



DEPURACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA RIEGO

PÉREZ-PARRA, J.

Se autoriza la reproducción íntegra o parcial citando su procedencia: Estación Experimental de Cajamar 'Las Palmerillas'

Curso superior de especialización. Mejora de la Eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos. Pág. 447-469

DEPURACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA RIEGO

Jerónimo Pérez Parra

Dr. Ingeniero Agrónomo. Director de la Estación Experimental de Cajamar "Las Palmerillas"

"Las aguas residuales urbanas son un valioso recurso que debería emplearse siempre que fuera posible, con las debidas medidas de protección sanitaria..." (OMS 1990).

Resumen

Se recoge en el presente trabajo información acerca del estado actual de la depuración de las aguas residuales urbanas y se examina el interés que tiene la reutilización de las mismas en la planificación de los recursos hídricos. El aumento incesante de las demandas de agua en contraste con la irregularidad de los recursos naturales disponibles en áreas de clima árido o semiárido, unido a una creciente sensibilidad social e institucional en materia de protección medioambiental, son argumentos suficientes para explicar el gran interés actual por la depuración/recuperación y la reutilización de las aguas residuales urbanas. En la ponencia se resumen los principales sistemas para el tratamiento de aguas residuales y se revisa la situación actual a nivel nacional, regional y provincial. Desde esta revisión se analiza la realidad y las perspectivas de Almería y se proponen acciones que permitirían paliar la escasez de recursos hídricos, mediante la integración de las aguas residuales en la planificación hidrológica provincial como un recurso adicional.

1.INTRODUCCIÓN

El agua de calidad para satisfacer las necesidades humanas es un recurso cada vez más escaso, y su posesión constituye un factor esencial de civilización, de lo que da testimonio la historia de los asentamientos de la humanidad.

La escasez de recursos hídricos naturales en zonas áridas y semiáridas constituye un problema, a veces dramático, para la población asentada en ellas, como es el caso de las regiones mediterráneas, en las que la creciente acumulación de población unida a una escasa pluviometría, irregularmente distribuida en el tiempo, y a unos limitados recursos superficiales, están llevando al agotamiento o al deterioro irreversible de los recursos subterráneos. En este contexto, la reutilización de las aguas residuales urbanas se perfila como una fuente adicional de agua merecedora de ser tenida en cuenta en la gestión global de los recursos hídricos, junto a medidas ya tradicionales como los trasvases desde cuencas excedentarias, la construcción de embalses para regular recursos superficiales y otras medidas más innovadoras y costosas como la desalación de agua de mar.

La existencia de vertidos líquidos urbanos e industriales, con poca o nula depuración, que alcanzan cursos superficiales de agua y acuíferos, junto a depósitos de residuos sólidos urbanos o industriales no controlados y las aportaciones, poco racionales a veces, de fertilizantes y fitosanitarios en agricultura, provocan una contaminación artificial de las aguas que agrava significativamente su carencia con una importante pérdida de calidad.

Las aguas residuales, como consecuencia de la incorporación a las aguas de abastecimiento de los restos de la actividad humana e industrial, pueden ser contempladas como un "caldo" que contiene millones de microorganismos aerobios y anaerobios, elementos orgánicos e inorgánicos disueltos y sólidos en suspensión. Además de la carga orgánica, el uso doméstico aporta sustancias minerales, que en unos casos añadirán valor fertilizante y en otros pueden suponer una carga tóxica limitante para su reutilización (metales pesados como Cd, Hg o Zn).

Cuando se dispone de suficiente agua de buena calidad, lo lógico es pensar en eliminar la residual, una vez que ha sido tratada, vertiéndola a algún medio receptor: río, mar, rambla, etc. En caso de limitadas disponibilidades de agua, sería un lujo no considerar la posibilidad de su aprovechamiento. Pero en una y otra situación será imprescindible proceder a la descarga de la contaminación incorporada a las aguas residuales, para evitar repercusiones indeseables sobre el medio ambiente y la salud pública, sometiéndolas a un grado de depuración que será función del origen de la carga contaminante, de la sensibilidad del medio receptor en caso de vertido o del destino que vayan a tener en caso de aprovechamiento posterior. Esta necesidad de depuración, no es sólo aconsejable, sino que está recogido por las distintas legislaciones y se convierte en una obligación para muchos países, entre ellos los países miembros de la U.E. según diversas directivas del Consejo, entre las que hay que destacar la de 21 de Mayo de 1991 (Directiva 91/271/CEE), que establece el compromiso para los Estados miembros de recoger las aguas residuales de aglomeraciones urbanas, de instalar sistemas de tratamiento adecuados para las mismas y define criterios para la determinación de zonas de vertido sensibles (lagos, arroyos, estuarios, bahías) y zonas menos sensibles. Asimismo, se fijan plazos para el cumplimiento de tales medidas, en defensa del medio ambiente, que oscilan entre el 31 de Diciembre del año 2000 para aglomeraciones de mas de 15.000 habitantes y el 31 de Diciembre del año 2005 para núcleos de 2.000 a 15.000 habitantes.

