

# ÍNDICE

## REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Concepto de reutilización.....  | 5  |
| 1.1     | Ventajas de la reutilización .....  | 6  |
| 1.2     | Regeneración. Producto de calidad .....   | 8  |
| 1.3     | La gestión integral del agua .....  | 8  |
| 1.4     | Transporte y almacenamiento del agua regenerada. Coste de distribución .....              | 10 |
| 2       | Situación actual .....  | 10 |
| 2.1     | La reutilización en el mundo.....   | 11 |
| 2.2     | La reutilización de agua en Europa .....  | 13 |
| 2.3     | La regeneración en España .....   | 14 |
| 2.4     | El agua en la comunidad valenciana y en la provincia de Alicante .....                    | 15 |
| 2.5     | Conclusiones .....  | 17 |
| 3       | Uso de las aguas residuales depuradas para reutilización .....                            | 18 |
| 3.1     | Disponibilidad de aguas residuales depuradas. Directiva 91/271/CEE.....                   | 19 |
| 3.2     | Viabilidad económica y social de la utilización de aguas regeneradas .....                | 21 |
| 3.2.1   | Viabilidad económica.....   | 22 |
| 3.2.2   | Los precios del agua regenerada .....   | 23 |
| 3.2.3   | Conclusión .....  | 25 |
| 3.3     | Los impactos de la regeneración .....   | 25 |
| 3.4     | Tratamiento terciario en las aguas residuales .....                                       | 28 |
| 3.5     | Otras opciones. Reactores biológicos de membrana (MBR).....                               | 28 |
| 4       | Normativa de calidad y usos del agua regenerada. Proyecto de R.d. 22 de mayo de 2006..... | 31 |
| 5       | Reutilización de aguas residuales para riego.....   | 35 |
| 5.1     | Riego en Agricultura.....   | 37 |
| 5.1.1   | Calidad de agua de riego .....  | 38 |
| 5.1.1.1 | Riesgo de salinidad .....   | 40 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 5.1.1.2 | Riesgo del sodio .....   | 41 |
| 5.1.1.3 | Reutilización de agua para agricultura en la provincia de Alicante ..... | 42 |
| 5.1.2   | Empleo de lodos como abono – enmienda agrícola.....                      | 43 |
| 5.2     | Riego en Jardines .....  | 44 |
| 5.3     | Opciones para la mejora de la productividad agrícola.....                | 45 |

## TRATAMIENTO TERCARIO

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 6       | Finalidad del tratamiento terciario. Fiabilidad tratamiento secundario ..... | 47 |
| 6.1     | Eliminación biológica de Nitrógeno .....                                     | 48 |
| 6.2     | Opciones más usuales.....  | 49 |
| 6.2.1   | Tratamiento físico – químico. Coagulación - floculación .....                | 50 |
| 6.2.2   | Decantación.....   | 51 |
| 6.2.3   | Filtración .....   | 52 |
| 6.2.3.1 | Microfiltración .....  | 54 |
| 6.2.3.2 | Ultrafiltración.....   | 54 |
| 6.2.3.3 | Nanofiltración .....   | 55 |
| 6.2.3.4 | Ósmosis inversa .....  | 55 |
| 6.2.4   | Sistemas naturales.....  | 57 |
| 6.2.4.1 | Infiltración-percolación.....  | 58 |
| 6.2.4.2 | Lagunaje.....  | 58 |
| 6.2.5   | Desinfección .....   | 58 |
| 6.2.5.1 | Luz UV .....   | 60 |
| 6.2.5.2 | Cloro.....   | 61 |
| 6.2.5.3 | Ozono.....   | 63 |
| 6.2.6   | Línea de fangos.....   | 65 |
| 6.2.6.1 | Espesamiento.....  | 66 |
| 6.2.6.2 | Estabilización .....   | 67 |
| 6.2.6.3 | Deshidratación .....   | 68 |
| 6.3     | Costes asociados .....   | 69 |

## PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 7     | Protocolo de actuación.....   | 75 |
| 7.1   | Análisis de agua.....   | 75 |
| 7.1.1 | Calidad del agua residual. Adaptar la calidad al uso y a la norma.....              | 76 |
| 7.2   | Perfil del caudal disponible.....   | 76 |
| 7.3   | Elección del tipo de tratamiento terciario o mejora del tratamiento secundario..... | 77 |
| 7.4   | Viabilidad económica.....   | 79 |
| 7.5   | Control del proceso de regeneración. Fiabilidad de los procesos.....                | 80 |

## BIBLIOGRAFÍA

# REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

A pesar de los avances científicos en áreas como la biotecnología, la ingeniería o la ciencia de los materiales, la reutilización de las aguas regeneradas no es todavía una práctica común (SEGUÍ, 2004).

En este momento, la regeneración y reutilización de las aguas residuales cobran un papel de gran importancia, pues además de solucionar el problema de contaminación, permiten aumentar la disponibilidad del recurso sin necesidad de seguir explotando las fuentes convencionales para el suministro de agua. En concreto, la reutilización de agua regenerada dentro de una cuenca hidrográfica es una de las prácticas que mejor concuerda con los preceptos de un desarrollo sostenible (SEGUÍ, 2004).

La mayoría de las naciones, con mayor o menor grado de industrialización, tienen grandes problemas para garantizar un adecuado suministro de agua, así como para asegurar la protección de las fuentes de suministro frente a la creciente contaminación de las aguas. Estos problemas en su conjunto han servido como catalizadores al concepto de regeneración y reutilización del agua y lo han elevado a un plano de primordial importancia, considerándolo como una prioridad en el ámbito internacional. (SEGUÍ, 2004)

El agua ha sido considerada hasta hace pocos años como un recurso prácticamente ilimitado. Sin embargo, el continuo aumento de la demanda de agua, en algunos casos por encima de la cantidad disponible, ha empezado a preocupar. Una solución para las zonas que presentan un déficit hídrico sería utilizar el recurso natural de una manera más racional. Así nace la idea de que el agua debe ser reutilizada de forma planificada para poder satisfacer la demanda global. La reutilización planificada está cobrando cada vez más importancia en las zonas áridas y semiáridas del Mediterráneo, con una pluviometría irregular y una demanda creciente de agua. No obstante, la reutilización se ha limitado en la mayor parte de ocasiones a usos agrícolas, obviando otras posibilidades.

Muchos países tienen el problema de un severo desequilibrio hídrico. Este desequilibrio entre la demanda de agua y su suministro es debido, principalmente, a la desigual distribución de las precipitaciones, las altas temperaturas, la alta demanda de agua para riego y el impacto del turismo. Para aliviar esta escasez, una práctica que se debe tomar seriamente en consideración es el tratamiento y la reutilización del agua residual. (Hidalgo et al, 2004)

Según un reciente informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, el ser humano extrae un 8% del total anual de agua dulce renovable y se apropia del 26% de la evapotranspiración anual y del 54% de las aguas de escorrentía accesibles. El control que la humanidad ejerce sobre las aguas de escorrentía es ahora global y el hombre desempeña actualmente un papel importante en el ciclo hidrológico.

El consumo de agua per cápita aumenta (debido a la mejora de los niveles de vida), la población crece y en consecuencia el porcentaje de agua objeto de apropiación se eleva. Si se suman las variaciones espaciales y temporales del agua disponible, se puede decir que la cantidad de agua existente para todos los usos está comenzando a escasear y ello nos lleva a una crisis del agua.

Aunque los datos confiables sobre la extensión y gravedad de la contaminación son incompletos, se estima que la producción global de aguas residuales es de aproximadamente 1.500 km<sup>3</sup>.

Asumiendo que un litro de aguas residuales contamina 8 litros de agua dulce, la carga mundial de contaminación puede ascender actualmente a 12.000 km<sup>3</sup>.

## 1 CONCEPTO DE REUTILIZACIÓN

Las primeras evidencias de la reutilización de aguas residuales corresponden a la Grecia antigua y a lo largo de la historia Asano (2001) las dividió en tres etapas fundamentales: una primera época inicial, hasta 1850, donde surgieron los sistemas de agua y saneamiento; una segunda época de gran avance sanitario, correspondiente al tiempo entre 1850 y 1950, y una tercera que corresponde a la regeneración, la reutilización y el reciclaje de aguas residuales (de 1960 hasta nuestros días).

Aunque la reutilización planificada de las aguas regeneradas empezó a principios de los años 20 en Estados Unidos, en Arizona y California, donde se destinaba el agua a usos agrícolas, fue en 1965 cuando la normativa impulsó de manera decisiva la regeneración, el reciclaje y la reutilización de las aguas residuales.

En la actualidad, se entiende por 'agua regenerada' aquella agua residual que después de ser sometida a un proceso de tratamiento, su calidad es satisfactoria para un uso en particular. Es decir, el agua regenerada no es otra que 'agua residual tratada' o 'efluente tratado', que satisface los criterios para poder ser usada nuevamente (SEGUÍ, 2004).

El proceso de tratamiento necesario para que un agua pueda ser reutilizada se denomina regeneración y el resultado de dicho proceso agua regenerada. De acuerdo con su significado etimológico, la regeneración de un agua consiste en devolverle, parcial o totalmente, el nivel de calidad que tenía antes de ser utilizada.

Ahora bien debido a la propiedad de las aguas, los expertos consideran que la reutilización se puede dar de manera directa o indirecta. La reutilización "directa" o "planificada" (Asano, 1998) requiere de la existencia de tuberías u otros medios de conducción para distribuir el agua regenerada que garantice el control de la propiedad del agua. Mientras que la reutilización "indirecta" o "natural" sucede cuando el vertido de un efluente, con o sin tratamiento, es depositado en una masa de agua y ésta es extraída aguas abajo.

El agua residual regenerada se viene empleando para múltiples usos, entre los que cabe destacar:

### **Reutilización urbana:**

- Riego de parques públicos, campos deportivos, jardines, áreas verdes de edificios públicos, industrias, centros comerciales y carreteras.
- Riego de áreas ajardinadas de las residencias unifamiliares y multifamiliares.
- Usos ornamentales: fuentes y estanques.
- Lavado de vehículos, ventanas, agua de mezcla para fertilizantes líquidos.
- Limpiezas de calles.
- Protección contra incendios.
- Agua de cisternas para urinarios públicos y en edificios comerciales e

**Reutilización industrial:**

- Refrigeración.
- Procesos industriales.
- Construcción.

**Reutilización para irrigación:**

- Riego agrícola.
- Riego de campos de golf.

**Reutilización ambiental:**

- Restauración de hábitats naturales y mejora del entorno.
- Recarga de acuíferos para control de la intrusión marina.
- Aumento de los recursos potables.

Atendiendo al posible contacto o ingestión del agua regenerada por personas, la reutilización se clasifica en reutilización para uso no potable y reutilización para uso potable.

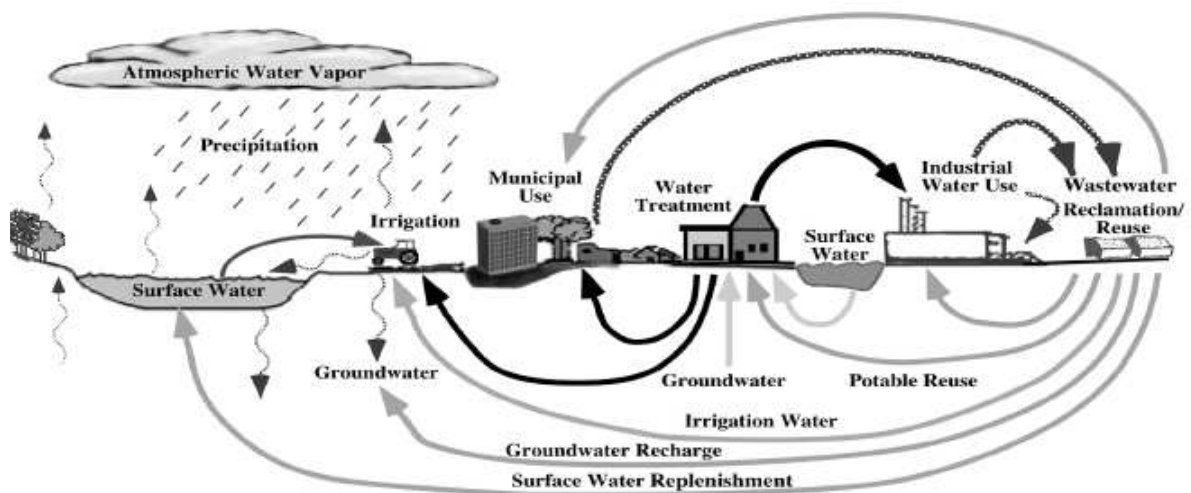
Los proyectos de regeneración para usos no potables son los que han adquirido el mayor desarrollo en numerosas partes del mundo y alcanzado unas excelentes cuotas de fiabilidad y de aceptación por parte de los usuarios y el público en general, especialmente en países desarrollados donde los recursos hídricos son limitados y la protección ambiental es una prioridad destacada

Mujeriego (1999) plantea que el futuro se centra en estos momentos entre la conveniencia de impulsar la reutilización indirecta para usos potables, o de restringirla a los usos no potables. La reutilización indirecta para uso potable sucede cuando el agua regenerada se mezcla con otra masa de agua natural, como ocurre durante la infiltración de agua regenerada en un acuífero natural del que posteriormente se extrae agua como materia prima para la elaboración de agua potable.

## 1.1 VENTAJAS DE LA REUTILIZACIÓN

La reutilización, abre nuevas perspectivas sobre como enfocar la eliminación de los diferentes elementos presentes en las aguas depuradas. Contra la opción de quitar cada vez más sustancias del agua residual depurada existe la opción de verter menos, reciclando aquellas que puedan tener un interés para la sociedad. (SEGUÍ, 2004)

La **Figura 1** muestra el ciclo que sigue el agua tanto superficial como subterránea a través de los diferentes usos a los que se destina, con el consecuente deterioro del medio ambiente. Sin embargo, al integrar las tecnologías de regeneración, reciclaje y reutilización como parte del ciclo hidrológico, se puede lograr mantener la calidad del agua que permita el equilibrio de los ecosistemas y el suministro del recurso, dentro de un concepto de sostenibilidad.



**Figura 1.** Ciclo hidrológico y su relación con el tratamiento, la regeneración y la reutilización de las aguas residuales (Asano, 2001).

Por su parte, la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. argumenta que la utilización de agua regenerada proporciona los siguientes beneficios ambientales:

1. Disminuye el desvío de agua dulce de los ecosistemas sensibles. Plantas, fauna y peces dependen de unos flujos de agua suficientes para su hábitat, su vida y su reproducción. La falta de un flujo adecuado de agua, resultado del desvío de agua para usos agrícolas, urbanos e industriales, puede causar el deterioro de la calidad del agua y el buen estado del ecosistema. Los diferentes usuarios del agua pueden suplir sus demandas mediante el uso de agua regenerada, posibilitando la liberación de volúmenes de agua para el medio ambiente e incrementando los flujos vitales para los ecosistemas.

2. Disminuye las descargas contaminantes a masas de agua sensibles. Aunque el ímpetu de reutilizar agua regenerada no pueda suplir en algunos casos, total o parcialmente, las necesidades de abastecimiento de agua, puede eliminar o disminuir la necesidad de verter aguas residuales al océano, estuarios o ríos.

3. Permite la utilización del agua para la creación o mantenimiento de hábitat en humedales y ríos. Los humedales aportan muchos beneficios, incluidos hábitat de flora y fauna, así como de aves de caza, mejora de la calidad del agua, disminución de las inundaciones y favorece las condiciones para el desarrollo de la industria pesquera. Para los ríos que tienen problemas por pérdidas de caudal debido al desvío de agua, el agua regenerada puede aumentar los caudales circulantes preservando y manteniendo el hábitat acuático.

4. Permite reducir y prevenir la contaminación. Cuando los vertidos contaminantes se restringen a océanos, ríos y otras masas de agua, la carga contaminante en estos cuerpos decrece. Sin embargo, determinadas sustancias que pueden ser contaminantes al ser vertidas a una masa de agua pueden ser útiles si se reutilizan en la agricultura. Por ejemplo, el agua regenerada contiene altos niveles de nutrientes, como el nitrógeno. La aplicación del agua regenerada en el riego agrícola y de jardinería puede servir de fuente de nutrientes y reducir la necesidad de aplicar fertilizantes sintéticos.

5. Permite aprovechar los elementos nutritivos contenidos en el agua depurada para usos agrícolas.

6. Permite mayor fiabilidad en su disponibilidad frente a recursos no tan estables, como puede ser el transvase.

## 1.2 REGENERACIÓN. PRODUCTO DE CALIDAD

La regeneración de agua residual se concibe actualmente como un proceso destinado a obtener un producto de calidad. La elaboración y la comercialización de este producto deben plantearse en un marco más amplio que el tradicional de lucha contra la contaminación. Con una nueva mentalidad en la concepción y explotación de los procesos de regeneración diferente a la adoptada generalmente en el tratamiento de agua residual, cuyo resultado final suele considerarse un residuo líquido o sólido. Esta nueva forma de plantear la regeneración de agua residual ha hecho que la reutilización de planificada de agua residual pase a ser un elemento esencial de la gestión integral de los recursos hidráulicos (Trapote, 2007).

Se prefiere el término agua regenerada ya que conlleva una connotación ambiental positiva y evita las connotaciones sociales negativas que los términos "reutilización de las aguas residuales" o "reutilización del efluente tratado de las aguas residuales" provocan en mucha gente y, es un término cada vez más usado en la literatura (SEGUÍ, 2004). Además, lo correcto sería hablar de "reutilización de aguas residuales" y de "reciclaje de aguas regeneradas".

La reutilización del agua regenerada no ha sido una tarea fácil, pues se debe cumplir técnicamente con varios requisitos:

1. que satisfaga la calidad de agua para el uso que se le intenta dar.
2. que no deteriore o afecte los ambientes a los que llega.
3. que no cause problemas de salud a los seres que están en contacto con la actividad a la que se le destine.
4. que satisfaga el concepto de sostenibilidad.

La regeneración y reutilización de las aguas residuales tienen un enorme potencial para la recuperación de recursos hídricos y la disminución de la contaminación (Seguí, 2004).

Aspectos que influyen en la reutilización de aguas depuradas (EPSAR, 2007):

1. Disponibilidad de recursos.
2. Grado de calidad. (Sales disueltas).
3. Distancia al punto de aprovechamiento.

El desarrollo actual permite obtener efluentes de agua regenerada de diversas calidades, incluso hasta un nivel tan alto como la del agua potable, pero la finalidad es conseguir un producto que sea adecuado para ser empleado en diferentes tipos de reutilización (industrial, agrícola, recreativo, etc.) y a un coste competitivo.

## 1.3 LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA

La práctica de regenerar y reutilizar aguas residuales está surgiendo como una nueva fuente de suministro técnicamente viable. Esto conlleva que esta práctica debe ser incluida dentro de la gestión integral del agua y asumida dentro de la estructura de las instituciones del sector hidráulico.



La gestión del agua (**Figura 2**), de acuerdo con la Red Internacional de Organismos de Cuenca (RICO), permite adoptar los siguientes puntos de vista:

1. **Gestión Integral.** Se relaciona con los criterios físicos (integrar la gestión de las aguas subterráneas con las superficiales, la calidad con la cantidad del agua, los distintos puntos de una cuenca que están vinculados entre sí y las estaciones del año), con los criterios institucionales (debe existir un marco institucional que armonice y coordine en aras de una mejor gestión del agua en beneficio de la sociedad y la economía), y con los criterios de participación pública (es necesario fomentar soluciones consensuadas cuando existan conflictos entre usuarios y entre instituciones).

2. **Gestión Sostenible.** Corresponde al discurso de agua suficiente, de calidad adecuada y de disponibilidad en forma oportuna para satisfacer las actividades sociales y económicas del hombre de hoy y mañana.

3. **Gestión Eficiente.** Es el resultado de la búsqueda de soluciones a la escasez del agua; el objetivo es obtener una mayor productividad o beneficio social por unidad de volumen en los distintos usos y regiones.

4. **Gestión Equitativa.** No busca un trato igualitario para las partes, los usos y los usuarios, sino establecer pactos sostenibles entre usuarios, regiones e incluso naciones. Se basa en el principio de buena voluntad y no-beligerancia, en el que la negociación entre las partes les lleva a ceder para también ganar.

5. **Gestión por Cuenca.** Reconoce las rutas que el agua sigue según su ciclo hidrológico y medio geográfico, que define regiones, humedad, cubierta vegetal y fauna, y determina potencialidades y restricciones. Reconoce que los actores de una cuenca forman una colectividad que debe realizar una gestión armónica del agua.



**Figura 2.** La gestión del agua (Seguí, 2004).

Los objetivos básicos de la gestión del agua según son:

1. El agua tiene un valor económico en todos sus usos competitivos y debe reconocerse como un bien económico.
2. Para gestionar este recurso en términos sostenibles es necesario reconciliar los intereses en competencia.
3. El acuerdo de intereses sólo se logra si las partes dialogan y acuerdan civilizadamente coordinar sus demandas de agua.

#### 1.4 TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DEL AGUA REGENERADA. COSTE DE DISTRIBUCIÓN

El aprovechamiento de un agua regenerada requiere los siguientes elementos:

1. El transporte desde la planta de regeneración hasta el lugar de utilización.
2. El almacenamiento o regulación para adecuar el caudal suministrado por la planta a los caudales consumidos.
3. La definición de unas normas de utilización del agua que permitan minimizar los posibles riesgos directos o indirectos para el medio ambiente, las personas que la utilizan, la población circundante al lugar de uso y los consumidores de cualquier producto cultivado con el agua regenerada.

Estos tres elementos técnicos constituyen el núcleo central de un programa de reutilización planificada de agua residual.

## 2 SITUACIÓN ACTUAL

La reutilización de las aguas residuales, ya sean sin tratar o regeneradas, ha sido una práctica muy común en la gran mayoría de los países. Sin embargo, a lo largo de estos últimos años la reutilización planificada de aguas regeneradas ha cobrado un significativo auge, debido básicamente a la escasez del recurso hídrico (Seguí, 2004).

La regeneración y reutilización de aguas residuales tienen un papel cada vez más importante dentro de la administración y manejo del agua, especialmente en aquellos países donde existen problemas de escasez, o bien en los que las fuentes convencionales de suministro han sido contaminadas.

En los países industrializados se han desarrollado muchos proyectos e investigaciones para la regeneración de las aguas residuales, obteniendo además de la reutilización del agua regenerada para satisfacer demandas, los beneficios adicionales de protección al ambiente y prevención de riesgos a la salud. En los países en desarrollo también es necesario cubrir estos aspectos, solo que, debido a las carencias económicas y tecnológicas, se requiere utilizar sistemas de menor coste y tecnificación.

Si nos centramos en los países del Mediterráneo, especialmente los del Norte de África y Oriente Medio están caracterizados por un severo desequilibrio hídrico. La reutilización del agua residual tratada

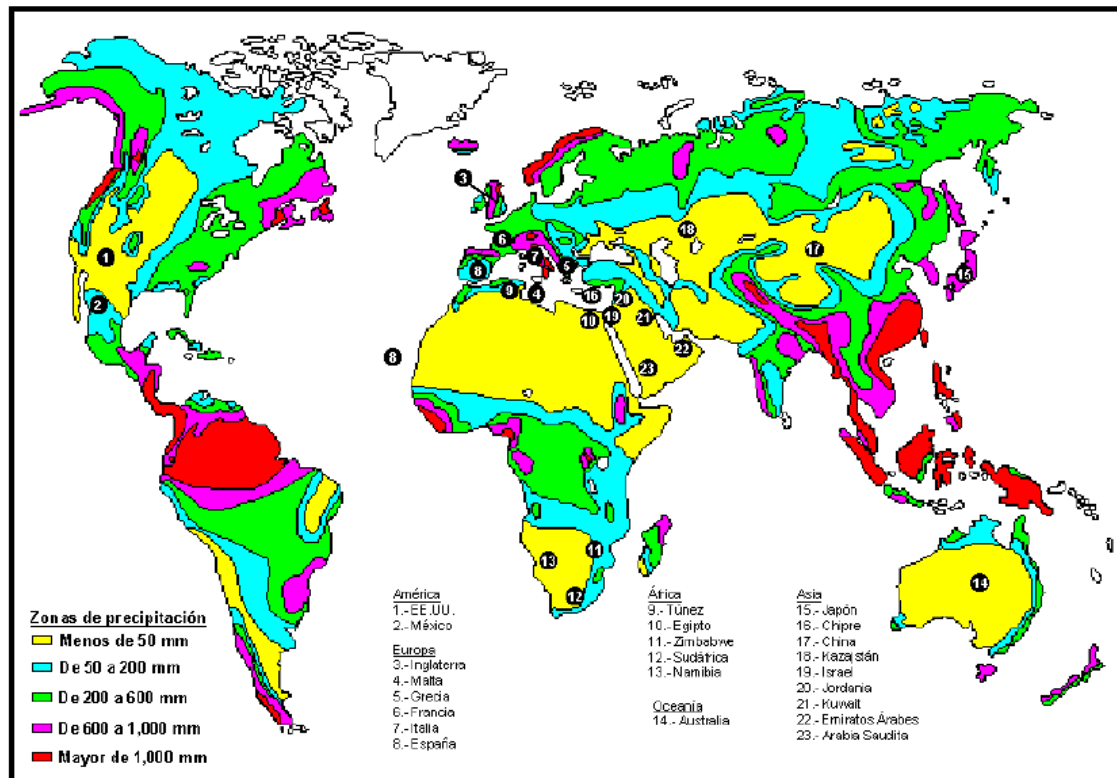
en irrigación aparece aquí como una estrategia adecuada de disposición final de los efluentes procedentes de una planta convencional de tratamiento de aguas.

La región del Mediterráneo se caracteriza por el bajo nivel e irregularidad de los recursos hídricos, tanto en el tiempo (veranos muy secos), como en el espacio (más seco en el Sur). Esta región incluye el 60% de la población mundial con recursos naturales renovables de menos de 1.000 m<sup>3</sup> agua/habitante/año (Hidalgo et al, 2004). El fuerte crecimiento de factores como la urbanización, el turismo, el regadío y la población puede incrementar las tensiones en algunos países y regiones donde el consumo ha alcanzado ya la cantidad de recursos disponibles.

Por otro lado, el volumen de agua residual está aumentando también en la región del Mediterráneo. Muchas zonas podrían ser abastecidas con agua reciclada, la cual también podría ser utilizada para otros propósitos diferentes, dependiendo de la demanda, las características del agua, su disponibilidad, etc. En consecuencia, hay un mayor uso potencial de agua reciclada en la región. Es, sin embargo, esencial, que el desarrollo de la reutilización de agua en la agricultura y otros sectores esté basado en evidencias científicas de sus efectos sobre el medio ambiente y la salud pública.

## 2.1 LA REUTILIZACIÓN EN EL MUNDO

La reutilización de las aguas residuales se da en aquellos lugares donde la disponibilidad de agua es baja. La **Figura 3** presenta la distribución de precipitaciones anuales en el mundo y la ubicación de aquellos lugares donde existe alguna evidencia documental sobre la reutilización de aguas regeneradas (señalados con puntos negros). Es importante destacar que en los 5 continentes existen lugares donde la regeneración y reutilización de las aguas residuales se lleva a cabo.

