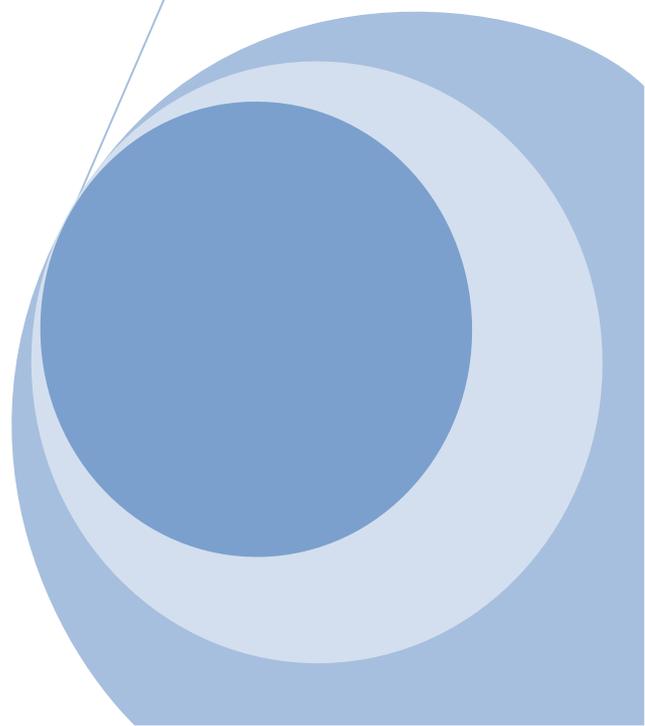
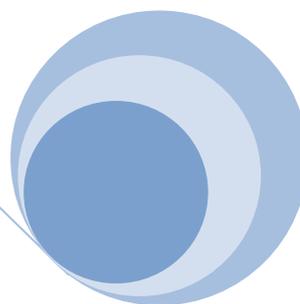
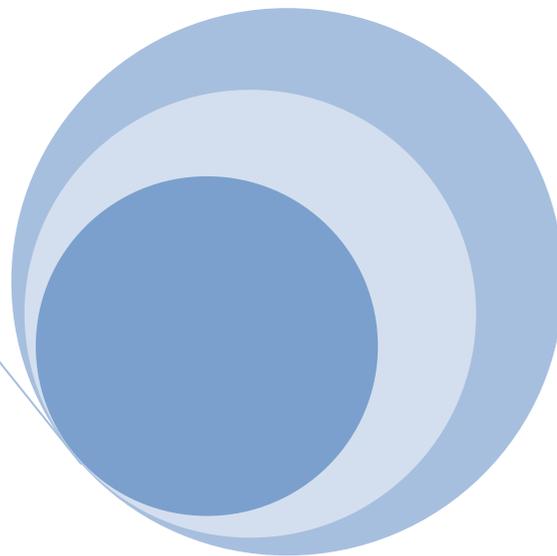


**REVISIÓN  
BIBLIOGRÁFICA**



## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

#### **2.1.1. Antecedentes**

La reutilización para riego de aguas residuales es un hecho desde tiempos inmemoriales, ya sea de manera directa o bien de una manera indirecta, previa dilución de dichas aguas en los cursos naturales de los ríos. Desde hace décadas existen referencias de la reutilización planificada de dichas aguas, una vez que superan procesos de depuración hasta obtener aguas con unas características químicas, físicas y biológicas adecuadas para su empleo en diversos usos. Es destacable desde hace años el volumen de reutilización los aprovechamientos alcanzados en zonas áridas y/o superpobladas de Estados Unidos como la Baja California y Florida (Mujeriego, 2006).

En España los antecedentes de uso de aguas regeneradas son mas recientes. No obstante, hay diferentes ejemplos con años de experiencia, de reutilización con éxito en el riego de cultivos, como son el caso de la Costa Brava y de Álava.

En Andalucía, desde hace una década, la comunidad de regantes “Las Cuatro Vegas” se ha encargado de la regeneración de las aguas procedentes de la estación depuradora de “El Bobar”, la cuál trata la mayor parte de las aguas residuales de Almería capital y su periferia.

Todos estos proyectos tienen un denominador común, se encuentran ubicados en zonas con déficit hídrico y no han estado exentos de polémica en su desarrollo, el cuál se ha producido durante años sin un adecuado marco legal y sin un verdadero impulso desde las autoridades políticas.

La situación ha cambiado recientemente, ya que por un lado ha sido publicado el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (Real Decreto 1620/2007, BOE 294 de 7 de Diciembre) y por otro lado, se han alcanzado niveles de déficit hídrico permanentes o estacionales tan críticos que han obligado a las diferentes administraciones competentes a considerar la reutilización de las aguas residuales regeneradas como un componente más del ciclo del agua.

#### **2.1.2. Actualidad**

Actualmente, existe en el mundo una superficie invernada superior a las 450.000 ha, de las cuales un 30% se encuentra en la cuenca mediterránea (Cobos y López, 1998). En Europa, la mayor superficie de invernaderos se concentra en los países mediterráneos, con una superficie de 130.000 ha aproximadamente.

En España, la superficie de invernaderos ha aumentado mucho en los últimos años, cifrándose en 71679 hectáreas en el año 2008 (MARM, 2009), lo que supone el 0,25% de la superficie total cultivada en España y el 1,9% de la superficie de regadío, pero el valor económico de las producciones obtenidas en ellas contribuye con un 16,12% a la Producción Final Agraria (PFA) española (MARM, 2009). La mayor concentración de esta superficie se encuentra en el sureste peninsular, donde destacan Andalucía con el 75,23% de la superficie y Murcia con el 7,9%.

En Almería, donde la agricultura intensiva bajo invernadero es el motor de desarrollo de la provincia, existe una superficie de invernaderos de 25.983 ha (Sanjuán, 2007), lo que supone aproximadamente el 36% de la superficie de invernaderos de España, constituyendo con un 26% de la Producción Hortofrutícola andaluza con casi 1850 millones de euros (Anuario de la Agricultura almeriense, 2010).

Los datos de invernaderos comerciales de Almería indican que la eficiencia en el uso de agua, considerada como la relación entre el rendimiento de fruto obtenido por litro de agua empleado para producirlo, es de 21 a 23 g l<sup>-1</sup> (Caja Rural de Almería, 1997; Carreño et al., 2000), frente a 1 g l<sup>-1</sup> de agua empleada en los regadíos de maíz en zonas áridas de España (Naredo et al., 1993).

Pero a pesar de esta alta eficiencia en el uso del agua, el principal problema existente en Almería, es el déficit hídrico estructural (Confederación Hidrográfica del Sur y Moptma, 1995) que está dificultando la expansión e incluso el sostenimiento de la producción hortícola bajo invernadero. Este déficit hídrico tiene su origen en el clima árido, con precipitaciones escasas y variabilidad espacial y temporal.

En Almería, los recursos hídricos disponibles ascienden aproximadamente a 926 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> mientras que las demandas se cifran en 1251 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, lo que supone un déficit de 325 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> (Plan Hidrológico de la Cuenca Sur, 1999). En el Campo de Dalías, principal zona productora de cultivos hortícolas intensivos de la provincia, el déficit existente es de 115 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> (Confederación Hidrográfica del Sur y Moptma, 1995). El Campo de Níjar, también presenta un importante déficit hídrico cifrado en 75 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, presentando además unos recursos hídricos muy bajos (9 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>) y de peor calidad.

Los recursos hídricos en la provincia de Almería se distribuyen en un 80% de origen subterráneo y un 20% que proviene de aguas superficiales (Plan de Regadíos de Andalucía, 1996).

El régimen torrencial de las precipitaciones conlleva que los recursos hídricos superficiales sean bastante irregulares y difícilmente aprovechables en su totalidad. La mayor parte de estos recursos proceden del embalse de Beninar (23 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>). Un recurso potencial está en el aprovechamiento del agua de lluvia que cae sobre la cubierta de los invernaderos, y que podría suponer en el Campo de Dalías unos 38 hm<sup>3</sup> (Reca et al., 1999).

La sobreexplotación de los recursos subterráneos ha provocado problemas de salinización (Domínguez et al., 2001), por lo que, la demanda creciente de agua por parte de la agricultura, la industria y la población empuja a buscar recursos alternativos.

Una posible fuente de recursos hídricos son los transvases de agua desde cuencas excedentarias, actualmente se cuenta con  $15 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$  del transvase Tajo-Segura. Está previsto el transvase de  $50 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$  del Negratín al Almanzora (ACUSUR, 1998).

Otra alternativa para la generación de recursos hídricos es la desalación de agua del mar. Por motivos económicos, esta alternativa se suele plantear para el abastecimiento urbano. En Almería, se ha construido una desaladora para abastecimiento urbano con una producción prevista de unos  $20 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ . La utilización de aguas desaladas directamente en la agricultura representa un elevado coste, aunque para el caso particular de los invernaderos podría asumirse debido a la alta productividad obtenida (Ferraro et al., 1999). También, está prevista la construcción en Carboneras de una planta desaladora con una producción de  $40 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$  aproximadamente, y que abastecerá al campo de Níjar.