2.EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES. SISTEMAS

Para analizar la situación de la depuración de aguas residuales, conocidas las necesidades y los objetivos a cubrir, es necesario conocer los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales que existen, con el fin de poder elegir en cada caso la alternativa que mejor se adapte a esas necesidades. Los diferentes sistemas usados en el tratamiento de las aguas residuales, se pueden clasificar según los criterios siguientes (Ulloa, 1996):

a.-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.1.-Procesos físicos. Los métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos (aplicación de fuerzas gravitatorias, centrifugas, retención física, etc.) se conocen como procesos físicos. En este grupo se pueden incluir: desbaste de sólidos, desengrasado, desarenado, sedimentación, flotación, evaporación, desinfección y absorción.

a.2.-Procesos químicos. Los métodos de tratamiento en los que la eliminación de contaminantes es provocada por la adición de productos químicos o por otras reacciones químicas se conocen con el nombre de procesos químicos. Entre estos podemos incluir: floculación y coagulación, neutralización, oxidación, reducción, intercambio iónico, absorción y desinfección (cloro, ozono).

a.3.-Procesos biológicos. Los métodos de tratamiento en los cuales se consigue la eliminación de contaminantes por una actividad biológica son conocidos como procesos biológicos. El tratamiento biológico se usa esencialmente para eliminar las sustancias orgánicas biodegradables (coloidales o disueltas) presentes en el agua residual. Básicamente, estas sustancias se transforman en gases que pueden escapar a la atmósfera y en tejido celular biológico que puede posteriormente eliminarse por sedimentación. Entre ellos citamos: fangos activos, lechos bacterianos, lechos de turba, lagunaje, biodiscos y sistemas de aplicación al suelo.

b.-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.

b.1-Pretratamiento y tratamiento primario. El pretratamiento es común a todos los sistemas de depuración, sólo varía en los niveles de automatización que incorpora. No se considera un tratamiento propiamente dicho, pero su utilidad en cabeza de las instalaciones de depuración, está demostrada al eliminar elementos presentes en estas aguas, que de entrar en el proceso, podrían comprometer gravemente su funcionamiento (sólidos flotantes, arenas, grasas, aceites, etc.). Puede incluir: desbaste de sólidos, desarenador, desengrasador, decantación primaria y lagunaje anaerobio.

b.2-Tratamiento secundario. Suele ser de naturaleza biológica, incorporándose, normalmente, a la línea de tratamiento de una planta depuradora, después del tratamiento primario. Pueden citarse los siguientes: fangos activos, lagunaje facultativo, lagunas aireadas, lechos de turba y biodiscos. Todos ellos constituyen ejemplos de tratamiento secundario del agua residual, aunque, por extensión, dan nombre a sistemas de tratamiento completos.

b.3-Tratamiento terciario. De naturaleza biológica o físico-química, reúne un conjunto de instalaciones de tratamiento que, normalmente, se sitúan detrás del tratamiento secundario. Se incluyen: procesos de nitrificación-desnitrificación, procesos de eliminación de fósforo, 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.

c.-Según el coste de la explotación.

En esta clasificación no se tienen en cuenta ni el tipo de proceso unitario ni las fases que integran un proceso de depuración, por el contrario, se realiza una ordenación de los diferentes sistemas en dos grupos según las necesidades de explotación y mantenimiento que requieren.

c.1-Tecnologías de bajo coste, métodos blandos o extensivos. La base de estos sistemas es la reproducción de los fenómenos de depuración naturales con vistas a una mayor facilidad de manejo y, por lo tanto, a lograr unos menores costes de mantenimiento. Sus características básicas son: facilidad de operación y mantenimiento, no necesitan de personal especializado, requieren grandes tiempos de respuesta, son procesos de gran inercia, tienen grandes requerimientos de superficie, el equipamiento es sencillo, tienen bajos costes energéticos, buena integración en el medio rural, rendimientos en descontaminación buenos-aceptables y son muy adecuados en reutilización agrícola.

Dentro de estos sistemas podemos destacar: lagunaje, lagunas de macrofitas, aplicación al suelo y filtros verdes, lechos de turba, lechos bacterianos y contactores biológicos rotativos (biodiscos y biocilindros).

c.2-Métodos convencionales. 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. Se caracterizan por: requieren mano de obra especializada, tienen altos coste de explotación, baja integración en el medio rural, obtiene buenos resultados en depuración y adaptación media-baja a reutilización.

En éste grupo pueden citarse: procesos físico-químicos y fangos activos incluyendo el tratamiento convencional de fangos.

En las tablas 1 y 2 se resumen los diferentes sistemas usados para eliminar los contaminantes más importantes de las aguas residuales y la eficacia de diferentes procesos en la reducción de algunos de los parámetros más significativos.

Tabla 1 -Sistemas de tratamiento usados para eliminar los principales contaminantes presentes en el agua residual.