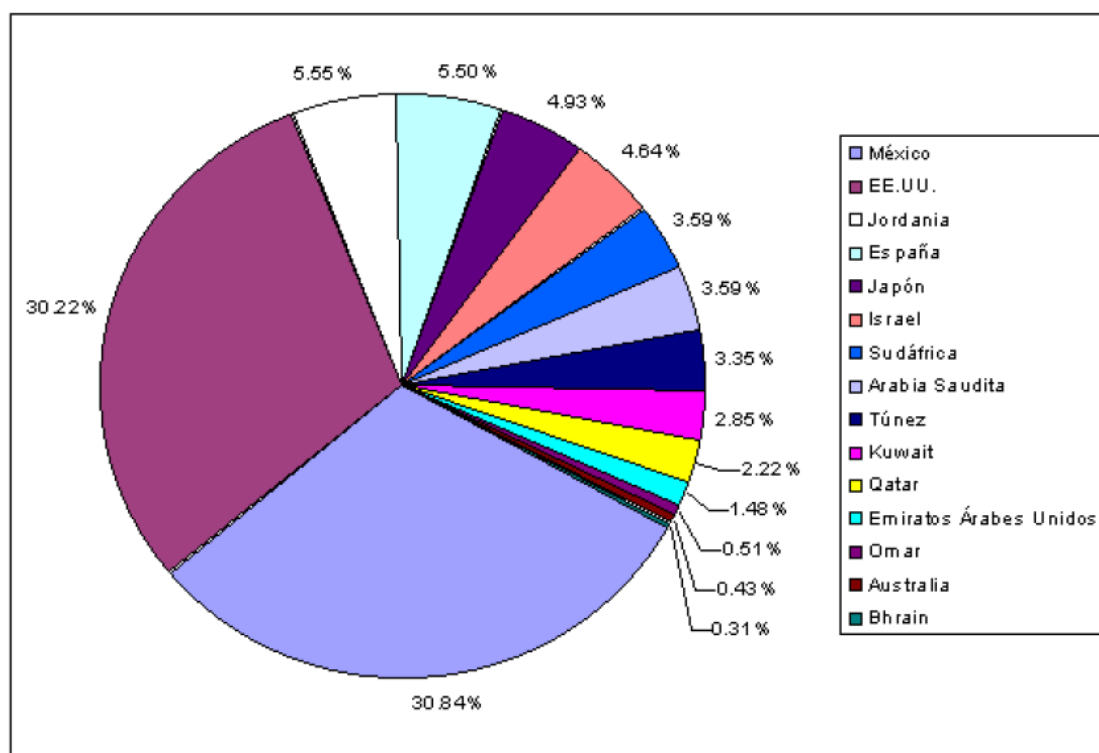


**Figura 3.** Distribución de precipitaciones anuales en el mundo (Seguí, 2004).

Existen básicamente dos zonas donde se resalta la práctica de regenerar y reutilizar las aguas residuales: la primera, aquellas zonas continentales donde la precipitación es escasa (menor a los 200 mm de lluvia). Y la segunda, las islas donde debido posiblemente a la falta de infraestructura para la captación, la práctica de reutilización se convierte en una opción para el suministro de agua.

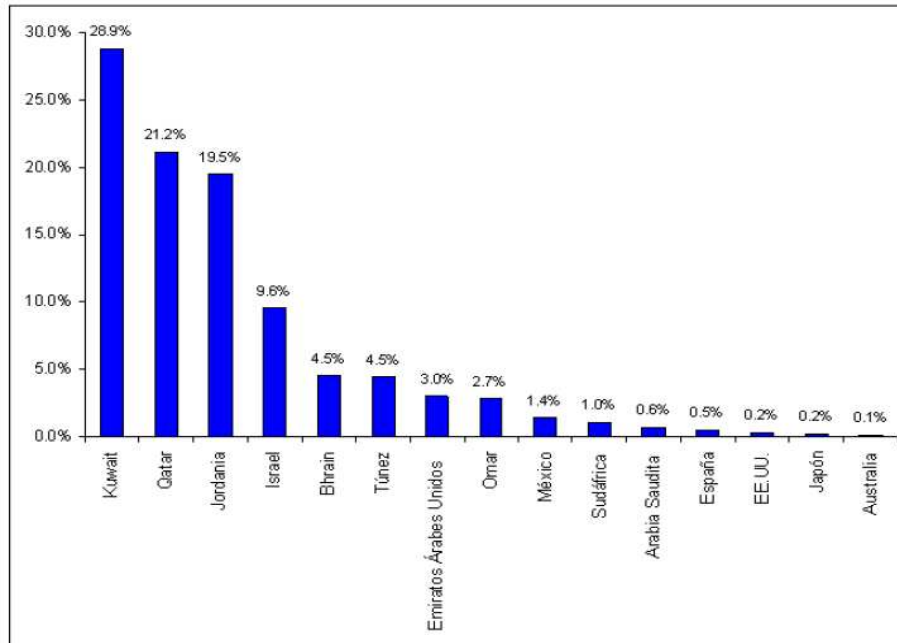
El único caso documentado (Seguí, 2004) donde se realiza la reutilización potable directa es en Namibia. Para todos los demás usos existen evidencias de la reutilización de las aguas regeneradas por varias partes del mundo.

La **Figura 4** presenta los porcentajes de reutilización de 15 países del mundo con relación exclusivamente al volumen reutilizado de agua regenerada, en el ámbito internacional los países con mayor porcentaje son México, EE.UU. y Jordania con 30,84% (1,290 Mm<sup>3</sup>/año), 30,22% (1,264 Mm<sup>3</sup>/año) y 5,55% (232 Mm<sup>3</sup>/año), respectivamente (Seguí, 2004). España se sitúa en la cuarta posición con un 5,5% (230 Mm<sup>3</sup>/año).



**Figura 4.** Distribución, en porcentaje por país, de la reutilización de las aguas regeneradas en el mundo (Seguí, 2004).

Sin embargo, estas cifras cambian considerablemente si se analiza el volumen de agua regenerada y reutilizada contra volumen extraído de las fuentes convencionales. La **Figura 5** muestra que Kuwait, Qatar, Jordania e Israel son los países donde la reutilización de aguas residuales es una fuente importante de suministro, ya que llegan a reutilizar con respecto a su extracción total, el 28.9%, 21.2%, 19.5% y 9.6% respectivamente.



**Figura 5.** Porcentaje de aguas regeneradas reutilizadas con respecto al volumen total de aguas extraídas (Seguí, 2004).

Estas aguas regeneradas son una fuente de suministro para los diferentes usos demandados en el país. Por esto, y al nivel de nuestro análisis, se podría concluir que a medida que el recurso presenta problemas de disponibilidad, la regeneración y reutilización de las aguas residuales pasa a ser considerada como una fuente alternativa significativa en el suministro de agua.

## 2.2 LA REUTILIZACIÓN DE AGUA EN EUROPA

El parlamento Europeo y el Consejo de la Unión europea consideran que el agua no es un bien comercial como los demás, si no un patrimonio que hay proteger, defender y tratar como tal. La Directiva 2000/60/CE establece un marco de actuación en el ámbito de la política de aguas. El objetivo de esta directiva es establecer un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas.

Los objetivos ambientales descritos en el artículo 4 de esta directiva, establecen que los Estados miembros habrán de proteger, mejorar y restaurar todas las masas de agua superficial y subterránea. Se establecen una serie de medidas básicas y medidas complementarias dentro de las que destaca la eficacia y la reutilización, el fomento de tecnologías de eficiencia hidráulica en la industria y de técnicas de riego economizadoras de agua, así como una serie de estrategias para combatir la contaminación de las aguas. La Agencia Europea para el Medio Ambiente (AEMA, 2003) reconoce que durante los últimos 17 años se ha logrado un avance significativo en materia de saneamiento. Sin embargo, este avance ha sido desigual en las distintas zonas que conforman la Unión Europea.

Así pues, el aumento en la capacidad de depuración es significativo para todos los Estados miembros excepto Suecia, Finlandia y los Países Bajos, donde está capacidad ya era alta (SEGUÍ, 2004). El aumento más significativo está en los países meridionales tales como España y Grecia.

El porcentaje de población con tratamiento terciario ha aumentado desde 1980 en todas las regiones europeas. En Austria y España, durante los últimos 17 años se ha duplicado la proporción de

cobertura conectada al alcantarillado y saneamiento de las aguas residuales. Sin embargo, en España solamente alrededor de la mitad de la población trataba sus aguas residuales antes de 1995.

En los años 80 muchos países occidentales, como los Países Bajos y Austria, trataban la mayoría de las aguas residuales mediante sistemas de tratamiento secundario. Mientras que, en países como Finlandia y Suecia el tratamiento de las aguas residuales era hasta un nivel terciario. Al final de la década de los 80 y durante los años 90, muchos de los países occidentales construyeron sistemas de tratamiento para la eliminación de nutrientes.

La región mediterránea es la zona que debido a sus condiciones hidroclimatológicas, necesita incorporar la reutilización del agua dentro del balance de sus recursos hídricos como estrategia para la próxima década. No obstante, muy pocos países han explotado el valor del agua regenerada hasta la fecha.

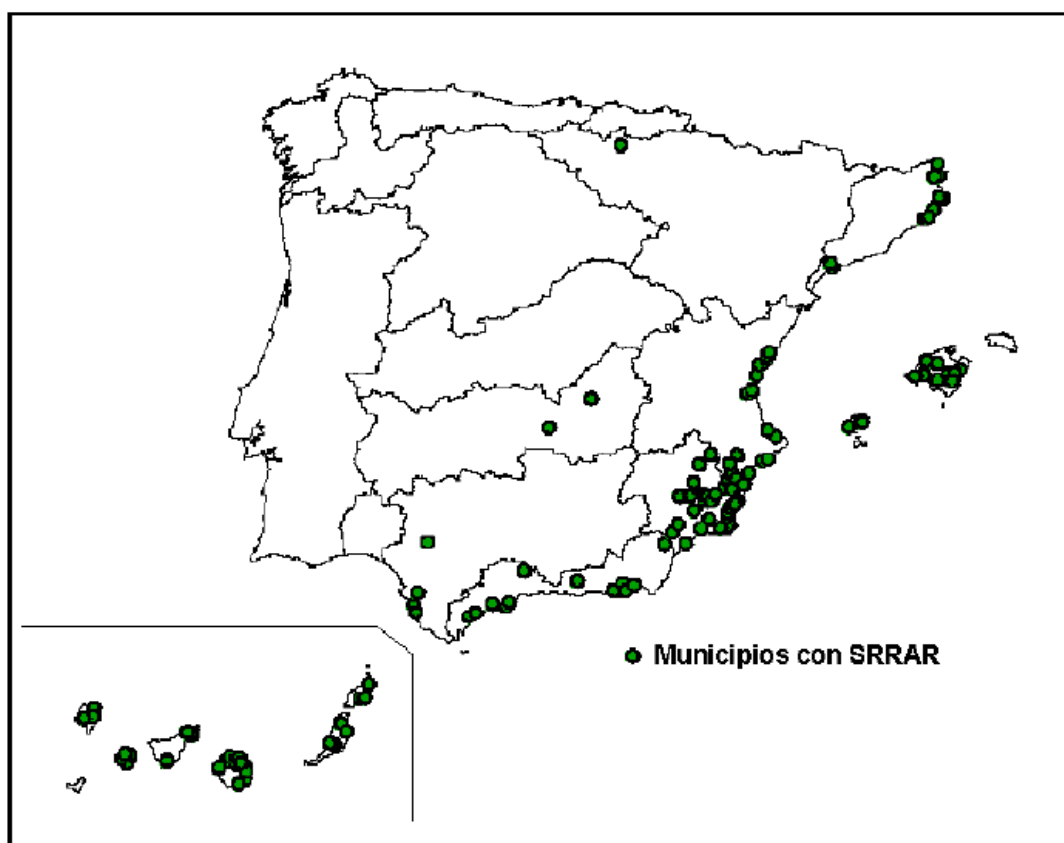
## 2.3 LA REGENERACIÓN EN ESPAÑA

En numerosos países la reutilización de las aguas residuales es una fuente adicional de recursos de agua, y como tal está incluida en la gestión integral del agua. En España, si bien el interés por dicho recurso es enorme, las acciones llevadas a la práctica son aun demasiado limitadas. La posible explicación puede hallarse en el escaso número de proyectos de demostración desarrollados y en la ausencia de un marco regulador específico para la reutilización segura de las aguas regeneradas (López-Ramírez et al, 2004).

El trabajo realizado por Olcina (2002) recoge un análisis de la gestión de los recursos hídricos en España, y en particular los recursos no convencionales. El autor realiza un profundo y minucioso análisis de las condiciones que actualmente existen en España sobre la regeneración y reutilización de las aguas residuales.

López-Ramírez (2004) considera que el consumo efectivo de agua en España es de 20,783 Hm<sup>3</sup>/año de los cuales 14,559 Hm<sup>3</sup>/año retornan a los cauces receptores. Por otra parte se depuran 2,500 Hm<sup>3</sup>/año de los cuales se reutilizan planificadamente 230 Hm<sup>3</sup>/año (como también mencionaba Seguí, 2004, en apartados anteriores).

La **Figura 6** presenta la ubicación los municipios donde se llevan a cabo acciones de regeneración y reutilización planificada de las aguas. En la actualidad existen más de 100 actuaciones de reutilización directa identificadas. La reutilización agrícola es el aprovechamiento más extendido (89% del volumen total, frente al 6% de usos recreativos y campos de golf, 2% de usos municipales, 2% para requerimientos ambientales y 1% de usos industriales) (MMA, 2000).



**Figura 6.** Municipios con instalaciones de regeneración y reutilización planificada de aguas residuales (MMA 2000).

Las instalaciones están ubicadas, sobre todo, en las islas y zonas costeras mediterráneas con escasez de recursos hídricos; fundamentalmente las confederaciones hidrológicas del Júcar y el Segura, con 83 hm<sup>3</sup>/año y 55 hm<sup>3</sup>/año respectivamente. Estas zonas son, además, las que parecen presentar mayores potencialidades para su desarrollo futuro (MMA, 2000).

#### 2.4 EL AGUA EN LA COMUNIDAD VALENCIANA Y EN LA PROVINCIA DE ALICANTE

La Comunidad Valenciana tiene una extensión de 23.295 km<sup>2</sup> y tiene una pluviometría de 450 mm. Con una demanda de 3700 hm<sup>3</sup>/año de agua tiene un déficit de 350 hm<sup>3</sup>/año (EPSAR, 2007).

A escala regional, y sin sumar los caudales ambientales (400 hm<sup>3</sup>/año), existe un acusado desequilibrio entre oferta (3.200 hm<sup>3</sup>/año) y demanda (3.450 hm<sup>3</sup>/año) que propicia situaciones de insuficiencia hídrica muy graves en los sistemas de explotación de Alicante y de Castellón, frente al ligero superávit de agua que disfruta la provincia de Valencia (Rico, 2002). Resulta patente el dominio del consumo agrícola con un 76,4 % (2.641 hm<sup>3</sup>/año) (EPSAR, 2007).

El 20% del PIB de la Comunidad Valenciana, con 450 km de costa, lo constituye el turismo. En comarcas alicantinas como el Bajo Segura ha sido habitual la ejecución de planes urbanísticos para la construcción de grandes urbanizaciones, sobre pequeños resaltes topográficos con buenas perspectivas paisajísticas, caso de Rojales, con el complejo residencial de Ciudad Quesada, y de San Fulgencio, con la Escuera. En el litoral norte de Alicante, en municipios como Benisa y Calpe, las unidades de actuación urbanística adquirirían menor tamaño y densidad pero paulatinamente se hacían más extensivas, a costa

de secanos y superficies forestales (Navalón, R. 2001). La reducción de regadíos productivos ha sido espectacular en municipios como Torrevieja, El Campello, Rojales o San Fulgencio, con pérdidas de más del 50 % durante 1985-2000. La promoción de campos de golf, asociados a complejos residenciales y hoteleros, se ha impuesto también en municipios costeros como el Campello o el Pilar de la Horadada, donde conviven el turismo y los cultivos hortícolas bajo plástico (Rico, 2002).

Ha habido una espectacular evolución del número de EDAR en la Comunidad. La provincia de Alicante, a fecha 31 de diciembre de 2004, contaba con 145 estaciones depuradoras de aguas residuales para el tratamiento de las aguas residuales, con una capacidad instalada total de depuración de 470.382 m<sup>3</sup>/día (172 hm<sup>3</sup>/año) (Prats et al, 2006). Y en 2006 había en Alicante 148 depuradoras en servicio con un rendimiento de eliminación de la DBO5 del 95%. La producción de fangos anual estaba en torno a las 164 mil toneladas (EPSAR, 2007).

En la Comunidad valenciana 154 hm<sup>3</sup>/año de agua son reutilizados directamente, lo que supone un 30% de las aguas residuales tratadas (**Figura 7**).



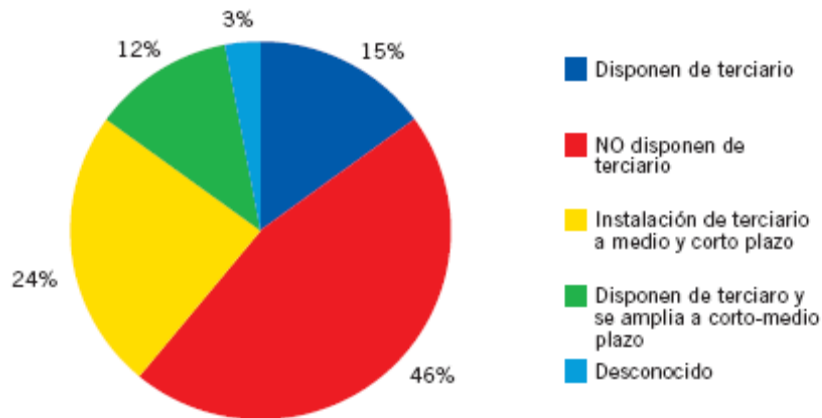
**Figura 7.** Número de EDAR con reutilización y tratamiento terciario en la Comunidad Valenciana

La reutilización de aguas depuradas en la Comunidad Valenciana es de las más importantes de España, 225 hm<sup>3</sup>/año son reutilizados en total, lo que supone un 45%.

En la provincia de Alicante todavía queda un 54,8% (93,1 hm<sup>3</sup>/año) de la capacidad total de depuración instalada que no va a ser sometido a tratamiento terciario por el momento. En muchas de las EDAR se ha constatado que la calidad de los efluentes no reúne las características requeridas para la mayoría de los usos posibles. En consecuencia, se debería valorar la necesidad de establecer este tipo de tratamientos que mejoren la calidad del agua y posibiliten su amplia reutilización.

De manera gráfica, en la **Figura 8** se realiza la comparación entre el porcentaje del caudal tratado en los terciarios actuales y el porcentaje de caudal previsto en los terciarios de próxima construcción en las EDAR de la provincia de Alicante.





**Figura 8.** Porcentaje de caudal tratado en los terciarios actuales y el previsto en los terciarios de próxima construcción en las EDAR de la provincia de Alicante.

Según la EPSAR (2007), en el año 2010, la Comunidad Valenciana estará en condiciones de reutilizar 350 hm<sup>3</sup>/año (70%).

## 2.5 CONCLUSIONES

En aquellas regiones donde los recursos hídricos son abundantes, la reutilización de las aguas residuales, ya sean sin tratamiento previo o regeneradas, se da de una manera habitual. Debido a los fenómenos de dilución, asimilación y dispersión en las masas de agua, los contaminantes son minimizados o estabilizados, a tal grado que cuando las aguas son extraídas para algún uso, éstas cumplen con la calidad necesaria para ser utilizadas.

La situación se complica en aquellos lugares donde la disponibilidad de agua es baja, pues ello conlleva que los fenómenos antes mencionados no logren alcanzar una calidad del agua aceptable, y por lo tanto, los usos del agua empiecen a restringirse.

Por lo tanto existen dos zonas donde la práctica de la regeneración y reutilización de las aguas residuales es evidente:

1. aquellas zonas continentales donde la precipitación es escasa y
2. las islas, donde debido posiblemente a la falta de infraestructura para la captación la reutilización se convierte en una opción para el suministro de agua. Así pues para estas dos regiones, existe una gran cantidad de literatura reciente que expone casos de estudio sobre la práctica de regenerar las aguas residuales y su posterior reutilización en todos los usos en los que se utiliza en agua, incluido el uso para consumo humano de forma directa.

Queda de manifiesto entonces que la regeneración y reutilización de las aguas residuales es cada vez más relevante, sobre todo en aquellas zonas donde la posibilidad de acceder a otras fuentes de suministro es cada vez más complicada.

Es en estas condiciones es necesaria una buena gestión del agua, entendida esta como una gestión integral, sostenible, eficiente, equitativa y por cuenca. Es en esta gestión integral del agua, donde debe considerarse tanto la cantidad disponible, como la calidad que presenta el agua para poder ser utilizada.

Una buena gestión del agua, donde el intercambio de usos permita sustituir aguas regeneradas por aguas de fuentes convencionales, permitirá liberar volúmenes de agua para usos prioritarios como el suministro de agua para el consumo humano, ya que la reutilización de aguas regeneradas de manera directa o indirecta para el consumo humano sigue incipiente debido a motivos sanitarios y a la percepción negativa de los consumidores.

Los avances tecnológicos y el abaratamiento de la tecnología permite cada vez más el impulso de SRRAR; existen indicios (Seguí, 2004) de que los costes de regeneración y reutilización, en algunas zonas, empiezan a ser inferiores a los del transporte de agua procedente de fuentes convencionales que se encuentran a grandes distancias.

La evidencia internacional sobre la práctica de la regeneración y reutilización de aguas residuales es muy extensa. Sin embargo, esta información se encuentra muy dispersa. Asimismo destaca la falta de información documental sobre la regeneración y/o reutilización de las aguas residuales en los países en vías de desarrollo.

Por otro lado, la información reciente en el ámbito de la regeneración y reutilización de las aguas residuales es muy diversa, tanto en la forma como en el fondo (Seguí, 2004). Esto provoca distorsiones en la información que suelen ser a priori engañosas.

Por otra parte, es muy común expresar el beneficio de regenerar y reutilizar las aguas residuales como un porcentaje del total de las aguas residuales producidas. Sin embargo, esto es correcto bajo una visión de saneamiento, pero no cuando se habla de considerar a la regeneración y reutilización de aguas residuales como una fuente alternativa de abastecimiento.

Es decir, lo adecuado sería comparar el agua regenerada y reutiliza con respecto al total de los recursos hídricos utilizados en una determinada unidad de gestión (Seguí, 2004). De esta manera se podrá observar la repercusión que tiene la regeneración y reutilización de aguas residuales como una fuente alternativa de abastecimiento.

En la comunidad valenciana si se quiere incrementar la reutilización de aguas residuales a corto plazo, será necesario (Rico, 2002) acometer las siguientes actuaciones:

1. La generalización de sistemas terciarios y de desalación, que garanticen a los usuarios unas aguas regeneradas en condiciones óptimas, especialmente en cuando a salinidad.
2. El establecimiento de fórmulas de complementariedad entre usuarios urbano-turísticos y agrarios, con el intercambio de aguas limpias a cambio de depuradas a bajo coste.
3. La difusión de las residuales depuradas en usos urbanos (baldeo de calles, riego de jardines, fuentes, etc.) y recreativos (campos de golf).

En algunas depuradoras de la provincia de Alicante está previsto ampliar el tratamiento terciario, mientras que en otros casos en los que no se dispone esta prevista su construcción a corto o medio plazo (Prats et al, 2006).

### **3 USO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEPURADAS PARA REUTILIZACIÓN**

En sus inicios, la depuración del agua residual apareció como respuesta al problema del vertido de los residuos humanos en las incipientes ciudades. A lo largo del siglo XX, la tendencia sobre la depuración cambió, debido básicamente al explosivo crecimiento de las ciudades. La visión actual del saneamiento de las aguas residuales en las grandes ciudades es la construcción, a gran escala y de forma

centralizada, de sistemas de regeneración. Algunos autores creen que el futuro de la gestión se encuentra en los sistemas de tratamiento a pequeña escala que descentralizan el problema del tratamiento del agua residual y que comportan muchas ventajas en núcleos urbanos de poca densidad de población.

### 3.1 DISPONIBILIDAD DE AGUAS RESIDUALES DEPURADAS. DIRECTIVA 91/271/CEE.

El agua residual municipal es el nombre que recibe el residuo líquido recogido por la red municipal de saneamiento. El agua residual se transporta hasta una planta de tratamiento o estación depuradora de aguas residuales (EDAR). Este residuo es el resultado de la mezcla de cuatro tipos de agua: 1) el agua residual doméstica, 2) el agua residual industrial, 3) el agua de escorrentía y 4) el agua de infiltración. Su composición puede variar enormemente de un lugar a otro en función de las variaciones que se produzcan en los distintos tipos de agua.

El agua residual tratada debe tener unas características sanitarias que permitan prevenir la degradación ambiental y a la vez proteger la salud pública, especialmente si existe la intención de reutilizar, tanto si este aprovechamiento comporta un contacto directo o indirecto con las personas. El agua es un vínculo de transmisión de una gran variedad de microorganismos patógenos, parásitos y virus. El principal peligro de la contaminación biológica está en el vertido de aguas residuales en general y de los excrementos en particular. A este hecho debe añadirse la posible presencia de compuestos tóxicos que, conjuntamente con los contaminantes biológicos, pueden poner en peligro la salud de las personas cuando éstas se exponen a las aguas residuales no tratadas, ya sea por contacto, inhalación o ingestión. Para preservar la salud pública es necesario aplicar tratamientos encaminados a eliminar o disminuir estos riesgos.

El aprovechamiento de un agua regenerada requiere normalmente las siguientes fases:

1. Su transporte desde la planta de regeneración hasta el lugar de utilización.
2. Su almacenamiento o regulación para adecuar el caudal suministrado por la planta a los caudales consumidos.
3. La definición de unas normas de utilización del agua que permitan minimizar los posibles riesgos directos o indirectos para el medio ambiente, las personas que la utilizan, la población circundante al lugar de uso y los consumidores de cualquier producto cultivado con el agua regenerada.

El objetivo del proceso de depuración de las aguas residuales municipales es el de conseguir una eliminación de la carga contaminante de origen orgánico. De este modo puede ser vertida a un receptor sin que se produzcan daños ambientales. La eliminación se sitúa en promedio entre el 90% y el 95%, expresado en términos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y de materia en suspensión (MES).

Las EDAR suelen estar compuestas básicamente de estas tres partes:

1. **Pretratamiento:** implica las operaciones que se realizan de forma previa al inicio del tratamiento propiamente dicho. Estas operaciones suelen incluir el desbaste y/o tamizado para la eliminación de elementos de gran tamaño.
2. **Tratamiento primario:** consiste en separar del agua la materia orgánica fácilmente sedimentable por efecto de la gravedad, se realiza en los decantadores primarios. Este proceso tiene un efecto limitado de eliminación de la mayoría de especies biológicas

presentes en el agua residual, sin llegar a reducir de forma eficaz la concentración de bacterias o virus contenidos en ella.

3. **Tratamiento secundario:** consiste en la eliminación de la materia orgánica biodegradable soluble y coloidal y es llevado a cabo por un proceso biológico aeróbico en tanques de aireación por medio de microorganismos aerobios. De esta manera se reduce la concentración de microorganismos en el efluente del tratamiento primario, pero no llega a eliminarlos por completo. En general, los procesos de fangos activados son más eficaces que otros sistemas de tratamiento secundario para reducir las poblaciones de bacterias y virus.

Las posibilidades de la reutilización están condicionadas por el número de estaciones depuradoras de aguas residuales en funcionamiento. El cumplimiento de la Directiva Europea 91/271/CEE, sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, obligará a la construcción de numerosas EDAR, lo que supone un gran impulso para este sistema de utilización del recurso.

Partiendo de un agua procedente de una EDAR convencional se ha de exigir como mínimo respetar las condiciones de vertido de la Directiva Europea 91/271/CEE.

**Tabla 1.** Requisitos por los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas sujetos a lo dispuesto en los artículos 4 y 5 de la Directiva 91/271/CEE.

| Parámetros                                      | Concentración<br>(media diaria maxima) | Porcentaje mínimo de<br>reducción (%) |
|---|--|---------------------------------------|
| <b>DBO<sub>5</sub></b><br>(a 20 °C sin nitrif.) | 25 mg/l O <sup>2</sup>                 | 70-90                                 |
| <b>DQO</b>                                      | 125 mg/l O <sup>2</sup>                | 75                                    |
| <b>SS Totales</b>                               | 35 mg/l                                | 90                                    |

La **Tabla 1** muestra un resumen del cuadro 1 del ANEXO I de la Directiva 91/271/CEE y la **Tabla 2** un resumen del cuadro 2. Las dos pretenden orientar sobre los requisitos mínimos permitidos, para más detalle consultar la Directiva 91/271/CEE.

**Tabla 2.** Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles propensas a eutrofización.

| Parámetros     | Concentración<br>(media diaria maxima) | Porcentaje mínimo de<br>reducción (%) |
|----------------|--|---------------------------------------|
| <b>P total</b> | 1-2 mg/l P                             | 80                                    |
| <b>N total</b> | 10-15 mg/l N                           | 70-80                                 |

Respecto al cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE todas las EDAR cumplen los parámetros relativos a la eliminación de materia orgánica (DBO<sub>5</sub> y DQO). Respecto a los vertidos que puedan afectar a zonas sensibles, las depuradoras de Ibi y Crevillente son las que realizan un vertido más impactante (Prats y Melgarejo, 2006), alejado de las directrices de calidad que se apuntan en la directiva 91/271 para las zonas sensibles y, en consecuencia, sobre estas depuradoras se debe realizar un esfuerzo sobre el proceso, o conseguir la reducción de la contaminación en origen, en parte de procedencia industrial.