Aunque quizás la fuente de recursos a tener más en cuenta sea la reutilización de aguas residuales urbanas. En Almería, en el año 1991, el volumen generado de aguas residuales se situaba en torno a  $37 \text{ hm}^3$ , de los cuales  $14,2 \text{ hm}^3$  (el 38%) recibía algún tipo de tratamiento. Hoy día, estas cifras han aumentado hasta cerca del 62%. De las actuaciones en funcionamiento se encuentra la reutilización de aguas residuales depuradas generada por la Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.) de la ciudad de Almería. La E.D.A.R. tiene una producción de  $15 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$  de agua depurada, que tras ser sometida a un tratamiento de ozonización, posteriormente es usada en los regadíos del Bajo Andarax (Pérez y Valverdú, 1997). Recientemente, la Junta de Andalucía aprobó el Plan Subregional de Ordenación del Territorio del Poniente de Almería (2002-2015), que contempla la construcción de dos desaladoras, con una capacidad de  $17 \text{ hm}^3$  de agua, y la puesta en marcha de 9 depuradoras, cuatro de las cuáles permitirán la reutilización para riego de  $12 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$  de aguas residuales urbanas.

En la búsqueda de nuevas fuentes de recursos hídricos que ayuden a solucionar las limitaciones de agua para el desarrollo agrícola (Iqbal, 1987; Oron y Demalach, 1987; Godet y Brissaud, 1991), como se ha dicho anteriormente las aguas residuales depuradas pueden ser muy importantes para complementar las necesidades de agua en algunos casos y, en otros, un factor determinante al no existir otro tipo de agua. Frente a la escasez de agua, el crecimiento de la disponibilidad de agua residual tanto urbana como de instalaciones agropecuarias e industriales, hace que tras su depuración pueda llegar a tener un uso agrícola.

El agua residual depurada aplicada con sistemas de riego adecuados debe ser el agua de futuro para las tierras con infradotación de riego, optimizando los recursos en aquellas condiciones que así lo permitan (Griñan, 1997). En algunos casos el agua residual depurada es de mejor calidad que el agua de la zona presentando una total adecuación para su uso en riego (Segura et al., 2000).

Además, la necesidad de depuración del agua residual impuesta por la Directiva Comunitaria 91/271 aprobada en 1994, que obliga al tratamiento de las aguas residuales antes de su vertido, va a hacer que se disponga de este recurso en numerosas localizaciones. La reutilización de aguas residuales exige la adopción de medidas de protección de la salud pública, para ello se dispone de normas tanto nacionales como

internacionales que permiten el uso seguro de aguas residuales tratadas (Real Decreto 1620/2007, BOE 294 de 7 de Diciembre; O.M.S., 1989; U.S. EPA, 1992;).

La transposición de las normas comunitarias a nuestro país se recoge en el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración, aprobado en 1995, en el que se establecen las bases jurídicas y económicas que regulan el tratamiento de aguas residuales urbanas, lo que ha supuesto un fuerte impulso en la construcción y mejora de estaciones depuradoras y ha relanzado el interés por la reutilización de las aguas residuales depuradas.

## **2.2. COMPOSICIÓN, DEPURACIÓN Y REUTILIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL**

### **2.2.1. Composición de las aguas residuales**

Las aguas que llegan a las estaciones depuradoras de aguas residuales suelen ser efluentes líquidos que se recogen en la red de alcantarillado de una ciudad, mezcla de distintas aguas residuales (Seoánez, 1995) cuyo origen puede ser: doméstico, urbano e industrial.

Las concentraciones de los componentes de esta agua son muy diversas, siendo los intervalos normalmente encontrados los que vienen dados en la Tabla 1, datos obtenidos a partir de Asano et al. (1990) y Loehr et al. (1979).

COMPONENTE	CONCENTRACIONES <sup>(1)</sup>		
	Alta	Media	Baja
PH <sup>(2)</sup>	8,0	7,5	6,5
Materia sólida (mg/L)	1200	720	350
En suspensión	350	220	100
Disuelta	850	500	250
DBO <sub>5</sub> a 20°C (mg/L)	400	220	110
DQO (mg/L)	1000	500	250
C orgánico (mg/L)	290	160	80
N total (mg/L)	85	40	20
Orgánico	35	15	80
Inorgánico	50	25	12
P total (mg/L)	15	8	40
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros (mg/L)	100	50	30
CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	200	100	50
Coliformes totales <sup>(3)</sup> (ufc*/100mL)	100·10 <sup>6</sup>	30·10 <sup>6</sup>	1·10 <sup>6</sup>
Virus (ufp*/100mL)		3,6	
Metales pesados <sup>(4)</sup> (mg/L)			
Cadmio			0,007-0,019
Cromo			0,008-0,090
Cobre			0,120-0,210
Plomo			0,075-0,120
Níquel			0,014-0,090
Zinc			0,200-0,250

<sup>(1)</sup> Metcalf y Eddy (1979). <sup>(2)</sup> Batelle Memorial Instittu, Final Report (1974). <sup>(3)</sup> Metcalf y Eddy (1972). <sup>(4)</sup> Davis y Jackson (1975).

\* Abreviaturas: ufc=unidades formadoras de colonias; ufp=unidades formadoras de placas.

**Tabla 1: Composición media del agua residual bruta.**

Para controlar la calidad de estas aguas los parámetros utilizados son: materia en suspensión (MES), demanda bioquímica y química de oxígeno (DBO<sub>5</sub> y DQO<sub>5</sub>) que indican la cantidad de oxígeno disuelto consumida por un agua residual durante la oxidación biológica o química, respectivamente, medida a los cinco días, y los microorganismos patógenos de origen fecal. Desde el punto de vista del riego, resultan interesantes los elementos nutritivos como el nitrógeno, fósforo y potasio, así como los que pueden afectar a los procesos de filtración del suelo alterando sus condiciones estructurales (sodio, calcio, etc.). También hay que valorar los micronutrientes, como el hierro y boro así como la presencia de metales pesados con efectos tóxicos, aunque éstos se retienen fundamentalmente en los lodos o biosólidos.

## 2.2.2. Sistemas de depuración de las aguas residuales

Los diferentes sistemas usados en el tratamiento de las aguas residuales, se pueden clasificar según los criterios siguientes (Ulloa, 1996):

- Según el medio de eliminación de los contaminantes.

Los contaminantes del agua residual se pueden eliminar por medios físicos, químicos y biológicos. Normalmente un sistema de tratamiento (o fase del proceso) es una combinación de los mismos. A efectos de clasificación se considera el efecto predominante.

a-) Procesos físicos. Se puede incluir: desbaste de sólidos, desengrasado, desarenado, sedimentación, flotación, evaporación, desinfección y absorción.

b-) Procesos químicos. Entre estos podemos incluir: floculación y coagulación, neutralización, oxidación, reducción, intercambio iónico, absorción y desinfección (cloro, ozono).

c-) Procesos biológicos. Entre ellos citamos: fangos activos, lechos bacterianos, lechos de turba, lagunaje, biodiscos y sistemas de aplicación al suelo.

- Según la fase de depuración.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales podemos clasificarlos en función de los rendimientos alcanzados en el proceso de depuración o según la fase de depuración en la que se sitúan. Esta clasificación es quizás la más utilizada, aunque como en el caso anterior, no siempre es posible encuadrar un tratamiento dentro de una fase concreta, o la fase de depuración se adopta por extensión para denominar el proceso completo.

a -) Pretratamiento y tratamiento primario. Puede incluir: desbaste de sólidos, desarenador, desengrasador, decantación primaria y lagunaje anaerobio.

b -) Tratamiento secundario. Pueden citarse los siguientes: fangos activos, lagunaje facultativo, lagunas aireadas, lechos de turba y biodiscos.

c -) Tratamiento terciario. Se incluyen: procesos de nitrificación-desnitrificación, procesos de eliminación de fósforos, biodiscos y lechos bacterianos, lagunaje de maduración, lagunas de macrofitas, filtros verdes y sistemas de aplicación al suelo en general, filtros y ultrafiltración, ozonización y radiación ultravioleta.

### **2.2.3. Métodos convencionales de depuración de aguas residuales**

Se incluyen aquí los métodos tradicionales de depuración cuya base de funcionamiento son también los procesos naturales de depuración pero bajo una concepción distinta: son sistemas intensivos, tienen bajos requerimientos de espacio pero precisan aporte de energía para el proceso y necesitan de control preciso. Son procesos de poca inercia, por lo que cualquier problema se manifiesta de forma inmediata en los resultados. En éste grupo pueden citarse: procesos físico-químicos y

fangos activos incluyendo el tratamiento convencional de fangos (Pérez y Valverdú, 1997).

- **PRETRATAMIENTO**

La finalidad que tiene es retirar los sólidos de cierto tamaño y peso que se pueden encontrar en las agua. Este tratamiento es necesario no sólo desde el punto de vista de la contaminación sino también porque posibilita el correcto funcionamiento de la depuradora, ya que evita taponamientos y daños que podrían comprometer gravemente su funcionamiento (Hernández, 1990).

El agua residual como hemos dicho anteriormente tiene elementos que pueden causar daños en la estación, encontrándose entre estos elementos las arenas, que actúan como elementos abrasivos de las distintas estructuras de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.). La eliminación de estas arenas se consigue reduciendo la velocidad del agua hasta conseguir que estas partículas sedimenten, sin que lo hagan los sólidos orgánicos, esto se consigue mediante desarenadores. Las arenas depositadas así en el fondo son extraídas mediante sistemas de bombas que las depositan en un contenedor.