CONTAMINANTES	SISTEMA DE TRATAMIENTO
Sólidos en suspensión	Sedimentación. Desbaste. Filtración. Flotación. Adición de polímeros o reactivos químicos. Coagulación-sedimentación. Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Materia orgánica biodegradable	Fangos activados. Película fija: filtros percoladores. Película fija: discos biológicos. Variaciones del lagunaje. Filtración intermitente en arena. Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno. Sistemas físico-químicos
Patógenos	Cloración. Hipocloración. Ozonización. Radiación UV. Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Nitrógeno	Variaciones de sistemas de cultivo suspendido (nitrificación-Desnitrificación). Variaciones de sistemas de película fija (nitrificación-desnitrificación). Arrastre de amoniaco (stripping). Intercambio de iones. Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Fósforo	Adición de sales metálicas. Coagulación y sedimentación con sal. Eliminación biológica de fósforo. Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Materia orgánica refractaria	Absorción en carbón. Ozonización terciaria. Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Metales pesados	Precipitación química. Intercambio de iones
Sólidos inorgánicos disueltos	Intercambio de iones. Osmosis inversa. Electrodialisis

3.-LA REUTILIZACION DE AGUAS RESIDUALES

De acuerdo con las definiciones de T.Asano (1996), llamamos *recuperación* de las aguas residuales al tratamiento o proceso que sufren las aguas residuales para poder ser reutilizadas, y *reutilización directa* del agua al aprovechamiento de las aguas residuales tratadas con fines beneficiosos. La reutilización directa de las aguas residuales requiere la existencia de tuberías u otros medios de conducción para la distribución del agua recuperada. La *reutilización indirecta*, a través del vertido de afluentes residuales en un agua receptora, para su asimilación y retirada aguas abajo, aún siendo importante no constituye un sistema de reutilización directa y planificada de las aguas. Al contrario de lo que ocurre con la reutilización directa del agua, el *reciclado* del agua normalmente supone un sólo uso o usuario y sus efluentes se recogen y son devueltos para el mismo plan de utilización.

La reutilización de efluentes depurados es un componente intrínseco del ciclo natural del agua. Mediante el vertido de efluentes a los cursos de agua y su dilución con el caudal circulante, las aguas residuales han venido siendo reutilizadas en puntos aguas abajo, para su aprovechamiento urbano, agrícola e industrial. La reutilización directa o planificada, a gran escala, tiene su origen más reciente y supone el aprovechamiento directo de efluentes depurados con un mayor o menor grado de tratamiento previo, mediante su transporte hasta el punto de

aprovechamiento a través de una conducción específica, sin mediar para ello la existencia de un vertido o de una dilución en un curso natural de agua (Catalinas y Ortega, 1999).

Con la reutilización de aguas residuales depuradas, además de ayudar a paliar los problemas de escasez de agua en las zonas áridas y semiáridas, se resuelve un problema medioambiental (Oron y col., 1999a). En algunos casos el agua residual tratada es de mejor calidad que el agua de la zona presentando una total adecuación para su uso en riego (Segura y col., 2000).

En las últimas décadas, el interés por el aprovechamiento de las aguas residuales urbanas que han recibido tratamientos avanzados de depuración ha ido en aumento. La convicción de que estas aguas deben ser aprovechadas y no desperdiciadas, junto con la escasez creciente de aguas y los problemas de protección mediambiental, crean un entorno realista para considerar la reutilización de las aguas residuales. En muchas áreas del mundo que se enfrentan a la escasez del agua, como los países ribereños del Mediterráneo, los del Oriente Medio, Suroeste de los Estados Unidos, Méjico o Sureste y Centro de Asia, entre otras, el uso de aguas residuales recuperadas es una práctica habitual que en los últimos años ha tenido un incremento notable. Incluso, en zonas con abundancia de precipitaciones, como Japón o Florida, las aguas residuales se están reutilizando en servicios higiénicos, sobre todo cuando las fuentes de agua se encuentran lejos y el transporte es caro o cuando existen demandas competitivas de otras regiones o usos. (Shelef, 1996). Entre los diversos destinos que pueden darse a las aguas reutilizadas, mediante actuaciones debidamente planificadas, destacan las aplicaciones a riego agrícola o de jardines, el abastecimiento para servicios higiénicos mediante sistemas dobles de distribución, el uso con fines estéticos o medioambientales y el uso para fines industriales.

La reutilización del agua requiere un estudio profundo de planificación de la infraestructura y de los recursos, el emplazamiento de la planta de tratamiento de las aguas residuales, la fiabilidad del tratamiento, el análisis económico y financiero, y una gestión del uso del agua que suponga la integración del agua recuperada con otras fuentes disponibles de agua no recuperada. Hoy día, existen tratamientos técnicamente probados o procesos de purificación capaces de recuperar agua residual de casi cualquier calidad que se desee. Así, la reutilización de las aguas residuales tiene su propio lugar y desempeña un papel importante a la hora de hacer una óptima planificación y una gestión y un uso más eficientes de los recursos hídricos en muchas áreas del mundo.

Las posibilidades de reutilización de las aguas residuales tratadas son numerosas y variadas dependiendo del nivel de tratamiento a que se sometan, lo que determinará la calidad del efluente conseguido, destacando como destino mas frecuente, en la mayoría de los proyectos, el riego agrícola.