### 3.2 VIABILIDAD ECONÓMICA Y SOCIAL DE LA UTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS

El término aguas regeneradas, que cada día cobra mayor fuerza, tiene que ver simplemente con la búsqueda de la aceptación social de estas aguas, pues desde el punto de vista técnico, y siempre desde el ámbito de las aguas residuales; el efluente tratado, las aguas tratadas y las aguas regeneradas son términos sinónimos.

El triunfo del agua regenerada se dará, sobretodo, si se realizan las siguientes acciones:

- Evaluaciones de manera exhaustiva sobre el crecimiento de los cultivos con agua regenerada.
- Comparaciones químicas y microbiológicas detalladas entre el agua regenerada y la de abastecimientos.
- Realización de estudios epidemiológicos en poblaciones que utilizan agua regenerada.
- Realización de pruebas en animales para evaluar efectos carcinógenos, teratogénicos y mutagénicos potenciales.

Con el agua regenerada se puede producir alimentos de la alta calidad, así como ser una fuente de suministro tan buena como la de los abastecimientos de agua fresca locales. Sin embargo, las preocupaciones por la reutilización potable indirecta continúan, y se han editado más publicaciones mejorando los métodos de supervisión y de análisis. Según Seguí (2004) las actuales preocupaciones son:

- Los posibles efectos de patógenos emergentes (**Tabla 3**).
- Las implicaciones de varios subproductos de la cloración y de trazas importantes de compuestos farmacéuticos, nitrosodimetilaminas (NDMA5), y hormonas, que se han detectado en muchos efluentes regenerados.

**Tabla 3.** Muestra de los agentes microbianos infecciosos que se pueden encontrar en el agua residual y las enfermedades que ocasionan (OMS, 2003).

| Agente patógeno  | Enfermedad      | Agente patógeno  | Enfermedad           |
|------------------|-----------------|------------------|----------------------|
| <i>Bacterias</i> |                 | <i>Protozoos</i> |                      |
| Cambylobacter    | Gastroenteritis | Balantidium coli | Disenteria           |
| Escherichia coli | Gastroenteritis | Cryptosporidium  | Diarrea              |
| Salmonella Typha | Fiebre tifoidea | Entamoeba        | Amebiasis            |
| Vibrio cholerae  | Cólera          | Giardia lamblia  | Giardiasis           |
| <i>Helmitos</i>  |                 | <i>Virus</i>     |                      |
| Echinococcus     | Hidatidosis     | Astrovirus       | Gastroenteritis      |
| Enterobius       | Enterobiasis    | Enterovirus      | Meningitis, otros    |
| Necator          | Necatoriasis    | Hepatitis A      | Hepatitis infecciosa |
| Taenia           | Taeniasis       | Parvovirus       | Gastroenteritis      |

Hay otras razones por las cuales los ciudadanos son motivo de resistencia en el uso de agua regenerada (Asano, 1998): (1) los usuarios pueden estar preocupados acerca de los efectos perjudiciales del agua regenerada en procesos industriales, jardinería o cultivos, (2) los usuarios pueden poseer su propio abastecimiento de agua lo que puede representar un menor coste que la conexión a la red municipal o el precio ofertado por el uso de agua regenerada, (3) puede existir desacuerdo en la aceptación del precio del agua regenerada, (4) los usuarios pueden estar renuentes a pagar por los

costes adicionales en conducciones o transporte del agua regenerada para ser puesta en el punto de reutilización, (5) los usuarios pueden estar fuera de los límites propuestos por el proyecto, requiriéndose la negociación con otras jurisdicciones, y (6) los departamentos de salud locales o estatales pueden desaprobar su uso por riesgos a la salud pública.

En respuesta a la preocupación de la comunidad, los resultados del estudio de Lindsey et al. (1996) muestran diferencias poco significativas en el crecimiento de las plantas regadas con agua residual regenerada respecto al riego con agua potable en Mann County, California, EE.UU. Por su parte, Filice (1996) presentó los resultados de opinión sobre reutilización de agua regenerada en San Francisco, encontrando un fuerte respaldo para los usos de regadío (Seguí, 2004).

Para que la implantación de proyectos de reutilización pueda tener éxito, se requiere que la comunidad se involucre en el proyecto, que sea informada sobre los orígenes de esta fuente de agua y se le muestre la seguridad de su manejo. La educación pública es por tanto esencial:

1. definición precisa de la terminología.
2. demostración de la calidad del agua regenerada.
3. promoción de las ventajas con respecto otras fuentes.
4. fomento de los beneficios ambientales.
5. educación en la seguridad de su uso.

Este aspecto social cobra relevancia en los últimos años debido básicamente a la inquietud y reticencia social que conlleva la reutilización de las aguas regeneradas. Por esta razón, es cada vez más notable la incorporación de especialistas relacionados con las áreas de las ciencias sociales, que antes no estaban vinculados con el sector del agua.

En la reutilización de aguas es común la existencia de varias corrientes que investigan sobre este tema sin que confluyan en un foro u organización común. Se perciben dos grupos de profesionales muy definidos, por un lado una Corriente de la ingeniería Civil, particularmente de la sub-disciplina de la ingeniería sanitaria y por otro lado la ingeniera agrícola, esta última relacionada con la reutilización para ese uso en particular.

---

### 3.2.1 VIABILIDAD ECONÓMICA

El coste total de un SRRAR incluye todos los costes internos o privados de la producción y distribución del agua regenerada además de todos los costes externos, tales como los costes ambientales y sociales. Tradicionalmente los proyectos de regeneración y reutilización del agua han considerado solamente los costes privados y que actualmente son la base de información para el estudio del ciclo de vida de los SRRAR.

Los costes privados de un SRRAR están conformados por:

- Los costes de inversión que corresponden a todos aquellos bienes que es necesario adquirir inicialmente y durante la vida útil del proyecto para cumplir con las funciones de regeneración y reutilización del agua residual. Los principales componentes del coste de inversión para un SRRAR son: 1) Terreno, 2) Obra Civil, 3) Maquinaria y Equipo principal y 4) Instalaciones y Obras de conexión.
- Los costes financieros que corresponden a los intereses monetarios que deberán pagarse por el financiamiento de capitales para poder realizar la implantación del SRRAR.

- Los costes de explotación y mantenimiento son todas aquellas partidas directamente relacionadas con el funcionamiento del SRRAR, se dividen en costes fijos y variables. Los costes fijos de explotación son aquellos que se generan como consecuencia de la operación del sistema, independientemente del volumen de agua regenerada. Los costes variables de explotación son aquellos que están directamente asociados con la producción del agua regenerada, varían en proporción directa al volumen producido.

Según un estudio de Asano (1998) sobre los costes totales del agua regenerada según su reutilización en EE.UU., la agricultura se situaba como uno de los mínimos costes (0,15 – 0,48 euros/m<sup>3</sup>) y para riego urbano unos costes de 0,25 – 0,95 euros/m<sup>3</sup>.

Según Asano (2001), los costes en los sistemas de regeneración biológicos en los EE.UU. tienen la siguiente distribución: 24% del coste corresponde al tratamiento primario, 40% al tratamiento secundario, 22% al tratamiento de los fangos y 14% a la infraestructura administrativa y de control.

Para Seguí (2004) el tratamiento y la disposición de las aguas residuales han sido pagados tradicionalmente por la ciudad que produce las aguas residuales. La irrigación con aguas residuales introduce un nuevo componente económico en la fórmula: los agricultores que se beneficiarán de las aguas residuales regeneradas. Los agricultores pueden comprar las aguas regeneradas del sector urbano, o invertir en el SRRAR, o cubrir los costes operacionales y de mantenimiento. Hay diversos esquemas potenciales entre los sectores urbanos y rurales. Esto significa que los costes totales para la regeneración y reutilización de las aguas residuales son compartidos de alguna manera por ambos sectores:

- Para el sector urbano esto significa una reducción de los costes del tratamiento de las aguas residuales.
- Para el sector rural esto significa un acceso a una fuente confiable del agua para la irrigación en un coste más bajo que el coste de importar el agua convencional de fuentes distantes.

---

### 3.2.2 LOS PRECIOS DEL AGUA REGENERADA

La literatura demuestra que a medida que los requisitos de calidad del agua son más exigentes, el proceso de tratamiento se hace más complejo y costoso (Seguí, 2004).

La oferta del agua regenerada está determinada esencialmente por la capacidad de producción del SRRAR, donde la materia prima principal para la producción es el agua residual. Partiendo de este principio la oferta de agua regenerada puede ser considerada, una vez alcanzada la capacidad máxima del SRRAR, como constante y garantizada (siempre y cuando no existan restricciones en el suministro de agua potable a la población que genera el agua residual).

Los mayores usuarios de agua regenerada son agricultores y los clientes de los llamados usos recreativos como campos de golf y parques, así como el riego en áreas verdes en escuelas. Otros usos incluyen plantas de producción de energía, lavado de coches y algunas aplicaciones comerciales.

El establecimiento del precio del agua regenerada es un proceso determinante de la operatividad y el éxito de cualquier programa de reutilización de agua. Este proceso es complejo, debido fundamentalmente a que suele ser más costoso suministrar agua regenerada que abastecer con agua potable, a pesar de que el agua regenerada tiene una calidad inferior a la del agua potable. No obstante,

los beneficios a largo plazo de la utilización de agua regenerada hacen que numerosos servicios públicos de abastecimiento de agua estén promoviendo su utilización (Trapote, 2007).

Los costes de abastecimiento de agua potable suelen estar basados en inversiones pasadas, y en gran parte amortizadas. Por el contrario, los proyectos de suministro de agua regenerada han de enfrentarse a unas inversiones y un régimen de explotación y mantenimiento que, de acuerdo con los métodos tradicionales de asignación de costes, resultan en un coste del agua regenerada igual o incluso superior al del agua de abastecimiento público. El dilema en estos casos es evidente: si el agua regenerada se factura a su precio real de coste, los usuarios no tendrán generalmente un incentivo suficiente para utilizarla; por otra parte, si el agua regenerada se factura a un precio inferior a su coste de producción, será necesario subvencionarla con otras fuentes de ingresos. La cuestión que surge en este caso es determinar quién debe hacerse cargo de esa subvención, y cuál ha de ser su cuantía (Trapote, 2007).

La recuperación del coste oscila desde una pequeña proporción hasta el 100% del coste total de regenerar y reutilizar el agua residual. La mayoría de empresas aparentemente recuperan el 75% del coste del agua regenerada, recuperando en casi todos los casos los costes de explotación. La mayoría de las empresas no recuperan sus costes, por lo que es necesario que los sistemas de agua regenerada sean subsidiados por otros clientes o por otros medios, dando lugar a subsidios cruzados difíciles de compensar. Las subvenciones de los costes de agua regenerada pueden ser justificadas por distintas razones, basándose en los beneficios que los clientes tienen al recibir agua regenerada, entre los que podemos mencionar: un agua de mejor calidad, reducir los vertidos de agua residual, una mayor disponibilidad de abastecimiento con agua potable y menores restricciones de riego durante periodos de sequía (Seguí, 2004).

Las conclusiones de los autores sostienen que actualmente muchas empresas han elegido basar sus tarifas de agua regenerada como un porcentaje de la tarifa de agua potable. Aunque esta estrategia puede ser efectiva para promocionar el uso de agua regenerada, el éxito de un programa de agua regenerada reside en el grado en que sea capaz de recuperar sus costes totales. Los autores consideran que para que un sistema de agua regenerada sea competitivo con los sistemas de agua potable, estos deben ser siempre evaluados en igualdad de condiciones, es decir, contemplando en ambos casos la distribución del agua, ya que de lo contrario los sistemas de regeneración se encontrarán siempre en gran desventaja.

Sin embargo desde un punto de vista económico, parece razonable que los costes deberían ser, cuando menos, la base del bien ofertado. Si, además, consideramos que tal bien puede resultar escaso en términos económicos, es decir, la demanda del bien a ese precio fuera superior a la oferta, la lógica de mercado llevaría a valorar el bien sobre la base de su valor de escasez, por encima del citado valor de coste (Seguí, 2004).

Es decir, el precio debería calcularse de manera que al menos todos los costes relacionados (incluyendo los ambientales que no presentan un reflejo en el mercado, por causas diversas) puedan ser recuperados.

Entre los posibles beneficios derivados de la reutilización planificada anteriormente citados, cabe resaltar la mayor disponibilidad de agua potable que ello conlleva (al ser sustituida por agua regenerada) y la supresión de las restricciones de riego durante periodos secos, evitando las enormes pérdidas que los periodos de sequía comportan usualmente.



### 3.2.3 CONCLUSIÓN

Los argumentos ambientales son cada día más sólidos para justificar la implantación de SRRAR, pues contribuyen, por una parte, al control de la contaminación de las masas de agua, y por otra, al aumento en la disponibilidad de agua, sobre todo en aquellas zonas de baja disponibilidad. Creándose la posibilidad de recuperar y/o mantener los caudales ecológicos o la recarga de acuíferos. No obstante, es necesario desarrollar una metodología que permita la visualización y evaluación de los aspectos ambientales.

Los aspectos sociales cobran cada día mayor importancia. Los usuarios quieren conocer y estar informados de las características, ventajas y desventajas que conlleva el uso del agua regenerada, las actuales investigaciones se centran en las preferencias que los usuarios tienen por el uso del agua regenerada, así como, el desarrollar mecanismos de difusión que permitan dar a conocer las ventajas de la reutilización del agua regenerada.

Por lo que respecta a los aspectos económicos existen atrasos metodológicos importantes, pues si bien es cierto, se reconoce la necesidad de realizar una evaluación económica, en la práctica simplemente se desarrolla un análisis de costes como soporte para la toma de decisión.

Para finalizar, las principales exigencias para fomentar la reutilización de agua regenerada tanto social, política y económicamente, serían:

- Responsabilidades.- Establecer las entidades responsables de la producción de agua regenerada, así como los mecanismos para la verificación y control de la calidad en la producción.
- Transferencias de agua.- Fomentar la transferencia e intercambio de aguas regeneradas por aguas de fuentes convencionales.
- Política tecnológica.- Fomentar la investigación, desarrollo y transferencia tecnológica de sistemas de regeneración y reutilización del agua residual.
- Capacidad técnica.- Contar con una red de especialistas que permitan dar soporte a los sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales.
- Fijación de precios / Recaudación.- Establecer políticas de tarificación adecuadas que permitan la recuperación de los costes, o en su defecto los subsidios pertinentes que permitan al agua regenerada ser competitiva.
- Capacidad de información.- Fomentar la difusión de las características, ventajas en su uso y al medio ambiente y los niveles de confianza en la utilización del agua regenerada, que permitan al usuario estar plenamente informado para la elección entre la utilización de agua convencional o agua regenerada.

## 3.3 LOS IMPACTOS DE LA REGENERACIÓN

Tanto para conocer los costes económicos como los sociales o medioambientales, hay que conocer los impactos que causa la regeneración de aguas residuales. Por eso se resume a continuación los conceptos obtenidos del trabajo realizado por Seguí (2004):

Definiremos como impacto cualquier consecuencia producto de la implantación de un SRRAR, deseada o no, promovida o casual, generalmente susceptible de medición, en un área concreta de la unidad de gestión hidráulica. Distinguiremos en una primera instancia entre impactos internos y externos.

Los impactos internos o privados son aquellos que están directamente ligados al proceso de producción del agua regenerada y su posterior reutilización. Corresponden básicamente a los ingresos (impactos privados positivos) por la venta del agua regenerada o algún subproducto, o por los costes de inversión, explotación y mantenimiento del SRRAR (impactos privados negativos).

Los impactos externos, (por ejemplo la afectación a terceros, el control de la contaminación, el aumento en la disponibilidad del agua o la garantía en el suministro), si bien pueden ser más difícilmente computables, no por ello son de menor importancia, pues un impacto de estas características puede provocar prácticamente la censura del proyecto o la viabilidad económica del mismo.

**Tabla 4.** Resumen de los impactos de la regeneración y reutilización de aguas residuales (Seguí 2004).

| Grupo de Impactos                                     | Descripción de los impactos                                   |
|---|---|
| La infraestructura                                    | La captación y almacenamiento de agua                         |
|   | La potabilización de agua de abastecimiento                   |
|   | La conducción y transporte de agua potable                    |
|   | La rehabilitación y ampliación de las redes de alcantarillado |
|   | El tratamiento y/o vertido del agua residual                  |
|   | La regeneración y reutilización del agua residual             |
| El acondicionamiento y reutilización de contaminantes | El nitrógeno  |
|   | El fósforo  |
|   | Los fangos  |
|   | La energía  |
| El uso del recurso                                    | La cantidad de agua   |
|   | Las garantías de suministro                                   |
|   | La calidad del agua   |
| La salud pública                                      | Los riesgos biológicos  |
|   | Los riesgos físico-químicos                                   |
| El medio ambiente                                     | El agua superficial   |
|   | El agua subterránea   |
|   | La contaminación de las masas de agua                         |
|   | El hábitat de humedales y ríos                                |
| La educación  | Técnica   |
|   | Cultura del agua  |

A continuación se definirán y explicarán los 6 grupos en los se agrupan los diferentes impactos que pueden presentarse al implantar un SRRAR.

**Infraestructura hidráulica:** Bajo los impactos de la infraestructura hidráulica se consideran todos los costes privados (costes de inversión, explotación y mantenimiento) relacionados con las instalaciones hidráulicas involucradas en la gestión del agua (captación-almacenamiento-potabilización-distribución-recolección-depuración-vertido y/o regeneración-reutilización) de una determinada región, idealmente esta región debería coincidir con la unidad de gestión. En este grupo se pretende resaltar solamente los elementos fundamentales entre la infraestructura hidráulica y los SRRAR.

Esencialmente se busca evaluar los costes privados de las diversas opciones de solución dentro de una zona de estudio. Las posibilidades convencionales de suministro son: la explotación de acuíferos, los transvases de agua, la potabilización con tratamientos avanzados, son evaluadas considerando la incorporación de las fuentes alternativas de abastecimiento: la regeneración y reutilización de las aguas residuales y la desalación.

**Acondicionamiento y reutilización de contaminantes:** La acción de depurar o regenerar aguas residuales es en síntesis la separación y/o eliminación de componentes no deseados en el agua, con el fin de que el agua regenerada cumpla unas condiciones de calidad que permitan que ésta pueda ser nuevamente reutilizada.

Existen contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, que para algún uso en particular pueden ser aprovechados convirtiéndolos en sustancias nuevamente útiles y con un valor comercial. Así pues, el acondicionamiento y reutilización de contaminantes, como el nitrógeno, el fósforo, los fangos y la energía, puede ser una opción interesante. En la actualidad, existen diversas tecnologías que permiten el acondicionamiento y reutilización de contaminantes, por lo que se puede decir que no hay limitación técnica para desarrollar este tipo de prácticas.

Los impactos a considerar de cara al acondicionamiento y reutilización de contaminantes son:

- El Nitrógeno
- El Fósforo
- Los fangos
- La energía

**Uso del recurso:** El uso del recurso está íntimamente ligado con las necesidades a satisfacer con su utilización, por un lado están los usos productivos (agrícola, industrial, urbano, turístico y recreativo) y por otro los usos ambientales (abastecimiento de agua potable y ecológico). La sustitución del agua procedente de fuentes convencionales por agua regenerada en los usos mencionados esta dada por factores físicos, tecnológicos, económicos, sociales y culturales. Sin embargo, los factores físicos como son la disponibilidad, la garantía en el suministro y la calidad del agua son predominantes para que los demás factores se ajusten a nuevos escenarios.

Las diferentes actividades realizadas por el ser humano requieren de una cantidad mínima de agua, la cual esta en función de la disponibilidad espacial y temporal del recurso. Pero cada vez se provoca que se tengan que buscar nuevas fuentes de suministro de agua de primer uso cada vez mas alejadas del lugar de la demanda.

Las garantías de suministro de agua regenerada tan solo disminuirán, en el peor de los casos, debido a las posibles restricciones en el suministro de agua potable. Por tanto, al tener una generación constante de aguas residuales se puede garantizar la producción de agua regenerada. Así pues, regenerar y reutilizar agua residual no solo es una alternativa viable para el suministro de agua, sino que también es una fuente que garantiza el recurso hídrico en todo momento.

Pero disponer de agua en cualquier momento no es garantía para satisfacer una demanda. Se requiere, además, que ésta sea de la calidad adecuada para cubrir las exigencias solicitadas. La regeneración y reutilización del agua residual, permite contar con agua de calidad, que en algunos casos, puede ser superior a la existente en las fuentes convencionales.

**Salud pública:** Este grupo de impactos es el que da origen a los sistemas de regeneración de las aguas residuales como una respuesta a la prevención y control de la contaminación, y cuya finalidad es la de evitar enfermedades de origen hídrico y disminuir los riesgos de epidemias. Para poder regenerar adecuadamente el agua residual y alcanzar la calidad requerida para determinado tipo de reutilización, es necesario conocer cuáles son los principales contaminantes presentes en el agua residual, tanto de tipo químico como biológico, entender el significado de su presencia y cómo realizar el adecuado tratamiento para lograr la eliminación de los contaminantes en cuestión con el fin de alcanzar la calidad deseada para el uso específico.

**Medio ambiente:** El cambio del paradigma en los usos del agua reconoce la existencia del uso ecológico. Según estos nuevos principios, este uso debe ser incluido dentro de la gestión integral de los recursos hídricos. Los impactos identificados afectan al agua superficial, al agua subterránea, a la contaminación de las masas de agua y al hábitat de humedales y ríos.

**Educación:** Este grupo considera los cambios de conducta de los operadores de plantas depuradoras al proveer una materia prima como es el agua regenerada. La idea parte del hecho de que las demandas de exigencia por el cliente de agua regenerada provocaran cambios de actitud en los trabajadores, puesto que están sujetos a una supervisión y control más riguroso, lo que repercute en la producción de agua de buena calidad de manera constante.

Por otro lado, contar con sistemas de regeneración ejemplares, así como con personal calificado permite tener un capital educativo de primer nivel, donde se busque sensibilizar a la ciudadanía de la importancia de estas acciones.

Un personal responsable y profesionalizado permite una reducción de costes en la explotación y mantenimiento de estas las plants de regeneración.

Por otra parte, la infraestructura implantada para la regeneración y reutilización del agua residual, forma un patrimonio que junto con su personal, puede ser utilizado con fines didácticos para el cuidado del medio ambiente. El desarrollo de planes y programas de visitas guiadas para diferentes sectores de la población, puede contribuir en el mediano y largo plazo a un aumento de la demanda de agua regenerada, debido a la sensibilización del público de una región determinada.

El impulso de un programa de sensibilización a la población, conlleva inversiones en personal capacitado para el área de comunicación social y la elaboración de material didáctico, además de gastos en difusión e implantación del programa, así como gastos de transporte.

### 3.4 TRATAMIENTO TERCIARIO EN LAS AGUAS RESIDUALES

La calidad ambiental está reconocida como una parte esencial de nuestra vida, en este contexto, en muchos países se están promulgando normas de calidad cada vez más exigentes de los efluentes de las aguas residuales tratadas, que necesitarán un alto grado de tratamiento terciario para satisfacer los estándares de calidad exigidas (Soriano y Hernandez, 2006).

El tratamiento terciario de un proceso de depuración permite rebajar algunos de los componentes del agua residual que no es posible reducir mediante el tratamiento secundario. Un tratamiento terciario consiste generalmente en una coagulación-floculación, una decantación y una filtración. De todo esto hablaremos más adelante.

El tratamiento terciario también puede llegar a eliminar una fracción elevada de los virus y las bacterias presentes en el afluente. Además, este proceso de tratamiento reduce la turbiedad del agua residual hasta niveles muy bajos, lo que asegura la eficacia del proceso de desinfección que se efectúa después de la filtración.

### 3.5 OTRAS OPCIONES. REACTORES BIOLÓGICOS DE MEMBRANA (MBR)

La demanda de agua potable aumenta constantemente debido fundamentalmente al desarrollo industrial y al aumento de la densidad de población en zonas concretas y, como consecuencia, la cantidad de agua residual que se vierte. Este incremento en la demanda y el volumen de agua contaminada y su impacto sobre el medio está haciendo que la presión sobre los niveles de contaminación sea más exigente y la calidad requerida se acerque a los requerimientos de reutilización.

Esta situación plantea a los sistemas de tratamiento de aguas residuales unas exigencias de:

- Alto rendimiento de depuración.
- Costes de explotación bajos.
- Alta flexibilidad para las oscilaciones.
- Mínima producción de lodos.
- Menos necesidad de espacio.

La solución tradicional en el tratamiento de aguas residuales consiste en los tratamientos biológicos mediante fangos activos en todas sus variantes, sin embargo, el punto débil del sistema es el decantador secundario por los siguientes motivos:

- Limita la concentración de fangos del sistema.
- Problemas de bulking y por tanto, de decantación.
- Tóxicos que afectan a la biomasa y generan turbidez en el efluente.

Además, para alcanzar el objetivo de vertido a cauces públicos protegidos y de reutilización de las aguas depuradas, se precisa la incorporación de tratamientos terciarios, consistentes en su mayor parte en filtros de arena y carbón activo.

Los reactores biológicos de membrana (**Figura 9**) suponen un adelanto a los sistemas tradicionales incorporando en una etapa las operaciones de aireación, decantación secundaria y filtración. Estos sistemas ofrecen varias ventajas frente a los sistemas convencionales:

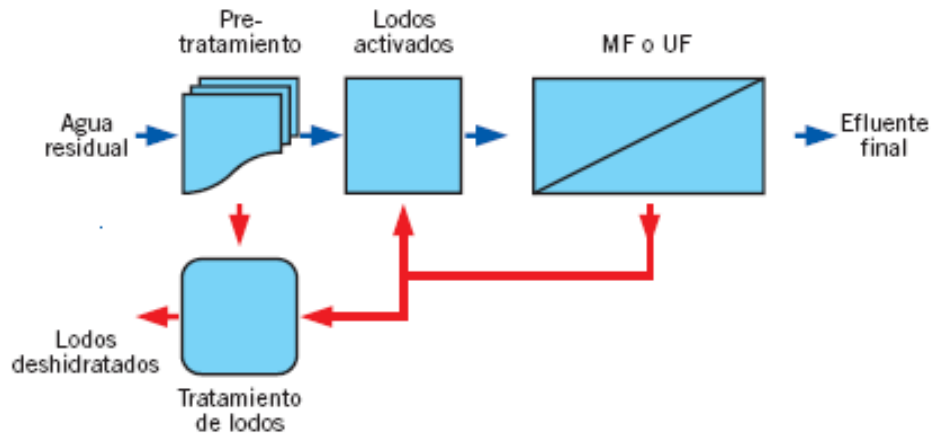
- La calidad del efluente es mayor que con los sistemas de filtración con arena y genera menos lodos.
- La concentración de biomasa en suspensión es mayor, lo que supone reducción de tamaño del reactor.
- Sin decantador, el sistema es insensible al bulking y posibilita equipos muy compactos.

Además la membrana retiene no sólo toda la biomasa sino que también previene el escape de enzimas exocelulares y de oxidantes solubles que crean un licor de mezcla más activo capaces de degradar una gama más amplia de compuestos (Prats y Melgarejo, 2006).

El funcionamiento de este tipo de tecnología es el siguiente: el agua del reactor biológico es filtrada pasando a través de las paredes de la membrana a causa de una pequeña depresión producida por una bomba centrífuga. El agua filtrada es extraída del sistema mientras el fango y los compuestos de tamaño superior al poro de la membrana quedan retenidos y permanecen o retornan al reactor biológico.

Este ciclo se alterna con un corto contralavado, en el que se invierte el sentido del flujo para forzar el paso del agua filtrada desde el interior al exterior de la membrana para limpiarla. Periódicamente, en función del grado de ensuciamiento, se realizan limpiezas químicas en profundidad de las membranas mediante su inmersión en una solución de limpieza.

Normalmente se trabaja con concentraciones de sólidos en el reactor (MLSS) del orden de 10-15 g/l (mientras en los sistemas tradicionales no pasan de 6 g/l) y la purga de fango se realiza directamente del reactor.