La separación de los sólidos más gruesos se realiza mediante rejillas con distintas separaciones, a través de las cuales, se hace pasar el agua. Estas rejillas se limpian periódicamente, retirando los objetos retenidos en ellas.

En el pretratamiento también se retiran los aceites y las grasas ya que estos compuestos se sitúan en la superficie del agua formando una película que impide su oxigenación, a la vez que se adhieren a las distintas estructuras de la E.D.A.R.. Por lo que su retirada se hace en los desarenadores, donde se retira la capa superior resultante por la flotación de las grasas mediante una rasqueta, que las desplaza hacia un extremo de donde pasan a un contenedor. La flotabilidad, favorecida por la baja velocidad del agua, se consigue además mediante la inyección de aire desde el fondo de la estructura.

- **TRATAMIENTO PRIMARIO**

Es un tratamiento físico que persigue conseguir la retirada de aquellos sólidos que han pasado a través de los sistemas de pretratamiento pero que, por su tamaño, pueden separarse por gravedad. Consiste en disminuir la velocidad del agua hasta conseguir que sedimenten. Esto se realiza en los llamados decantadores primarios, en cuyo fondo se depositan los sólidos que son barridos de forma radial, concentrándose en el centro del decantador de donde son extraídos, constituyendo los primeros lodos obtenidos en la E.D.A.R. (lodos primarios). El agua decantada se recoge y pasa al siguiente tratamiento.

Con el tratamiento primario se consigue la eliminación de un 25-50% de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y de un 50-70% de los sólidos en suspensión (Van Note et al., 1975; Asano et al., 1990), incluyendo parte del nitrógeno, fósforo y de los elementos pesados contenidos.

- TRATAMIENTO SECUNDARIO

El agua que sale del tratamiento primario sigue conteniendo aquellos sólidos en suspensión que por su pequeño tamaño o baja densidad no han sedimentado en los tratamientos anteriores, y materia disuelta. Su eliminación se realiza mediante medios biológicos, ya que el eliminarlos por medios físico-químicos resultaría complicado y sería muy costoso. Los tratamientos biológicos simulan a los procesos naturales de descomposición de residuos y depuración de aguas. Son procesos en los que se mantiene una población estable de microorganismos capaces de nutrirse de la materia orgánica presente en el agua, transformándola en CO<sub>2</sub> y otros compuestos estables que son separados posteriormente del agua por decantación (Hernández, 1990).

Esta digestión biológica puede llevarse a cabo en condiciones aerobias o anaerobias, según sea la naturaleza de los microorganismos implicados en el proceso, y en diversos sistemas: lagunas naturales o aireadas (Seoánez, 1995), lechos bacterianos, sistemas de fangos activados, etc. La elección de un sistema u otro viene dada por el caudal de agua a tratar, o lo que es lo mismo, número de habitantes de la población y superficie requerida (Díaz, 1988).

El sistema que más se utiliza para poblaciones relativamente numerosas es el de fangos activados, en él el agua pasa a unas balsas llamadas reactores biológicos o cubas de aireación, donde las bacterias deben encontrarse en un medio óptimo para su desarrollo. Para ello se les suministra oxígeno a través de unos difusores que están en el fondo de las cubas para conseguir que se produzca la asimilación de los nutrientes. En definitiva, a la materia disuelta en el agua se le incorpora organismos vivos que se agrupan en flóculos fácilmente eliminables por decantación. Su acumulación en el fondo de las cubas se evita mediante agitación, realizada por el aire procedente de los difusores. El agua que sale de estos reactores biológicos contiene estos sólidos en suspensión y pasa a unos decantadores secundarios, de mayores dimensiones que los primarios ya que los lodos a extraer presentan una menor densidad y se necesita un mayor tiempo de residencia para lograr su sedimentación. Este sistema elimina un 75-90% de la DBO y sólidos en suspensión, del agua de entrada al mismo (Van Note et al., 1975; Hernández, 1990). El agua ya libre de sólidos es recogida en la parte superior del decantador.

- TRATAMIENTO TERCIARIO Y DESINFECCIÓN

Los tratamientos terciarios están diseñados para eliminar sustancias solubles que han escapado del tratamiento secundario (Eckenfelder, 1980). Normalmente sólo se utiliza en situaciones de rigor, donde se requiere una elevada calidad del efluente de salida, ya que tienen unos costes muy altos. Algunos de los procesos que incluyen son: nitrificación-desnitrificación para la eliminación de nitrógeno, precipitación de fósforo para eliminar fósforo, osmosis inversa y destilación para eliminación de sólidos disueltos, etc.

La desinfección del efluente de una E.D.A.R. se realiza para evitar el riesgo de enfermedades producidas por la presencia de patógenos en esta agua. El cloro y sus compuestos llegan a eliminar más del 99% de la población de virus y bacterias de esta agua (Loehr et al., 1979). El ozono es igualmente efectivo, pero más costoso, si bien tiene la ventaja de que no deja efectos residuales como el cloro.

## 2.2.4. Alternativas de reutilización del agua residual depurada

En regiones con límite natural de recursos hídricos, el agua residual depurada, principalmente la urbana, se puede utilizar para la agricultura, industria y recarga de acuíferos (Bouwer, 1989; Asano y Mill, 1990; Asano et al., 1992). Además debido a la producción continua de agua residual se garantiza una mayor fiabilidad y regularidad del agua disponible, especialmente en zonas de escasos recursos hídricos, como son la costa mediterránea y los archipiélagos de Baleares y Canarias (Catalinas y Ortega, 1999).

La reutilización del agua residual se puede realizar de dos formas distintas:

1. De forma directa: El Reglamento de Dominio Público Hidráulico define la reutilización directa como la que afecta a las aguas que habiendo sido ya utilizadas por quien las derive y antes de su devolución al cauce público fueran aplicadas a otros diferentes usos sucesivos. Para Asano (1996), reutilización directa es el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas con fines beneficiosos. Requiere la existencia de tuberías para la conducción y distribución del agua depurada.

2. De forma indirecta: consiste en el vertido de efluentes residuales en un agua receptora, para su asimilación y retirada aguas abajo. Para que esta modalidad de depuración pueda ser incorporada a un proceso de reutilización controlado, dirigido a reforzar los recursos hídricos, será preciso que se hiciera una planificación adecuada de la zona territorial receptora. Normalmente la reutilización indirecta supone un solo uso o usuario y sus efluentes se recogen y son devueltos para el mismo plan de utilización.

En la Tabla 2 se muestran los principales usos que pueden tener las aguas residuales depuradas, destacando el uso para la recarga de acuíferos, lo que evitaría la salinización de los mismos al controlar la intrusión marina, y el uso para riego, ya sea riego agrícola como riego de campos de golf y de zonas verdes.

<b>Reutilización urbana</b>	Riego de parques, estadios deportivos, jardines de escuelas, áreas verdes de edificios públicos, centros comerciales, carreteras y autopistas.
	Riego de las áreas ajardinadas de las residencias unifamiliares y multifamiliares.
	Lavado de vehículos, ventanas, agua de mezcla para fertilizantes líquidos, herbicidas y pesticidas.
	Usos ornamentales: fuentes, estanques.
	Limpieza de calles.
	Protección contra el fuego.
	Agua de cisterna para urinarios públicos y en edificios comerciales e industrias.
<b>Reutilización industrial</b>	Refrigeración.
	Procesos industriales.
	Construcción.
<b>Riego agrícola</b>	
<b>Riego de campos de golf</b>	
<b>Restauración de hábitats naturales y mejora del entorno</b>	
<b>Usos recreacionales</b>	
<b>Recarga de acuíferos para el control de la intrusión marina</b>	
<b>Aumento de los recursos potables</b>	Reutilización indirecta: - Recarga de acuíferos - Descarga en embalses, ríos y lagos
	Reutilización directa

**Tabla 2: Usos del agua residual depurada (U.S. EPA, 1992).**

Lo más importante es que la reutilización de agua residual depurada para riego reduce la cantidad de agua captada desde embalses o acuíferos (Catalinas y Ortega, 1999; Reza et al., 1999; Harivandi, 2000), así como los problemas medioambientales provenientes de su vertido (Oron et al., 1999a), reduciendo el aporte de contaminantes a los cursos naturales de agua (Catalinas y Ortega, 1999).

Actualmente, aunque la reutilización del agua residual no es muy conocida en España, no sucede igual en el resto del mundo. En Israel, constituye una práctica habitual perfectamente regulada desde hace bastante tiempo (Feigin, 1975; Shelef, 1977; Feigin et al., 1991; Juanico et al., 1994), siendo el aporte del agua residual un 11% del total del agua de riego, lo que supone un aprovechamiento casi del 70% de las aguas residuales urbanas regeneradas en todo el territorio en más de 250 proyectos de riego. En la ciudad de Beer-Sheva, localizada en la zona árida del país, después de someterlas a un tratamiento secundario, se reutilizan en riego mediante sistemas de riego por goteo (Oron et al., 1982) en cultivos de algodón remolacha, alfalfa y maíz. En otros países la reutilización de este tipo de aguas es mucho mayor, llegando a ser, en épocas de sequía, del 70% y del 87% del total del agua de riego en Santiago de Chile y México respectivamente (Navarro, 1994). En Estados Unidos, el uso planificado de estas aguas ha sido ampliamente reconocido como una alternativa viable al suministro de nuevos recursos de agua (Flack, 1984; Mujeriego, 2006), siendo el principal destino

de estas aguas el riego agrícola, alternativa que dispone de una tecnología difundida y bien conocida, pero hay otras aplicaciones bastante experimentadas como son el riego de zonas verdes, campos de golf, parques, jardines, reusos industriales, incendios, etc. En Hawai, la práctica del riego por goteo usando mezclas de agua residual y agua fresca se inició en 1979 para mejorar la eficiencia y el incremento de la cosecha (Bui, 1991).

