental-indicadores-ambientales/indicadores-ambientales-perfil-ambiental-de-espana/perfil-ambiental-de-espana-2007/. (Consultado el 25 de marzo de 2012.)

Mujeriego R (2005). La reutilización, la regulación y la desalación de agua. *Ingeniería y Territorio*. 72:16-25.

Ortuño F, Niñerola JM, Armenter JL, Molinero J (2009). La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga artificial en el acuífero del Llobregat (Barcelona, España). *Boletín Geológico y Minero.*120:7-16.

M. Carmen Trapote Forné
mctrapote84@gmail.com
Diplomada en ingeniería técnica industrial (química). Licenciada en ciencias ambientales.

Begoña Martínez López
bmartinez@emssa.com
Licenciada en ciencias químicas. Actualmente desarrolla su carrera profesional como jefa de línea de aguas de la EDAR El Prat de Llobregat (Barcelona).