3.1.- El aprovechamiento en riego agrícola y sus limitaciones

La aplicación de las aguas residuales a terrenos agrícolas para riego, aprovechando su valor fertilizante, o para su eliminación evitando la contaminación de ríos, es una práctica realizada desde la antigüedad por griegos y romanos y habitual en China, Inglaterra o Alemania durante los siglos XVI, XVII, XIX y principios del siglo XX. A lo largo de este siglo la reutilización para la aplicación en riego de las aguas residuales, ha adquirido un nuevo auge como sistema alternativo de depuración, como mecanismo eficaz para regular los recursos hídricos en zonas muy deficitarias y para crear barreras hidráulicas contra la intrusión marina.

La agricultura en áreas áridas y semiáridas depende casi absolutamente del riego, y la demanda de agua para riego representa un porcentaje que supera en muchos casos el 80% de la demanda total de agua. La elevada demanda de agua para riego unida al hecho de que este uso ha pasado a ocupar el tercer lugar en las prioridades de satisfacción de demanda, después del suministro urbano y el uso ecológico, convierte el aprovechamiento de las aguas residuales para

riego en la agricultura en una alternativa especialmente adecuada de reutilización. No obstante, ésta sólo será óptima si se cuenta con las condiciones y conocimientos necesarios para garantizar tanto la conservación de la fertilidad del suelo (características orgánicas, minerales e hidrogeológicas) como la obtención de productos que respondan a las calidades higiénicas y sanitarias exigibles según su destino, para lo cual es necesario que el aprovechamiento de aguas residuales se realice de modo controlado.

En regiones con límite natural de recursos hídricos, el agua residual tratada, principalmente la urbana, se puede utilizar para la agricultura, industria y recarga de acuíferos (Bouwer, 1989; Asano y Mill, 1990; Asano et al., 1992). Lo más importante es que la reutilización de agua residual depurada para riego reduce la cantidad de agua captada desde embalses o acuíferos (Reca et al., 1999; Harivadi, 2000; Catalinas y Ortega, 1999), 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).

El empleo de aguas residuales depuradas para riego agrícola afecta a diferentes aspectos agronómicos, fundamentalmente al riego y al abonado y materiales en suspensión aportados por el efluente depurado (Sala y Millet, 1997). También afecta a aspectos sanitarios y económicos. El efecto que el agua residual pueda provocar depende de sus propias características, en consonancia con el tipo de tratamiento aplicado, el cultivo y 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.

Las aguas residuales depuradas, debido a su origen, presentan unas características particulares, y en su utilización para riego debe cumplir las normas de calidad físico-química o agronómicas y las sanitarias o microbiológicas.

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 (Crook, 1991; Ayers y Wescot, 1985). Así pues, los aspectos a considerar en la evaluación agronómica serían: salinidad, macromutrientes, micronutrientes, metales pesados, pH, sólidos en suspensión, cloro residual, etc.. 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. El aporte extra de elementos nutritivos, en concreto, nitrógeno, fósforo, potasio y ciertos microelementos, reduce las necesidades de fertilización (Ayers y Wescot, 1985; Asano et al., 1984; Ivorra et al., 1997; Segura et al., 2000; Segura et al., 2001), aunque se debe prestar especial cuidado a su aplicación excesiva.

Los sólidos en suspensión, precipitación de elementos químicos, algas, etc., pueden provocar la obturación de los emisores (Nakayama y Bucks, 1991; Crook, 1991; Ravina et al., 1992; Ravina et al., 1997). Los sólidos en suspensión también pueden taponar los poros del suelo y por tanto reducir la aireación y penetración del agua (Ayers y Wescot, 1985; Crook, 1991). Sin embargo, si el agua residual es sometida a un tratamiento secundario, los sólidos en suspensión presentan muy pocos problemas. El filtrado, la cloración del agua o el limpiado de las tuberías son medidas generalmente aplicadas para prevenir la obturación de los emisores (Ravina et al., 1997).

Los elementos presentes en las aguas residuales, que pueden limitar su uso en riego, son los siguientes:

Sólidos en suspensión: Su acumulación da lugar a depósitos de lodos que generan condiciones anaeróbicas en el suelo, pudiendo, además, provocar obturación en sistemas de riego localizados.

Materia orgánica biodegradable: Las proteínas, carbohidratos y grasas generan unas necesidades de oxígeno disuelto, medidas como DBO₅ ó DQO (Demanda bioquímica y química de oxígeno), cuya no satisfacción da lugar al desarrollo de condiciones sépticas.

Patógenos: La presencia de virus (enterovirus, adenovirus, rotavirus), bacterias (coliformes, etc.), protozoos o helmintos de origen humano y su posible transmisión a través de los productos cultivados puede ser origen de diversas enfermedades.

Nutrientes: Los nutrientes como nitrógeno, fósforo ó potasio, esenciales para el desarrollo vegetal, enriquecen las aguas para riego, pero una carga excesiva puede provocar efectos nocivos para el terreno, las plantas y las aguas subterráneas.

Materia orgánica no biodegradable: Determinados productos tóxicos no degradables por los sistemas de tratamientos, tales como fenoles, pesticidas y organoclorados, pueden limitar el uso en riego.

pH: El pH del agua afecta la solubilidad de los metales y pueden alterar el equilibrio del suelo.