En España la reutilización de las aguas residuales ha sido practicada hasta la fecha en áreas muy limitadas. Aunque la posibilidad de su reutilización tiene un indudable futuro, teniendo en cuenta el déficit hídrico estructural de algunas zonas y los aportes resultantes del cumplimiento que nos impone la Directiva 91/271 (Consejo de 21 de mayo de 1991). El plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales, (1995-2005), evalúa en un 40,62% el porcentaje de habitantes-equivalentes servidos en España de conformidad a los dictados de la citada Directiva e incluye entre sus objetivos el obtener resultados satisfactorios en materias de reutilización de las aguas residuales en el ámbito de los planes hidrológicos. En Tenerife, donde la zona de riego la forman 750 ha con 230 explotaciones, se han realizado experiencias en campo aplicando agua residual depurada mediante riego localizado por goteo o microaspersión en más del 70% de las fincas, y el resto por aspersión (Padrón et al., 1995).

El empleo de aguas residuales depuradas para riego agrícola afecta a una serie de aspectos agronómicos, fundamentalmente al riego y al abonado, ya que contribuye al suministro de agua y aporte de fertilizantes, y materiales en suspensión aportados por el efluente depurado (Sala y Millet, 1997), también afecta a aspectos sanitarios y económicos. El efecto que puede provocar depende de las características del agua, en consonancia con el tipo de tratamiento aplicado, el cultivo y la especie, así como el método de riego y la existencia de un adecuado drenaje que permita sanear el terreno del exceso de agua aplicada mediante lavados.

Así, se pueden resumir las principales ventajas e inconvenientes de la utilización de agua residual regenerada en estos puntos:

- VENTAJAS:

- Las aguas regeneradas son una nueva fuente de agua, que permiten aumentar los abastecimientos y paliar situaciones de déficit.
- En zonas con grandes variaciones temporales en cuanto a la disponibilidad de recursos hídricos, caso de la Cuenca Mediterránea, las aguas regeneradas suponen una fuente relativamente constante.
- Las actuales exigencias legales en cuanto a calidad de las aguas depuradas hace que el coste de la regeneración se haya abaratado en los países desarrollados.
- El coste energético de las aguas regeneradas es inferior si se compara con fuentes alternativas de agua como los trasvases a larga distancia o la desalación, lo cual implica una disminución de los aportes de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Mujeriego, 2006). Así, para el agricultor, el coste del agua residual regenerada es similar al coste del agua proveniente de acuíferos.
- En el caso de que la reutilización se produzca en las cabeceras de las cuencas hidrográficas, si bien no redundará en un aumento efectivo de los recursos hídricos, sí supone un ahorro de costes de depuración cuenca abajo.
- La reutilización planificada de las aguas residuales se plantea como la mejor salida medioambiental para las mismas.

Cuando se trata de reutilizar el agua para el riego de cultivos, además de las menciones anteriores se pueden apreciar otras ventajas, como son:

- En las zonas costeras, zonas donde cobra más sentido acometer la reutilización, la variación estacional a lo largo del año de la disponibilidad de aguas residuales coincide con los momentos de máxima necesidad de los cultivos.
- Estas aguas tienen un contenido residual de elementos nutritivos para las plantas, nitratos y fosfatos principalmente, que permiten un ahorro importante en los costes de fertilización de los cultivos cuando se hace uso de ellas (Asano et al., 1984; Ayers y Wescot, 1985; Ivorra et al., 1997; Segura et al., 2000; Segura et al., 2001; Segura et al., 2006).
- En los países desarrollados el uso para riego ha pasado a ocupar el tercer lugar en las prioridades de satisfacción de demanda, detrás del suministro urbano y el uso ecológico (Perez-Parra, 2005), lo cual obliga a los usuarios de los regadíos a buscar nuevas fuentes que le garanticen los suministros en periodos de escasez.

- **INCONVENIENTES**

- La reglamentación europea de producción ecológica solo permite el empleo de agua potable para el riego de los cultivos comercializados bajo esa denominación (Reglamento CEE 2092/91). Por lo tanto el agua residual regenerada está descartada para su uso en este tipo de cultivos.
- Cuando las redes de distribución simultanean el destino agrario con otros usos se complica el empleo de aguas regeneradas.
- Cumplir los límites de calidad establecidos por el Real Decreto 1620/2007 para el riego de cultivos comestibles cuyos productos puedan entrar en contacto directo con el agua. Aquí juega un papel muy importante el diseño y el manejo que se haga de las plantas de depuración y regeneración.
- Las aguas regeneradas pueden degradar químicamente el suelo tanto por su elevada concentración salina, como por su contenido de metales pesados disueltos.
- Las aguas regeneradas pueden afectar negativamente a la comercialización de los productos agrarios.

## **2.3. CALIDAD AGRONÓMICA DE LAS AGUAS RESIDUALES**

Los parámetros de calidad agronómica que se exigen a un agua residual depurada son los mismos que los de cualquier tipo de agua (Crook, 1991). La calidad del agua residual depurada va a depender del origen del agua, tratamiento, y del diseño y manejo del sistema de distribución (Ayers y Wescot, 1985; Crook, 1991). Así pues, los aspectos a considerar en la evaluación agronómica serían: salinidad, macromutrientes, micronutrientes, metales pesados, pH, sólidos en suspensión y cloro residual.

- SALINIDAD

Una excesiva salinidad derivada de la presencia de iones Na, Ca, Mg, Cl o B, pueden producir daños a los cultivos y provocar problemas de permeabilidad en el suelo.

La forma que normalmente se utiliza para medir la concentración de sales es por medio de la conductividad eléctrica de la solución acuosa. La salinidad afecta a la estabilidad estructural del suelo dependiendo del tipo de iones que domina su complejo de cambio, si es el ión sodio el que predomina sobre el calcio se activa la dispersión de los agregados de arcilla. La relación de adsorción de sodio (SAR) es la que marca la concentración relativa del ión sodio. Por otro lado, la presión osmótica de la solución ha de ser considerada como sumando del potencial que induce el flujo de humedad hacia la raíz. Cuando su valor es alto (potenciales osmóticos bajos), la raíz encuentra dificultades para absorber agua.

Por todo esto conviene que el contenido en sales sea limitado de manera natural o artificial, por medio de lavados. Los efectos de la salinidad dependen del cultivo y de su desarrollo vegetativo. La distribución de sales es muy importante sobre todo en el periodo de nascencia del cultivo debido a la concentración en superficie con la evaporación. La fertilidad, aireación, estructura y estado de humedad del suelo tiene influencia en la reacción del cultivo a la salinidad. Además los efectos salinos son mayores cuando la radiación, temperatura y humedad lo son, ya que se acentúa el factor osmótico.

- NUTRIENTES

El aporte extra de elementos nutritivos, en concreto, nitrógeno, fósforo, potasio y ciertos microelementos, reduce las necesidades de fertilización (Asano et al., 1984; Ayers y Wescot, 1985; Ivorra et al., 1997; Segura et al., 2000; Segura et al., 2001), aunque se debe prestar especial cuidado a su aplicación excesiva.

Tanto el nitrógeno como el fósforo son componentes de las aguas residuales urbanas. La cantidad total de nitrógeno después de un tratamiento secundario varía entre 10 y 60 mg l<sup>-1</sup>. Esta variación, así como la forma química en que se presenta (nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitritos y nitratos) depende del tipo y grado de tratamiento dado. Esto es importante ya que si se somete a las aguas a tratamientos secundarios biológicos de fangos activados se obtendrá nitrógeno en forma amoniacal y orgánico, que para que sea asimilado por las plantas debe sufrir un proceso de transformación en el suelo, mientras que si se someten a tratamientos de aireación prolongada se obtendrán nitratos y nitritos que son rápidamente absorbidos por las plantas. La concentración total de fósforo en el agua tratada con tratamiento secundario oscila entre 6 y 15 mg l<sup>-1</sup>, equivalentes a 15-35 mg l<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. El fósforo, como consecuencia de percolar poco, queda retenido en el suelo aumentándose progresivamente su contenido en el mismo, disminuyéndose así la cantidad de fertilizante requerido en años sucesivos.

- MICRONUTRIENTES Y METALES PESADOS

Los microelementos y metales pesados que se encuentran en las aguas residuales depuradas están relacionadas con las actividades que se realizan en el lugar de donde proceden las aguas, es decir, depende de las industrias, de las actividades realizadas en las ciudades, de los detergentes, del lavado de las calles, de la corrosión de las tuberías, etc. En el caso de los metales pesados como el cobre y el zinc no suelen existir problemas porque quedan retenidos por los lodos (García, 1997). Mientras que el problema de los microelementos puede ser su exceso, ya que son necesarios en las plantas en pequeña cantidad.

