



## Hacia el Vertido Cero gracias a la reutilización de aguas residuales en las Demarcaciones Hidrográficas de España

**Autor:** Carlos Menor Salazar

**Institución:** Asociación Vertidos Cero

**Otros autores:** Alberto Morán García (Asociación Vertidos Cero); Isabel Herráez-Sánchez de las Matas (Asociación Vertidos Cero)

## Resumen

Con la presente Comunicación Técnica se pretende abordar el estado actual de la reutilización de las aguas en España para los usos agrícola y ambiental (mayoritarios, siendo un 71 y 18 %, respectivamente), enfocado al cumplimiento de los parámetros microbiológicos y a las perspectivas futuras en la eliminación de contaminantes emergentes. Se expone una sinopsis de estado de la materia en las Demarcaciones Hidrográficas en España en cuanto a tecnología y resultados de un no convencional y estratégico.

El cumplimiento de la legislación ambiental de calidad de aguas así como los límites de contaminación cada vez más estrictos contribuye a la adopción de estrategias integradas como la del tratamiento terciario de aguas para su reutilización, con el objetivo del vertido cero. Con la reutilización no solo se logra disminuir el patrón de consumo en origen de agua potable sino también el volumen y carga contaminante de las aguas residuales vertidas a las masas de agua (objetivo de mejora del caudal ecológico, en cantidad y en calidad) y por tanto evitar el impacto ambiental y sobre la salud humana. Se identifica por tanto el desarrollo normativo y la exigencia relativa a la Evaluación de Impacto Ambiental, según donde se desarrollen los casos de reutilización.

Se identifican las rutas de exposición a contaminantes microbiológicos y también se evalúan los tratamientos que además den respuesta a los nuevos retos que suponen la detección y eliminación de contaminantes emergentes (productos químicos persistentes y tóxicos) en el agua: fármacos, disruptores endocrinos y productos de cuidado personal.

Por último se responde a las siguientes cuestiones técnicas: ¿cuál es la capacidad tecnológica actual en términos de depuración y reutilización?; ambientales: ¿cómo responde la reutilización del agua a los futuros desafíos de escasez de agua y cambio climático en España?, ¿están las Demarcaciones Hidrográficas Españolas preparadas actualmente para eliminar todo tipo de contaminantes en las masas de agua?; y económicas: ¿quién debe pagar el coste por metro cúbico de agua reutilizada de un proyecto que haya sido calificado como viable?, ¿cuáles son los mecanismos de financiación actual para cerrar la brecha hídrica?

**Palabras clave:** Aguas residuales; reutilización; vertido cero; tratamiento terciario; parámetros microbiológicos; contaminantes emergentes

## ÍNDICE

1. Introducción
2. Estado de la reutilización de las aguas residuales en España
3. Casos prácticos
4. Contaminantes emergentes y técnicas de eliminación
5. Viabilidad económica
6. Conclusiones
7. Bibliografía

## 1. INTRODUCCIÓN.

La menor disponibilidad de recursos hídricos como consecuencia de los efectos producidos por el cambio climático, así como los objetivos de consecución de buen estado (cuantitativo y cualitativo) de las masas de agua superficiales y subterráneas para el año 2015 establecidos por la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) han permitido que la reutilización de aguas residuales se convierta en una herramienta estratégica en el futuro de la planificación y gestión de las Demarcaciones Hidrográficas.

Se debe indicar que esta comunicación técnica se refiere en todo momento a la reutilización directa, es decir la reutilización en aguas que ya han sido utilizadas por quién las derivó y antes de su devolución al Dominio Público Hidráulico o dominio Público Marítimo Terrestre.

La reutilización directa de las aguas residuales permitirá disponer de un nuevo recurso, en un contexto en el que cada vez más unidades de explotación se encuentran o tienden a una situación de déficit, no solo por el aumento de la demanda sino también por la previsible reducción de las aportaciones medias en las cuencas debido al cambio climático. La disminución de la aportación total variaría entre un 2% (Galicia Costa y Norte I) y un 11% (Guadiana y Segura) según datos MIMAM (2005) aunque actualmente los datos del CEDEX (2012) incorporan algunas variaciones según los escenarios de emisiones y modelos climáticos utilizados. Además, la reutilización puede reducir el impacto y degradación en diferentes sistemas del Dominio Público Hidráulico, como el caso de masas de agua subterráneas en situación de sobreexplotación y masas de agua superficiales con pérdida de su calidad debido a los vertidos mal depurados.