Metales pesados: Los vertidos industriales, sobre todo, pueden aportar al agua metales como cadmio, mercurio, cinc y otros, cuya presencia reduce la aplicabilidad para riego de las aguas residuales por sus efectos tóxicos para los cultivos y la salud.

Conductividad eléctrica: Una excesiva salinidad derivada de la presencia de iones como Na, Ca, Mg, Cl, ó B, puede producir daños a los cultivos y provocar problemas de permeabilidad en el suelo (SAR).

Cloro residual: Concentraciones de radicales de cloro libre mayores que 0,5 mg/l, limitan la aplicación del agua a cultivos sensibles.

El conocimiento de todos estos parámetros nos permitirá adecuar el tratamiento a que deben someterse las aguas residuales para reutilizarlas en riego, en función del tipo de cultivo y de suelo a que se apliquen o el método de riego empleado.

3.2.- Reutilización y salud pública

La reutilización de aguas residuales exige la adopción de medidas de protección de la salud pública. En todo proceso de recuperación y reutilización de aguas residuales, existe algún riesgo de exposición humana a los agentes infecciosos. El tratamiento de las aguas residuales para fines de reutilización tiene como enfoque principal la reducción considerable de los microorganismos patógenos, sean de origen bacteriano, viral, de protozoos o helmintos, además de la eliminación de malos olores u otras sustancias que pudiesen tener un efecto negativo en la práctica de la reutilización como los sólidos en suspensión que obstruyen los aspersores o las boquillas para el riego por goteo. Por ello es preciso prestar una atención especial a los requisitos de calidad general de las aguas residuales y a las medidas de seguridad.

El principal inconveniente para el uso de aguas residuales depuradas deriva 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), donde el mercurio es el más peligroso, y los fluoruros y 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). No obstante, al considerar únicamente el reuso de aguas residuales de origen municipal, no cabe esperar contenidos apreciables ni de metales pesados ni de otros contaminantes químicos.

En la 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 exclusivo de Coliformes y Estreptococos Fecales. La presencia de otros organismos está directamente relacionada con la de estas bacterias de contaminación fecal.

Tabla 2 -Muestra de agentes infecciosos presentes en aguas residuales no tratadas (adaptado de U.S. EPA, 1992).

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>Salmomella 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

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.

Para proteger la salud pública, se han realizado considerables esfuerzos en orden a establecer unas condiciones y normas que permitan el uso seguro de las aguas residuales recuperadas. Aunque no exista ninguna serie estándar uniforme, se ha podido disponer de normas

internacionales, nacionales y estatales sobre las aguas residuales (O.M.S., 1989; U.S. EPA, 1992; California, 1978). Estas normas atienden, principalmente, a criterios de tipo sanitario y no tienen en cuenta la tecnología del tratamiento, la forma de aplicación del agua ni el efecto potencial del agua recuperada sobre las cosechas o el suelo.

Otras medidas de seguridad para las aplicaciones no potables de la reutilización del agua pueden incluir la instalación de sistemas separados de almacenamiento y distribución del agua potable; el uso de etiquetas codificadas por colores para distinguir las instalaciones de tuberías de agua potable y no potable; dispositivos para la prevención del reflujo y de la interconexión; el uso periódico de tintes trazadores para detectar la posible contaminación cruzada en las vías de suministro potables ó el riego en horas de bajo consumo para minimizar todavía más el riesgo potencial por el contacto humano.

4.-DEPURACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN ESPAÑA.

La aprobación en 1994 de la Directiva Comunitaria 91/271, por lo que regula el tratamiento de las aguas residuales urbanas antes de su vertido, marca una nueva etapa en la atención prestada en España a la depuración de aguas residuales. 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 para el periodo 1995-2005 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 relanzado el interés por la reutilización de las aguas residuales regeneradas.

De acuerdo con datos del Cedex (1997) relativos a la reutilización de las aguas residuales urbanas depuradas, existen en España unas 100 actuaciones que reutilizan 200 Hm³/año, sobre todo en riego agrícola.

En la tabla 4 se recogen algunas de las actuaciones más significativas a nivel nacional en materia de reutilización directa de aguas residuales.

Tabla 3.- Experiencias de reutilización directa en riego en España

SITUACIÓN	TRATAMIENTO	CULTIVO REGADO
Almería	Primario + Secundario + filtración + desinfección (ozono)	Hortalizas, cítricos
Vitoria - Gasteiz	Primario + Secundario + Decantación + filtración+ Desinfección (Cl)	Hortalizas, forrajes
Mallorca	Primario + Secundario	Almendro, olivo, forrajes, hortalizas
Tenerife	Primario + Secundario + Filtración+ Desinfección Cl).	Platanera
Cartagena	Lagunaje	Almendros, cítricos,Forrajes, hortalizas
Guardamar (Alicante)	Lagunaje	Cítricos, almendros, alcachofa