- pH, SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN, CLORO RESIDUAL

Las aguas depuradas suelen presentar un pH adecuado para el riego de cultivos (entre 6,5 y 8,5) por lo que no presentan ningún problema, salvo por la presencia de vertidos industriales. Los sólidos en suspensión tienen que estar en una baja concentración para que el proceso de desinfección de un efluente secundario tenga la máxima eficacia bactericida (Roldán, 1997). También se pueden producir problemas de obturación de los goteros por presencia de sólidos en suspensión, junto con algas, precipitación de elementos químicos, etc. (Crook, 1991; Nakayama y Bucks, 1991; Ravina et al., 1992; Ravina et al., 1997), aunque si el agua es sometida a un tratamiento secundario, los sólidos en suspensión presentan pocos problemas. El filtrado, la cloración del agua o el limpiado de las tuberías son medidas generalmente aplicadas para prevenir la obturación de los goteros (Ravina et al., 1997). El cloro residual en concentraciones superiores a  $5 \text{ mg l}^{-1}$  de  $\text{Cl}_2$  puede producir quemaduras en las hojas cuando el agua se aplica por aspersión.

## **2.4. CALIDAD SANITARIA DEL AGUA RESIDUAL DEPURADA PARA RIEGO AGRÍCOLA**

La calidad exigida a las aguas está en función del destino que tengan esas aguas y en función de las características del suelo y las posibles infiltraciones que se puedan dar. El tratamiento que se les da a las aguas residuales para su reutilización tiene como objetivos la reducción considerable de microorganismos patógenos, ya sean de origen bacteriano, viral, de protozoos o helmintos (Shuval et al., 1986), además de otras sustancias que tengan un efecto negativo en la reutilización.

Los criterios para condicionar la reutilización según Crook (1995) son: los aspectos sanitarios, la política pública, la experiencia al respecto y los aspectos económicos. La aceptabilidad de las aguas residuales depuradas desde el punto de vista sanitario depende de la posible presencia de sustancias tóxicas y de microorganismos patógenos que las hacen potencialmente peligrosas para la salud pública.

En las aguas residuales depuradas se pueden encontrar sustancias tóxicas tanto inorgánicas como orgánicas. Dentro de las primeras se encuentran los metales pesados (O.M.S., 1989; Crook, 1991), de los cuales destacan el mercurio, que es el más peligroso, los fluoruros y los compuestos nitrogenados. Los metales pesados tienen un origen muy diverso y provienen principalmente de las industrias, y su presencia reduce

la aplicabilidad para riego de las aguas residuales por sus efectos tóxicos para los cultivos y la salud (Ayers y Wescot, 1985; Crook, 1991; Paliwal et al., 1998). Como compuestos orgánicos peligrosos, ya sea por su baja biodegradabilidad o por sus efectos cancerígenos, destacan los hidrocarburos aromáticos, plaguicidas, fenoles, etc. (O.M.S., 1989; Crook, 1991).

Los mecanismos de contaminación de los cultivos por estos componentes químicos incluyen: la contaminación física que, a través de la evaporación y el riego repetitivo, puede dar lugar a la acumulación de estos contaminantes en las plantas, la asimilación por medio de las raíces de los contaminantes presentes en el agua y en el suelo y la asimilación a través de las hojas.

Apenas hay información sobre la significación sanitaria de los compuestos orgánicos que pueden estar en el agua residual depurada que se usa para riego agrícola. No obstante, al considerar únicamente la reutilización de aguas residuales de origen municipal, no cabe esperar contenidos apreciables ni de metales pesados ni de otros contaminantes químicos.

Por tanto, el mayor problema que presenta la aplicación generalizada de agua residual depurada para riego de cultivos agrícolas es la presencia de diversos organismos patógenos, que aún después de los procesos de tratamiento del agua residual sobreviven con el consiguiente riesgo para la salud pública.

En la Tabla 3 se muestra algunos de los agentes infecciosos que pueden estar presentes en las aguas residuales urbanas no tratadas, así como las enfermedades que provocan.

Dada la diversidad de agentes infecciosos que pueden estar presentes en las aguas residuales urbanas no tratadas, se ha generalizado un método rápido para conocer la calidad sanitaria del agua basado en el recuento de coliformes totales y fecales por cada 100 ml de agua, aunque también se puede recurrir a cuantificar la presencia de clostridios sulfito reductores y de enterococos fecales.

ORGANISMO PATÓGENO	ENFERMEDAD	
Protozoos	<i>Entameoba histolytica</i>	Amebiasis (disentería amèbica)
	<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis
	<i>Cryptosporidium</i>	Criptosporidiosis, diarrea fiebre
Helmintos	<i>Ascaris lumbricoides</i> (nematodo)	Ascariasis
	<i>Trichuris trichura</i> (nematodo)	Tricuriasis
	<i>Taenia</i> spp. (cestodo)	Teniasis
Bacterias	<i>Shigella</i> (4 spp.)	Shigelosis (disentería bacilar)
	<i>Salmonella typhi</i>	Fiebres tifoideas
	<i>Salmonella</i> (1700 serotipos)	Salmonelosis
	<i>Vidrio cholera</i>	Cólera
	<i>Escherichia coli</i> (enteripatogénica)	Gastroenteritis
Virus	Enretovirus (72 tipos) (polio, echo)	Gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis
	Virus de la hepatitis A	Hepatitis infecciosas
	Adenovirus (47 tipos)	Infecciones oculares y respiratorias

**Tabla 3: Muestra de agentes infecciosos presentes en aguas residuales no tratadas (adaptado de U.S. EPA, 1992).**

Los tratamientos exigidos para conseguir un agua sin restricciones sanitarias son los terciarios. Los diferentes tipos existentes se aplican según la calidad final exigida acorde al fin a que se destina el agua. En general, se suele aplicar una secuencia de diversos tratamientos hasta conseguir la calidad sanitaria adecuada.

Un tratamiento primario elimina organismos de mayor peso y tamaño, así como huevos de parásitos, aunque es poco efectivo con las bacterias y virus. Un tratamiento secundario de carácter biológico, aunque más efectivo que el primario, no llega a eliminar por completo los microorganismos existentes (hasta un 90% de coliformes). En esta etapa, el proceso de fangos activados es más eficaz que el de los filtros percoladores. El tratamiento terciario implica, en primer lugar, los siguientes procesos: coagulación química, decantación y filtración, para a continuación concluir con la desinfección (donde normalmente se usa cloro, aunque en los últimos tiempos se ha prestado también atención al ozono). El almacenaje del agua antes de su uso también reduce la concentración de bacterias y virus.

En la Tabla 4 se puede observar el porcentaje en el que se reducen los sólidos en suspensión (SS), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y la presencia de coliformes en el agua después de someterla a algunos de los tratamientos utilizados en la depuración de las aguas residuales.

TRATAMIENTO	% REDUCCIÓN		
	DBO <sub>5</sub>	SS	Coliformes
Sólo cloración	15-30	-	90-95
Tratamiento previo	15-30	15-30	10-25
Decantación primaria	25-40	50-70	25-75
	35	65	25-35
Efluente primario + cloración	-	-	99
Fangos activos (convencional)	85-95	85-92	90-98
	75-90		90
Efluente secundario + cloración	-	-	98-99

Tabla 4: Intervalos de reducción de DBO<sub>5</sub>, SS y Coliformes después de varios procesos de depuración (Castillo et al., 1994).

Mientras que en la Tabla 5 se muestra el intervalo de concentración de algunas especies bacterianas, tanto en el agua bruta como después de someterse a un tratamiento primario y secundario de depuración.

ORGANISMO (nº/100 ml)	Agua residual urbana bruta	Tratamiento primario	Tratamiento secundario
<i>Escherichia coli</i>	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup> 0.5-1.6·10 <sup>8</sup> 10 <sup>4</sup> -10 <sup>9</sup> 4·10 <sup>6</sup>	0.3-0.6·(10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup> )	5.4-170·10 <sup>3</sup>
<i>Salmonella sp.</i>	125 en verano 9 en invierno 400-1200 400-8000	56 en verano 4 en invierno	0.22 en verano 0.1 en invierno
<i>Clostridium sp.</i>	73000 50000 29600	46000	27000
<i>Micobacterium sp.</i>	20-100		

Tabla 5: Concentración de organismos patógenos presentes en el agua residual urbana bruta y después de un tratamiento primario y secundario de depuración (Castillo et al., 1994).

En Andalucía se ha editado un texto sobre criterios de evaluación sanitaria de los proyectos de reutilización directa de aguas residuales urbanas en el que se recoge un catálogo de aplicaciones de reutilización admitidas sanitariamente, junto al nivel de calidad recomendado (Tabla 6).