Históricamente utilizada como recurso no convencional en varias demarcaciones Hidrográficas de España, la reutilización de aguas residuales se ha ido realizando sin un soporte legal de referencia hasta la aprobación del MAGRAMA del Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (en adelante, RD de reutilización). Esto ha supuesto un significativo aumento del volumen de agua regenerada.

A grandes rasgos el RD de reutilización indica los usos para los que pueden utilizarse las aguas regeneradas: uso agrícola, uso urbano, uso recreativo, uso industrial y uso ambiental; estableciéndose para cada uno de ellos unos Valores Máximos Admisibles (VMA) de determinados parámetros de calidad (Anexo I.A. del RD de reutilización): nematodos intestinales, *Escherichia coli*, sólidos en suspensión y turbidez. Dependiendo del tipo de aplicación o destino del agua regenerada además: *Legionella* spp. (aerosolización), Nitrógeno y Fósforo Total (recarga de acuíferos), *Taenia* spp., *Salmonella* spp., y otros contaminantes que no figuran en el RD de reutilización pero que el organismo de cuenca valore (Carbono orgánico total o disuelto, Cloro residual, Colifagos o *Clostridium perfringens*). Sin embargo, el RD no contempla los contaminantes emergentes puesto que su descubrimiento ha sido posterior, originalmente las EDAR y ERAR no han sido diseñadas para remover y/o eliminar contaminantes emergentes.

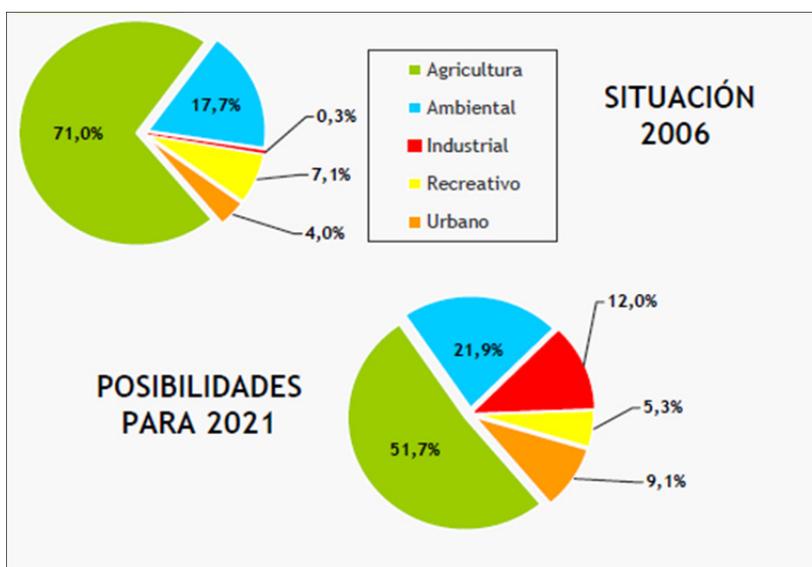
Por otro lado, el RD de reutilización establece dos títulos administrativos para la reutilización de aguas residuales:

- **Autorización administrativa;** cuando es solicitada por el titular de la autorización de vertido de las aguas residuales a reutilizar.
- **Concesión administrativa;** cuando es solicitada por una persona diferente al titular de la autorización de vertido de las aguas a reutilizar.

Este RD de reutilización ha sido completado posteriormente con una guía de aplicación elaborada por el propio Ministerio donde no solo se solventa las dudas más frecuentes en la interpretación de la norma sino que también se indican aspectos técnicos en la reutilización de aguas residuales: redes de distribución, almacenamiento y tipos de tratamiento de regeneración. Por lo tanto se cuenta con un soporte legal importante y desarrollado que protege la salud de las personas y permite la reutilización en diferentes usos.

Pese a ello, la reutilización en España se enfrenta a una serie de retos, por un lado todavía es necesaria una importante inversión en instalaciones de regeneración, así como de infraestructuras de transporte y almacenamiento. Esta continua innovación y renovación tecnológica de las infraestructuras hará que sea más viable desde el punto de vista económico (cuyo indicador clave es la disminución del precio del metro cúbico de agua regenerada). Además se debe de vigilar los vertidos (sobre todo de tipo industrial y hospitalario) que van a parar a los sistemas de saneamiento y que en muchas ocasiones afectan a los sistemas de depuración y por ende de regeneración.

La reutilización en España tiene diferentes objetivos en su uso (Figura 1). Actualmente las aguas regeneradas son utilizadas principalmente para usos agrícola y ambiental, seguidos en menor parte de recreativo, urbano e industrial.