5.-LA REUTILIZACIÓN DIRECTA DE LAS RESIDUALES DE ALMERÍA: UN EJEMPLO PRACTICO

La situación hidrológica de Almería hace que en esta provincia, el uso de recursos de agua no convencionales merezca una consideración especial. El elevado déficit estructural, el alto valor económico asociado al uso del agua, especialmente en riego, y una previsible buena situación en

materia de depuración a corto plazo, son argumentos suficientes para valorar el interés que, entre otras soluciones, tiene la reutilización de las aguas residuales para satisfacer demandas de agua no potable, contribuyendo así a una planificación hidrológica que garantice los suministros en el futuro. Sobre la base de estas consideraciones se iniciaron en los años 80, los primeros estudios en Almería con el objetivo de reutilizar en riego el mayor caudal de aguas residuales disponible: el de la capital. Esta actuación se encuentra actualmente en funcionamiento, siendo gestionada por la CC.RR. "Cuatro Vegas".

5.1.-Reutilización de las aguas residuales de Almería en los regadíos del Bajo Andarax.

La existencia en el Bajo Andarax, la comarca de influencia de la ciudad de Almería, de un área agrícola con graves y crecientes problemas de disponibilidad de agua en cantidad y calidad suficientes para mantener una actividad económica rentable, unido a la disponibilidad de un importante volumen de aguas residuales de la ciudad de Almería (unos 15 Hm³ actualmente) con tratamiento secundario que son vertidos al mar, ha llevado a la Consejería de Agricultura y Pesca a desarrollar las acciones necesarias para reutilizar las aguas residuales de Almería en los regadíos del Bajo Andarax.

Estas actuaciones son la conclusión de un importante trabajo iniciado en 1977, con los correspondientes estudios de viabilidad y de alternativas posibles (Alonso C., 1988, 1992) para el aprovechamiento de este importante volumen de agua.

Los trabajos desarrollados han abarcado aspectos tan diversos como el estudio de otras opciones de tratamiento, la recarga del sistema acuífero del Bajo Andarax (descartado por la baja eficiencia previsible) o el seguimiento exhaustivo de la calidad de las aguas residuales de Almería y el desarrollo de experiencias de desinfección con ozono en una planta piloto instalada en la EDAR de Costacabana. Todos estos trabajos, unidos al estudio de experiencias desarrolladas fuera de nuestra provincia, llevaron a adoptar como solución más idónea, teniendo en cuenta aspectos técnicos, sanitarios y económicos la reutilización directa de las aguas residuales de Almería, incorporando un tratamiento terciario de desinfección mediante ozono producido "in situ" a partir del oxígeno contenido en el aire ambiente.

El destino del agua reutilizada, riego de hortalizas de consumo crudo, impone una alta exigencia de calidad sanitaria al efluente a obtener, lo que hace preciso la incorporación de un tratamiento de desinfección o terciario al agua procedente de la depuradora municipal. Esta exigencia de calidad bacteriológica ha sido fijada, junto a otras de calidad química por el Servicio Andaluz de Salud, siguiendo los criterios establecidos por la Organización Mundial de la Salud, ante la inexistencia de una normativa básica sobre estos aspectos en nuestra legislación.

En la elección del ozono como desinfectante a emplear, se han considerado diversas posibilidades con el fin de determinar el agente desinfectante más adecuado desde el punto de vista técnico -sanitario y económico.

Un aspecto importante de esta actuación, ha sido el desarrollo de ensayos previos, como parte del proceso de planificación, determinantes para conocer la eficacia del tratamiento, parámetros imprescindibles de diseño(dosis, tiempo de contacto), y los costes del proceso.

Las aguas residuales, una vez que han recibido tratamiento secundario en la EDAR de Almería son almacenadas en un depósito de captación cubierto, en el que se dispone de un centro de elevación formado por 5 bombas de 100 l/sg cada una, y una estación de filtrado compuesta por 28 unidades de filtros de arena. Las aguas filtradas, se elevan hasta la cota 116, donde reciben un tratamiento terciario de desinfección mediante ozono, obtenido mediante generadores de alto voltaje y media frecuencia, con el fin de eliminar los microorganismos presentes en el agua y hacerla apta para su uso en riego, tanto de frutales como de hortalizas para consumo fresco.

Cuadro nº 9 -Resumen de las características técnicas de las obras del Bajo Andarax.

Caudal de agua a tratar: 500 l/sg.
Sistema de tratamiento: filtrado y desinfección con ozono.
Sistema de filtrado de aguas residuales: batería de filtros de arena autolimpiables.
Sistema de generación de ozono: A partir de aire ambiente seco, por descarga eléctrica de alto voltaje y media frecuencia.
Producción máxima de ozono: 21,6 Kg/hora.
Dosis de tratamiento prevista: 8-12 g. O ₃ /m ³ agua.
Sistema aplicación Ozono: Difusión mediante placa cerámica porosa en cámara de contacto compartimentada.
Sistema eliminación Ozono residual: Dilución 1: 100 a la atmósfera.
Potencia eléctrica instalada: 3.780 KVA.
Capacidad de embalse total: 180.000 m ³ .
Longitud total conducciones impulsión y distribución primaria: 22.300 ml.
Longitud red de distribución de riego: 181.627ml.
Presión mínima en hidrante: 2,5 atm.
Superficie regable:
-sector I 272,6 Has.
-sector II 845,8 has.
-sector III 174,9 has.
-sector IV 981,5 has.
-sector V 1.007,2 has.
Total 3.281 Has.