APLICACIONES DE REUSO	Estándar de calidad (Consideraciones particulares)	Tratamiento orientativo
<b>Agrícola y forestal</b>	-Riego de vegetales de consumo en crudo.  -Riego de cultivos industriales, madereros y forrajeros, cereales, árboles frutales y, cultivos para conservas o cocinados.	Nematodos < 1/1 CF (Coliformes Fecales)/100 ml < 1000  Nematodos < 1/1  -Estanques de estabilización o tratamiento equivalente.  -Retención en estanques de estabilización o tratamientos equivalentes.
<b>Municipal</b>	-Riego de campos deportivos y de zonas verdes con acceso público.  -Riego de zonas verdes con acceso público prohibido.	Nematodos < 1/1 CF/100 ml < 200  -----  -Retención en estanques de estabilización o tratamientos equivalentes.  -Primario
<b>Industrial</b>	Refrigeración	En circuitos semicerrados CF/100 ml < 1000  En circuitos abiertos CF/100 ml < 10000  Secundario
<b>Acuicultura</b>	-Producción de biomasa destinada al consumo humano.  -Producción de biomasa no destinada al consumo humano.	CF/100 ml < 1000  -----  -Estanques de estabilización.  -Pretratamiento.
<b>Turístico y recreativo</b>	-Riego de campos deportivos y zonas verdes con acceso público.  -Riego de zonas verdes con acceso público prohibido.  -Lagos artificiales con posible contacto público.  -Lagos artificiales con contacto público prohibido.	Nematodos < 1/1 CF/100 ml < 200  -----  Nematodos < 1/1 CF/100 ml < 2000  -----  -Retención en estanques de estabilización o tratamientos equivalentes.  -Primario.  -Estanques de estabilización.  -Pretratamiento.

**Tabla 6: Relación de aplicaciones de reutilización directa de aguas residuales urbanas depuradas con indicación de los estándares de calidad mínimos, consideraciones particulares y tipos de tratamientos orientativos (Castillo et al., 1994).**

Con el fin de minimizar los riesgos para la salud se han desarrollado diversas directrices de calidad microbiológica (Real Decreto 1620/2007, BOE 294 de 7 de Diciembre; O.M.S., 1989; U.S. EPA, 1992), y en la Tabla 7 se muestra un resumen de estas directrices. Mientras que la O.M.S. enfatiza en el uso de balsas de estabilización para producir una calidad microbiológica aceptable, California requiere tratamientos

biológicos convencionales, filtración y desinfección por cloro. Parece necesario que el agua utilizada para regar alimentos de consumo en fresco y parques de uso público no restringido sea sometida a esta última secuencia de tratamientos.

	Aplicación del agua residual	Nematodos intestinales (huevos/litro)	Coliformes fecales (OMS) (ufc/100 ml)	Tratamiento requerido
O.M.S.	Riego de cultivos para consumo en fresco, campos deportivos y parques públicos	$\leq 1$	$\leq 1000$	Balsas de estabilización
España	Riego de cultivos para consumo en fresco	$< 1$	$< 1000$	Estanques de estabilización o tratamiento equivalente
California	Riego por superficie y aspersión de cultivos, alimentación y de parques	--	$\leq 2,2$	Tratamiento secundario + filtración + desinfección

**Tabla 7: Resumen de las directrices de calidad microbiológica de las aguas recomendada por la O.M.S., por el Estado de California, USA y por el Real Decreto de España.**

Tenemos como punto de preocupación la frecuencia de muestreo, ya que la tasa de reproducción de los microorganismos presentes en el agua es muy alta en condiciones óptimas, y ningún método de depuración puede eliminarlos totalmente. El Real Decreto 1620/2007, BOE 294 de 7 de Diciembre establece cada cuánto tiempo deben realizarse estos muestreos, así como las excepciones o modificaciones en la frecuencia de análisis del agua residual regenerada. En la Tabla 8 se muestran las frecuencias de muestreo, dependiendo de los diferentes usos a los que vaya destinada.

USO	CALIDAD AGUA	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SOLIDOS SUSPENSIÓN	TURBIDEZ
USO URBANO	1. Residencial (Riego de jardines privados, descarga de aparatos sanitarios) y 2. Servicios (Riego de zonas verdes urbanas, baldeo de calles, sistemas contra incendios, lavado industrial de vehículos).	Quincenal	2 veces semana	Semanal	2 veces semana
USO AGRARIO	1. 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.	Quincenal	Semanal	Semanal	Semanal
	2. Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que permite el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, con un tratamiento industrial posterior; Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne; Acuicultura.	Quincenal	Semanal	Semanal	--
	3. Riego localizado de cultivos leñosos y riego de invernaderos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana; Riego de cultivos de flores ornamentales y viveros; Riego de cultivos industriales no alimentarios.	Quincenal	Semanal	Semanal	--
USO INDUSTRIAL	1. Aguas de proceso y limpieza.	--	Semanal	Semanal	Semanal
	2. Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.	Semanal	3 veces semana	Diaria	Diaria
USO RECREATIVO	1. Riego de campos de golf.	Quincenal	2 veces semana	Semanal	2 veces semana
	2. Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua.	--	Semanal	Semanal	--
USO AMBIENTAL	1. Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.	--	2 veces semana	Semanal	--
	2. Recarga de acuíferos por inyección directa.	Semanal	3 veces semana	Diaria	Diaria
	3. Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público; Silvicultura.	--	--	Semanal	--

El control deberá realizarse a la salida de la planta de regeneración, y en todos los puntos de entrega al usuario.

La frecuencia de análisis se modificará en los siguientes supuestos:

- i. Tras 1 año de control se podrá presentar una solicitud motivada para reducir la frecuencia de análisis hasta un 50%, para aquellos parámetros que no sea probable su presencia en las aguas.
- ii. Si el número de muestras con concentración inferior al VMA del Anexo I.A es inferior al 90% de las muestras durante controles de un trimestre (o fracción, en caso de periodos de explotación inferiores), se duplicará la frecuencia de muestreo para el periodo siguiente.
- iii. Si el resultado de un control supera al menos en uno de los parámetros los rangos de desviación máxima establecidos en el

Anexo I.C, la frecuencia de control del parámetro que supere los rangos de desviación se duplicará durante el resto de este periodo y el siguiente.

**Tabla 8: Frecuencia mínima de muestreos en aguas residuales regeneradas para diferentes usos, así como posibles modificaciones de ésta (Real Decreto 1620/2007, BOE 294 de 7 de Diciembre).**

Pero lo que realmente suscita preocupación es la posible persistencia de estos patógenos en el suelo con cierto potencial de infección tanto del operario como del consumidor final (Shuval et al., 1985; Pescod, 1992; Rose et al., 1996).

Entre los organismos patógenos que pueden sobrevivir a los procesos de depuración podemos mencionar las bacterias (*Escherichia coli*, *Salmonella* sp., *Shigella* sp., etc.), los protozoos, los helmintos y los virus. El suelo es un medio hostil para la supervivencia de estos organismos siendo el bajo contenido en humedad del suelo (Kibbey et al., 1978), las altas temperaturas (Reddy et al., 1981), las condiciones de

aridez y alcalinidad extremas (Ellis y McCalla, 1976), la luz solar (Tannock y Smith, 1971; Gerba et al., 1975;) y la microbiota antagonista adaptada a las condiciones existentes (Gerba et al., 1975) factores que limitan enormemente la persistencia de los organismos patógenos.

El sistema de riego localizado reduce drásticamente el riesgo de contagio tanto del trabajador como por consumo de productos cosechados, haciendo prácticamente nula la posibilidad de movimiento de estos patógenos a través de suelo. No obstante, en aquellos cultivos en los que la parte cosechable se mantiene en contacto directo con el suelo, la posibilidad de contaminación de la misma hace que no se pueda aún hablar de éxito en los resultados obtenidos. Con un sistema de riego localizado y suelos con baja tasa de infiltración el agua residual depurada puede permanecer en la superficie del suelo y entrar en contacto con hojas y frutos (Oron et al., 1999a). No obstante, la exposición directa a la radiación solar, así como las altas temperaturas aumentan la mortalidad de los organismos patógenos. Sin embargo, el riesgo para la salud persiste (Oron et al., 1999a). Pero una posible solución a este hecho pueden ser los sistemas de riego localizado enterrados, ya que el punto de emisión del agua se encuentra a unos centímetros bajo la superficie y, en el recorrido de aquella hasta la misma, el suelo puede ejercer cierta acción depuradora, limitando aún más la posibilidad de supervivencia de estos organismos. Además, la superficie del suelo permanece seca minimizando aún más los riesgos de contaminación (Oron et al., 1999a).

En distintas zonas del mundo se han llevado experiencias con el fin de evaluar el empleo de aguas residuales depuradas con sistema de riego enterrado (Oron et al., 1991; Shrive et al., 1994; Gushiken, 1995). Phene y Ruskin (1995) desarrollaron un manual de recomendaciones para el uso de aguas residuales depuradas con sistema de riego localizado enterrado. Ruskin (1992) comentó los problemas y las posibles soluciones derivadas de la aplicación de agua residual depurada con sistema de riego enterrado.

Cuando se emplean sistemas de riego localizado y sobre todo los sistemas enterrados los criterios microbiológicos pueden ser menos estrictos, ya que el suelo actúa como un filtro biológico complementario y no existe contacto directo entre el agua residual y los trabajadores o cultivo (Oron et al., 1999a). En experiencias llevadas a cabo en Israel con sistema de riego localizado superficial y enterrado, se ha puesto de manifiesto que es posible limitar la contaminación microbiológica de los frutos cuando la cosecha se retrasa después del último riego (Oron et al., 1999a).

## **2.5. INFLUENCIA DEL USO DE AGUA RESIDUAL DEPURADA EN LOS SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO**

El principal problema que presentan los sistemas de riego por goteo es la obturación de los goteros. Algunos de los parámetros que dan lugar a esta obturación son: la baja velocidad de circulación del agua a través de los goteros que pueden dar lugar a precipitados, junto con la calidad del agua y mantenimiento de los sistemas de riego, además de la formación de películas biológicas provocadas por bacterias y por otros microorganismos.