**Figura 1.** Distribución de usos del agua regenerada en España según datos del PNRA (Puig, A., 2012)

- El **uso agrícola** permite un suministro seguro y de calidad a los agricultores. Debido a las fuertes inversiones en transporte y almacenamiento de aguas regeneradas, implica un coste elevado que a día de hoy no puede competir con el agua procedente de fuentes convencionales.
- El **uso ambiental** de las aguas regeneradas permite el mantenimiento y mejora de muchos ecosistemas acuáticos como humedales, así como que muchas masas de agua superficiales pudieran alcanzar un buen estado.
- El **uso industrial**, que debería desarrollarse y potenciarse, permitiría liberar un recurso de fuentes convencionales (masas de agua subterráneas y/o superficiales) y que además en muchos casos no requeriría de una fuerte inversión en el caso de depuradoras próximas a polígonos industriales. En este sentido se debe destacar como algunas empresas ya utilizan aguas regeneradas en sus procesos productivos: La papelera Holmen-Paper en Fuenlabrada (Madrid) que utiliza agua regenerada procedente de la EDAR Cuenca Media-Alta del arroyo Culebro, o en la refinería de Petronor en Muskiz que reutiliza el 30% de las aguas residuales generadas para el funcionamiento de la propia planta. La EDAR de Tarragona y la EDAR de Terrasa son también casos a destacar.

Por último se debe destacar también la elaboración, aún en fase de borrador (última consulta a fecha de 20/10/2014), del Plan Nacional de Reutilización de Aguas Residuales (en adelante, PNRA) que junto con los planes de ámbito local y autonómico tiene como objetivo promover el uso de aguas regeneradas y que dicho uso se haga con garantías de calidad para los usuarios, al mismo tiempo que se consiguen los objetivos medioambientales de las masas de agua, se contribuye al establecimiento de caudales ecológicos y se reducen los vertidos al mar (Tabla 1). Para ello el plan establece una serie de actuaciones presupuestadas en materia de reutilización para el primer y segundo ciclo de planificación. En el desarrollo de los trabajos para la aprobación definitiva del PNRA se está siguiendo la metodología y procedimiento de la Evaluación Ambiental Estratégica. Así, en 2010 se emitió el Informe de Sostenibilidad Ambiental del PNRA, que establece que la alternativa elegida para la consecución de los objetivos del plan sea un *“mantenimiento del volumen neto de los recursos hídricos en zonas de interior y aumento en zonas costeras (...) con una detracción, parcial o total, de los vertidos directos al mar y la sustitución de agua concesionada por regenerada para que el agua liberada discurra por el cauce natural aumentando la calidad de las masas de agua, o bien se destine a usos ya existentes que requieran una calidad más elevada”*.

En la Tabla 1 se han recogido los principales beneficios ambientales y desafíos de la reutilización en España:

Beneficios ambientales	Desafíos
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ahorro del volumen equivalente extraído de masas de agua superficiales (obtener caudales ecológicos) y subterráneas (prevención de riesgo de intrusión salina); alcanzar vertido cero en los vertidos directo al mar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Normativa y regulación demasiado estricta para la aplicación de prácticas de reutilización a nivel generalizado.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejora de la calidad y por tanto cumplimiento de la Directiva Marco del Agua y</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitaciones técnicas por infraestructura, tanto por su adecuación como mantenimiento y renovación (fallos y fugas)</li> <li>- Posibles impactos adversos sobre el</li> </ul>

<p>logro del buen estado de las aguas para 2015.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Garantía de calidad del agua, sin riesgos para el medio ambiente ni para la salud pública.</li> <li>- Favorable al ciclo de la oferta y la demanda, siendo complementario y alternativo, siendo un caudal de agua disponible no dependiente de la estacionalidad del propio recurso (importante por las características de la climatología española)</li> </ul>	<p>medioambiente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere de monitorización y evaluación, con el equipo, personal y coste asociados.</li> <li>- Limitaciones financieras, puesta en servicio y precio de venta del agua regenerada.</li> <li>- Falta de aceptación pública y conciencia ciudadana</li> </ul>
---	--

**Tabla 1.** Beneficios ambientales y desafíos de la reutilización en España. (Elaborada a partir de la Guía para la Aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas; y Barceló y Petrovic, 2011).

Por último, recalcar dos definiciones importantes que recoge el RD de reutilización, y que son objeto del análisis en esta publicación:

Aguas regeneradas → “aguas residuales depuradas que han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan”

Aguas reutilizadas → “aguas que, habiendo sido utilizadas por quien las derivó, se han sometido al proceso o procesos de depuración establecidos en la correspondiente autorización de vertido y a los necesarios para alcanzar la calidad requerida para un nuevo uso privativo, en función de los usos a que se van a destinar antes de su devolución al dominio público hidráulico y al marítimo terrestre”.