**Figura 9.** Tratamiento mediante biorreactores de membrana en el que se elimina el tratamiento primario y terciario (Prats y Melgarejo, 2006).

Los biorreactores de membrana (MBR, Membrane Bio-Reactors) están compuestos por dos partes principales 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 (Prats y Melgarejo, 2006). Además se pueden configurar de dos formas:

**Biorreactores con membrana integrada o sumergida:** la unidad de membrana está en el interior del tanque biológico. La fuerza impulsora a través de la membrana se consigue presurizando el biorreactor o creando vacío en el lado permeado de la membrana. Generalmente se coloca el difusor de aire justo debajo del módulo de la membrana para suministrar el aire necesario para el proceso biológico, para homogeneizar el contenido del tanque y para la propia limpieza de la membrana (además la limpieza de la membrana se completa a través de frecuentes retrolavados con agua permeada + aire y cuando es necesario mediante retrolavados con soluciones químicas).

**Biorreactores con membrana externa (o con recirculación):** implica que el licor de mezcla es recirculado desde el biorreactor hasta la unidad de membrana que se dispone externamente a la unidad biológica. En este caso la fuerza impulsora es la presión creada a través de la superficie de la membrana

Esta tecnología es altamente competitiva en las siguientes situaciones condicionantes:

- Necesidad de disminución de fangos.
- Necesidad de un grado de depuración alto; vertido a cauce público, zonas sensibles, pago de canon de vertido elevado.
- Necesidad de reutilización.
- Disponibilidad de espacio.
- Ampliación de la capacidad de tratamiento de plantas convencionales existentes.
- Efluentes industriales con componentes de difícil o lenta biodegradabilidad.

Pero, según Prats y Melgarejo (2006), los principales inconvenientes asociados a la tecnología MBR son:

- Se requiere una inversión inicial importante ya que las unidades de membrana son actualmente bastante caras.
- Hay un gasto energético asociado a la presión o vacío necesario para que el agua permee a través de las membranas.
- Hay problemas de polarización y ensuciamiento.
- Los lodos generados pueden presentar problemas adicionales de deshidratación.
- Y la posible acumulación en el biorreactor de compuestos inorgánicos no filtrables que a determinadas concentraciones podrían ser dañinos para la población bacteriana o afectar a la integridad de las membranas.

#### **4 NORMATIVA DE CALIDAD Y USOS DEL AGUA REGENERADA. PROYECTO DE R.D. 22 DE MAYO DE 2006**

El progreso de la regeneración y reutilización planificada de las aguas residuales no depende únicamente de los avances tecnológicos, sino también de la existencia de un marco legal sólido que marque las directrices para que la reutilización no comporte riesgos para los beneficiarios. (SEGUÍ, 2004)

Muchos países han desarrollado regulaciones y guías de actuación para la reutilización de agua residual tratada de forma que sea segura para la salud pública y el medio ambiente. El económico es un factor claramente dominante en la elección de soluciones. Los países desarrollados han tendido a adoptar una forma de operar que conduce a la pauta de alta tecnología/ alto precio/ bajo riesgo. Algunos países en desarrollo han hecho el esfuerzo de seguir esta misma pauta, pero no siempre han tenido éxito debido a falta de dinero, experiencia o capacidad de control. Es por ello que en la mayoría de estos países se opta por la opción de baja tecnología/ bajo precio/ riesgo controlado según las pautas expresadas por la Organización Mundial de la Salud (Hidalgo y Irusta, 2004).

En Europa, la normativa seguida para la reutilización de aguas residuales no es uniforme. Algunos países Europeos, no tienen una legislación específica en la materia (SEGUÍ, 2004).

El parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea consideran que el agua no es un bien comercial como los demás, si no un patrimonio que hay proteger, defender y tratar como tal (Hidalgo y Irusta, 2004). La Directiva 2000/60/CE establece un marco de actuación en el ámbito de la política de aguas. El objetivo de esta directiva es establecer un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas. Este marco debe contribuir a:

1. Garantizar el suministro suficiente de agua superficial o subterránea en buen estado, tal como requiere un uso del agua sostenible, equilibrado y equitativo.
2. Reducir de forma significativa la contaminación de las aguas subterráneas.
3. Proteger las aguas territoriales y marinas.
4. Lograr los acuerdos internacionales mínimos para la prevención y control de la contaminación del medio ambiente.

Esta directiva marco establece la cuenca hidrográfica como unidad de gestión de los recursos hídricos, por lo que las diferentes fuentes de suministro de agua superficiales, subterráneas y alternativas deben gestionarse de una manera integral.

En España la reutilización de aguas regeneradas se regula en la Ley de Aguas y en el RDPH. Toda reutilización precisa de autorización administrativa y un convenio entre el gestor de la instalación y los usuarios (EPSAR, 2007).

El avance tecnológico tanto en el desarrollo de los sistemas de tratamiento, como en la mejora de los métodos de análisis para la determinación de la calidad de las aguas, ha permitido avanzar en la definición precisa de los criterios físico-químicos y bacteriológicos que un agua regenerada deberá cumplir para poder ser reutilizada.

Cabe destacar que estos criterios se han establecido partiendo del supuesto de que el agua que se piensa regenerar es un agua de origen urbano, por lo que la determinación de las sustancias tóxicas, radioactivas o de otro tipo no tienen especial razón de ser identificadas y cuantificadas, partiendo del supuesto de que los vertidos industriales al alcantarillado municipal están controlados.

La Directiva 91/271/CEE de mayo de 1991 sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas, que debe completarse en todos los Estados miembros a finales de 2005 mediante la construcción de depuradoras en todos los núcleos urbanos mayores de 2.000 h-e en aguas continentales y mayores de 10.000 h-e en aguas costeras, establece para el agua tratada unos objetivos de calidad para minimizar el impacto ambiental según la calificación de las zonas de vertido (sensibles, normales o menos sensibles). Hay que indicar que esta Directiva no está claramente orientada a la reutilización, por lo que aunque se cumpla la Directiva es posible que los efluentes no puedan ser utilizados para muchos de los usos potenciales (Prats y Melgarejo, 2006).

Para la utilización de efluentes de agua regenerada atenderemos al Proyecto de Real Decreto de 22 de Mayo de 2006, en el cual se establecen las condiciones básicas para la reutilización de las aguas depuradas y se modifica parcialmente el reglamento del dominio público hidráulico aprobado por real decreto 849/1986, de 11 de abril.

Según el proyecto de Real Decreto de 22 de mayo de 2006, las aguas regeneradas podrán utilizarse para los usos indicados en el **Anexo I.A** de este Real Decreto. Se exponen a continuación los principales usos y las calidades correspondientes según el R.D.:

#### **1. Usos urbanos:**

##### **Calidad 1.1 RESIDENCIALES**

- a) Riego de jardines privados.
- b) Descarga de aparatos sanitarios.
- c) Sistemas de calefacción y refrigeración de aire.
- d) Otros usos domésticos.

##### **Calidad 1.2 SERVICIOS URBANOS**

- a) Riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos y similares).
- b) Baldeo de calles.
- c) Sistemas contra incendios.
- d) Lavado industrial de vehículos.
- e) Fuentes y láminas ornamentales.



## **2. Usos agrícolas:**

### **Calidad 2.1**

- a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.

### **Calidad 2.2**

- a) Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior.
- b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne.
- c) Acuicultura.

### **Calidad 2.3**

- a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana.
- b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones.
- c) Riego de cultivos industriales, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas.

## **3. Usos industriales:**

### **Calidad 3.1**

- a) Aguas de proceso, limpieza y refrigeración industrial, excepto en la industria alimentaria.
- b) Otros usos industriales.

## **4. Usos recreativos**

### **Calidad 4.1**

- a) Riego de campos de golf.

### **Calidad 4.2**

- b) Estanques, caudales circulantes de uso recreativo accesibles al público (excepto baño).

### **Calidad 4.3**

- a) Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua.

## 5. Usos ambientales

### Calidad 5.1

- a) Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.

### Calidad 5.2

- a) Recarga de acuíferos por inyección directa.

### Calidad 5.3

- a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público.
- b) Silvicultura.

### Calidad 5.4

- a) Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares).

En los supuestos de reutilización del agua para usos no contemplados en el Anexo I.A, el Organismo de cuenca exigirá las condiciones de calidad que se adapten al uso más semejante de los descritos en el mencionado Anexo. Será necesario, en todo caso, motivar la reutilización del agua para un uso no descrito en el mismo.

En todos los casos de reutilización de aguas, el Organismo de cuenca solicitará de las autoridades sanitarias un informe que tendrá carácter vinculante.

Se prohíbe la reutilización de aguas para los siguientes usos:

- a) Para el consumo humano, salvo situaciones de declaración de catástrofe en las que la autoridad sanitaria especificará los niveles de calidad exigidos a dichas aguas.
- b) Para los usos propios de la industria alimentaria, tal y como se determina en el artículo.
- c) Para usos de refrigeración en instalaciones hospitalarias y otros usos similares.
- d) Para el cultivo de moluscos filtradores en acuicultura.

El **Anexo I** recoge los criterios de calidad para la utilización de las aguas regeneradas según los usos. Estos criterios tendrán la consideración de mínimos obligatorios exigibles (**Tabla 5**). Por su parte el **Anexo II** contiene el modelo normalizado de solicitud que deben presentar quienes deseen obtener la concesión o autorización de reutilización de aguas depuradas.

**Tabla 5.** Resumen del Anexo I.A: criterios de calidad para la reutilización de las aguas según sus usos. Para más detalle consultar el Anexo I.A del proyecto de Real Decreto de 22 de mayo de 2006.

| Calidad | Valor máximo admisible                         |                   |                       |                   |
|---------|--|-------------------|-----------------------|-------------------|
|         | Nematodos intestinales                         | Escherchia coli   | Solidos en suspensión | Turbidez          |
| 1.1     | 1 huevo/10L                                    | 0 UFC/100 mL      | 10 mg/L               | 2 UNT             |
| 1.2     | 1 huevo/10L                                    | 200 UFC/100 mL    | 20 mg/L               | 10 UNT            |
| 2.1     | 1 huevo/10L                                    | 200 UFC/100 mL    | 20 mg/L               | 10 UNT            |
| 2.2     | 10 huevo/10L                                   | 1000 UFC/100 mL   | 35 mg/L               | No se fija límite |
| 2.3     | 10 huevo/10L                                   | 10000 UFC/100 mL  | 35 mg/L               | No se fija límite |
| 3.1     | No se fija límite                              | 10000 UFC/100 mL  | 35 mg/L               | 15 UNT            |
| 4.1     | 1 huevo/10L                                    | 200 UFC/100 mL    | 20 mg/L               | 10 UNT            |
| 4.2     | 1 huevo/10L                                    | 200 UFC/100 mL    | 20 mg/L               | 10 UNT            |
| 4.3     | No se fija límite                              | 10000 UFC/100 mL  | 35 mg/L               | No se fija límite |
| 5.1     | No se fija límite                              | 1000 UFC/100 mL   | 35 mg/L               | No se fija límite |
| 5.2     | 1 huevo/10L                                    | 0 UFC/100 mL      | 10 mg/L               | 2 UNT             |
| 5.3     | No se fija límite                              | No se fija límite | 35 mg/L               | No se fija límite |
| 5.4     | Calidad mínima requerida se estudiará por caso |                   |                       |                   |

La información sobre la frecuencia mínima de muestreo y análisis de cada parámetro, y la evaluación de la calidad de las aguas regeneradas se encuentra en el **Anexo I.B** y **Anexo I.C**, respectivamente, del proyecto de Real Decreto de 22 de mayo de 2006.

## 5 REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA RIEGO

La agricultura es el sistema que mayor demanda del agua supone a nivel mundial. El riego de tierras agrícolas supone la utilización de un 70% de los recursos hídricos en el mundo (Lenntech, 2007). En los países en vías de desarrollo, muchas veces el agua utilizada para regadío representa el 95% del total de usos del agua, y juega un papel esencial en la producción y seguridad de los alimentos. A largo plazo, el desarrollo y mejora de las estrategias agrícolas para estos países esta condicionado al mantenimiento, mejora y expansión de la agricultura de regadío.

Por otra parte, el incremento de la presión sobre los recursos hídricos para la agricultura compite con el uso del agua para otros fines y representa una amenaza para el medio ambiente y utilización insostenible de los recursos hídricos del planeta.

En la Unión Europea (UE), el agua utilizada para fines agrícolas representa un 30% de los recursos extraídos (Lenntech, 2007). Esto por supuesto varía según el clima, el tipo de cultivo y las técnicas o métodos agrícolas. Por ejemplo, el papel de los sistemas de regadío es esencial en países del Sur que dependen del regadío para el mantenimiento de la producción agrícola, en comparación con los países del Centro y Oeste Europeo (mayores lluvias y por lo tanto menor dependencia de los sistemas de regadío).

De hecho la mayor parte del agua de regadío en Europa corresponde a los países del Sur de Europa, como España, Italia, Francia, Grecia y Portugal con un 85% del total de zonas de regadío de la UE. Por ejemplo, en España la agricultura de regadío supone el 56% de la producción agrícola y ocupa del orden de un 18% de la superficie total agrícola.

El agua usada para riego proviene de fuentes naturales y alternativas:

- Las fuentes naturales incluyen el agua de lluvia y superficial de escorrentía (lagos y ríos). Estos recursos deben ser usados de una manera responsable y sostenible. El agua superficial es un recurso limitado y, normalmente, requiere de la construcción de embalses y presas para su explotación con un significativo impacto ambiental.
- Las fuentes alternativas de riego son el reuso del agua municipal y agua de drenaje. En cualquier caso el uso de agua reciclada puede tener efectos adversos para la salud pública y el medio ambiente. Esto dependerá de la aplicación/uso que se le de a este agua reciclada, características y limitaciones de suelo, condiciones climáticas y prácticas agrícolas. Por lo tanto, es imprescindible que todos estos factores sean tenidos en cuenta en la gestión del agua reciclada.

En los países que sufren escasez de agua, la reutilización del agua residual tratada en irrigación aparece como una estrategia adecuada de disposición final de los efluentes procedentes de una planta convencional de tratamiento. El uso de agua reciclada para regar es una práctica común (Lenntech, 2007), tanto en Europa como en España en particular.

En los países del Mediterráneo, el agua residual, según su nivel de tratamiento (sin tratar, con tratamiento secundario o con tratamiento terciario) se usa sola o mezclada con agua limpia, principalmente en el riego de forraje y cereales, pero también a veces en el riego de árboles frutales y algunos vegetales, dependiendo de la Legislación Nacional vigente en cada caso. Las restricciones más importantes para la reutilización de aguas residuales vienen dadas por la preocupación por la salud humana y el medio ambiente. En algunos casos, el agua residual no es tratada adecuadamente debido al hecho que el coste de construcción de los sistemas eficientes de tratamiento, es muy alto. Naturalmente, durante los últimos años, y gracias al progreso científico y tecnológico, se han desarrollado algunas soluciones alternativas. Sin embargo, la elección de la técnica apropiada para el tratamiento, se hace según las necesidades de cada comunidad, aunque en algunos casos el efluente del sistema de tratamiento de aguas residuales seleccionado no tiene una calidad adecuada, bien porque las plantas de tratamiento no son bien operadas o porque no hay personal cualificado capaz de superar los problemas habituales de operación ni controlar el proceso de tratamiento entero (Hidalgo et al, 2004).

La reutilización agrícola y de jardinería constituye el aprovechamiento más extendido del agua residual regenerada. Vamos a diferenciar dos tipos de riego: uno sin restricciones (criterios de calidad menores) y otro con restricciones.

**Riego sin restricciones:** es el de uso agrícola, excepto en cultivos cuyo sistema de riego permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco. Corresponden a las calidades 2.2 y 2.3 del R.D. de 22 de mayo de 2006.

**Riego con restricciones:** es el de uso urbano y recreativo, como por ejemplo parques, campos deportivos y campos de golf. Corresponden a las calidades 1.2, 2.1 y 4.1 del R.D. de 22 de mayo de 2006.

El más restrictivo según el R.D. de 22 de mayo de 2006 es el **riego de jardines privados** que corresponde a la calidad 1.1.

## 5.1 RIEGO EN AGRICULTURA

Según Prats y Melgarejo (2006), los principales criterios a considerar en el riego son:

**Salinidad:** Resultado de la acumulación de sales en la disolución del suelo, aumentando el potencial osmótico, lo que impide o dificulta la toma de agua por parte de la planta y, además, origina alteraciones en la absorción no selectiva de nutrientes. Este parámetro considera la cantidad total de sales presentes en el agua, sin especificarlas.

**Permeabilidad:** Que estima la concentración del ión sodio del agua, en relación a otros cationes. Su consideración está plenamente justificada ya que la acumulación de Na<sup>+</sup> en el suelo induce efectos tan negativos como pérdida de estructura y graves problemas de infiltración, al tiempo que se provocan alteraciones nutricionales en la planta.

**Toxicidad de iones específicos:** Debido a la presencia en el agua de riego de concentraciones elevadas de iones sodio, cloruro, bicarbonato, boro y microelementos.

**Efectos diversos:** Tales como los excesos de nutrientes que reducen los rendimientos y la calidad de las cosechas, la aparición de manchas necróticas que deprecian los cultivos, etc.

**Obstrucción en riego localizado:** Problemas de corrosión en las tuberías y equipos, obturación del sistema de riego, etc.

**Calidad microbiológica:** Estima la cantidad de agentes patógenos presentes en el agua de riego, y sus posibles efectos nocivos sobre las plantas y sobre el ser humano.

El uso de aguas residuales regeneradas para riego puede ocasionar problemas de obturación de los sistemas de riego por aspersión y de riego localizado. Los sistemas de riego localizado están diseñados para aplicar el agua lentamente a través de pequeñas aberturas, que constituyen los emisores de agua. Estos emisores pueden ser obstruidos por sedimentos, sustancias químicas y organismos biológicos, contenidos frecuentemente en las aguas de riego. La obstrucción de los emisores puede deberse a un elemento o a la combinación de varios de ellos. En este último caso el problema es más grave y más difícil de solucionar. Los parámetros más habituales que causan estos problemas en el agua para riego se recogen en la **Tabla 6**.

**Tabla 6.** Posibles problemas de obstrucción provocados por el agua utilizada en sistemas de riego localizado (Prats y Melgarejo, 2006).

| Tipo de problema |   | Posibles restricciones de uso |                   |          |
|------------------|---|-------------------------------|-------------------|----------|
|                  |   | Ninguno                       | Ligero a moderado | Elevado  |
| Físico           | Sólidos en suspensión, mg/L                 | < 50                          | 50-100            | > 100    |
| Químico          | pH  | < 7,0                         | 7,0-8,0           | > 8,0    |
|                  | Materia disuelta, mg/L                      | < 500                         | 500-2.000         | > 2.000  |
|                  | Manganeso, mg/L (a)                         | < 0,1                         | 0,1-1,5           | > 1,5    |
|                  | Hierro, mg/L (b)                            | < 0,1                         | 0,1-0,5           | > 1,5    |
|                  | Sulfuro de hidrógeno, mg/L                  | < 0,5                         | 1,5-2,0           | > 2,0    |
| Biológico        | Concentración bacteriana (máximo número/mL) | < 10.000                      | 10.000-50.000     | > 50.000 |

Las directrices indicadas en esta tabla ayudan a evaluar la idoneidad de un agua para su uso mediante riego localizado. Se debe tener en cuenta cuando se utilizan estas directrices que solo son indicaciones de carácter general, por lo que es necesaria la consideración simultánea de otros factores tales como la temperatura, la luz solar, los tipos de goteros y los caudales de agua, ya que cualquiera de ellos pueden modificar considerablemente la gravedad del problema (Prats y Melgarejo, 2006).

### 5.1.1 CALIDAD DE AGUA DE RIEGO

La calidad de agua usada para irrigación es determinante para la producción y calidad en la agricultura, mantenimiento de la productividad del suelo de manera sostenible y protección del medio ambiente. Por ejemplo, las propiedades físico- químicas del suelo, (ex. estructura del suelo, estabilidad de los agregados) y permeabilidad son características del suelo muy susceptibles al tipo de iones intercambiables que provengan del agua de riego.

La calidad del agua de regadío puede ser determinada mediante análisis de laboratorio. Los factores mas importantes a tener en cuenta para determinar la validez del agua usada para los fines agrícolas específicos son los siguientes:

- PH
- Riesgo de salinidad
- Riesgo de sodio (Relación de absorción de sodio o SAR)
- Riesgo de carbonato y bicarbonato (relación con el contenido en Ca y Mg)
- Elementos traza
- Elementos tóxicos
- Nutrientes
- Cloro libre

**Tabla 7.** Parámetros para la reutilización del agua con interés desde el punto de vista agrícola (Lenntech, 2007).

| Parámetro                     | Importancia para el regadío   | Cantidades máximas recomendadas                       |
|-------------------------------|---|---|
| Sólidos totales en suspensión | La medida de partículas se puede relacionar con la contaminación microbiana; puede interferir con la desinfección; obstrucción de los sistemas de regadío; deposición.                    | <5-35 TSS/L   |
| Turbidez                      |   | <0.2-35 NTU   |
| DBO5                          | Substrato orgánico para el crecimiento microbiano; puede generar crecimiento bacteriano en los sistemas de distribución y deposición microbial (bio-fouling).                             | <5-45 mg BOD/L  |
| DQO                           |   | <20-200 mg COD/L                                      |
| Coliformes totales            | Medida del riesgo de infección debido a la presencia potencial de patógenos; puede dar lugar a bio-fouling.   | <1-200 CFU/10mL                                       |
| Metales pesados               | Elementos específicos (Cd, Ni, Hg, Zn, etc.) son tóxicos para plantas, y por lo tanto existen límites máximos de concentración de estos elementos para el agua utilizada para irrigación. | < 0.001 mg Hg/L<br><0.01 mg Cd/L<br><0.02-0.1 mg Ni/L |
| Inorgánicos                   | Alta salinidad y boro son dañinos para el agua de regadío de cultivos vulnerables.  | <450-4000 mg TDS/L<br><1 mg B/L                       |
| Cloro residual                | Recomendado para prevenir el crecimiento bacteriano; la concentración excesiva de cloro libre (>0.05mg/L) puede dañar algunos cultivos vulnerables  | 0.5-5 mg Cl/L   |
| Nitrógeno                     | Fertilizantes para regadío; puede contribuir a crecimiento bacteriano y eutrofización de depósitos de almacenamiento, corrosión(N-NH4) o incrustación (P)                                 | <10-15 mg N/L   |
| Fósforo                       |   | <0.1-2 mg P/L   |

### 5.1.1.1 RIESGO DE SALINIDAD

El exceso de sales es una de las mayores preocupaciones en la reutilización del agua para fines agrícolas. Un alto contenido en sales presentes en el agua supone un aporte de sales en el suelo que sustenta la planta afectando la productividad del cultivo, degradando la estructura de la tierra y generando problemas de contaminación en las aguas subterráneas.

La conformidad del agua reciclada para su utilización en riego en relación con el contenido en sales dependerá de los siguientes factores:

- Tolerancia a la concentración de sal del cultivo del que se trate
- Características del suelo sometido a regadío
- Condiciones climáticas. La calidad del agua de regadío juega un papel esencial en zonas áridas afectadas por evaporación alta que causan la acumulación de altas concentraciones de sales en el suelo
- Gestión del suelo y agua

En general, el agua reciclada con fines de regadío debe tener un bajo/ medio nivel de concentración en sales (conductividad eléctrica del orden de 0.6 a 1.7 dS/m). (ver **Tabla 8**).

Debe tenerse especial interés en las zonas costeras, donde la intrusión e infiltración de agua del mar en el agua que es bombeada en pozos cercanos, puede ocasionar un grave riesgo de salinidad en las aguas. Por ejemplo, en España la sobre-explotación de los recursos hídricos subterráneos provoca la disminución del nivel del agua y como consecuencia la intrusión de agua salina en las tierras aledañas.

**Tabla 8.** Niveles de salinidad con los peligros que puede ocasionar a los cultivos (Lenntech, 2007).

| Peligro         | TDS (ppm o mg/L) | dS/m o mmhos/ cm |
|-----------------|------------------|------------------|
| <b>Ninguno</b>  | < 500            | < 0,75           |
| <b>Ligero</b>   | 500 - 1000       | 0,75 – 1,5       |
| <b>Moderado</b> | 1000 - 2000      | 1,5 – 3,0        |
| <b>Severo</b>   | > 2000           | > 3,0            |

Se pueden utilizar niveles de salinidad moderados en ciertas ocasiones bajo condiciones de drenaje suficiente, con sistemas de riego localizado y dando riegos de lavado de sales.

Aguas con alto contenido en sales y sodio no deberán de utilizarse para fines de regadío. No obstante, en algunos países afectados por la disminución de los recursos hídricos, es práctica común utilizar como aguas de regadío, aguas con alto contenido en sales como suplemento a otro tipo recursos hídricos. Por lo tanto es esencial que el tipo de planta cultivado en estas zonas tenga alta tolerancia al contenido en sales de los suelos, así como otras prácticas de gestión.

Un exceso de **sodio** produce sequedad o quemaduras en los bordes exteriores de las hojas, el exceso de **cloruro** suele manifestarse con quemaduras en la punta de las hojas y avanzar por los bordes y los síntomas de toxicidad por **boro** suelen manifestarse por un amarilleamiento de la punta de las



hojas más antiguas que va desplazándose hasta el centro de las hojas entre los nervios y sequedad en algunas otras zonas de la planta.

Si se utiliza agua con alto contenido en sales en ciertas ocasiones en que haya escasez y limitación de recursos hídricos, el suelo debe ser permeable, el drenaje debe ser adecuado, la cantidad de agua aplicada debe ser mayor y el tipo de cultivos seleccionado debe tener la mayor tolerancia posible al exceso de sales.

---

#### 5.1.1.2 RIESGO DEL SODIO

Los altos contenidos de iones de sodio en las aguas de riego, afectan a la permeabilidad del suelo y causa problemas de infiltración. Este proceso se tiene lugar porque el sodio cuando está presente en el suelo es intercambiable por otros iones. El calcio y el magnesio son cationes que forman parte de los complejos estructurales que forman el suelo generando una estructura granular apropiada para los cultivos. El exceso de iones de sodio desplaza el calcio (Ca) y magnesio (Mg) y provoca la dispersión y desagregación del suelo. El suelo se vuelve duro y compacto en condiciones secas y reduce la infiltración de agua y aire a través de los poros que conforman el suelo.

Este problema está igualmente relacionado con otros factores como el nivel de salinidad y el tipo de suelo. Por ejemplo, alto contenido de sodio en suelos arenosos no afecta tanto ya que éstos tienen una gran superficie de drenaje, en contra de otros suelos más compactos.

Otros problemas de los cultivos causados por un exceso de sodio son la formación de incrustaciones de semillas, malas hierbas, erosión del suelo, escasez de oxígeno y nutrientes disponibles para las plantas.

El agua reciclada puede ser una fuente de exceso de Na en el suelo comparado con otros cationes como Ca, K, Mg y por lo tanto debe ser controlado adecuadamente.

Una forma de saber el peligro que puede causar el Na en el cultivo es usando el índice de Relación de Absorción de Sodio (RAS) (ver **Tabla 9**), que expresa la relación entre los iones de sodio y la relación con el calcio y el magnesio existente en el suelo.

RAS se define con la siguiente ecuación:  $RAS = [CNa] / [\sqrt{(CCa + CMg)/2}]$

Donde:

(C): concentración iónica en mol/m<sup>3</sup>

Si las unidades son en meq/L, la suma de C<sub>Ca</sub> + C<sub>Mg</sub> debe ser dividida en mitad antes de la raíz cuadrada.