## 2.5.1. Causas de las obturaciones

Según Gilbert y Ford (1986) las causas más comunes de obturación de los goteros son la precipitación de sales, el crecimiento microbiano, hospedaje de insectos, intrusión de raíces y establecimiento de sedimentos en los goteros.

Así, estos factores se pueden estudiar para cada uno de tres apartados:

- Calidad del agua residual depurada.
- Tipo de emisor y tratamientos del agua: filtración y desinfección.

### 2.5.1.1. *Calidad del agua residual depurada*

Según la calidad de las aguas residuales depuradas pueden causar obturaciones de tipo físico, biológico y químico (Havelly et al., 1973; Golberg et al., 1976; Malaval, 1981; Vermeiren et al., 1983; Abbott, 1985).

#### 1.-) Obturación física.

Se debe a la sedimentación de materiales en suspensión y partículas muy finas que atraviesan los filtros y se depositan después en las conducciones y pasos de los goteros formando agregados de mayor tamaño. El grado de obturación física va a depender en gran medida del tipo de gotero empleado, en este sentido Malaval (1981) realizó algunos ensayos con distintos tipos de goteros. Para evitar este tipo de obturaciones es aconsejable utilizar filtros de arena.

#### 2.-) Obturación biológica.

Se deben fundamentalmente a la actividad bacteriana y a la producción de algas. Ford (1977) encontró tres tipos de limos bacterianos: sulfurosos, de hierro y no específico con limos filamentosos y no filamentosos aerobios. Para evitar este tipo de obturaciones adiciones de cloro y ácidos parecen ser efectivas sobre todo si se realizan conjuntamente y no por separado. La cloración y un buen filtrado resuelven este tipo de obturaciones (Hills et al., 1990; Massoud et al., 1994; Ravina et al., 1995).

#### 3.-) Obturación química.

Los precipitados que se han identificado como causantes de la obturación química son el carbonato cálcico, óxido de hierro y óxido de manganeso (Suárez, 1997a).

El incremento de la concentración de sales debido a la evaporación del agua suele ser el motivo de la obturación a la salida del conducto de disipación de la energía en el gotero. Las obturaciones al inicio del conducto son de tipo físico, ya que se suelen deben al taponamiento por incrustaciones desprendidas de la pared de la tubería, las que se producen en la zona intermedia se deben a obturaciones sobre las paredes del mismo (Rodrigo et al., 1992).

Los óxidos de hierro suelen causar problemas cuando se trata de aguas ácidas que transportan hierro disuelto en forma ferrosa (Fe II) y que al oxidarse pasa a forma férrica (Fe III), precipitando y formando depósitos de color marrón en goteros y filtros. Se recomienda para eliminarlo una aplicación continua de cloro pasando también a través de un filtro medio de arena (English, 1985).

El carbonato cálcico es el principal causante de las obturaciones químicas. Los puntos críticos son aquellos en los que el agua permanece en reposo durante los periodos entre riegos y las salidas al exterior donde, debido a la evaporación del agua, aumenta la concentración de sales. Según Suárez (1997a) altas temperaturas en combinación con la pérdida de CO<sub>2</sub> favorecen la precipitación del calcio. El sistema de riego por goteo subterráneo al mantener la temperatura más baja y uniforme, minimizando la pérdida de CO<sub>2</sub> en los puntos de goteo, parece que reduce este problema. Para solucionar el problema de las obturaciones químicas Meyer (1985) recomienda la acidificación a pH bajos hasta que el agua acidificada salga por los goteros y lavar repitiendo el proceso tantas veces como sea necesario. Nakayama et al. (1981) recomiendan usar ácido sulfúrico y cloro para tratar las obturaciones químicas y biológicas. Zhixu et al. (1997) recomendaron la utilización de ácidos orgánicos en lugar de los ácidos fuertes utilizados normalmente para la eliminación de los carbonatos de calcio.

#### **2.5.1.2. Tipo de emisor y tratamientos del agua**

Hoy día se comercializan gran cantidad de modelos de emisores de riego localizado, con diferentes características, y que pueden clasificarse según diferentes parámetros:

a) Según inserción del gotero en el ramal:

- **Integrados:** Son aquellos que se instalan en el interior de la tubería durante el proceso de fabricación. Existen dos modelos principales: En el modelo 1 el gotero es cilíndrico y está embutido por las paredes de la tubería. En el modelo 2 el emisor es de menor tamaño y forma rectangular y se pega interiormente a la tubería. La Fotografía 1 muestra dos goteros integrados, con diámetros de paso de 12 y 16 mm.



**Fotografía 1: Goteros integrados.**

**→ Ventajas:**

- Tubería portagoteros completamente lisa por su cara exterior, por lo que es más manejable.
- Desaparece la posibilidad de robo del emisor.
- Los ramales con este tipo de emisor se adaptan mejor al paso de la maquinaria.

**→ Inconvenientes:**

- No pueden desmontarse los emisores para ser lavados.
- No se pueden sustituir los emisores dañados.

- **Interlínea:** Son aquellos que se instalan entre dos secciones del ramal tras realizar un corte en el mismo. La Fotografía 2 muestra dos goteros interlínea, con diámetros de paso de 12 y 16 mm.



**Fotografía 2: Goteros interlínea.**

**→ Ventajas:**

- Es posible desmontarlo para una limpieza o sustitución.
- Es posible cambiar la ubicación y elegir la distancia entre los emisores.
- No sobresalen de la tubería, por lo que se facilita el manejo del ramal.

**→ Inconvenientes:**

- Frecuente desacople del ramal y el emisor, sobre todo cuando se trabaja con altas presiones en zonas de altas oscilaciones térmicas.

- **Pinchados:** Son aquellos que se instalan sobre la pared del ramal, mediante un orificio practicado con un sacabocados. La Fotografía 3 muestra dos goteros pinchados.



**Fotografía 3: Goteros pinchados.**

→ Ventajas:

- Posibilidad de desmontarlo para una posible limpieza o sustitución.
- Se puede cambiar la ubicación y elegir la distancia entre emisores.
- Algunos modelos permiten el acople de microtubos en la salida, lo que facilita el riego en cultivos sin suelo.

→ Inconvenientes:

- Sobresalen del ramal, por lo que complican la posibilidad de enrollar la tubería y se daña la inserción de unión del gotero con el ramal.
- Su facilidad de extraerlos hace que sea posible las pérdidas por robos.
- Si hay fallos en la instalación suelen producirse fugas.
- El gotero se puede desprender en situaciones de sobrepresión.

b) Según compensación de caudal:

- **Turbulentos:** Son aquellos cuyo caudal de salida está bastante influido por la presión del agua a la entrada de los mismos. Se consideran de este tipo los emisores cuyo exponente de descarga es superior a 0.2. La Fotografía 4 muestra dos goteros integrados turbulentos.



**Fotografía 4: Goteros integrados turbulentos.**

→ Ventajas:

- Menor coste.
- Suelen presentar una mayor vida útil.

→ Inconvenientes:

- No se adaptan bien a terrenos de morfología regular.
- No permiten grandes longitudes de tuberías portagoteros y portarramales.

- **Autocompensantes:** Son aquellos que, dentro de los límites de presión especificados por el fabricante, mantiene un caudal prácticamente constante. Se consideran autocompensantes los emisores en los que el exponente de descarga es inferior a 0.2.

Normalmente estos emisores realizan la compensación del caudal gracias a una membrana de silicona que oprime la salida al aumentar la presión del agua en el

interior de los mismos. La Fotografía 5 muestra un gotero integrado autocompensante, además de su membrana de silicona.



**Fotografía 5: Gotero integrado autocompensante.**

→ Ventajas:

- Se adaptan a terrenos de morfología irregular, en los cuales se producen oscilaciones de presión a lo largo del ramal.
- Permiten mayores longitudes de los ramales y tuberías portarramales.

→ Inconvenientes:

- Mayor coste.
- Como consecuencia de la degradación del material de la membrana, la vida útil del gotero suele ser menor.

c) Según tipo de recorrido del agua en su interior:

- **Microtubos:** Consisten en un tubo de plástico de pequeño diámetro por el interior del cual circula el agua. El régimen es prácticamente laminar, por lo que la influencia de la presión en el caudal de salida es muy notable. Modificando su longitud se puede modificar el caudal. La Fotografía 6 muestra un gotero pinchado microtubo.



**Fotografía 6: Gotero pinchado microtubo.**

→ Ventajas:

- Coste muy bajo.

→ Inconvenientes:

- Son muy sensibles a la temperatura, produciendo variaciones de caudal importantes debido a las dilataciones y contracciones del microtubo.
- Debido a su régimen prácticamente laminar, el nivel de compensación de caudal de este emisor es mínimo.

- **Helicoidales:** El agua experimenta en su interior un recorrido helicoidal. El exponente de descarga suele estar comprendido entre 0.65 y 0.75, lo que implica una menor sensibilidad que el microtubo a la presión y temperatura. La Fotografía 7 muestra un gotero pinchado helicoidal.