## 2. ESTADO DE LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN ESPAÑA

Conforme al estudio del PNRA y de los Planes Hidrológicos recientemente aprobados<sup>1</sup> (2013 y 2014), se presenta un resumen del estado en que se encuentra la reutilización de las aguas residuales en las diferentes Demarcaciones Hidrográficas, tanto intercomunitarias como intracomunitarias. Así mismo, estos Planes deben incluir los aspectos de la reutilización, como ejemplo para el PH del Tajo: “*serían susceptibles de producir modificaciones en masas de agua las actuaciones que se considere oportuno en futuros planes de ámbito nacional, especialmente en el Plan Nacional de Reutilización de aguas Regeneradas y en la revisión del Plan Hidrológico Nacional*” donde se podrán otorgarse “*concesiones de reutilización de agua residual depurada, cuyo plazo de duración concesional irá ligado al de la necesaria autorización de vertido*”.

Para una mejor comprensión, este resumen va a dividir las demarcaciones por sectores de la Península: Norte, Central, el sector Mediterráneo, el sector Atlántico y finalmente los archipiélagos (Islas Baleares e Islas Canarias).

**Sector Norte:** Caracterizado por grandes aportaciones en sus cuencas pero escasa capacidad de regulación (embalses), ya que muchas de las presas construidas solo tienen la función de aprovechamiento hidroeléctrico. Por lo que la reutilización es poco significativa o nula.

**DH Miño-Sil:** Se estima un potencial de reutilización de 2 hm<sup>3</sup>/año para 2015 que podría ascender a 5 hm<sup>3</sup>/año para 2027, utilizándose exclusivamente para uso urbano de ciudades medias, del orden de 50.000-500.000 habitantes (i.e.: Ourense, Ponferrada) incluso algunas pequeñas (i.e.: Monforte de Lemos) y riego de campos de golf sobre todo en el periodo estival debido a la falta de regulación.

**DH Cantábrico Occidental:** Se plantea la reutilización de 2 hm<sup>3</sup>/año para usos urbanos y sobre todo uso industrial ya que es el que presenta una mayor demanda y se organiza en grupos de grandes consumidores. Ello obligará a la inversión en infraestructuras de almacenamiento y transporte.

**DH Cantábrico Oriental:** La parte de la demarcación de gestión estatal, se considera nulo el potencial de reutilización, mientras que en la parte de la demarcación gestionada por la Comunidad Autónoma del País Vasco existen casos de reutilización de uso industrial como son: EDAR de Galindo (0,3 hm<sup>3</sup>/año) o refinería Petronor en Muskiz, (1,5 hm<sup>3</sup>/año). Esta demarcación, al igual que la anterior, posee un alto potencial en el uso industrial de aguas regeneradas en el caso de industrias próximas a las EDARs y siempre que se cumplan con los requisitos de calidad de agua que demandan los usos industriales.

**DH Galicia-Costa:** Actualmente no se reutilizan aguas residuales aunque se plantea un volumen mínimo (1 hm<sup>3</sup>/año) para uso urbano y recreativo (campos de golf). Es de destacar las medidas recogidas dentro del Decreto 262/2007 de la Consellería de Vivienda de la Xunta de Galicia, entre las cuales incluían la obligación de que todas las

<sup>1</sup> Consulta de los Planes Hidrológicos (acceso a través de la web del MAGRAMA): <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planific/acion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-cuenca/>

viviendas nuevas instalen un sistema de recogida, almacenaje y depuración del agua de lluvia, lavabos y ducha para su reutilización doméstica en cisternas, lavadoras o riego de jardines. Sin embargo, por problemas de aplicación práctica, fue posteriormente modificado por el Decreto 29/2010; aunque destacaba por su innovación y reducción de la huella hidrológica mediante la reutilización en el propio hogar.

**Sector Central.** Se caracterizan por ser cuencas hidrográficas de gran extensión, con una fuerte regulación y que pueden sufrir déficit de recursos en determinadas zonas, además de un estado peor que bueno en sus masas de agua.

**DH Ebro:** Existen en esta demarcación dos problemas fundamentales, escasez de recursos para una fuerte demanda y el tener que cumplir con el establecimiento de caudales ecológicos en diferentes masas de agua superficiales. La reutilización no ha tenido un fuerte desarrollo utilizándose actualmente 14 hm<sup>3</sup>/año sobre todo para uso agrícola, Sin embargo el Plan Hidrológico pretende fomentar una reutilización de bajo coste para uso urbano, recreativo, agrícola y ambiental (forestal).