También se puede calcular el RAS ajustado (un valor RAS<sub>adj</sub>) teniendo en cuenta el contenido de carbonatos y bicarbonatos. Los altos contenidos de carbonato y bicarbonato presentes en el agua causan la precipitación de calcio y magnesio e incrementan la concentración relativa de sodio siendo el índice RAS mayor. RAS calculado a través de las concentraciones de Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, y Mg<sup>++</sup> en solución puede diferir de RAS real. La siguiente ecuación permite estimar el RAS verdadero de los valores calculados con la ecuación anterior.

$$RAS_{adj} = 0.08 + 1.115 \times (RAS)$$

**Tabla 9.** Peligro de RAS en aguas de regadío (Lenntech, 2007).

| Peligro                  | RAS       | Observaciones   |
|--------------------------|-----------|---|
| <b>Ninguno</b>           | < 3.0     | Sin restricciones en el uso de agua reciclada para regadío  |
| <b>Ligero o moderado</b> | 3.0 - 9.0 | De 3-6 ciertos cuidados a tener en cuenta en cultivos vulnerables.<br>De 6-8 se debe usar yeso. No utilizar cultivos sensibles. |
| <b>Agudo</b>             | > 9.0     | Daño severo. No conforme  |

Entre las soluciones a los problemas causados por el sodio en el suelo, tenemos:

- Cambiar o tratar con tecnología adecuada el agua de irrigación.
- Mezclar de agua de irrigación con agua que tenga bajo contenido en sodio.
- Aumentar la aireación.
- Inyección de sulfuro, yeso o ácido sulfúrico.
- Utilizar tecnologías de membrana.

#### 5.1.1.3 REUTILIZACIÓN DE AGUA PARA AGRICULTURA EN LA PROVINCIA DE ALICANTE

En el trabajo realizado por Prats y Melgarejo (2006) en diferentes plantas de tratamiento de la provincia de Alicante, respecto a las características agronómicas del agua depurada, cabe destacar:

1. Los sólidos en suspensión no presentan limitación alguna para su uso en riego por inundación pero sí para su utilización en riego por goteo ya que existe riesgo de obturación de goteros.
2. La conductividad resulta alta en todos los casos, lo que provocará problemas crecientes para el suelo y la mayoría de los cultivos. Sólo algunos frutales como higuera, granado y olivo podrían cultivarse sin pérdidas de producción, aunque si no se dispone de caudales para permitir un adecuado lavado podría producirse una acumulación en el suelo que afectaría incluso a las especies más resistentes
3. Todas las depuradoras dan un agua rica en materia orgánica disuelta, lo que resulta interesante, ya que ésta mejora la estructura del suelo, aumentando su potencial productivo y atenuando el efecto de las sales.
4. Debe resaltarse que los lodos de depuradoras urbanas han sido aplicados a diferentes cultivos, y esto pueden sustituir en parte a la fertilización química, aportando materia orgánica que se mineraliza y es fuente de nitrógeno que se libera lentamente, por lo que puede cubrir una parte de las necesidades en este elemento, reduciéndose las aportaciones de abonos nitrogenados químicos.
5. La presencia de nutrientes como el nitrógeno, el fósforo, el potasio, etc., en concentraciones apropiadas, suponen un valor añadido para el uso agrícola, siempre que la concentración de estos nutrientes se tenga en cuenta al establecer el programa de nutrición correspondiente, pues además de

obtenerse un ahorro económico y evitar problemas de toxicidad, se evitará la contaminación de acuíferos.

6. En general, para el uso agrícola del agua de las depuradoras estudiadas es muy recomendable la mezcla con agua de mejor calidad, para evitar problemas de salinización de los suelos y pérdidas de producción por el efecto tóxico específico de algunos iones y por el efecto general osmótico.

7. Muchas de las depuradoras ofrecen un agua con un excesivo nivel de boro, elemento de difícil eliminación en el suelo.

8. La presencia de detergentes es muy baja, y aunque éstos pueden producir espumas en el agua, cuando son biodegradables no deben presentar problemas de toxicidad.

9. Dada la falta de legislación para el conjunto de los países de la UE y de unidad de criterios sobre la reutilización de las aguas residuales depuradas, podrían generarse problemas en el comercio de los productos hortofrutícolas, por lo que se deben establecer lo antes posible unos criterios comunes de calidad para la utilización de esta agua.

En cuanto a los usos sin restricciones y con restricciones Prats y Melgarejo (2006) señalan:

Los **usos agrícolas** serían posibles con todos los efluentes terciarios, pero no con todos los secundarios, encontrándose en muchos casos una concentración excesiva de Nematodos intestinales, Escherichia Coli y/o sólidos en suspensión. En cualquier caso hay que indicar que para uso en regadío, además de los parámetros de calidad que se contemplan en esta normativa, se deben tener en cuenta otros muchos parámetros agronómicos relacionados con la salinidad y toxicidad de iones específicos.

Respecto a los **usos ambientales y recreativos**, la valoración depende del uso específico. Así, para riego de campos de golf serían apropiados los efluentes terciarios mientras que muchos de los efluentes secundarios presentan valores por encima del límite en todos los parámetros. Para uso en estanques, masas de agua y caudales circulantes de uso recreativo, sirven los efluentes terciarios, mientras que un porcentaje de los efluentes secundarios presenta problemas en la concentración de Escherichia Coli y fósforo total. El riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público y actividades de silvicultura es posible con todo tipo de efluentes.

---

### 5.1.2 EMPLEO DE LODOS COMO ABONO – ENMIENDA AGRÍCOLA

Los componentes que son separados en el proceso de regeneración del agua quedan básicamente conjuntados en lo que definimos como “lodos o fangos”, y que son el subproducto de someter a un tratamiento determinado las aguas residuales.

En el proceso de regeneración de las aguas residuales municipales, además de obtenerse agua regenerada de posible reutilización, se generan enormes cantidades de residuos orgánicos (aproximadamente 70 - 100 g de materia seca persona y día) (Seguí, 2004).

En función del grado de estabilización se distingue principalmente dos tipos de fangos: frescos y digeridos. Los lodos frescos, son aquellos que no han recibido ningún tratamiento de fermentación, se caracterizan por un olor muy desagradable y por su alto grado de contaminación por gérmenes patógenos. Los lodos digeridos, se originan al someter los lodos frescos a un proceso de digestión aerobia o anaerobia. Este tipo de lodos tiene un olor menos desagradable y un menor contenido de microorganismos patógenos. Los fangos, tanto los frescos como los digeridos, suelen someterse a una

deshidratación mediante eras de secado o mediante distintos sistemas mecánicos (filtro de bandas, centrifugación, secado térmico, etc.) obteniéndose un producto más o menos pastoso.

Dentro de la gestión de cualquier sistema de depuración y/o regeneración de aguas residuales los fangos deben ser considerados como parte del problema a resolver, de lo contrario se estaría incurriendo en una externalidad negativa al trasladar un agente contaminante al medio ambiente con la consecuente afectación a terceros.

La tendencia actual sobre la disposición final de los fangos es la utilización de los mismos como materia prima en la fabricación de productos con demanda en el mercado actual, o la utilización directa de los mismos en sustitución de otros convencionales.

La reutilización de los fangos básicamente se realiza en:

1. La utilización directa en la agricultura.
2. la fabricación de compost.
3. la producción de energía mediante su eco- incineración o por la generación de biogás, con la posterior reutilización de las cenizas en materiales para la construcción.

La Directiva 86/278/CEE, relativa a la protección del medio ambiente y en particular de los suelos en la utilización de lodos con fines agrícolas establece los contenidos máximos de metales pesados en los lodos destinados a uso agrícola, así como en los suelos objeto de estas aplicaciones.

También prohíbe la aplicación en algunos cultivos, al tiempo que establece plazos para su aplicación en los cultivos autorizados.

Considera la necesidad de mantener un código de buenas prácticas agrícolas a fin de garantizar la protección del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas.

Determina la realización de analíticas de lodos y suelos, obliga a facilitar información al usuario y a mantener un registro de los puntos de aplicación, sin llegar a definir a quién corresponde la caracterización de los suelos.

Establece los métodos oficiales para la caracterización de los lodos así como para el muestreo y análisis de los suelos objeto de aplicación.

## 5.2 RIEGO EN JARDINES

El fomento del uso de aguas residuales para atender las necesidades de riego de los campos de golf resulta necesario para no distraer o minorar recursos hidráulicos destinados a otros usos preferentes, tales como el abastecimiento a la población, regadíos, usos agrarios e industriales. Por lo tanto, sólo en la medida en que sobren recursos hidráulicos una vez atendida la demanda de usos con prioridad sobre el recreativo, podrá destinarse agua potable al riego de campos de golf. De ahí deriva la importancia de fomentar el uso de aguas residuales para satisfacer las necesidades de este tipo de instalaciones deportivas, sin merma alguna sobre los demás usos prioritarios (Prats y Melgarejo, 2006).

El proceso de obtención de un agua residual regenerada que satisfaga los criterios de calidad similares a los propuestos por la USEPA (1992) para el riego de jardinería de zonas públicas sin ningún tipo de restricción en cuanto a exposición y contacto del público con el agua regenerada consta fundamentalmente de cuatro elementos (Mujeriego, 1998):

1. La implantación de un control de vertidos a la red de saneamiento que asegure la ausencia de contaminantes que puedan impedir la reutilización del agua regenerada.
2. Un tratamiento biológico secundario capaz de producir un efluente con un contenido de materia en suspensión inferior a 10-20 mg/l y valores comparables de DBO5.
3. Un tratamiento terciario destinado a eliminar la materia en suspensión del afluente secundario, mediante una filtración directa, y a desinfectar completamente el efluente. Este proceso de tratamiento constituye propiamente la fase de regeneración del agua residual.
4. Un depósito regulador de los caudales de agua regenerada, a fin de adecuar la producción de la planta a la demanda de uso y asegurar una cierta reserva de agua regenerada.

En general, las plantas de regeneración de agua destinadas a usos municipales (riego agrícola y de jardinería) e incluso industrial (refrigeración) suelen ser explotadas por los propios municipios, bien directamente o bien a través de una empresa de servicios.

Estas plantas de regeneración guardan un gran parecido con las plantas potabilizadoras de agua, en cuanto que todo el personal está mentalizado sobre la necesidad de producir un agua de calidad satisfactoria y de aplicar medidas correctoras urgentes, ante cualquier alteración del proceso, para evitar que un agua de insuficiente calidad pueda salir de la planta de regeneración. Generalmente, los municipios son los encargados de la distribución y gestión del agua regenerada que pasa así a constituir un nuevo servicio público de calidad.

### 5.3 OPCIONES PARA LA MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD AGRICOLA

Es evidente que el medio ambiente, y en particular los recursos naturales hídricos, está sujeto a grandes presiones que podrían minar, a largo plazo, la sostenibilidad hidrológica y ecológica de no ser corregidas. En especial, contribuye a esta situación, la gran demanda de agua existente para riego agrícola. La adecuada gestión de la demanda y la reducción en el consumo de agua a través de la reutilización de aguas residuales, cambios en los cultivos y desarrollo de sistemas más eficientes de irrigación son posibilidades a explorar para mitigar estos efectos negativos (Hidalgo et al 2004).

Entre las diferentes decisiones que se pueden tomar para optimizar el riego y minimizar las pérdidas y consumo de agua, Lenntech (2007) recomienda estas:

#### **Técnica:**

- Nivelación de la tierra para aplicar el agua de manera uniforme.
- Irrigación con bombeo para mejorar la distribución del agua.
- Rociadores eficientes para suministrar agua de manera uniforme.
- Rociadores de precisión y baja energía para evitar la evaporación y pérdidas por el viento.
- Removimiento de tierra para promover infiltración del agua en el suelo y evitar pérdidas por escorrentía.
- Regadío de goteo para cortar evaporación y otras pérdidas de agua e incrementar la producción de los cultivos.

**Gestión:**

- Mejor horario de riego.
- Mejora de la operación de los canales para suministros temporales.
- Aplicación de agua en momentos esenciales para la productividad.
- Conservación del agua embalsada y métodos de preparación del campo.
- Mejora del mantenimiento de canales y equipos.
- Reciclaje de agua de drenaje y embalsada.

**Institucional:**

- Establecer organizaciones de usuarios del agua para involucrar en la toma de decisiones a agricultores y establecer un sistema de impuestos por mala o exceso de utilización del agua.
- Reducir los subsidios/ayudas por riego e introducir medidas de conservación relacionadas con el costo real del agua.
- Establecer un marco legal para establecer mercados del agua justos y reales.
- Establecer más infraestructura legal para el sector privado para la distribución de tecnología.
- Mayor formación.

**Agronómica:**

- Selección de variedades de cultivo adecuadas para las condiciones particulares.
- Intel cultivos para maximizar la mezcla y uso del suelo.
- Cultivos adecuados en función de las condiciones climáticas y cantidad de agua disponible.
- Seleccionar cultivos resistentes a las condiciones secas cuando haya escasez de agua.

# TRATAMIENTO TERCIARIO

Si el agua que ha de recibir el vertido requiere un grado de tratamiento mayor que el que puede aportar el proceso secundario, o si el efluente va a reutilizarse, es necesario un tratamiento avanzado de las aguas residuales. A menudo se usa el término tratamiento *terciario* como sinónimo de tratamiento avanzado, pero no son exactamente lo mismo. El tratamiento terciario, o de tercera fase, suele emplearse para eliminar el fósforo, mientras que el tratamiento avanzado podría incluir pasos adicionales para mejorar la calidad del efluente eliminando los contaminantes recalcitrantes.

Hay procesos que permiten eliminar más de un 99% de los sólidos en suspensión y reducir la DBO5 en similar medida. Los sólidos disueltos se reducen por medio de procesos como la ósmosis inversa y la electrodiálisis. La eliminación del amoníaco, la desnitrificación y la precipitación de los fosfatos pueden reducir el contenido en nutrientes. Si se pretende la reutilización del agua residual, la desinfección por tratamiento con ozono es considerada el método más fiable, excepción hecha de la cloración extrema.

Es probable que en el futuro se generalice el uso de estos y otros métodos de tratamiento de los residuos a la vista de los esfuerzos que se están haciendo para conservar el agua mediante su reutilización.

## 6 FINALIDAD DEL TRATAMIENTO TERCIARIO. FIABILIDAD TRATAMIENTO SECUNDARIO

La eliminación de la MES y la turbiedad del agua pueden conseguirse sometiendo al agua a diversos procesos físico-químicos antes de proceder a su desinfección. Este conjunto de procesos se designa comúnmente como tratamiento terciario e incluye la coagulación, la floculación, la decantación y la filtración. El tratamiento terciario permite, además, eliminar un porcentaje elevado de los virus, las bacterias y los parásitos contenidos en el afluente, confiriendo así una mayor fiabilidad al proceso de regeneración (Aguirre *et al.*, 2004).

El objetivo del tratamiento terciario es eliminar la materia en suspensión del afluente secundario mediante filtración directa, y desinfectar completamente el efluente, satisfaciendo así las exigencias del proceso de regeneración del agua residual (USEPA, 1992). La desinfección es el tratamiento que consigue el mayor grado de inactivación de virus y, por lo tanto, el que merece un mayor grado de control. No obstante, la calidad de muchas aguas residuales es inadecuada para un tratamiento eficiente de desinfección.

Los tratamientos terciarios o avanzados pueden utilizarse como complemento al proceso convencional de depuración biológica, para eliminar contaminantes disueltos o en suspensión, elementos nutritivos, metales específicos, y otros componentes peligrosos. La gama de tratamientos terciarios disponibles actualmente incluye los físicos, los químicos y los biológicos. La utilización tanto de estas como de nuevas tecnologías de tratamiento ofrece nuevas opciones para la gestión del agua:

1. El uso de materias primas de mayor calidad.
2. El uso de tecnologías más limpias.
3. La adopción de tecnologías con un uso más eficiente del agua.
4. La aplicación de tecnologías de tratamiento avanzadas que promuevan la recuperación de materiales, de energía, y el reciclado y reutilización del agua.

El interés de disponer de un tratamiento terciario se debe fundamentalmente a los siguientes motivos:

1. Eliminación de nutrientes (N y P) para evitar la eutrofización (excesivo crecimiento de algas) de embalses.
2. Eliminación de compuestos nitrogenados para mejorar las condiciones de los ríos. También se pueden prever etapas de desnitrificación (reducción de los nitratos a nitrógeno gaseoso) en aquellas instalaciones donde se espere la nitrificación (oxidación del nitrógeno amoniacal a nitratos) por las condiciones de temperatura del agua. Con la inclusión de esta etapa se consigue una mejor calidad del efluente (sobre todo en lo que se refiere a los sólidos) a la salida de la clarificación final.
3. Tratamientos físico-químicos para la reducción de cargas excepcionales de tipo puntual o estacional y también para la eliminación de compuestos provenientes de vertidos industriales que pudieran perjudicar el funcionamiento del sistema biológico.
4. Filtración, bien para mejorar las condiciones del vertido con vistas a su reutilización, bien para su uso como agua industrial tanto dentro de la propia EDAR.

En función de la calidad del efluente secundario y del tipo de reutilización, se aplican una serie o combinación de procesos unitarios físicos, químicos o biológicos, con el fin de eliminar al máximo posible la Materia en Suspensión (MES) y la Materia Orgánica (MO).

## 6.1 ELIMINACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO

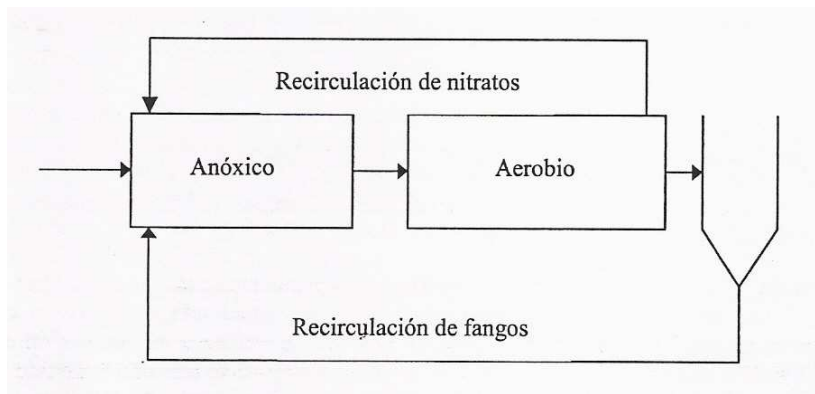
La reutilización con fines agrícolas del nitrógeno proveniente de las aguas residuales domésticas es una de las prácticas más antiguas y documentadas en la literatura (Asano, 2001). El destino final del nitrógeno aportado por las aguas residuales, depende principalmente de la proporción de nitratos presentes en la disolución que percola a través de las capas del suelo, donde éstos son interceptados y absorbidos por las plantas.

Las especies químicas del nitrógeno normalmente presentes en un agua residual son: el nitrógeno orgánico, el amoníaco y el nitrato. Así mismo, un agua residual puede contener pequeñas concentraciones de nitritos. La proporción relativa de estas diversas formas varía según el origen del agua residual, y de la serie de tratamientos a que ésta ha sido sometida. El amoníaco es la especie predominante en la mayoría de los casos, con concentraciones que oscilan entre 5 y 40 mg N/l.

Cuando el agua residual es sometida a un tratamiento aerobio, y dependiendo del grado de oxidación, el amoníaco presente en el agua será convertido normalmente en nitratos por acción de las bacterias nitrificantes. Esta forma química del nitrógeno es la asimilada por las plantas. En general, la asimilación de nitrógeno aportado tiene una eficiencia que no supera normalmente al 50%, siendo con frecuencia inferior a dicho valor.

En las plantas de aguas residuales la opción más común (**Figura 10**) de eliminación de nitrógeno es la de pasar las aguas por un proceso de anoxia y oxigenación, en la cual el nitrógeno es eliminado en forma de gas.





**Figura 10.** Esquema sencillo de la eliminación biológica de nitrógeno en una EDAR.

Para riego aparentemente puede que no nos sea necesario ya que el nitrógeno es un nutriente necesario para las plantas, pero hay casos en los que puede que sea factible. Por ejemplo, un caso sería aquel que se basa en la eliminación de nutrientes cuando el agua depurada debe de ser vertida (meses de invierno) y en la conservación de estos nutrientes cuando el agua puede ser suministrada para riego (meses de verano). La conservación de estos nutrientes propicia un ahorro global que incluso permite su suministro para riego en las zonas agrícolas.

## 6.2 OPCIONES MÁS USUALES

Según Prats y Melgarejo (2006) un tratamiento terciario clásico estaría formado por los elementos:

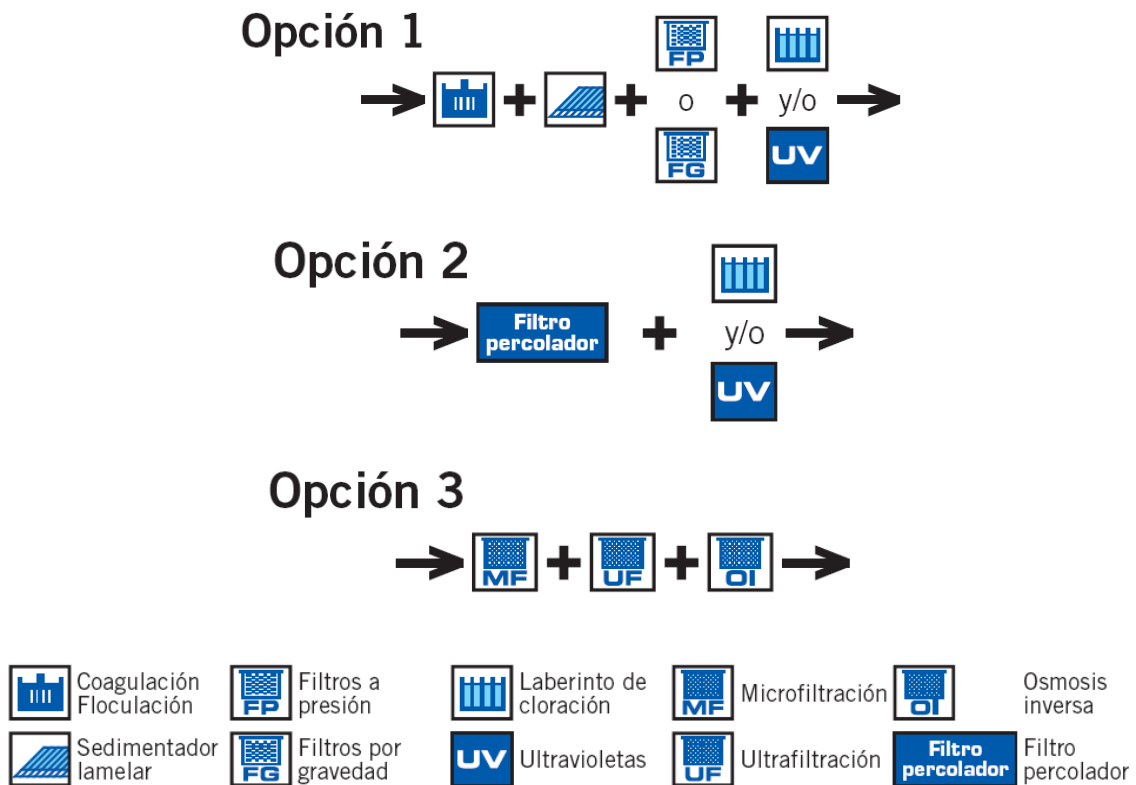
- Sistema de Coagulación-Floculación.
- Filtración (Filtros de arena, sílex, por gravedad, a presión...).
- Desinfección (Mediante cloración y/o Ultravioletas).

Muchas EDAR tienen un laberinto de cloración a la salida del tratamiento secundario, que en la mayoría de los casos ni siquiera se utiliza.

Este sistema no se considera un tratamiento terciario. En cuanto a la cloración se refiere, fuentes consultadas en las distintas EDAR indican que la E.P.S.A.R prohíbe la adición de cloro en el efluente de salida (Prats y Melgarejo, 2006). Cuando se clora el agua, se pueden generar compuestos tóxicos como, cloraminas, trihalometanos, ácidos haloacéticos, además de otros compuestos organo-clorados.

Estos compuestos podrían entrar en contacto con los cultivos receptores, existiendo un peligro potencial de que pasen a la cadena alimentaria. Es éste, un aspecto importante que requiere especial atención.

En la **Figura 11** se muestran diversos esquemas de tratamiento terciario con diferentes opciones de tratamiento, dependiendo de la calidad de agua regenerada que queramos obtener y del agua depurada que tengamos para regenerar.



**Figura 11.** Distintas opciones para la instalación de tratamientos terciarios (Prats y Melgarejo ,2006).

La Opción 1 es la más común, mientras que la Opción 3 es la más novedosa y va teniendo una progresiva aceptación e implantación, especialmente en el caso de aguas saladas o salobres, circunstancia en que resulta imprescindible el empleo de esta tecnología. Consiste en un tratamiento mediante membranas y permite unos rendimientos de tratamiento muy elevados. Con la Ósmosis Inversa se consigue eliminar las sales disueltas y un agua de excelente calidad.

En el trabajo de Prats y Melgarejo (2006) se identifican depuradoras con previsión a ampliar el tratamiento terciario, mientras que en otros casos en los que no se dispone esta prevista su construcción a corto o medio plazo. Es necesario conocer los procesos básicos del tratamiento terciario ya que supondrá una parte más de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

### 6.2.1 TRATAMIENTO FÍSICO – QUÍMICO. COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN

La coagulación-floculación es un proceso que consiste en añadir productos químicos al agua para desestabilizar (reducir o eliminar) la carga superficial de las partículas (arcillas, coloides, virus, bacterias y ácidos húmicos). De esta manera se forman aglomeraciones de partículas de mayor tamaño llamadas flóculos que pueden sedimentar o ser filtradas.

La coagulación puede realizarse mediante dos tipos de reacciones: 1) la desestabilización de las cargas de las partículas en suspensión en el agua por medio de cationes polivalentes y 2) el barrido de las partículas en suspensión por la formación del hidróxido amorfo que arrastra los flóculos y los coloides. La coagulación por desestabilización se realiza con un estricto control del pH entre 7,0 y 7,5 y bajas dosis de coagulante. La floculación por barrido se produce por precipitación química, en la que el control del pH no es crítico y las dosis son mayores que en el primer caso.

Muchas sustancias naturales tienen capacidad para coagular, como es el caso del almidón y la quitosana, aunque industrialmente no se usan. Los coagulantes más usados son las sales de cationes polivalentes, principalmente  $Al^{+3}$  y  $Fe^{+3}$ .

La coagulación se puede realizar en línea o en un tanque de mezcla completa. Sin embargo, como la reacción del coagulante con el agua es rápida, no hace falta colocar un tanque de mezcla completa y la operación se realiza en línea. La dosis de coagulante es variable en función de las características del agua residual.

La precipitación química permite eliminar aproximadamente del 80 al 90% de los sólidos en suspensión, del 70 al 80% de la DBO<sub>5</sub> y del 80 al 90% de las bacterias. La desventaja de dicho proceso es que produce un aumento de la conductividad del agua.

Cuando no se dispone de decantador, debe evitarse que los flóculos formados sean demasiado grandes, porque esto puede producir una colmatación rápida de los filtros. De esta manera se trabaja con dosis pequeñas, especialmente en filtración por contacto.

La dosis de coagulante recomendada para cada tratamiento se muestra en la **Tabla 10**.

**Tabla 10.** Rango de dosis recomendadas de coagulante según el tratamiento (adaptada de Metcalf y Eddy, 1995).

| Tratamiento                    | Dosis de $Al^{+3}$ mg/L | Control de pH      |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------|
| <b>Completo</b>                | 10 - 100                | No necesita        |
| <b>Filtración directa</b>      | 2 - 5                   | Estricto 7,0 – 7,5 |
| <b>Filtración por contacto</b> | 2 - 5                   | Estricto 7,0 – 7,5 |

Los ensayos de laboratorio de “jar tests” se han mostrado como herramientas útiles para la obtención de las concentraciones previas de los reactivos que posteriormente se han optimizado en planta (López-Ramírez *et al.*, 2004).

Los costes asociados al tratamiento físico – químico son los siguientes (Prats y Melgarejo ,2006):

- Costes de implantación: 500 - 700 euros/m<sup>3</sup>/h
- Costes de explotación: 0,015 - 0,020 euros/m<sup>3</sup>
  - coagulante 0,015 euros/m<sup>3</sup>
  - floculante 0,0017 euros/m<sup>3</sup>
  - energía 0,007 - 0,01 euros/m<sup>3</sup>

## 6.2.2 DECANTACIÓN

La sedimentación consiste en la separación por la acción de la gravedad de las partículas en suspensión cuyo peso específico es mayor que el del agua. Los decantadores se emplean para eliminar

los flóculos químicos formados en las etapas de coagulación y floculación del tratamiento terciario. El objetivo principal es obtener un efluente clarificado y transparente.