5.1.1-Aplicación en riego de hortalizas.

Con el objetivo de estudiar los efectos que produce el agua residual depurada sobre el suelo y los cultivos y evaluar si el sistema de riego subterráneo reduce significativamente el riesgo de contaminación microbiológica de los cultivos en contacto con el suelo se han realizado diversas experiencias cuyas principales conclusiones se resumen a continuación:

La presencia de potasio y nitrógeno (en forma amoniacal) en el agua residual depurada utilizada para el riego permitió un ahorro en el aporte de fertilizantes (del 56,8% en N y del 15,7% en K). Lo que implica que, la reutilización de aguas residuales depuradas para uso agrícola puede ser beneficiosa para la sociedad en general, al eliminar el residuo ambiental que ésta supone, y para el agricultor en particular, ya que le permite un ahorro importante en fertilizantes.

Ni el sistema de riego ni el tipo de agua tuvo efecto sobre el rendimiento del cultivo de melón, no observándose diferencias estadísticamente significativas, aunque se mostró un ligero incremento en la producción y en el número de frutos a favor del agua residual depurada y el sistema de riego enterrado. En las categorías comerciales tampoco hubo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, mostrando los tratamientos de riego enterrados un ligero aumento en la producción y el número de frutos de categoría 1.

Se observó una gran variabilidad en la calidad microbiológica del agua de riego durante el periodo de cultivo, superando en algunas ocasiones los límites establecidos por el Real Decreto 927/1988 y la OMS para el riego de cultivos de consumo en crudo, sin embargo la presencia de organismos patógenos en suelo fue baja. El sistema de riego enterrado redujo la presencia de organismos patógenos (Coliformes Totales y Fecales) en la capas superficiales del suelo, no detectándose presencia de estos en la superficie. En los tratamientos con sistema de riego superficial no se detectó presencia de Coliformes Fecales en superficie. Esto último puede deberse a la escasa capacidad de retención de agua de la capa superficial de arena de los sistemas de cultivo con suelo enarenado, ya que la humedad en el suelo es uno de los principales factores que afectan a la supervivencia de estos organismos. El bajo contenido hídrico que presentaban todas las parcelas en la superficie provocó que la supervivencia de los organismos patógenos en las mismas fuese complicada, lo que justifica los resultados obtenidos.

En fruto, no se detectó presencia de organismos patógenos en ninguno de los tratamientos regados con agua residual depurada, independientemente del sistema de riego, lo que se esperaba a raíz de los datos obtenidos en la superficie del suelo.

A la vista de todos los resultados obtenidos, parece ser que la utilización de sistemas de riego enterrados para la reutilización de aguas residuales en invernaderos de Almería con suelo tipo enarenado no está justificada, ya que no se han observado diferencias estadísticamente significativas en cuanto a producción y tampoco se ha detectado presencia de microorganismos patógenos en frutos en ninguno de los tratamientos, siendo baja en el caso del suelo. Por lo que, el incremento de coste de instalación y manejo que suponen estos sistemas con respecto a los de superficie no parece estar justificado. Además, la utilización de agua residual depurada con tratamiento terciario en cultivos sobre suelo enarenado y con sistema de riego localizado no parece presentar ningún riesgo para la salud humana, ni ningún problema para el desarrollo de los cultivos.

8.-BIBLIOGRAFIA referenciada o relacionada con el tema

1. Alonso Cobos, Carlos. Reutilización de aguas residuales urbanas: aplicación al regadío. Ozonificación. Riegos y drenajes XXI; 1992.
2. Asano, T. La recuperación de las aguas residuales municipales como nuevo recurso hídrico. Actas Jornadas Intern.: Agua horizonte 2005. Murcia, 1996
3. Asano, T.; Pettygrove, G.S. Using reclaimed municipal wastewater for irrigation. California agriculture; 1987; 41, pp. 15-18.
4. Beltrán Novillo, F.J.; Beltrán de Heredia, J. Tratamientos de aguas con ozono. Parte d. Ingeniería Química; 1986; Enero.
5. Beltrán, B.J.; González, M.; García-Araya, J.F. Formación de THMs en la cloración de sustancias humicas. Efecto del ozono y del dióxido de cloro. Ingeniería Química; 1991; Enero: 217-223.
6. Burau, R.G.; Sheikh, b; Cort, R.P.; Cooper, R.C.; Ririe, D. Reclaimed water for irrigation of vegetables eaten raw. California agriculture; 1987; July-August: 4-7.
7. Cajigas Delgado, A. El ozono y sus aplicaciones. Ingeniería química; 1982; Agosto: 51-56.
8. Castillo, A. y col. Criterios para la evaluación sanitaria de proyectos de reutilización directa de aguas residuales urbanas depuradas. Edita: Consejería de Salud. J de A. 1994. 255 pp.
9. Consejería de Medio Ambiente. Informe Medioambiental de Andalucía, 1989-96.
10. Consejería de Obras Públicas. J. de A. Plan Director de Infraestructuras 1997-2007, 1996.
11. Contreras París J.; Martínez López J.; Alcalde Muñoz J.; Pérez-Parra J.; Roldán Cañas J. Influencia del sistema de riego localizado enterrado en la utilización de agua residual depurada para riego de hortalizas XX Congreso Nacional de Riegos. 75-77 Ciudad Real, 12-14 Junio 2002
12. Corominas, J.; Capote, C. Reutilización agraria de aguas residuales en Andalucía. El Plan Litoral. Actas del III Seminario Hispano-Portugues sobre el agua y la agricultura mediterránea. 1996. 30 pp.