**DH Duero:** Esta demarcación se enfrenta a problemas de sobreexplotación de diferentes masas de agua subterránea debido a la fuerte presión agrícola de la zona, por ello la reutilización sería una interesante herramienta para mantener y hacer crecer la actividad agrícola liberando recursos subterráneos. Sin embargo actualmente solo se reutiliza un volumen muy pequeño (0,04 hm<sup>3</sup>/año) para el sistema de explotación Cega-Eresma-Adaja y no se espera una tendencia al alza para el siguiente ciclo de planificación 2015-2021.

**DH Tajo:** En esta demarcación el problema reside en una significativa disminución de las aportaciones en la cuenca Alta del Tajo, y una fuerte demanda en el entorno de la Comunidad de Madrid, lo que además genera que sus principales masas de agua superficiales no cumplan con el buen estado ecológico. Por ello la reutilización podría servir como herramienta para sustituir demandas o incluso para usos ambientales (caudales ecológicos de calidad). Con base al año 2012, la Demarcación Hidrográfica del Tajo tiene un volumen total anual de reutilización autorizado de 21,1 hm<sup>3</sup>/año, aunque en el Plan Hidrológico se indica que solo 10 hm<sup>3</sup>/año, están de hecho reutilizándose. Destaca este volumen tan bajo con el fuerte potencial de reutilización que hay en esta demarcación (hasta 103 hm<sup>3</sup>/año), por lo que el objetivo es aumentarlo. Casi toda la reutilización se localiza en la Comunidad de Madrid, gracias a que se han desarrollado planes locales (Ayuntamiento de Madrid) y autonómicos para fomentarla (Plan Dpura, 2010) y a la relativa cercanía desde las estaciones de regeneración de la demanda (usos principalmente urbano y recreativo).

**DH Guadiana:** El principal problema de esta demarcación es la fuerte sobreexplotación que sufren muchas de sus masas de aguas subterráneas y superficiales, especialmente en la zona del Alto Guadiana debido a la fuerte demanda para uso agrícola.

La reutilización en este caso debe servir para sustituir volúmenes de derechos concesionales y liberar ese recurso convencional para mejorar el estado cuantitativo de esas masas de agua y mejorar la calidad ambiental de sus ecosistemas asociados. De hecho dentro del Plan Especial del Alto Guadiana solo se permite la reutilización si ya se cuenta con un derecho de uso privativo de aguas para permitir la sustitución por el mismo volumen.

Actualmente la reutilización en la DH Guadiana implica un volumen de 9,13 hm<sup>3</sup>/año procedente de las EDARs de las principales ciudades: Ciudad Real, Tomelloso, Alcázar de San Juan, etc., y es para usos principalmente urbanos. No se contempla en la planificación un incremento sustancial en el volumen reutilizado.

**Sector Mediterráneo:** Existe una escasez de recursos importante y una fuerte demanda urbana (sector turístico), industrial y agrícola. Por ello en este sector es muy interesante potenciar la reutilización de las aguas residuales procedentes de EDARs costeras, de manera que se pueda dar salida a unos volúmenes importantes que actualmente se desaprovechan al verterlos directamente al mar mediante emisarios submarinos, mejorándose además el estado ecológico y químico de las masas de agua costeras al eliminarse esos vertidos escasamente depurados.

**DH Júcar:** Tiene aún gran potencial de reutilización, sobre todo en EDARs cercanas a la costa, además requiere de la modernización y mejora de muchos sistemas de regeneración para adecuarse al RD de reutilización. Actualmente esta demarcación reutiliza 146 hm<sup>3</sup>/año de los que 114 son de uso consuntivo. El uso principal es el riego agrícola, sobre todo en la unidad de explotación del Turia (81,8 hm<sup>3</sup>/año) y del Vinalopó-Alcantí (27,3 hm<sup>3</sup>/año).

**DH Cuencas internas de Cataluña:** En el año 2008 se reutilizaban 52 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 40 eran para el uso ambiental, concretamente para recuperación de zonas húmedas y el tratamiento de vertidos en cauces donde los vertidos tratados de forma convencional no se diluirían adecuadamente y tendría como resultado que la masa de agua no alcanzase el buen estado.

Se debe destacar además la implantación de un plan autonómico de reutilización con el horizonte 2015, que tiene como objeto fomentar el uso industrial (incrementando este uso al 26%) llegando hasta los 200 hm<sup>3</sup>/año. Para el horizonte 2025, Cataluña llegaría a 389 hm<sup>3</sup>/año de aguas regeneradas.