Para mejorar el rendimiento de la sedimentación se han diseñado los decantadores lamelares. Los decantadores lamelares son los que más se utilizan en tratamientos terciarios, ya que presentan mejor rendimiento para un área determinada y por lo tanto ahorran espacio. El inconveniente práctico que presentan es la aparición potencial de olores debido al crecimiento biológico, la acumulación de aceites y su obturación. Los decantadores lamelares son tanques de poca profundidad que contienen unos dispositivos constituidos por paquetes de placas paralelas o de pequeños tubos de plástico de diferentes formas.

En la mayoría de los casos, el propósito fundamental es obtener un líquido clarificado, pero también es necesario producir un fango con una concentración de sólidos, que pueda ser manejado. En algunos casos la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual. La sedimentación puede producirse en una o varias etapas o en varios puntos del proceso de tratamiento.

En una planta de tratamiento de agua potable se utiliza en los clarificadores o sedimentadores primarios después de un tratamiento de floculación y previo a la filtración y desinfección. La eliminación de partículas también se puede llevar a cabo en un campo de aceleraciones variable como la acción de la fuerza centrífuga. En este caso se denomina sedimentación acelerada.

---

### 6.2.3 FILTRACIÓN

La filtración es un proceso de tratamiento consistente en hacer pasar el agua a través de un medio poroso para eliminar la materia en suspensión (MES). Además, constituye una de las principales barreras para los agentes infecciosos ya que contribuye a reducir la carga microbiana en el proceso de desinfección.

La filtración de aguas residuales adopta diseños especiales debido a las características físicas y químicas del agua. En general, los filtros utilizados en los tratamientos terciarios, reciben partículas de mayor tamaño y más variable, de mayor peso y con cargas de sólidos más variables.

El proceso es muy simple y consiste en pasar el agua que se quiere tratar por un lecho filtrante o por una membrana y se obtiene un permeado y un rechazo de sólidos, al final empieza a aumentar el contenido de sólidos en suspensión en el efluente hasta alcanzar un nivel máximo aceptable, o cuando se produce una pérdida de carga prefijada en el interior del filtro. Una vez alcanzada cualquiera de estas dos condiciones, se termina la fase de filtración, y se procede a lavar el filtro a contracorriente para eliminar la materia en suspensión que se ha acumulado en el interior del lecho filtrante.

Los parámetros de control de un filtro son la turbiedad del agua, la disminución de la carga hidráulica y el tiempo entre lavados. Se deben evitar los tiempos de lavados cortos, porque esto disminuye la producción de agua filtrada. Para evitar la colmatación rápida de los filtros y trabajar de forma continua se recomienda que el agua de alimentación de los filtros tenga una turbiedad inferior o igual a 6,0 UNT (Soriano y Hernandez, 2006).

Las tecnologías de membrana ofrecen la posibilidad de una clarificación y desinfección simultánea sin la necesidad de adición de productos químicos, que pueden reaccionar con las impurezas del agua generándose subproductos indeseables.

Una investigación llevada a cabo por Soriano y Hernandez (2006) en una planta de ultra – microfiltración cuyo efluente procedía del decantador secundario de una EDAR de lodos activados, demostró que el agua que se obtuvo fue de buena calidad, cumpliendo los criterios de la USEPA de aguas reutilizadas en usos humanos, no con carácter de potables, alcanzándose una eliminación total de los microorganismos indicadores de la contaminación fecal, y más del 99.8% en la eliminación de las bacterias aerobias totales.. En relación con la calidad del agua exigida para reutilización en España, como son: en riego agrícola, recreativo y agua para uso industrial tanto en refrigeración de circuito cerrado como abierto, se cumplen con los requisitos que señala la norma.

Entre los diferentes tipos de membrana, las membranas pueden ser:

- Microporosas uniformes con un tamaño de poro. para MF y UF.
- Asimétricas: con una superficie muy lisa y compacta seguida de microporosidad, se usan en OI y NF.
- TFC Thin Film Composite: para OI y NF Formada por una línea capa de rechazo, seguida de un diferente material microporoso y finalmente otro de soporte.

Además dentro de cada grupo se pueden distinguir:

- Membranas porosas (separación por efecto de cribado), que poseen poros que pueden ser de diferentes tamaños. Las operaciones de Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF), Nanofiltración (NF) y Diálisis usan membranas porosas.
- Membranas no porosas o densas (separación por mecanismo de solución-difusión). Las operaciones que utilizan este tipo de estructura son: osmosis inversa (OI), permeado gaseoso (PG) y pervaporación (PV).
- Membranas de intercambio iónico, que son un tipo especial de las membranas no porosas con radicales cargados electrostáticamente.

Cuando la calidad del agua lo permite, se puede prescindir del decantador, obteniéndose el tipo de tratamiento conocido como filtración directa. La ventaja de la filtración directa es el ahorro en la inversión y su desventaja es la menor fiabilidad del proceso.

Por último, la filtración por contacto consiste en la inyección de coagulante en línea para luego pasar directamente a la filtración. Es este caso la dosis de coagulante es mucho menor que en el tratamiento completo, debido a que unos flóculos de gran tamaño colmatan rápidamente el filtro. La ausencia de decantador y de floculadores requiere necesariamente un efluente secundario de gran calidad.

Los costes asociados a la filtración son los siguientes (Prats y Melgarejo ,2006):

| Tipo           | Costes de implantación (€/m <sup>3</sup> /h) | Costes de reactivos (€/m <sup>3</sup> ) | Costes de la energía (€/m <sup>3</sup> ) |
|----------------|--|---|--|
| Presión        | 200-300                                      | 0,01-0,02                               | 0,01-0,04                                |
| Gravedad       | 150-300                                      | 0,02-0,03                               | 0,02-0,03                                |
| Anillas        | 450-550                                      | 0,03-0,04                               | 0,03-0,05                                |
| Lecho pulsante | 700-900                                      | 0,02-0,03                               | 0,05-0,06                                |
| Puente móvil   | 750-900                                      | 0,005-0,02                              | 0,005-0,01                               |

---

### 6.2.3.1 MICROFILTRACIÓN

Es un proceso de membrana muy antiguo que utiliza el gradiente de presión como fuerza impulsora. El mecanismo es de cribado a través de los poros. Las membranas usadas para la microfiltración son porosas y simétricas, teniendo un tamaño de poro de 0.1 – 10 µm. Separa partículas de un diámetro superior a 0.1 mm, algunos coloides grandes, bacterias y levaduras. Parte de la contaminación viral también es atrapada en el proceso, a pesar de que los virus son más pequeños que los poros de la membrana de microfiltración, debido a que los virus se pueden acoplar a las bacterias.

Respecto al pretratamiento de la MF bastan pocos requerimientos en comparación con los procesos convencionales de clarificación del agua, donde se añaden coagulantes y otros productos químicos antes de la filtración. Cuando las partículas y los microorganismos son los contaminantes y se use fibra hueca son necesarios prefiltros, rango de 50 a 200 µm, para eliminar grandes partículas que pueden cegar el interior de las fibras. También puede requerirse ajuste de pH para mantenerlo en el rango adecuado, esto es más importante para membranas de derivados celulósicos.

Los costes asociados a la microfiltración son los siguientes (Prats y Melgarejo ,2006):

- Costes de implantación: 2.400-4.800 euros/m<sup>3</sup>/h
- Costes de explotación:
  - Productos químicos: 0,010 – 0,015 euros/m<sup>3</sup>
  - Consumo eléctrico: 0,012 – 0,015 euros/m<sup>3</sup>

---

### 6.2.3.2 ULTRAFILTRACIÓN

La ultrafiltración (UF), al igual que la microfiltración, es un proceso de separación que utiliza la presión como fuerza impulsora. La presión de trabajo es algo mayor, 0,6 a 5 bares. El mecanismo de separación es por cribado a través de los poros de la membrana, que puede ser simétrica o asimétrica. Los poros de las membranas de ultrafiltración pueden retirar de los fluidos partículas de 0.001 – 0.1 µm. y compuestos de elevado peso molecular (500 a 500.000 daltons). Este proceso incluye materiales como bacterias, virus, almidón, gomas, proteínas, arcillas, pigmentos de pinturas, etc. También reduce la concentración de colorantes de elevado peso molecular. Permite el paso de la mayoría de especies iónicas. El peso molecular de corte se usa para describir la capacidad de retención de la membrana y se refiere a la masa molecular de un macrosoluto (normalmente polietilenglicol, dextrano o proteína) para el que la membrana tiene una capacidad de retención mayor del 90%. Se utiliza para eliminar macromoléculas, coloides y materia en suspensión, para reducir la DBO y, también, para deshidratar fangos. La técnica de ultrafiltración tiene muchas ventajas sobre las operaciones de clarificación y filtración convencional.

Los costes asociados a la ultrafiltración son los siguientes (Prats y Melgarejo ,2006):

- Costes de implantación: 4.000-6.500 €/m<sup>3</sup>/h
- Costes de explotación:
  - Productos químicos: 0,0025 – 0,003 euros/m<sup>3</sup> a depresión  
0,012 – 0,025 euros/m<sup>3</sup> a presión
  - Consumo eléctrico: 0,009 – 0,015 euros/m<sup>3</sup>

---

### 6.2.3.3 NANOFILTRACIÓN

La nanofiltración (NF), es un proceso de filtración por membranas operadas bajo presión en la que solutos de bajo peso molecular (1000 daltons) son retenidos, pero las sales pasan, total o parcialmente, a través de la membrana con el filtrado. Lo que provee un rango de selectividad entre las membranas de Ultrafiltración y Osmosis Inversa, permitiendo simultáneamente concentración y desalado de solutos orgánicos. La membrana de NF retiene solutos que la UF pasaría, y deja pasar sales que la OI retendría. En algunas aplicaciones, su selectividad entre moléculas de tamaños similares es la clave del éxito del proceso de separación con membrana.

Permitiendo un paso, prácticamente libre, de iones monovalentes, la membrana de nanofiltración reduce el incremento del gradiente de presión osmótica, a la que contribuyen las sales monovalentes. Como resultado es posible una mayor caudal de producto (permeado)

La nanofiltración está basada en el mismo principio que la ósmosis inversa, que permite rechazar sales polivalentes y orgánicas macromoleculares a menor presión que la ósmosis (7 a 15 bar). La diferencia se encuentra en que la membrana (elemento filtrante) utilizada para la nanofiltración permite un rechazo menor de sales, del orden del 90 al 95 %.

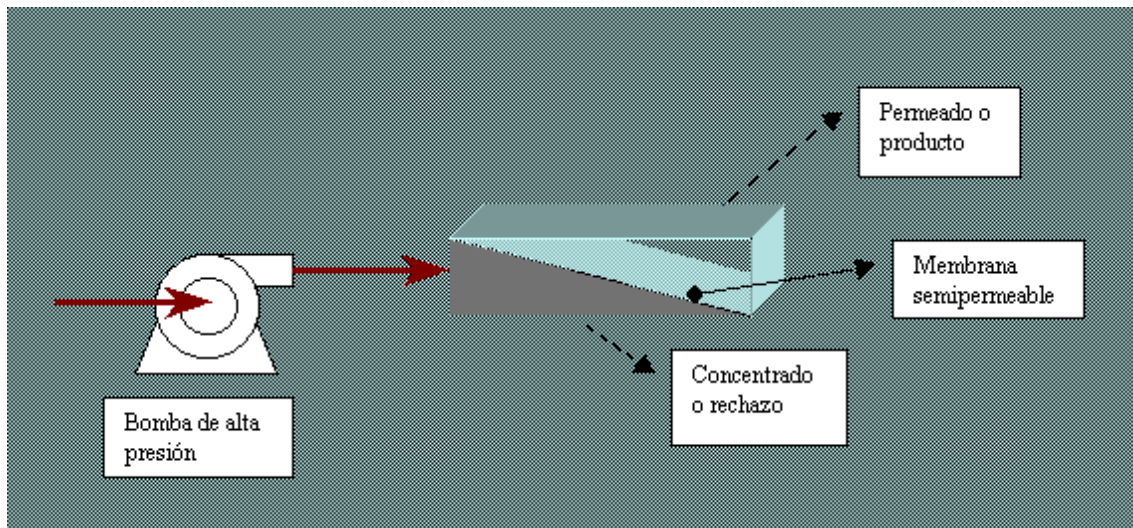
---

### 6.2.3.4 OSMOSIS INVERSA

El fundamento de la ósmosis inversa (OI), también llamada hiperfiltración, es aplicar a una solución salina una presión superior a su presión osmótica (de ahí el nombre de ósmosis inversa) con el fin de forzar al agua a pasar a través de una membrana semipermeable, separándola así de las sales que contiene. La OI permite la separación de unas sustancias tan pequeñas como iones inorgánicos.

En la práctica, la presión utilizada en la ósmosis inversa es entre 5 y 20 veces la presión osmótica. La presión de filtración de ósmosis inversa varía entonces en función de la cantidad de sales que contenga el agua, del porcentaje de rechazo que se busque, y de la propia tecnología de la membrana.

En forma simplificada (**Figura 12**), si aplicamos la presión suficiente al agua de alimentación que ingresa en el equipo, se producen dos corrientes de flujo continuo: una de permeado o producto y otra de concentrado o rechazo. La corriente de concentrado, de mayor conductividad eléctrica (debido a su contenido de sales) es habitualmente descartada, en tanto que el producto será agua prácticamente libre de sales.



**Figura 12.** Esquema de funcionamiento de la ósmosis inversa.

La ósmosis inversa es el nivel de filtración más fino disponible en la actualidad. Una membrana semipermeable actúa como barrera para toda clase de sales disueltas, moléculas inorgánicas y orgánicas, pirógenos, materias coloidales submicrómicas, virus y bacterias. Se pueden remover entre el 90 y 99 % de los compuestos disueltos, dependiendo del diseño del sistema.

Existen básicamente dos tecnologías de membranas de ósmosis inversa:

- Elementos en espiral (es la más utilizada actualmente).
- Elementos en fibra hueca (sólo fabricada por Dupont).

Cada fabricante ofrece una amplia gama de membranas que varían en porcentaje de rechazo, resistencias al cloro, resistencias a temperaturas y tamaños.

Se le llama conversión o recuperación al porcentaje de agua de alimentación que sale como producto. La recuperación depende de:

- Límite de diseño de cada elemento o membrana. Nunca supera el 50 % por membrana.
- Límite de concentración de sales en el rechazo.
- Número de pasos.
- Caudal de rechazo.

El problema más crítico a enfrentar en la operación de un sistema de ósmosis inversa es la posibilidad de ensuciamiento, por eso es necesario un pretratamiento previo.

Los pretratamientos son diseñados para cada equipo y para cada agua en función de sus características fisicoquímicas y bacteriológicas. Siempre se aconseja un prefiltrado para cualquier sistema y el mismo puede llegar hasta 1 o 5 micrones.

El empleo de la ósmosis inversa para la regeneración del agua residual ha tenido un gran éxito en los proyectos donde se ha utilizado, consiguiéndose agua de elevada calidad (López-Ramírez et al, 2004).



Cuando se emplea la ósmosis inversa, y especialmente tras el tratamiento convencional de fangos activos, además de la deposición de sólidos en suspensión que existen en el agua, se corre el peligro de que las membranas sean colonizadas por los microorganismos si no se cuenta con un sistema fiable de desinfección. Esto puede ser especialmente grave en el caso de las membranas de acetato de celulosa, dado que la colonización microbiana las puede dañar de forma irreversible. Por este motivo, la regeneración de los efluentes con este tipo de tecnología de membranas requiere un pretratamiento como medida de precaución. Este pretratamiento debe eliminar del agua la mayoría de los microorganismos, sólidos en suspensión y materia coloidal, de tal forma, que prácticamente, las membranas sólo reciban agua con materia disuelta. Por tanto, es necesario encontrar las condiciones óptimas de funcionamiento con cada tipo de efluente y unidad de tratamiento físico-química empleada (López-Ramírez et al, 2004).

El adecuado pretratamiento de los afluentes, antes de entrar en la unidad de ósmosis inversa, es de vital importancia dado que permite la eliminación de todos aquellos agentes perniciosos para el correcto funcionamiento de las membranas: los microorganismos, los sólidos en suspensión y la materia coloidal, de tal manera que hasta donde sea viable técnica y económicamente, las membranas sólo reciban agua con sólidos disueltos. Esto permite a las membranas trabajar en condiciones idóneas que extienden la vida útil de las mismas y hacen asumible económicamente el proyecto de regeneración de aguas residuales.

Partiendo de un efluente secundario, los pretratamientos que sufren las aguas residuales depuradas antes de su desalación suelen consistir en una eliminación de la materia orgánica (de características coloidales fundamentalmente) mediante procesos de coagulación-floculación-sedimentación, una eliminación de microorganismos mediante tratamientos de desinfección y un acondicionamiento químico necesario para el buen funcionamiento de las membranas. Puesto que la calidad de los efluentes secundarios no suele ser uniforme, resulta imprescindible determinar las condiciones óptimas de operación de las unidades de tratamiento físico-químico que se van a emplear como unidades de pretratamiento a la unidad de ósmosis inversa, por lo que los estudios a escala piloto resultan, hoy en día, todavía fundamentales, mientras no existan modelos matemáticos adecuados que predigan el ensuciamiento en las membranas de ósmosis inversa.

Desde un punto de vista económico, el pretratamiento previo que deben sufrir las aguas antes de su entrada en las membranas de ósmosis inversa supone un incremento en el coste del tratamiento final del agua. No obstante, el avance experimentado por las membranas de ósmosis inversa, especialmente en los últimos años que las hacen más permeables, más selectivas, más resistentes y más baratas podría llevar a pensar que es posible reducir, sin mermar las características del efluente para su reutilización, el nivel de pretratamiento necesario repercutiendo el coste de éste mediante la reposición de las membranas. Ante esta doble situación cabe plantearse la siguiente pregunta: ¿es preferible aumentar la protección de las membranas con un pretratamiento intenso antes de entrar en la unidad de ósmosis inversa, o por el contrario es preferible reducir el grado de este pretratamiento compensándolo con una mayor reposición de membranas?

---

#### 6.2.4 SISTEMAS NATURALES

Los sistemas naturales se definen como aquellos en que la velocidad de depuración tiene lugar al ritmo de crecimiento natural de los microorganismos, la vegetación y la fauna. Esto es debido a que funcionan con energía natural y por tanto no requieren de energía externa. Puesto que no requieren de

energía externa necesitan una mayor superficie para alcanzar el mismo grado de depuración que los sistemas convencionales.

Estos procesos consiguen mejorar la calidad físico-química del agua respecto a la materia en suspensión (MES), la turbiedad y la materia orgánica (DBO5). También se observa una mejora en la calidad microbiológica del agua, produciéndose una inactivación natural. Se distinguen dos grupos de sistemas naturales:

1. Los basados en la biología y los aspectos mecánicos del suelo: la infiltración-percolación.
2. Los basados en la biología y los aspectos hidráulicos del agua: el lagunaje.

---

#### 6.2.4.1 INFILTRACIÓN-PERCOLACIÓN

Este tipo de tratamiento combina la acción física, química y biológica de forma sencilla y eficaz. Es un sistema de depuración aerobio que consiste en infiltrar los efluentes a través de un terreno natural o un material, habitualmente 1,5 m de arena de granulometría definida. Intervienen tres procesos: 1) la infiltración de los sólidos en suspensión, 2) la adsorción de los microorganismos y 3) finalmente la degradación de los microorganismos. El proceso también produce la oxidación de la materia orgánica.

Este tratamiento presenta la ventaja de no necesitar reactivos químicos y tener un mantenimiento relativamente sencillo. El agua tratada puede servir directamente para su reutilización en muchos casos. Su principal exigencia es que si se quiere conseguir una alta calidad del agua, se requiere un efluente secundario muy bueno y generalmente hay que desinfectar con cloro; otra exigencia es que ocupa gran espacio.

---

#### 6.2.4.2 LAGUNAJE

El lagunaje es el sistema natural más conocido de tratamiento de aguas residuales. La desinfección se basa en el tiempo de permanencia del agua en la laguna, por efecto de la acción de la luz ultravioleta natural y de otros mecanismos. Sus ventajas son el bajo coste de explotación, la sencillez de las instalaciones y la facilidad de mantenimiento. Su inconveniente principal es la presencia de microalgas en el efluente y también la necesidad de disponer de grandes superficies.

La inactivación bacteriana y vírica en las lagunas de afino y en los humedales depende del tiempo de retención, de la concentración de MES y de algas, de la profundidad y de las condiciones medioambientales.

---

#### 6.2.5 DESINFECCIÓN

Cuando existe la posibilidad de que la población pueda entrar en contacto con el agua residual tratada o regenerada, el criterio de selección del tipo de tratamiento se basa en la necesidad de reducir la probabilidad de que las personas entren en contacto con los microorganismos patógenos. Por lo tanto, un factor importante de la reutilización del agua residual es el riesgo potencial para la salud pública asociado con la presencia de microorganismos patógenos.

Todo ello hace necesario incorporar algún tratamiento adicional para garantizar la eliminación de los microorganismos patógenos del efluente (Soriano y Hernandez, 2006). La desinfección es el proceso más importante desde el punto de vista de la inactivación de organismos patógenos.

Los sistemas de desinfección más comunes descritos por Metcalf y Eddy (1995) en los procesos de tratamiento de aguas residuales son:

- 1) la adición de productos químicos (cloro, ozono y peróxido de hidrógeno).
- 2) la instalación de lagunas de afino.
- 3) el uso de luz UV.
- 4) los sistemas de filtración en medio granular o membrana.

La eliminación de los microorganismos patógenos contenidos en un agua residual tratada se consigue mediante un proceso de desinfección (Aguirre *et al.*, 2004). Para asegurar la inactivación total de los microorganismos indicadores presentes en un agua es necesario reducir al mínimo posible el contenido de materia en suspensión (MES) y la turbiedad del agua a tratar, ya que las partículas ofrecen a los microorganismos una barrera protectora frente a la acción de los desinfectantes.

Los métodos de desinfección química empleados tradicionalmente utilizan alguno de los siguientes desinfectantes: cloro libre, dióxido de cloro, hipoclorito sódico o cloraminas. El ozono es una tecnología menos utilizada en la desinfección química. La eficiencia de cualquiera de estos productos desinfectantes es función de su concentración y del tiempo de contacto con la muestra que se quiere desinfectar, de manera que la eficiencia desinfectante aumenta cuando lo hacen los valores de las dos variables citadas. Varios estudios ponen de manifiesto la eficacia relativa de estos productos químicos después de haberlos evaluado con respuesta a diversos microorganismos, llegando a la conclusión de que, en general, el ozono presenta un mayor poder desinfectante, seguido por el cloro y, en último lugar, por las cloraminas formadas durante el proceso de desinfección.

En la aplicación de productos químicos para desinfectar un efluente secundario se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. El momento de introducción del producto en el proceso y el orden de introducción si se trata de más de un producto.
2. El pH del efluente secundario, que puede modificar el efecto desinfectante del agente químico.
3. La mezcla adecuada del producto con la muestra, con objeto de asegurar la presencia de desinfectante en todo el volumen de agua a desinfectar.
4. El carácter volátil de algunos productos químicos, que pueden provocar efectos graves en la población.
5. La eficiencia del desinfectante, así como con la cantidad de desinfectante que pueda absorber la MES y hacer disminuir su actividad frente a los microorganismos.
6. Los problemas que se pueden derivar de una concentración residual elevada de desinfectante.

Entre los desinfectantes químicos permitidos por la legislación tenemos:

- **Cloro** y sus derivados.
- **Ozono:** Es un poderoso oxidante.
  - Ventajas con respecto al cloro: No deja olor ni sabor residual. Produce una oxidación simultánea de la materia orgánica, no da lugar a la formación de trihalometanos.
  - Inconveniente: Alto coste. No acción residual
- **Permanganato potásico:** Es un oxidante energético, que actúa rápidamente sobre la materia orgánica...
  - Ventajas: No da sabor ni olor al agua; manipulación sencilla; bajo coste
  - Inconvenientes: No tiene acción residual; El agua tratada con permanganato al cabo de tiempo forma un precipitado pardo-oscuro, que se adhiere a los recipientes de vidrio y porcelana.
- **Sales de plata:** La aplicación de estos metales como desinfectantes del agua no se ha desarrollado en razón a su elevado costo (200 veces más que el cloro gas) y tiempo de acción prolongado.

Las principales características que debe de cumplir un buen desinfectante son:

- Capaz de destruir los microorganismos patógenos.
- El tiempo de desinfección.
- No nocivo para la salud.
- De fácil manipulación, almacenamiento y detección en el agua.
- Acción residual.
- Económico.

---

#### 6.2.5.1 LUZ UV

La desinfección con luz UV consiste en la destrucción selectiva de los microorganismos que causan enfermedades mediante la irradiación con rayos UV. Esta radiación provoca una serie de daños en la molécula de ADN de los organismos patógenos que finalmente impiden la división celular y causan la muerte.

La luz ultravioleta es el componente del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible, que se corresponden entre los 100nm y los 400nm. Las longitudes de onda germicidas son las que se corresponden a las regiones UVC y UVB, entre los 200 y 315nm, siendo los 265nm la longitud de onda más efectiva para la inactivación de microorganismos ya que el ADN expuesto a esta energía presenta un máximo de absorción.

Los microorganismos patógenos deben absorber la luz UV para que tenga lugar su inactivación. Cualquier elemento que dificulte la reacción de la luz UV con los microorganismos disminuirá la eficacia de la desinfección.

Se ha observado que el pH del agua no tiene ningún efecto sobre la desinfección con luz UV, pero otros factores si que influyen de forma directa en el rendimiento de la desinfección:

- Acumulación de materia en la superficie de las lámparas de luz UV.
- Concentración de sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas.
- Turbiedad.
- Color.
- Caudal y tiempo de permanencia del agua residual en el reactor.
- Calidad del agua.
- Dureza total.
- Condición de la lámpara.
- Limpieza del tubo de cuarzo.
- Tiempo de uso de la lámpara.
- Tratamiento del agua antes de aplicar luz UV.
- Diseño del reactor.

Las principales ventajas en el uso y mantenimiento de luz UV son:

- No genera subproductos.
- No se necesitan tanques de contacto; apenas algunos segundos son suficientes para la desinfección.
- No presenta riesgos al usuario.
- El mantenimiento es muy simple, pues necesita solamente un reemplazo anual de la lámpara y limpieza del tubo de cuarzo de vez en cuando. Dependiendo de la calidad del agua, la limpieza puede no ser necesaria.

Sin embargo, la aplicación de la luz UV para la desinfección de agua residual depurada todavía presenta notables limitaciones, especialmente derivadas de su escasa eficacia desinfectante cuando se utilizan aguas residuales de composición físico - química muy diferente e incluso variable en función de los vertidos de zona (Aguirre *et al.*, 2004).

La variabilidad propia de las aguas residuales hace necesario realizar estudios en planta piloto que: 1) corroboren la eficacia de los equipos de luz UV con diferentes tipos de efluentes secundarios, 2) determinen su campo de aplicación y 3) establezcan claramente los rendimientos que se pueden llegar a alcanzar en la práctica (Aguirre *et al.*, 2004).

Los costes asociados a la implantación de la desinfección por UV, según objetivos, son los siguientes (Prats y Melgarejo ,2006):

- Para 200 ufc/100 mL tene un coste de 4 – 9 euros/m<sup>3</sup>/día
- Para 10 ufc/100 mL tene un coste de 7 – 11 euros/m<sup>3</sup>/día
- Para 2,2 ufc/100 mL tene un coste de 12 – 16 euros/m<sup>3</sup>/día

---

#### 6.2.5.2 CLORO

A mitad del siglo XX ya se observó que el cloro inhibía ciertos enzimas específicos, lo que provocaba la inactivación de las bacterias. Hoy en día, está demostrado que el cloro actúa en la pared celular y daña los ácidos nucleicos, causando incluso mutaciones.

Los compuestos del cloro más frecuentemente utilizados en las plantas de tratamiento de agua residual son el hipoclorito sódico ( $\text{NaClO}$ ), el hipoclorito cálcico ( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ) y el cloro gas. Los dos primeros se emplean en plantas de tratamiento pequeñas. El hipoclorito sódico se puede obtener comercialmente de 1,5 al 15%, siendo el 4,0% la concentración usual máxima (lejía). La solución se descompone más fácilmente a mayores concentraciones y se ve afectada por la exposición a la luz y al calor. Por lo tanto, su almacenamiento requiere un lugar frío y un tanque resistente a la corrosión.