**Fotografía 7: Gotero pinchado helicoidal.**

- Ventajas:
  - Coste muy bajo.
- Inconvenientes:
  - El nivel de compensación del emisor es muy bajo, por lo que no es posible usarlo para pendientes pronunciadas o gran longitud del ramal.
- **Laberínticos:** el agua experimenta un recorrido largo en y muy tortuoso en su interior, lo que hace que el régimen hidráulico sea turbulento y el exponente de descarga oscile alrededor de 0.5. La mayoría de los goteros interlínea e integrados utilizados, hoy en día, son laberínticos. La Fotografía 8 muestra un gotero integrado plano laberíntico.



**Fotografía 8: Gotero integrado plano laberíntico.**

- Ventajas:
  - Son menos sensibles a las variaciones de temperatura.
  - No son autocompensantes pero, debido a su régimen turbulento, se adaptan a longitudes de ramal relativamente largas y a pequeñas pendientes del terreno.
  - Coste bajo.

**→ Inconvenientes:**

- Debido a la tortuosidad y longitud del laberinto se pueden presentar obturaciones, especialmente en aquellos goteros que presenten un menor diámetro mínimo de paso.
- **Vortex:** En estos el agua después de atravesar un orificio estrecho entra tangencialmente en una cámara circular donde se produce un flujo vortical. Su exponente de descarga se aproxima a 0,4, lo que denota un cierto carácter compensante. La Fotografía 9 muestra un gotero pinchado vortex.



**Fotografía 9: Gotero pinchado vortex.**

**→ Ventajas:**

- Coste bajo
- Buena compensación del caudal, aunque sin llegar a ser autocompensante.

**→ Inconvenientes:**

- Bastante sensibles a obturaciones.

d) Otras características de los emisores:

- **Desmontables:** Son aquellos que permiten un desacople rápido para facilitar labores de limpieza. Normalmente son interlinea, aunque también los hay pinchados. La Fotografía 10 muestra un gotero pinchado desmontable.



**Fotografía 10: Gotero pinchado desmontable.**

**→ Ventajas:**

- Posibilidad de limpieza de posibles obturaciones internas.

**→ Inconvenientes:**

- Posibilidad de desacoplamiento del emisor por sobrepresiones.

- Posibilidad de daños en la zona de montaje durante los procesos de limpieza, que dejaría el gotero inservible.
- **Antidrenantes:** Son aquellos que dejan de trabajar por debajo de un valor de presión en la entrada. Con estos emisores cuando se produce una parada en el funcionamiento de la instalación, el agua deja de fluir por ellos evitando la descarga de las tuberías y los pequeños golpes de ariete en los ramales como consecuencia de la entrada de aire.

Este tipo de emisores se suelen colocar en instalaciones de riego subterráneo para evitar la entrada de arcilla por el orificio de salida, provocada por las aspiraciones originadas con los movimientos del aire durante el vaciado y llenado de las tuberías. También se recomienda su empleo en instalaciones en las que se pretende realizar el llamado "riego por pulsos" (varios riegos al día de pequeña dotación), para evitar grandes variaciones en el caudal aportado por los emisores. La Fotografía 11 muestra un gotero pinchado antidrenante.



**Fotografía 11: Gotero pinchado antidrenante.**

- **Ventajas:**
  - Evita la descarga de la tubería y con ello los golpes de ariete que pueden dañar los ramales.
  - Evita la entrada de arcilla en uso en instalaciones de riego subterráneo.
  - Debido a que la tubería se mantiene llena, todos los goteros comienzan a emitir en el instante inicial.
- **Inconvenientes:**
  - Mayor coste.
- **Autolimpiantes:** Son aquellos que llevan incorporado un mecanismo que hace que el propio agua, en su paso por ellos, elimine algunos sedimentos que se acumulan en su recorrido. La Fotografía 12 muestra un gotero pinchado autolimpiante, haciendo hincapié en su laberinto.



**Fotografía 12: Gotero pinchado autolimpiante.**

→ **Ventajas:**

- Disminuyen obturaciones gracias al mecanismo de limpieza de algunos sedimentos.

→ **Inconvenientes:**

- Alto coste.

Para disminuir la obturación de los goteros es necesario un buen diseño del gotero y un tratamiento adecuado del agua de riego, pero es necesario que estos factores se estudien conjuntamente para poder conseguir un funcionamiento adecuado del sistema de riego.

Existen diversos trabajos en los que se estudia la resistencia a la obturación de distintos tipos de goteros, entre ellos está el de Lesavre et al. (1988) que seleccionaron una serie de goteros resistentes a la obturación para utilizarlos en sistemas de riego por goteo subterráneos con la utilización de agua residual. Massoud et al. (1994) realizaron una clasificación en función de la sensibilidad de los goteros a la obturación según la dimensión mínima de paso de los mismos. Nakayama y Bucks (1991) trabajaron con goteros autolimpiantes para disminuir la obturación. Chica et al. (2001) realizaron una clasificación en función de la influencia del tipo de gotero en la obturación del mismo trabajando con aguas residuales depuradas de diferentes calidades.

Como se ha comentado anteriormente el tratamiento de las aguas de riego es muy importante para evitar problemas de obturación. Generalmente se recomienda someter al agua a diversos grados de filtración y/o la inyección de ácido clorhídrico, siendo el método más utilizado para prevenir la obturación de los goteros debida a microorganismos y sus secreciones la cloración.

Gilbert et al. (1982) estudiaron la obturación en ocho emisores, entre ellos tres autocompensantes, usando aguas del Río Colorado con varios grados de tratamientos, viendo que los tratamientos del agua eran esenciales para un funcionamiento correcto de los goteros. Oron et al. (1982) realizaron un estudio en el que usaron goteros de tipo laberinto con aguas residuales depuradas en lagunas de oxidación facultativas sometiendo al agua a un tratamiento de filtración con un filtro de malla de 120 mesh, junto con la limpieza del lateral, dando como resultado una mínima obturación de los goteros. Lau et al. (1981) estudiaron métodos de tratamiento en aguas residuales con tratamiento secundario para usar en riego por goteo y llegaron a la conclusión de que no existía ningún producto químico que controlase totalmente la obturación de los goteros.

Lesavre y Zairi (1988) concluyeron mediante la realización de un proyecto de riego usando agua residual tratada, sometida después a varias filtraciones y a una hora de conducción de cloro dos veces por semana, que los goteros de gran caudal y apertura resistían a la obturación mientras que algunos goteros de pequeño caudal si sufrían obturación si no se realizaba la cloración.

En un estudio realizado por Hills et al. (1990) en el que evaluaron el comportamiento de varios goteros autocompensantes bajo distintas calidades de agua, obtuvieron que todos los goteros habían tenido relativamente éxito en la autolimpieza cuando las impurezas que tenía el agua eran de origen inorgánico, mientras que impurezas orgánicas dieron lugar a la obturación gradual por crecimiento bacteriano. Massoud et al. (1994) establecieron que para aguas depuradas con tratamiento secundario, la filtración por si sola no evita la obturación de los goteros, sin embargo, una filtración adecuada, con un filtro de granulometría media, reduce las necesidades de cloración y frecuencia de lavado de los laterales. Los sólidos en suspensión dan lugar a la obturación de los filtros y de los goteros (Lau et al., 1984). Chica et al. (2001) comprobaron que la calidad del agua residual depurada influye de manera importante en el grado de obturación de los goteros, recomendando al menos un tratamiento primario al agua residual más una filtración que reduzca la cantidad de sólidos en suspensión hasta valores equiparables a un tratamiento secundario de depuración. Además recomendaron el aumento de presión al finalizar cada sesión de trabajo para prevenir obturaciones en los goteros.

## **2.5.2 Influencia de las obturaciones sobre los parámetros hidráulicos de los riegos por goteo**

La obturación de los goteros introduce un nuevo factor de variación de caudales no previsto en el diseño de una unidad de riego y que se suma a las causadas por la variación de fabricación y el diseño hidráulico, dando lugar todo esto a la disminución del coeficiente de uniformidad de riego hasta valores que pueden afectar a la producción de los cultivos.

Las obturaciones de los goteros son unas de las principales causas de mala uniformidad en las subunidades de riego (Bralts et al., 1987). Según Solomon (1985) las causas de la pérdida de uniformidad en las subunidades de riego por goteo son: la obturación, el número de emisores por planta, el coeficiente de variación de los goteros, el exponente del gotero, la respuesta del gotero a la temperatura del agua y la variación de presión en la subunidad de riego.

Nakayama y Bucks (1981) estudiaron la disminución de la uniformidad de riego en función del porcentaje de goteros obturados y del número de goteros por planta, para lo que utilizaron un modelo de simulación en el que las variables utilizadas fueron el caudal medio inicial, el coeficiente de variación, el número de goteros por planta y el grado de obturación de los goteros, el resultado que obtuvieron fue que las obturaciones afectaban bastante a la uniformidad cuando se tienen de dos a ocho goteros por planta y del 1 al 5% de los goteros empiezan a obturarse.

Wu et al. (1991) y Lau et al. (1978) demostraron en ensayos de campo que las obturaciones no se distribuían uniformemente a lo largo del ramal sino que se localizaban aguas abajo del mismo.

En el diseño de los sistemas de riego por goteo es muy importante tener en cuenta el coeficiente de variación de los goteros (Solomon y Keller, 1978). El mayor problema causado por la obturación de los goteros es la variación de caudal y cómo afecta esto a la aplicación del agua en la unidad de riego.