13. Dyer-Smith, P.; Jaisli, E.; Jimenez Perono, M. Tecnología del ozono. Ingeniería Química; 1985; Noviembre.
14. Fao (Food and Agricultural Organization). Report on the proceedings of the FAO regional seminar on the treatment and use of sewage effluent for irrigation. Reg Commis Land and Water use in the Near East, Cyprus; 10-12 oct.1985; FAO Rome: 10 pp.
15. Fayas, J.A.; Oliver, R. Reutilización de aguas residuales depuradas en regadíos: Pla de Sant Jordi (Mallorca). Reutilizacio aigues urbanes; 25-27 Septiembre de 1985 Platja d'Aro.Costa Brava.
16. Fernández M.D.; Contreras J.I.; Segura M. L.; Polo M.J. Efectos en el rendimiento de cultivos hortícolas producidos por el uso de agua residual depurada para riego. XX Congreso Nacional de Riegos 71-74 Ciudad Real, 12-14 Junio 2002
17. Harakeh, M.S.; Butler, M. Factors influencing the ozone inactivation of enteric viruses in effluent. Ozone Science and Engineering; 1985; 6: 235-243.
18. Hernández Muñoz, Aurelio (Escuela Técnica Superior de Madrid). Una aportación a la depuración de las aguas residuales y su posibilidad de reutilización. Medio Ambiente- Retema, 1989: 9
19. Koga, M Kadokami, K Shinohara, R. Laboratory-scale ozonation of water contaminated with trace pesticides. Water Science and Technology; 1992; 26(9-11): 2257-2260.
20. Langlais, B.; Legube, B; Beuffe, H; Dore, M. Study of the nature of the by-products formed and the risks of toxicity when disinfecting a secondary effluent with ozone. Water science and technology; 1992; 24 pp. 135-143.
21. Legeron, J.P. Comparative study of ozonation conditions in wastewater tertiary treatment. Ozone Science and Engineering; 1980; 2: pp.123-137.
22. Martín E.; Martínez J.; Fernández M^aD.; Alcaide M.; Roldán J. Comportamiento hidráulico de los sistemas de riego por goteo subterráneo y superficial utilizando agua residual depurada. XXI Congreso Nacional de Riegos, 147-149 y CD-Rom Mérida, Badajoz 6-8 de Mayo de 2003
23. Ministerio de Medio Ambiente (CHS). Plan de Depuración y Reutilización de las aguas residuales de la comarca de Poniente (Almería).1995
24. Mujeriego, R. Riego con agua municipal regenerada. Manual práctico. 1990. 482 pp.
25. OMS. Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Serie Informes Técnicos n^o 778
26. Paillard, H; Sibony, J. Desinfection des eaux residuales. Océanis; 1986; 12: pp. 491-509.
27. Pérez-Parra, J., Vallverdú, A. Reutilización de las aguas residuales de Almería en los regadíos del Bajo Andarax. Actas del II Seminario del agua. IEA, 1997. pp. 265-287
28. Pettygrove G.S.; Asano, T. Irrigation with reclaimed municipal wastewater-a guidance manual. Ed. Lewis, Chelsea; 1985.
29. Rojo, I.; Pérez-Parra, J., Vallverdu, A. Aptitud de las aguas residuales de Almería tratadas con ozono para su uso en riego. Actas XIV Congreso Nacional de Riegos y Drenajes. 1996. pp.660-667.
30. Roldán, J. La reutilización para el riego en España. Curso sobre reutilización de aguas para riego. ETSIA de Valencia, 1997. 11 pp.
31. Shelef, G. La gestión del tratamiento y de la reutilización de las aguas residuales. Actas Jorn. Intern.: Agua horizonte 2005. Murcia, 1996
32. Shelef, G. Wastewater reclamation and water resources management. Wastewater Reclamation and Reuse, 24. 1991. pp. 251-265.
33. Sierra, J.; Peñalver, L. La reutilización de las aguas residuales: acondicionamiento y uso. Monografías del CEDEX n^o 15. 1989. 222 pp.
34. Suarez Sánchez, C.L. Uso agrícola de aguas subterráneas y depuradas urbanas en Canarias. Canarias Agraria.
35. Ulloa Santamaría, J.J.. El agua residual. Parámetros caracterizadores. Curso sobre tratamiento de aguas residuales, basura y escombros en el ámbito rural; Madrid, 16-20 septiembre 1991.