**DH Cuencas mediterráneas Andaluzas:** Tiene un crecimiento continuado en el volumen reutilizado aunque a un ritmo lento. A fecha de 2005 se ha reutilizado 21 hm<sup>3</sup>/año cuyo uso principal es el urbano (11,9 hm<sup>3</sup>/año) y recreativo en campos de golf (9,1 hm<sup>3</sup>/año). El mayor potencial se encuentra en las zonas de costa, sin embargo es necesario impulsar el tratamiento terciario en muchas depuradoras, así como las infraestructuras que transporten el agua regenerada hasta las zonas de demanda (campos agrícolas). El objetivo establecido en la planificación es alcanzar los 123 hm<sup>3</sup>/año de aguas regeneradas para 2015.

**DH Segura:** Esta demarcación tiene un fuerte déficit hídrico estructural. Gracias al total de instalaciones de depuración, se reutiliza de forma directa 74,2 hm<sup>3</sup>/año y 67,8 hm<sup>3</sup>/año de forma indirecta, es decir la práctica totalidad de los retornos urbanos. No existen muchas posibilidades de incrementar el volumen de agua regenerada pero sí de mejorar su calidad y que esta cumpla con los criterios de calidad establecidos en el RD de reutilización.

**DH Melilla:** La regeneración representará en 2015 cerca de 0,4 hm<sup>3</sup>/año procedente de la única EDAR de la Ciudad Autónoma y que se utiliza para el riego del campo de golf y zonas verdes. Tras unas obras de remodelación de la EDAR se pretende reutilizar el 80% del volumen de entrada llegando a 6 hm<sup>3</sup>/año para 2021.

**DH Ceuta:** La memoria de planificación indica que en la ciudad autónoma posee una EDAR y que el 5-10% del agua tratada es reutilizada, tras pasar por un tratamiento terciario, para usos urbanos. Sin embargo no indica un volumen anual de este recurso reutilizado.

**Sector Atlántico:** Destacan el Guadalquivir y las cuencas internas de Andalucía.

**DH Guadalquivir:** Esta cuenca tiene problemas de déficit a nivel regional. Actualmente la reutilización se realiza principalmente para los usos de agricultura (15,3 hm<sup>3</sup>/año) y recreativo, fundamentalmente campos de golf (2 hm<sup>3</sup>/año).

**DH Guadalete, Barbate:** La mayor parte de la reutilización se está produciendo en Cádiz. Actualmente existe un volumen total concedido de reutilización de 9,7 hm<sup>3</sup>/año, procedente principalmente del sistema Guadalete, aunque existe capacidad para regenerar 15,1 hm<sup>3</sup>/año. El uso principal es el agrícola (8,13 hm<sup>3</sup>/año) seguido del recreativo. La demarcación es excedente en recursos gracias en gran parte a la reutilización.

**DH Tinto, Odiel y Piedras:** Actualmente no existe reutilización directa de los efluentes, aunque en el futuro se quiere potenciar para las demandas más importantes en la demarcación como son riego de campos de golf y uso agrícola. Así para 2015 se plantea la reutilización de 13,6 hm<sup>3</sup>/año.

**Archipiélagos:** Dependiendo de las islas la reutilización se realiza en mayor o menor medida. Se debe tener en cuenta que en estas demarcaciones los recursos proceden principalmente de aguas subterráneas y de la desalación, y que todos los vertidos se realizan al mar, por lo que la reutilización en estos casos se conforma como un nuevo e importante recurso a tener en cuenta.

**DH Islas Baleares:** El 25% del volumen depurado de las islas es reutilizado, alcanzando un volumen de 24,5 hm<sup>3</sup>/año y que se utilizan principalmente para el riego de campos de golf (4,69 hm<sup>3</sup>/año) y de cultivos agrarios (19,8 hm<sup>3</sup>/año). Está prevista una serie de proyectos entre el MAGRAMA y la Consellería de Medi Ambient para aumentar en 9 hm<sup>3</sup>/año la reutilización.

**Islas Canarias:** Los Planes Hidrológicos de las siete demarcaciones canarias, de características específicas y complejas en su tramitación, derivadas principalmente la legislación canaria en materia de ordenación del territorio, se encuentran en distintas fases de elaboración. Hasta su aprobación definitiva permanecen vigentes los Planes Hidrológicos Insulares aprobados entre 1997 y 2003. Actualmente, según datos del Gobierno Canario en el conjunto de las islas se reutilizan 95 hm<sup>3</sup>/año fruto de planes autonómicos y de los cabildos. Los usos principales son los urbanos y recreativos, derivado de la importante actividad turística que tienen las islas. Sin embargo aún existen importantes retos como es el que muchas EDARs que reutilizan las aguas residuales no cuentan con sistemas adecuados de tratamiento que garanticen la calidad exigida en el RD de reutilización, añadido al elevado coste que tiene la reutilización. Pese a todo existe una necesidad y dependencia cada vez más creciente de este recurso.