La cloración con cloro libre y/o derivados se utiliza como sistema de desinfección, pero también como método para eliminar el contenido de cianuros en determinadas aguas residuales y para disminuir los valores de la DBO a causa del elevado poder oxidante del cloro. La cloración es un sistema de desinfección eficaz y del cual se posee una amplia experiencia en su utilización, y que presenta además un coste favorable.

Aparte del pH y la temperatura, hay otros factores que influyen notablemente en los procesos de desinfección de aguas residuales. En particular, algunos de estos factores para la desinfección con cloro son: 1) el tiempo de contacto, 2) la concentración y el tipo de agente químico, 3) el tipo de organismo, 4) la materia en suspensión y 5) la materia orgánica.

El tiempo de contacto de los microorganismos con el desinfectante es el factor más importante para lograr la eliminación de los patógenos. El tiempo de contacto viene especificado generalmente por la autoridad encargada del control y puede oscilar entre 30 y 90 minutos.

El proceso de diseño del reactor debe garantizar que al menos un 80-90% del agua residual permanece en el reactor durante el tiempo de contacto especificado. Esto se consigue utilizando reactores del tipo flujo en pistón o bien una serie de tanques de mezcla completa interconectados. La velocidad horizontal deberá ser de 1,5 a 4,5 m/min como mínimo.

Es el procedimiento más extendido en la desinfección de las aguas de consumo en cuanto a que el cloro reúne la mayoría de las propiedades del "desinfectante ideal". El principal objeto de la cloración es la destrucción de microorganismos gracias a la acción germicida del cloro, pero también tiene una gran importancia la oxidación de sustancias inorgánicas reducidas (hierro, manganeso, sulfuros etc), la destrucción de compuestos que producen olor y sabor, eliminación de algas.

Puede convertirse en líquido a  $-35^\circ\text{C}$ , resulta por tanto fácilmente licuable por lo cual se suele transportar en estado líquido mediante botellas presurizadas. Como compuesto, en la naturaleza lo podemos encontrar en gran cantidad formando parte de la sal común o cloruro sódico ( $\text{NaCl}$ ), que en estado acuoso se encuentra disociado en sus iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$

El cloro resulta un desinfectante bastante eficaz y económico para el tratamiento y potabilización de aguas, ya sea aportado en forma gas disolviéndolo en el agua o bien aportándolo como hipoclorito sódico, hipoclorito cálcico o como derivados del cloroisocianurato. Sin embargo, el aporte de cloro reacciona con la materia orgánica del agua formando una serie de compuestos derivados del cloro que pueden resultar muy molestos y malolientes. De estos compuestos, los más perjudiciales son los llamados trihalometanos, de carácter cancerígeno para la salud humana. De todos ellos el más importante es el triclorometano o cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ), que tradicionalmente era usado como analgésico pero dejó de utilizarse debido a su toxicidad. Estos compuestos tóxicos traen asociados riesgos de cáncer de colon y vejiga y daños en el riñón y en el hígado. También pueden formarse otros subproductos perjudiciales como compuestos orgánicos volátiles, cloritos, ácidos cloroacéticos o cloruro de cianógeno.

La combinación del cloro con la materia orgánica produce compuestos orgánicos clorados que genéricamente se denomina CRC (cloro residual combinado) y tiene una gran importancia en el proceso

de cloración coadyuvante. Los compuestos más frecuentes son las cloraminas, por combinación con el amonio.

La cloración a punto de ruptura consiste en añadir cloro a la dosis necesaria para oxidar todos los compuestos orgánicos y algunas sales inorgánicas al estado de reducción que existan en el agua por ej. Fe, Mn...etc.

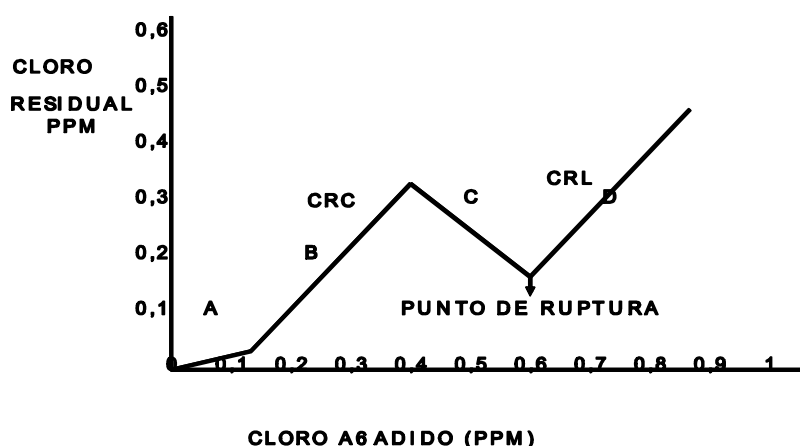
El proceso ocurre en cuatro etapas, como se muestra en la **Figura 13**:

A) Cuando comenzamos a añadir cloro a un agua, las sustancias fácilmente oxidables reaccionan con el cloro reduciéndose la mayor parte de él a ión cloruro.

B) Tras satisfacer esta demanda inmediata, el cloro reacciona con el amoníaco y compuestos orgánicos dando lugar a la formación de cloraminas o compuestos organoclorados. En esta fase se detecta cloro residual combinado (CRC). Al llegar al final de la fase B todo el cloro se encuentra combinado en forma de cloraminas, que son productos que tienen un bajo poder desinfectante y producen un olor desagradable. Estos compuestos son los causantes del llamado olor a piscina.

C) Destrucción de cloraminas y compuestos organoclorados, por lo que disminuye las concentraciones de CRC, hasta llegar a un punto mínimo que constituye el "punto de ruptura" en el cual ya se puede considerar desinfectada ese agua. Este punto constituye la demanda de cloro del agua.

D) La adición de cloro más allá del punto de ruptura, conduce a un aumento proporcional de CRL, lo que supone un margen de seguridad para cualquier demanda de cloro.



**Figura 13.** Gráfica representativa de la cloración a punto de ruptura.

La supercloración consiste en la adición del cloro en dosis muy superiores a la demanda del agua y la posterior neutralización del exceso con un neutralizante como el hiposulfito sódico.

### 6.2.5.3 OZONO

El ozono es oxígeno enriquecido, constando de tres átomos de oxígeno, es inestable y se descompone con cierta facilidad en oxígeno normal y oxígeno nascente, que es un fuerte oxidante. Debido a esta característica, actúa con gran eficiencia como desinfectante y se constituye como el más serio competidor del cloro.

El ozono es un gas poco soluble en el agua y muy volátil. Se mantiene en el agua solo algunos minutos; en su aplicación, se pierde aproximadamente el 10% por volatilización. Las dosis necesarias para desinfectar el agua varían según la calidad de la misma.

El ozono mata a la bacteria por medio de la ruptura de la membrana celular. Tiene un alto potencial de oxidación, es inestable, y ejerce su propia acción de desinfección atacando enzimas, grupos sulfridrilo o aldehidos, liberando compuestos peroxiles, que son también desinfectantes, todo esto conduce como se ha dicho antes a la dispersión del citoplasma y por consiguiente a la muerte del microorganismo. En cambio, el cloro debe introducirse a través de la pared celular de la bacteria y difundirse dentro del citoplasma, acción que depende en alto grado del tiempo de contacto.

Debido a su gran poder oxidante, el uso del ozono puede ser recomendable en el pretratamiento de aguas para la reducción de metales disueltos y la remoción de materia orgánica, lo que permite un ahorro en coagulantes y tiempos de retención. El ozono, además de atacar a los precursores de los trihalometanos y reducir su concentración en el agua, destruye a estos compuestos ya formados. Otra ventaja frente al cloro es que no imparte al agua color, olor ni sabor y nos evitamos otros aspectos toxicológicos procedentes de la cloración (trihalometanos, clorofenoles y cloramias).

Es un agente muy poderoso en el tratamiento de materiales orgánicos. Los orgánicos son naturales (ácidos de humectación y húmicos) o sintéticos (detergentes, pesticidas) en esencia. Algunos orgánicos reaccionan con ozono muy rápidamente hasta la destrucción, dentro de minutos o aún segundos (fenol, ácido fórmico), mientras otros reaccionan más lentamente con ozono (ácidos de humectación y húmicos, varios pesticidas, tricloroetano etc.). En algunos casos, los materiales orgánicos son oxidados solamente parcialmente con ozono. Una ventaja principal de oxidación parcial de materiales orgánicos es que al oxidarse parcialmente, los materiales orgánicos se polarizan mucho más que originalmente, produciendo materiales insolubles complejos que se pueden quitar con filtros de carbón activado.

Su principal inconveniente es que no aporta protección sobre las redes de abastecimiento aguas abajo del punto de aplicación.

#### **Aplicación del ozono:**

La técnica se basa, fundamentalmente, en lograr un tiempo de contacto adecuado del agua, con la cantidad adecuada de ozono. Concentraciones de entre 0.5 y 0.8 mg/l de ozono durante unos tres o cuatro minutos son suficientes para conseguir una calidad de agua excepcional y desinfectada. Tras el tratamiento, el ozono se descompone en oxígeno tras varios minutos no dejando ningún tipo de residual, pero como consecuencia tampoco existirá ningún residual desinfectante que pudiera prevenir el crecimiento bacteriológico. En los casos en los que sea necesario asegurar que el agua de consumo ha sido recién tratada con ozono, el sistema de ozonización se realizará en un depósito con un caudal de recirculación, en donde mediante un inyector venturi se añadirá la producción de ozono adecuada. Esta cantidad de ozono y por tanto, la concentración de ozono residual en el depósito depende, en primer lugar, de las características de producción del equipo, y en segundo lugar, del tiempo de funcionamiento y parada del mismo. Es decir, mediante el temporizador, es posible aumentar y disminuir el tiempo de producción y de parada consiguiendo en estado estacionario una mayor o menor concentración de ozono. Para sistemas más complejos de regulación y control puede instalarse una sonda de medición de ozono residual en el agua que actúe directamente sobre la producción del equipo para alcanzar el valor de consigna preestablecido como el ideal de concentración de ozono en el agua.

También tiene capacidad de eliminar la turbidez del agua. Esta se elimina por ozonización a través de una combinación de oxidación química y neutralización de carga. Las partículas coloidales que



causan turbidez son mantenidas en suspensión por partículas de carga negativas que son neutralizadas por el ozono. El ozono además destruye los materiales coloidales por medio de la oxidación de materias orgánicas.

La oxidación de la materia orgánica, metales pesados, sulfuros y sustancias extrañas, produce la supresión de sabores y olores extraños que el agua pudiera contener, proporcionando una mejora en la calidad y el aspecto del agua, haciéndola más adecuada para su consumo y disfrute.

Por último podemos clasificar las capacidades del ozono según la etapa del proceso en la cual es aplicado, por ello se ha determinado la siguiente clasificación de la acción oxidante del ozono:

1. **Procesos de pre - ozonización:** aquellos en los cuales se dosifica en etapas previas a la floculación - coagulación, teniendo como objetivos principales, la optimización de procesos de floculación - coagulación, la remoción de fierro y manganeso, y el control de algas en el agua de la fuente.
2. **Procesos de ozonización intermedia:** aquellos en los cuales la dosificación se produce en etapas posteriores a etapas de coagulación y previo a la etapa de filtrado en lechos de arena. Principalmente la aplicación en esta etapa esta dirigida a la optimización de características organolépticas, ya sea olor, sabor, color, a la precipitación de fierro y manganeso y al aumento de la biodegradabilidad de materias orgánicas.
3. **Procesos de post - ozonización:** aquello que se produce en la etapa final de tratamiento, es decir, posterior a la filtración y previo distribución. Sus objetivos principales son la desinfección y el control final de algas.

En contraposición a otros oxidantes, el ozono no genera compuestos tóxicos y además dada su rápida acción es mucho más efectivo. Otra ventaja es que es bastante inestable pasando rápidamente a oxígeno, aumentando así el contenido disuelto de este gas en el agua. Lo anterior hace que se pueden evitar la formación de zonas anóxicas, que generan compuestos de mal olor (ac. sulfhídrico, mercaptanos, etc.).

---

#### 6.2.6 LÍNEA DE FANGOS

En el tratamiento de aguas residuales, cuyo objetivo principal es eliminar la contaminación antes de su vertido al cauce receptor, se generan una serie de subproductos denominados fangos, donde se concentra la contaminación eliminada, y cuyo tratamiento y evacuación puede ser problemática.

Los fangos producidos la línea de agua de una EDAR presentan las siguientes características:

- Tienen una gran cantidad de agua (95-99%), por lo que ocupan un volumen importante y son de difícil manipulación.
- Tienen gran cantidad de materia orgánica, por lo que entran fácilmente en descomposición (putrefacción), produciendo malos olores.
- Poseen una gran cantidad de organismos patógenos, causantes de enfermedades.

Todo ello hace que deban tratarse con sumo cuidado y en su tratamiento deben darse tres fases, encaminadas a reducir al máximo los problemas anteriormente citados:

- Reducción del agua presente en los fangos para evitar el manejo de grandes volúmenes.
- Estabilización de la materia orgánica para evitar problemas de fermentación y putrefacción.
- Conseguir una textura adecuada para que resulten manejables y transportables.

---

#### 6.2.6.1 ESPESAMIENTO

Los fangos producidos en el tratamiento del agua poseen más del 95% de agua, por lo que ocupan volúmenes importantes, siendo por su naturaleza putrescibles. Ello hace necesario un tratamiento para modificar sus características y permitir unas condiciones tales que su evacuación y disposición final sean óptimas desde el punto de vista sanitario, medioambiental y de su manejo.

La etapa de espesamiento incluye para reducir el volumen de los fangos mediante concentración o eliminación parcial de agua, los fangos activados que normalmente se bombean desde los tanques de decantación secundaria con un contenido de sólidos del 0.8% pueden espesarse hasta un contenido del 4% de sólidos, consiguiéndose de esta manera una reducción del volumen del fango a una quinta parte del volumen inicial. Con ello se obtienen una serie de ventajas:

- Reducción del volumen de los tanques posteriores al espesamiento, así como su equipamiento.
- Reducción de la cantidad de calor requerida para el calentamiento de los fangos en procesos tales como digestión anaerobia, secado térmico e incineración.
- Reducción y mejora de los rendimientos de los equipos de deshidratación.

Los tipos más frecuentes de espesamiento son:

- Espesamiento por gravedad.
- Espesamiento por flotación.

Además, existe el espesamiento por centrifugación, alternativa válida para cualquier tipo de fango, aunque está más indicada para concentrar fangos muy hidrófilos (que difícilmente liberan el agua que contienen), de difícil compactación.

El tipo de espesamiento a aplicar y su compactación dentro de la línea de fango dependen de la procedencia del fango a espesar y del tipo de tratamiento a efectuar:

El espesamiento por gravedad se utiliza para los fangos primarios y los mixtos, así como para los procedentes de una precipitación química, localizándose antes del proceso de la digestión anaerobia. En el caso de que la línea de tratamiento de los fangos incluya una estabilización aerobia de los mismos, el espesador se sitúa, generalmente, posterior a la misma ya que este proceso requiere para su buen funcionamiento concentraciones no muy elevadas, no superiores al 2-2.5%.

La flotación está indicada para concentrar los fangos biológicos procedentes del decantador secundario, también llamados fangos en exceso.

La centrifugación tiene una aplicación limitada como sistema de espesado en una depuradora.

### 6.2.6.2 ESTABILIZACIÓN

El fango biológico tiene una gran cantidad de materia orgánica en forma de células y microorganismos que han estado oxidando la materia orgánica en el tratamiento secundario y que después de éste se encuentra en pequeña proporción. En la estabilización lo que se pretende es continuar la oxidación de la materia orgánica que, en este caso, es celular.

Dentro del metabolismo de los microorganismos podemos distinguir dos fases:

1. La fase de asimilación o síntesis.
2. La fase de desasimilación o respiración endógena.

Durante la primera fase los organismos consumen el alimento disponible creando nueva materia celular activa. Es la fase de crecimiento celular. Pero los organismos también necesitan respirar, moverse, y ejercer sus funciones vitales, para lo cual consumen reservas y, por tanto, parte de su propia biomasa. Esto constituye la segunda fase de su metabolismo, en la cual decrece su materia activa.

En el tratamiento secundario se desarrolla principalmente la primera fase y cuando los fangos (que son básicamente células) llegan a la estabilización aerobia se desarrolla fundamentalmente la fase de respiración endógena, para completar así la oxidación total de la materia orgánica que entró en la planta.

También se utiliza para fangos mixtos, pero en este caso se necesita un aporte de O<sub>2</sub> hasta 9 veces mayor que cuando se emplea sólo fango biológico. Esto hace que muchos países no utilicen la estabilización aerobia cuando existen fangos primarios. En cualquier caso, dado el alto coste económico, en España sólo se utiliza en poblaciones de 40-50000 habitantes.

Los fangos provenientes de la etapa de espesamiento de una E.D.A.R. tienen una concentración de sólidos que puede ir desde el 8-10% en los fangos primarios, hasta el 4-7% en fangos mixtos, o el 2-3% en fangos activos. De este contenido total de materia sólida de un fango se puede considerar que aproximadamente un 70% en peso está formado de materia orgánica y un 30% de materia inorgánica o mineral. Sólo la primera puede descomponerse en un proceso de digestión o estabilización.

En un proceso de digestión anaerobia se consigue:

- La reducción del volumen ocupado por los fangos.
- La eliminación o destrucción de gran parte de la materia orgánica que contienen los fangos, disminuyendo así el riesgo de putrefacción y la producción de malos olores.
- La destrucción casi total de gérmenes patógenos.
- La obtención de metano, de gran poder calorífico, que puede ser utilizado como fuente de energía dentro de la planta.
- Todo ello hace que el fango resultante sea fácilmente secable y capaz de ser evacuado sin grandes problemas.

Con respecto a la digestión aerobia de fangos tiene ciertas ventajas e inconvenientes:

- Menores costes de explotación al no utilizar la aireación como parte del proceso.
- Concentra mejor el fango y mejora su secado posterior.
- Produce gas metano que proporciona energía para otras operaciones.
- Pequeña producción de fangos estabilizados.
- Tiene capacidad para tratar altas cargas hidráulicas y orgánicas.
- Mayores costes de inversión en su construcción.

- Produce líquidos (sobrenadantes) que pueden ser difíciles de tratar cuando se recirculan en la instalación.
- Los fangos necesitan una nueva estabilización antes de su evacuación final.
- Arranque lento y delicado.

### 6.2.6.3 DESHIDRATACIÓN

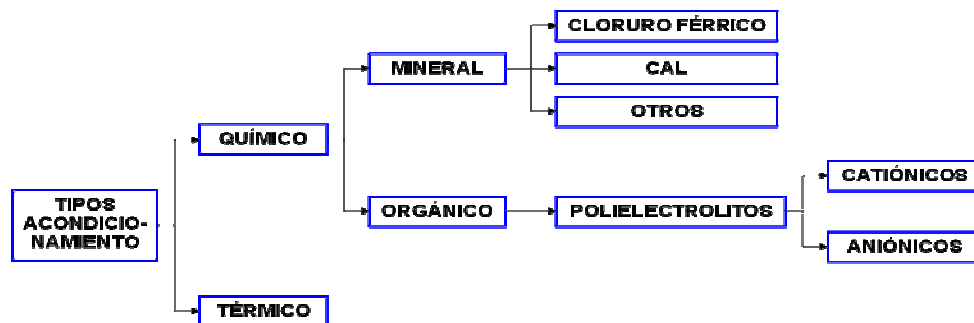
Después que el fango a pasado por el proceso de digestión, debe secarse y evacuarse. El problema que nos planteamos es el de eliminar los fangos digeridos de la manera más práctica y menos costosa posible, aumentando el porcentaje de materia seca lo más posible para reducir su volumen al máximo. Con los métodos que se emplean se consiguen fangos deshidratados con un 20-40% en peso de materia seca.

El sistema de deshidratación empleado dependerá de las características de la E.D.A.R., del tipo de fango y del destino final de los mismos. Las estaciones depuradoras pequeñas suelen tener eras de secado, mientras que las mayores utilizan sistemas mecánicos de secado.

En las depuradoras en las que se producen grandes volúmenes de fango y no se pueden utilizar eras de secado, se puede llevar a cabo el secado mecánico mediante:

- Filtros de vacío.
- Centrífugas.
- Filtros banda.
- Filtros prensa.

En general, en el caso de la deshidratación mecánica, los fangos deben ser previamente acondicionados, bien química bien térmicamente, ver **Figura 14**.



**Figura 14.** Tipos de acondicionamiento del fango (Gallardo ,2006).

El acondicionamiento se realiza para facilitar la pérdida de agua de los fangos durante el secado mecánico, haciéndolo más rápido, eficaz, y rentable económicamente. Consiste, básicamente, en romper la estabilidad de las partículas que están en el fango, aumentando su tamaño artificialmente.

Un acondicionamiento adecuado del fango es la base para un correcto funcionamiento del sistema de deshidratación.

### 6.3 COSTES ASOCIADOS

El agua residual tras su tratamiento puede ser empleada en un gran número de actividades, incluyendo el riego agrícola y de jardines, la recarga de acuíferos, procesos industriales, etc. Los requerimientos de calidad para esta agua variarán dependiendo del uso final que se le vaya a dar y de su potencial exposición al público. Como consecuencia, los costes de recuperación del agua residual normalmente no están bien documentados, llegando incluso a no ser conocidos con exactitud.

Un problema asociado a los proyectos de recuperación del agua residual es que el precio real es normalmente más alto que el estimado durante la etapa de diseño (Hidalgo, et al, 2004). Esto suele ser debido a una planificación insuficiente antes del diseño y puesta en marcha de los proyectos. El desarrollo de una estimación de costes debe incluir proyecciones del coste de capital, costes anuales de operación y mantenimiento y costes del ciclo de vida. Estos últimos son útiles para comparar la viabilidad económica de diferentes alternativas de proyectos de reutilización en un periodo de tiempo específico.

Los costes de los sistemas de tratamiento y reutilización de agua residual pueden presentarse en función del volumen de agua involucrado en el proceso, el uso final de esa agua o la configuración de los procesos del tratamiento. El coste global puede ser determinado analizando el coste de los componentes individuales, según criterios de diseño. El coste de cada componente individual variará, en cada caso, en función de la capacidad de tratamiento y reutilización del sistema del que se trate y sus dimensiones. El coste de acondicionamiento de los terrenos y coste eléctrico se toman, respectivamente, como un 10% y 15% del coste total.

El coste anual del sistema global de recuperación del agua (incluyendo tratamiento y reutilización) comprende los costes de personal, costes de operación (energía más productos químicos) y costes de mantenimiento (reparaciones y sustitución de equipos). Los requisitos de personal son función del tamaño y complejidad de las instalaciones. El coste de operación depende del consumo de energía y productos químicos. Los costes de mantenimiento se estiman generalmente, como un porcentaje de coste de compra del equipo (ej: 5%). Para tuberías y tanques de almacenamiento, los costes de mantenimiento se proyectan como un 2% del coste de capital.

En el estudio de costes de explotación aplicamos una tarifa binómica (**Tabla 11**):

- Término fijo: independiente del caudal de tratamiento (euro/día).
- Término variable: en función del caudal tratado (euro/m<sup>3</sup>).

**Tabla 11.** Terminos fijos y variables de los principales costes en una EDAR.

| Principales costes            | Término fijo   | Término variable            |
|-------------------------------|--|-----------------------------|
| <b>Energía</b>                | Cuota de potencia  | Cuota de energía (consumos) |
| <b>Personal</b>               | Nóminas  |                             |
| <b>Evacuación de residuos</b> |  | Transporte                  |
| <b>Consumo de reactivos</b>   |  | Reactivos químicos          |
| <b>Mantenimiento</b>          | Electrómecanico y obra civil   |                             |
| <b>Varios</b>                 | Oficina, teléfono, seguros, combustibles, laboratorio, agua, vehículos, etc. |                             |

Se pueden obtener ciertas economías de escala según la capacidad de los sistemas de tratamiento y reutilización. El incremento unitario de los costes de capital es mayor a medida que disminuye el tamaño de estos sistemas. Como consecuencia de que los costes auxiliares no aumenten de forma lineal con el tamaño de la planta, el coste de mantenimiento se vuelve un componente mayoritario de los costes en pequeñas plantas de recuperación, lo que contribuye a la alta desproporcionalidad de los costes unitarios finales.

Hay un hecho que tiene un impacto importante en la determinación de la vida útil de los proyectos: en lo que respecta a la obra civil, se considera un tiempo de vida útil entre los 45 y 50 años, pero en cambio los equipos es de tan solo 15 años (Seguí, 2004). Esto es una situación que deberá tenerse en cuenta en el momento de anualizar los costes de inversión.

Comparando los costes de obtención del agua depurada y agua regenerada (**Tabla 12**), observamos que el tratamiento avanzado supone un 25% y la distribución un 17,9 % del coste total de regeneración. La suma del tratamiento terciario y avanzado supone el 35,7% del coste total de regeneración, y si sumamos la distribución sale más del 50%.

**Tabla 12.** Comparativa de los costes de los diferentes tratamientos y de la distribución entre la depuración y la regeneración, datos obtenidos de la EPSAR (2007).

| Tipo de coste                 | Depuración                | Regeneración              |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Tratamiento secundario</b> | 0,26 euros/m <sup>3</sup> | 0,26 euros/m <sup>3</sup> |
| <b>Tratamiento terciario</b>  | 0,06 euros/m <sup>3</sup> | 0,06 euros/m <sup>3</sup> |
| <b>Tratamiento avanzado</b>   |                           | 0,14 euros/m <sup>3</sup> |
| <b>Distribución</b>           |                           | 0,10 euros/m <sup>3</sup> |
| <b>Total</b>                  | 0,32 euros/m <sup>3</sup> | 0,56 euros/m <sup>3</sup> |

Los costes del agua regenerada en una PTT no pueden generalizarse ya que están fuertemente condicionados por los diferentes procesos de tratamiento secundario y terciario de las aguas residuales, el origen de las mismas y el uso final a que van a destinarse (reutilización).

No obstante, pueden hacerse estimaciones de costes basadas en la experiencia de empresas del sector (constructoras/explotadoras), distinguiendo entre costes de implantación (construcción) y costes de gestión (mantenimiento y explotación).

### 1. Costes de implantación:

Los costes de implantación de plantas de tratamiento terciario son muy variables en función del objetivo perseguido, del tamaño y tipo de la planta de tratamiento y de la calidad del agua de la cual partimos.

Como ejemplo se citan los costes de algunas configuraciones en plantas de tratamiento terciario (Trapote, 2007):

- Plantas de infiltración-percolación con desinfección final UV situada después de un tratamiento secundario convencional (capacidad de tratamiento del orden de 2.000 m<sup>3</sup>/día): 200 euros/m<sup>3</sup>.d-1.
- Plantas de tratamiento físico químico de coagulación, floculación, decantación, filtración y desinfección con cloro y UV situada después de un tratamiento secundario convencional (capacidad de tratamiento del orden de 10.000 m<sup>3</sup>/día): 200 euros/m<sup>3</sup>.d-1.
- Plantas de tratamiento físico químico de coagulación, floculación, decantación, filtración y desinfección con cloro y UV situada después de un tratamiento secundario convencional (capacidad de tratamiento del orden de 1.000 m<sup>3</sup>/día): 400 euros/m<sup>3</sup>.d-1.
- Plantas de tratamiento de microfiltración y osmosis inversa situada después de un tratamiento secundario convencional seguido de un tratamiento físico químico con filtración (capacidad de tratamiento del orden de 2.000 m<sup>3</sup>/día y conductividad de 4.000 microS/cm): 1.000 euros/m<sup>3</sup>.d-1.
- Plantas de tratamiento de osmosis inversa situada después de un BRM (capacidad de tratamiento del orden de 5.000 m<sup>3</sup>/día y conductividad de 15.000 pS/cm): 200 euros/m<sup>3</sup>.d-1.

## 2. Costes de gestión

Los costes de gestión de PTT se desglosan, como también habíamos citado en la **Tabla 11**, entre costes fijos y variables. Estos últimos son proporcionales al agua tratada en estas instalaciones.

### A. Costes fijos:

- Costes de personal de operación y mantenimiento.
- Costes de mantenimiento electromecánico.
- Costes varios de seguimiento y control, seguridad y salud y administrativos.

En general, el impacto de estos costes depende de la posibilidad de compartirlos con los de una EDAR colindante. Esta regla recobra su máxima importancia en el capítulo de los costes de personal.

Los costes anuales de mantenimiento electromecánico ascienden a una cantidad del orden de 1% al 2% del montante de la inversión en equipos de la instalación, sin contar la reposición de equipos para la cual se ha de prever un fondo de amortización técnica del orden del 10% del montante de la inversión en equipos de la instalación anualmente (Trapote, 2007). Estos costes de mantenimiento tampoco contemplan la reposición de membranas en caso de instalaciones que utilizan esta tecnología ya que este tema tendrá que ser tratado en un capítulo a parte. Los costes varios se han de evaluar caso por caso.

### B. Costes variables:

- Costes de energía eléctrica.
- Costes de reactivos químicos.
- Costes de reposición de membranas.
- Costes de tratamiento y evacuación de subproductos generados (en caso de no ser evacuados a través de la EDAR colindante).

Los costes de consumo de energía eléctrica son mínimos si se considera un tratamiento de desinfección convencional con cloro y/o UV, de físico químico con decantación y/o filtración lenta. En todos estos casos estos consumos de energía eléctrica son generalmente inferiores a los consumos del bombeo de agua regenerada y/o inapreciable.

Sin embargo, no es el caso si existen tecnologías de membranas y especialmente OI ya que las instalaciones de baja presión, usualmente utilizadas, no constan de recuperadores de energía a la diferencia de las plantas de desalación de agua de mar.

Estos consumos energéticos son, a título orientativo (Trapote, 2007), los siguientes:

- Micro Filtración o Ultra Filtración de agua de salida de tratamiento secundario: 0,35-0,50 kWh/m<sup>3</sup>.
- Micro Filtración de licor mixto de tratamiento secundario con membrana sumergida (BRM): 1,0 kWh/m<sup>3</sup>.
- Ultra Filtración de licor mixto de tratamiento secundario con membrana tubular (BRM): 4,0 kWh/m<sup>3</sup>.
- Osmosis Inversa de agua microfiltrada o ultrafiltrada: 1,0 kWh/m<sup>3</sup> (para un agua origen de 4.000 microS/cm).
- Electro Diálisis Reversible agua de salida de tratamiento secundario filtrada: 1,0 kWh/m<sup>3</sup> (para un agua origen de 4.000 microS/cm).
- Osmosis Inversa de agua microfiltrada o ultrafiltrada: 1,2 kWh/m<sup>3</sup> (para un agua origen de 15.000 microS/cm).



- Radiación UV para dosis de 70-80 mJ/cm<sup>2</sup> en un agua de 60% de transmitancia: 0,1 kWh/m<sup>3</sup>.

Para más ejemplos de costes del agua regenerada en plantas de la provincia de Alicante consultar: ``Desalación y Reutilización de Aguas en la Provincia de Alicante`` de Daniel Prats Rico y Joaquín Melgarejo Moreno, 2006.

En resumen, el coste del agua reutilizada incluye: (a) el tratamiento extra necesario para alcanzar, como mínimo, los requisitos de calidad exigidos por las leyes de cada país para proteger la seguridad y salud de las comunidades afectadas, así como medio ambiente y (b) el transporte del efluente hasta el punto en que vaya a ser reutilizado. El beneficio de la reutilización incluye: (a) el ahorro por la no utilización de agua dulce (incluyendo aquí las necesidades de bombeo y transporte de la misma para su utilización), y (b) el coste de formas alternativas seguras de eliminación del efluente (incluyendo el tratamiento de los fangos) cuando la reutilización no se practica.

# PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO

Desde el punto de vista de la ingeniería, un proyecto de regeneración y reutilización de aguas residuales ideal es aquel que contempla integrar las necesidades del tratamiento de agua residual así como las del suministro de agua (Seguí, 2004). Para lo cual, es necesario planificar la regeneración de aguas residuales y su reutilización en los siguientes aspectos:

- Evaluar las necesidades del tratamiento de aguas residuales y su disposición.
- Conocer el suministro de agua y la evaluación de la demanda.
- Desarrollar un análisis minucioso de mercado del agua regenerada.
- Elaborar un análisis técnico y económico de las alternativas.
- Desarrollar un plan de implantación, apoyado en un análisis financiero.

Inicialmente para realizar la planificación a un nivel conceptual, es preciso visualizar el grado de regeneración al que se desea llegar ya que los costes que conllevan los diversos procesos de depuración y regeneración de las aguas residuales están fuertemente condicionados por el origen de las mismas y por el uso al que se va a destinar el agua regenerada. Su procedencia determina la clase y el nivel de los agentes contaminantes que se deben eliminar y ello influye en la elección del tipo de tratamiento que se ha de aplicar.

También el destino del agua regenerada condiciona la selección de los procesos que se van a emplear, ya que estos deben ser capaces de producir un efluente que pueda cumplir los requisitos de calidad que exija el uso al que se va a dedicar.

La planificación de un proyecto de reutilización de agua consta básicamente de las siguientes etapas:

1. Realizar un estudio de mercado que permita definir la posible demanda de agua residual y las condiciones a cumplir para satisfacer dicho mercado.
2. Evaluar las instalaciones existentes de abastecimiento de agua y de tratamiento de agua residual, con objeto de establecer alternativas preliminares para atender a una parte o al total de dicho mercado, satisfaciendo sus exigencias técnicas y de calidad del agua.
3. Identificar las instalaciones requeridas por las alternativas técnicas que no impliquen la reutilización de agua, tales como plantas de tratamiento con un vertido del efluente en cursos naturales de agua o de embalses de agua de abastecimiento, a fin de disponer de puntos de referencia con los que poder comparar las opciones de regeneración y de reutilización de agua residual.
4. Realizar una primera selección de las alternativas de regeneración de agua, a fin de establecer sus exigencias técnicas, económicas, financieras, de venta del agua regenerada y de cualquier otro tipo, tales como las relativas a la protección sanitaria.

Expondremos a continuación un protocolo de actuación general en el cual resumiremos las acciones que se deberían tomar para poner en marcha un proyecto de regeneración de aguas para riego

con la construcción de un tratamiento terciario. Los procedimientos detallados a continuación son orientativos.

## 7 PROTOCOLO DE ACTUACIÓN

Primeramente necesitamos saber las características de la zona de estudio: geografía, geología, climatología, situación de los acuíferos y las aguas superficiales, usos de la tierra, crecimiento poblacional, etc. Así como también las necesidades de suministro de agua: déficit de agua, tipos de cultivo, usos del agua en la agricultura, necesidades futuras, costes actuales y previsiones futuras del agua de riego, si existe disponibilidad estacional y precios del agua al agricultor.

A continuación analizaremos las mejores alternativas de reutilización del agua, identificando: la disponibilidad de aguas residuales depuradas, los cultivos o usos recreativos a los que se podría destinar el agua regenerada, los clientes potenciales, la estacionalidad y horas de uso del agua regenerada, etc.

Una vez vista la mejor alternativa en la que usar el agua regenerada, se hace un estudio preliminar sobre la viabilidad técnica, económica y social que tendrá el proyecto en la zona elegida, así como los posibles impactos ambientales, incluso la alternativa de no aplicar un tratamiento de regeneración y no seguir con el proyecto.

Se analiza la planta depuradora donde queremos instalar nuestro tratamiento terciario y y las zonas donde se usarán las aguas regeneradas, mirando: la distancia de distribución, tipos de cultivo, posible contacto del agua regenerada con la población, cantidad de agua requerida y si existe estacionalidad.

Una vez existe una necesidad de reutilizar el agua y se conoce influente a regenerar y el tipo de riego para el cual se va a usar el efluente regenerado se realiza un análisis del agua depurada con el objeto de saber cual es la opción más idónea de tratamiento terciario.

### 7.1 ANÁLISIS DE AGUA

El objetivo general de este análisis es saber la idoneidad del efluente secundario para ser reutilizado en riego con o sin restricciones y saber los parámetros físico-químicos, químicos y microbiológicos que tiene el agua depurada para adaptarlos posteriormente a la norma.

Primero se procederá con el muestreo y la obtención de muestras en la depuradora y se analizará posteriormente en el laboratorio.

La caracterización del agua residual depurada se realizará a partir de 7 campañas de muestreo efectuadas durante cada uno de los siete días de la semana. Las muestras obtenidas con periodicidad horaria se mezclaron para obtener una muestra compuesta diaria, cuya preparación tendrá en cuenta la evolución del caudal diario. Las muestras se recogerán con un muestreador automático portátil.

Las muestras compuestas son recogidas en frascos de vidrio o de polietileno, dependiendo de los parámetros que se vayan a determinar, y serán transportadas en neveras portátiles hasta el laboratorio, donde se conservaron a 4°C hasta la realización de los ensayos, dentro de los períodos máximos de conservación recomendados (APHA/WWA- WPCF, 1992).

Las muestras compuestas serán analizadas con respecto a los parámetros de calidad que mayor importancia tienen para el riego: pH, conductividad, alcalinidad, amoníaco, nitratos, nitritos, ortofosfatos, DQO, boro, cloruros, sulfatos, sodio, calcio, magnesio, potasio, tasa de adsorción de sodio (TAS), aluminio, arsénico, cadmio, cromo, cobre, hierro, plomo, manganeso, mercurio, níquel, selenio, zinc y molibdeno. Así mismo, se analizarán las concentraciones de los indicadores fecales convencionales (coliformes totales, fecales y estreptococos fecales) y de los virus (colifagos somáticos). Los métodos analíticos que se emplean para la realización de los análisis físico-químicos y microbiológicos que se presentan son los descritos en APHA-AWWA-WPCF (1992).

### 7.1.1 CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL. ADAPTAR LA CALIDAD AL USO Y A LA NORMA

Una vez caracterizado el efluente secundario debemos adaptarlo a nuestras necesidades, estas son:

- Al **uso del agua regenerada** previsto: riego de parques, campos de golf, riego de cultivos, riego de pastos para ganado, riego de cultivos industriales, etc.
- A la **norma**, ajustando nuestros parámetros por debajo del valor máximo admisible: calidad 1.2, 2.1, 2.2, 2.3 o 4.1 del proyecto de R.D. de 22 de mayo de 2006.

Tendremos primero que ajustar nuestra calidad de agua depurada a la calidad del R.D. de 22 de mayo de 2006, la información se encuentra resumida en el punto 4 de este trabajo.

Y también al uso ya que según el cultivo tiene unas cualidades que pueden ser más resistentes a unos parámetros o más sensibles a otros (por ejemplo la salinidad o el pH).

Sabiendo estas limitaciones y características como clima, lluvias y tipos de suelo ya podemos saber a que calidad de nuestra agua regenerada queremos llegar.

## 7.2 PERFIL DEL CAUDAL DISPONIBLE

Es necesario conocer el caudal de entrada a nuestro sistema de regeneración, así como nuestro caudal de uso de esa agua regenerada, ya que dependiendo de eso se elegirá un tipo de tratamiento terciario u otro.

Para evitar que la utilización de un agua inadecuadamente regenerada pueda provocar un riesgo ambiental y sanitario inaceptable, las normas de regeneración suelen exigir la instalación de lagunas de almacenamiento (lagunas de retención, donde desviar el efluente inadecuadamente tratado para su tratamiento posterior, o de un sistema alternativo de vertido).

Habrá que estudiar los perfiles de caudal tanto del influente (agua depurada) como del efluente (agua regenerada). Suele haber picos de caudal, por lo tanto, a veces es necesario y recomendable tener un depósito tampón o depósito regulador que nos permita hacer frente al consumo de caudal durante el día por parte de los consumidores potenciales (cooperativas, campos de golf, etc).

En los puntos donde el consumo sea mínimo el agua regenerada se va almacenando en el depósito, en cambio en los picos de consumo se distribuye más de lo que se almacena, así conseguimos una distribución eficiente del agua regenerada.

Y a veces es necesario y recomendable tener un depósito tampón o depósito regulador que nos permita hacer frente a los picos de caudal durante el día en la planta depuradora que recoja el agua de los consumidores y la depure, suministrando esa agua depurada a nuestro tratamiento terciario.

### 7.3 ELECCIÓN DEL TIPO DE TRATAMIENTO TERCIARIO O MEJORA DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO

Existen tecnologías que permiten alcanzar el nivel de calidad de agua adecuado al uso del que se trate; obviamente a medida que los requisitos de calidad del agua son más exigentes, el proceso de tratamiento se hace más complejo. Así mismo, es importante tener presente que cualquier proceso de regeneración requiere considerar también la línea de los subproductos obtenidos. Gracias a los avances tecnológicos, se dispone actualmente de un amplio espectro de sistemas de tratamiento que permiten obtener calidades adecuadas para cualquier tipo de reutilización.

Uno de los puntos a analizar antes de realizar un proyecto de tratamiento terciario es evaluar la fiabilidad de las instalaciones de tratamiento secundario que produce las aguas motivo del posterior tratamiento. Esta evaluación ha de permitir valorar la necesidad de dotar a estas instalaciones de tratamiento terciario de las seguridades oportunas. El éxito del tratamiento terciario depende del funcionamiento del tratamiento secundario previo (Trapote, 2007).

Una exigencia característica de los proyectos de regeneración de agua es la necesidad de asegurar una fiabilidad notable del proceso de tratamiento y una gestión adecuada del sistema de reutilización del agua que se adecue a la calidad que hemos decidido adoptar.

El tratamiento terciario constituye principalmente el punto de afino de la fase de regeneración, pero sin una buena calidad del efluente secundario no se puede conseguir la eficiencia que nosotros habíamos previsto.

Si el estudio preliminar de viabilidad anterior pone de manifiesto que la regeneración y la reutilización de agua residual son factibles y deseables, es posible continuar con la fase posterior de planificación detallada del proyecto en la que se desarrollen las alternativas detalladas de las instalaciones, llegando así a establecer la propuesta final de las instalaciones que deberán construirse.

Debemos elegir el tipo de tratamiento en base a los análisis realizados que haremos a las aguas depuradas, ya que nos indicará el tipo de terciario que más se ajusta (por ejemplo instalaremos OI si las aguas son muy salinas o eliminaremos nitrógeno si las aguas regeneradas se van a verter en invierno).

No se descarta una mejora del tratamiento secundario ya que para determinados cultivos no restrictivos no es necesario un tratamiento terciario complementario.

También haremos pruebas para evaluar las cantidades y el tipo de sustancias químicas que intervendrán en el proceso.

Por ejemplo, la elección del coagulante más adecuado para el proceso de regeneración se realizará mediante ensayos de floculación (*jar tests*) en los que se registrará la evolución de los siguientes parámetros de calidad: turbiedad, conductividad, pH, transmitancia y efecto producido por el polielectrolito. Los ensayos de laboratorio de “jar tests” se han mostrado como herramientas útiles para la obtención de las concentraciones previas de los reactivos que posteriormente se optimizarán en planta (López-Ramírez et al, 2004).

Se deberá tener cuidado en la elección, ya que por ejemplo, si tuvieramos un sistema con desinfección de UV, la absorción de la luz por el catión  $Fe^{+3}$  hará que las concentraciones residuales de coagulantes férricos puedan causar una disminución de la transmitancia del agua.

En la elección del proceso de desinfección se debe tener en cuenta igualmente la calidad del agua regenerada. Cuando los niveles de calidad sanitaria adoptados sean altos, como los requeridos para el riego de productos de consumo crudo, y el agua clarificada tenga una transmitancia inferior al 30% no se recomienda el uso exclusivo de equipos de luz UV. Unos niveles de transmitancia tan bajos hacen recomendable la adopción de un sistema combinado de desinfección (luz UV + cloro) que asegure la eficacia global del proceso a la vez que proporcione un ahorro de espacio (López *et al*, 2000). La elección del equipo de luz UV debe basarse en la determinación previa de la transmitancia del agua a desinfectar, siendo recomendable disponer de una transmitancia mínima próxima a 50-60%.

Otro factor a tener en cuenta es que en la época estival el problema por el aumento del caudal y la carga contaminante dificulta de manera significativa producir un efluente secundario con la calidad necesaria para el tratamiento terciario. A este respecto, es preciso replantear el funcionamiento durante la época estival del sistema de tratamiento biológico. Una posible solución sería recurrir a la adición de coagulantes y floculantes que coadyuven a mantener una buena calidad del efluente, con el fin de lograr el buen funcionamiento del sistema de regeneración.

Respecto a la línea de fangos, las EDAR's podrían deshidratar los fangos mediante una centrífuga para posteriormente trasladarlos hasta una planta de compostaje, donde pueden ser tratados biológicamente con la finalidad de producir compost que será utilizado por agricultores de la zona.

Como orientación (Trapote, 2007), se proponen seguidamente unas líneas de tratamiento que combinan diferentes operaciones unitarias, en función del tamaño de la planta:

- Pequeñas plantas (menos de 2.000 m<sup>3</sup>/día):
  - Laminación de caudal.
  - Infiltración/Percolación.
  - Desinfección con UV y/o cloro.
  - Almacenamiento previo a distribución.
- Medianas y grandes plantas (más de 2.000 m<sup>3</sup>/día):
  - Laminación de caudal.
  - Coagulación-floculación.
  - Decantación.
  - Filtración lenta.
  - Desinfección con UV y/o cloro.
  - Almacenamiento previo a distribución.
- Para desalación:
  - Laminación de caudal.
  - Coagulación-floculación.
  - Decantación.
  - Filtración lenta.
  - Microfiltración o ultrafiltración.
  - Nanofiltración, Electrodialisis Reversible u Ósmosis Inversa.
  - Desinfección cloro.
  - Almacenamiento previo a distribución.

En caso de plantas de tratamiento terciario de pequeño tamaño (menos de 2.000 m<sup>3</sup>/día aprox.) los tratamientos extensivos y especialmente la infiltración percolación son los más adecuados. El

problema de esta tecnología viene del espacio que ocupa, ya que sólo permite tratar entre 0.3 y 0.8 m<sup>3</sup>/día. También se ha de mencionar el riesgo que plantea este tipo de instalaciones en el futuro, ya que no existen de momento datos históricos del comportamiento de estos filtros a suficiente largo plazo como para predecir el momento de sustitución o de rehabilitación del medio filtrante. Las ventajas de esta tecnología proceden de la ausencia de utilización de reactivos químicos y por tanto de la ausencia de formación de productos indeseables como aquellos procedentes de la combinación del cloro con materia orgánica etc. También el coste de operación es mínimo.

En caso de plantas de tratamiento terciario de tamaño ya relevante (más de 2.000 m<sup>3</sup>/d aprox.), se imponen los tratamientos intensivos de tipo físico- químico de coagulación, floculación y decantación y/o filtración. Lo mejores resultados de calidad obtenidos son utilizando PAC como coagulante (10-20 ppm), polielectrolito aniónico como floculante, decantación lamelar y finalmente filtración sobre filtros de arena de limpieza continua para un afino y una seguridad. Cabe reseñar que los rendimientos de filtros de arena cerrados que funcionan a velocidades más rápidas son inferiores a filtros lentos especialmente en este tipo de aplicación. Con respecto a la desinfección, en este tipo de instalación de tamaño relativamente grande, el cloro o derivados combinado con una desinfección final con radiación UV permite obtener una calidad de desinfección suficiente para la gran mayoría de las aplicaciones posteriores. Asimismo, se está incrementando la aplicación de tecnologías de membranas (BRM) combinando el tratamiento secundario de una EDAR convencional con un tratamiento avanzado de desinfección.

En el caso de desear obtener un agua de alta calidad reduciendo su contenido en sales, sólo se pueden utilizar los tratamientos de membranas prestando especial atención a los pretratamientos a aplicar. La selección de esta tecnología de membrana ha de tener en cuenta la tipología y concentración de sales a eliminar del agua a tratar. Se utiliza mayoritariamente la QI como tecnología dedesalación por su adaptabilidad a todo tipo de aguas a tratar y la calidad del resultado obtenido.

Finalmente diremos que, en general, no se puede predecir con exactitud como se van a comportar en la realidad cada una de las operaciones unitarias que se han descrito anteriormente, el funcionamiento futuro depende en gran parte de la calidad del agua a la salida del tratamiento secundario. En este sentido, hay que tener presente que el mejor tratamiento terciario es un buen tratamiento secundario.

## 7.4 VIABILIDAD ECONÓMICA

Estudios de viabilidad económica, social y medioambiental. Desde el punto de vista económico es necesaria la selección de tratamientos de regeneración adecuados y de los sistemas de transporte y regulación del agua tratada para evaluar el coste-beneficio asociado. Socialmente es precisa la aceptación de la reutilización mediante la participación de los agentes implicados y la adopción de instrumentos eficaces para eliminar o reducir a límites aceptables los posibles riesgos sanitarios.

El análisis financiero da respuesta a la posibilidad de implantar un SRRAR y puede ser determinante para la viabilidad económica del proyecto. Los costes de inversión en este tipo de proyectos oscilan entre el 45% y el 75% del coste total (Asano, 1998), lo que en muchos casos puede ser la limitante para el desarrollo del proyecto. Obtener las cantidades de dinero que cubran la inversión inicial de los SRRAR puede conducir a un coste de intereses que ponga en riesgo la viabilidad económica del proyecto y por ende su ejecución.

Los SRRAR han sido tradicionalmente financiados por el estado, sin embargo, en la actualidad existen muchos esquemas de financiamiento donde se busca la participación pública y privada para el desarrollo de estos proyectos.

Aunque los factores técnicos, ambientales y sociales son aspectos importantes en la planificación de un proyecto de reutilización de agua, los aspectos económicos suelen ser determinantes a la hora de decidir la puesta en práctica de un proyecto. Los análisis presupuestarios pueden dividirse en dos grandes grupos: análisis económicos y análisis financieros. Aunque ambos términos pueden parecer similares, la distinción entre ambos tipos de análisis tiene una importancia crítica. El objetivo de un análisis económico es establecer las bases sobre las que justificar la viabilidad de un proyecto en términos económicos. Una vez determinada la conveniencia económica de un proyecto, el análisis financiero permite establecer su viabilidad económica.

El patrocinador de un proyecto de regeneración y de reutilización de agua no es el único agente de interés en un análisis financiero. Los futuros usuarios del agua regenerada constituyen así mismo interlocutores de gran importancia. El usuario confía normalmente que el coste del agua regenerada sea inferior al que habría de pagar por un agua proveniente de fuentes de abastecimiento convencionales. Además, un usuario de agua regenerada habrá de sufragar los costes de las modificaciones necesarias para adecuar sus conducciones, o instalar una doble red de distribución, a fin de poder utilizar el agua residual regenerada.

Teniendo en cuenta que la venta de agua residual regenerada puede reducir los beneficios de la venta de agua de abastecimiento, será necesario evaluar los efectos que el proyecto propuesto pueda tener sobre los proveedores de agua de abastecimiento y sobre los precios del agua proveniente de fuentes convencionales. Puede ocurrir que parte de los beneficios de la venta de agua residual regenerada deban destinarse a sufragar las pérdidas de beneficios de los proveedores de agua. Por otra parte, si la disponibilidad de agua regenerada evita el desarrollo y la construcción de nuevas fuentes de abastecimiento de agua mucho más costosas, parecería lógico destinar una parte de los beneficios y de los ahorros conseguidos por los proveedores de agua de abastecimiento a sufragar los costes de los proyectos de regeneración de agua residual.

Los costes asociados a la reutilización de agua regenerada, así como el coste de los diferentes elementos que constituyen el tratamiento terciario han sido mencionados anteriormente, en los puntos 3 y 6.

Por su parte, el Anexo II del proyecto de R.D. de 22 de mayo de 2006 contiene el modelo normalizado de solicitud que deben presentar quienes deseen obtener la concesión o autorización de reutilización de aguas depuradas. Para obtener la autorización complementaria a la de vertido será preciso presentar la solicitud prevista en el Anexo II con la información exigida en el artículo 6.2.1º y, en su caso, 6.2.2º.

## 7.5 CONTROL DEL PROCESO DE REGENERACIÓN. FIABILIDAD DE LOS PROCESOS.

Una vez que el sistema de tratamiento y reutilización del agua residual se ha construido y está en operación, es necesario también tener en cuenta un código de buenas prácticas para evitar cualquier posible problema relacionado con el uso de esta agua. Primeramente, se deberá tener en cuenta que el agua residual recuperada sólo debe ser reutilizada para usos permitidos por la legislación vigente en cada caso, según su calidad. Cuando la calidad del agua recuperada no alcanza los parámetros fijados



por la legislación, la reutilización debe cesar. Es necesario, por este hecho, proceder a una continua monitorización y control de la calidad del agua que está siendo reutilizada.

La fiabilidad de los procesos de tratamiento pasa a constituir un elemento esencial de la concepción y explotación del sistema de reutilización con prioridad sobre rendimiento y eficacia de los propios procesos, que han de satisfacer los límites de calidad establecidos para el efluente. Entre las exigencias relativas a la fiabilidad del proceso de regeneración cabe destacar la instalación de controles continuos de determinados parámetros, la instalación de alarmas y automatismos, la disponibilidad de piezas de recambio, la duplicidad de equipos y procesos, la existencia de equipos de entrada en funcionamiento automático en caso de avería, la existencia de volúmenes de reserva de reactivos, especialmente de desinfectante y la instalación de equipos autogeneradores o la duplicidad de suministros de energía eléctrica.

El grado de automatización de las plantas de regeneración de agua existentes es muy variado, pero exige en todos los casos un buen seguimiento del proceso de tratamiento biológico (mediante muestreos integrados diarios, como mínimo), un control continuo de la turbiedad del efluente secundario y del efluente filtrado (que suele situarse por debajo de 1 UNT) y de la concentración de desinfectante al término del proceso de desinfección, y un análisis diario de coliformes, sobre muestra integrada obtenida a la salida del proceso de desinfección.

En general, las plantas de regeneración de agua a partir de efluentes municipales y destinadas a usos municipales (riego agrícola y de jardinería) e incluso industrial (refrigeración) suelen ser explotadas por los propios municipios, bien directamente o bien a través de una empresa de servicios. Estas plantas de regeneración guardan un gran parecido con las plantas potabilizadoras de agua, en cuanto que todo el personal está mentalizado sobre la necesidad de producir un agua de calidad satisfactoria y de aplicar medidas correctoras urgentes ante cualquier alteración del proceso para evitar que un agua de insuficiente calidad pueda salir de la planta de regeneración. Generalmente, los municipios son los encargados de la distribución y gestión del agua regenerada que pasa así a constituir un nuevo servicio público de calidad. La coordinación y comunicación con los usuarios, tanto individuales como colectivos (urbanizaciones, campos de golf), es muy directa y cordial, a fin de detectar cualquier posible incidente y de disipar cualquier duda que pueda surgir.

La evaluación del rendimiento de cada etapa del proceso de regeneración y de los dos procesos de desinfección se realizará mediante un seguimiento sistemático de la planta. Los puntos de muestreo son: 1) la captación de agua residual depurada, 2) el efluente del decantador, 3) el efluente del filtro y 4) el efluente del reactor del desinfectante. Las muestras se recogen una vez por semana, una vez alcanzado un régimen permanente de funcionamiento, y en ellas se analizarán como mínimo los siguientes parámetros: pH, turbiedad, transmitancia, conductividad, cloro residual, DQO, MES, amoníaco, ortofosfatos, CT, CF, EF y SO.

También se deberá realizar en cada caso: un estudio de la eficacia y duración de los filtros de seguridad de 5 micras, estudios de la intensidad del equipo de rayos ultravioletas en la cámara de reacción y del grado de desinfección, estudio del funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa mediante el seguimiento de los parámetros que puedan indicar los posibles daños sufridos por las membranas trabajando (caudales, conversión, pérdida de carga, rechazo de sales...).

Para cumplir el proyecto de R.D. de 22 de mayo de 2006 se debe cumplir el programa de autocontrol de la calidad del agua regenerada que incluya los informes sobre el cumplimiento de la calidad exigida que se determinará conforme establece el Anexo I.B y I.C de dicho decreto, las frecuencias mínimas de muestreo se encuentran reflejadas en el Anexo I.B.

Tambien es recomendable realizar análisis al agua de riego para verificar y controlar problemas, el agua debe de ser controlada a corto, medio, largo plazo para asegurarnos la validez de dicha agua para fines de regadío.

Normalmente una muestra de 1 Litro suele ser suficiente y se deben utilizar botes de plastico es preferible a botes de cristal para evitar la intrusión de boro en las muestras.