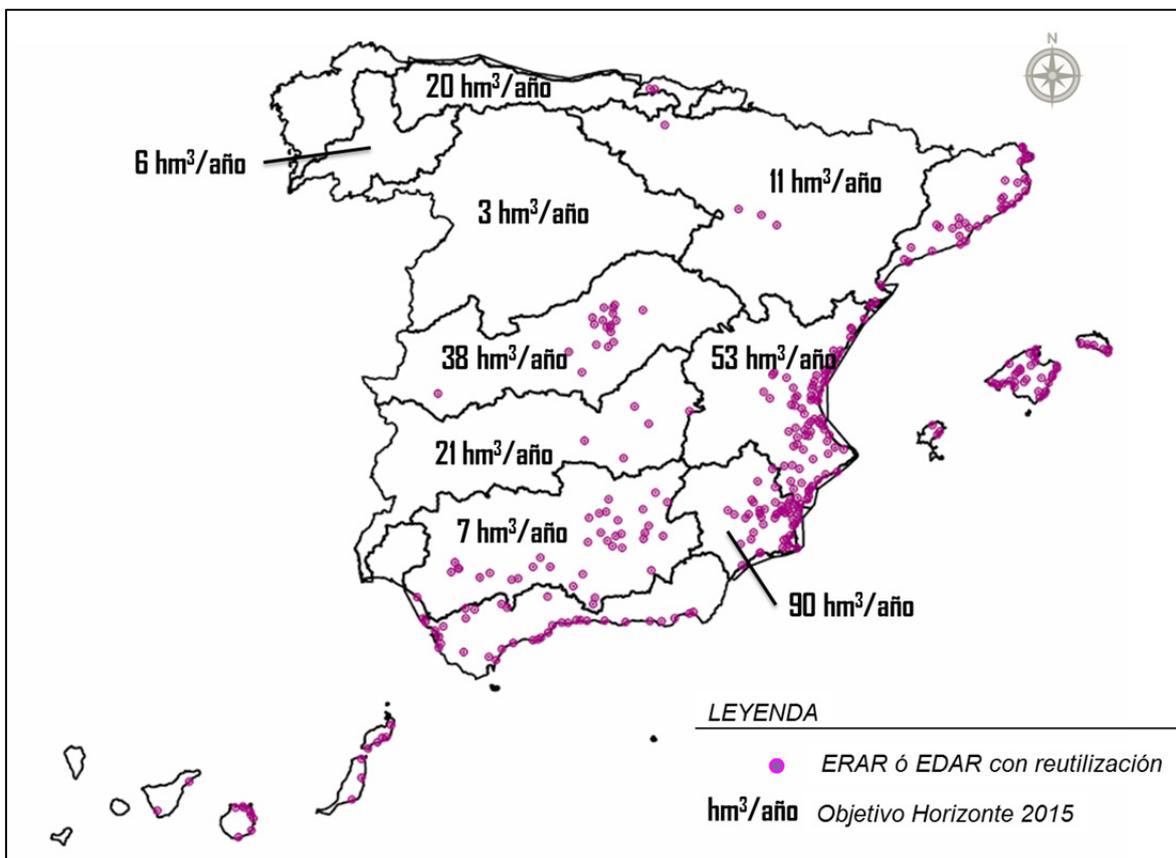
Como se puede comprobar en la **Tabla 2**, el mayor volumen de reutilización reside en el sector mediterráneo, seguido de los archipiélagos y ya en tercer lugar por el sector central (principalmente gracias a la DH Tajo). Además existe un fuerte contraste en los volúmenes reutilizados entre la zona norte y el resto de España.

Sector	Demarcación Hidrográfica	Volumen reutilizado hm <sup>3</sup> /año *	Objetivo PNRA 2015 hm <sup>3</sup> /año	% cumplimiento objetivo	Uso principal	Volumen por sector hm <sup>3</sup> /año
<b>Norte</b>	Miño-Sil	2	6	33,3	Urbano	5,8
	Cantábrico (Estado)	2	7	28,6	Urbano, Industrial	
	Cantábrico (CAPV)	1,8			Industrial	
	Galicia Costa	0				
<b>Central</b>	Ebro	14	11	<b>127,3</b>	Urbano, Agrícola	44,17
	Duero	0,04	3	1,3	Agrícola	
	Tajo	21	38	55,3	Urbano, recreativo	
	Guadiana	9,13	21	43,5	Urbano	
<b>Sector Mediterráneo</b>	Júcar	146	53	<b>275,5</b>	Agrícola, urbano	293,4
	Segura	74	90	<b>82,2</b>	Agrícola, urbano	
	Cuencas internas Cataluña	52			Ambiental	
	Cuencas mediterráneas Andaluzas	21			Urbano, recreativo	
	Ceuta y Melilla	0,4			Urbano	
<b>Sector Atlántico</b>	Guadalquivir	17,3	7	<b>104,3</b>	Agrícola, recreativo	27
	Guadalete, Barbate	9,7			Agrícola, recreativo	
	Tinto, Odiel, Piedras	0				
<b>Archipiélagos</b>	I. Baleares	24,5				119,5
	I. Canarias	95				
<b>TOTAL</b>		489,87	249	196,7		

**Tabla 2.** Estado de la reutilización en España por Demarcaciones Hidrográficas (Elaboración propia). Nota: los volúmenes aquí indicados proceden de la documentación relativa a los planes hidrológicos de cuenca, y no están todos referidos a 2014.

Comparándolos con los objetivos de reutilización para 2015 establecidos por el Plan Nacional de Reutilización, y teniendo en cuenta que dicho plan está aún en fase de borrador y que por tanto esos objetivos (ligados a una serie de inversiones) es muy probable que varíen, se observa como salvo el Ebro, Guadalquivir, Júcar y Segura el resto de demarcaciones no cumpliría con los objetivos marcados, habiendo, en el caso de las dos primeras demarcaciones mencionadas, superados significativamente este objetivo. Por último indicar que en el siguiente ciclo de planificación es importante seguir impulsando la reutilización para los diferentes usos.

En la Figura 2 se recogen las más de 322 instalaciones de reutilización (ERAR ó EDAR con reutilización) y el volumen objetivo de reutilización para el año 2015.



**Figura 2.** Instalaciones de reutilización y volumen de reutilización objetivo 2015 (Elaboración propia a partir del CEDEX, 2008 y la consulta a los PHC)

### 3. CASOS PRÁCTICOS

A continuación se exponen varios casos prácticos los usos actualmente mayoritarios (agrícola, ambiental y recreativo) y en potencial desarrollo e incremento (urbano e industrial).

En muchos de los ejemplos, la finalidad del uso del agua regenerada cumple múltiples propósitos, como el proyectado en el delta del Llobregat (Cataluña) para el año 2015 (Tabla 3; FAO, 2013). La planta de tratamiento de El Prat de Llobregat, con una generación de aguas residuales de alrededor de 120 hm<sup>3</sup>/año, es una de las más grandes no sólo de España sino de Europa, genera casi 45 hm<sup>3</sup>/año de aguas residuales tratadas que pueden utilizarse para suministrar el caudal ecológico de la parte inferior del río Llobregat, proporcionar agua para riego agrícola y para los humedales en las áreas del delta, e incluso crear una barrera hidráulica contra la intrusión de agua de mar.

	Planta de tratamiento El Prat de Llobregat hm <sup>3</sup> /año	Planta de tratamiento San Feliu de Llobregat hm <sup>3</sup> /año
Agricultura	11,83	7,32
Caudal del río	10,37	-
Humedales	6,31	-
Barrera para el agua de mar	0,91	-
Municipalidades	-	0,11
Recreación	-	0,37
Industria	5,48	-
<b>Total</b>	<b>34,9</b>	<b>7,47</b>

**Tabla 3.** Usos múltiples del agua regenerada en el delta del Llobregat para el año 2015 (FAO, 2013).

#### - **Uso agrícola**

##### Andalucía

En el Campo de Dalías (Almería) se encuentran tres EDAR importantes en los municipios de Adra, El Ejido y Roquetas de Mar, disponen de tratamiento terciario con ultrafiltración y ósmosis inversa. Conjuntamente vierten 26.000 m<sup>3</sup>/día al mar, que supone un total de 10 hm<sup>3</sup>/año. El proyecto de reutilización presentado en 2006 y que desde 2007 viene operando, pretende conseguir una liberación de los recursos del acuífero de Campo de Dalías (sobreeplotado y problemas de intrusión salina) y del embalse de Beninar. Fundamentalmente los destinatarios serían las comunidades de regantes de estas poblaciones. Minoritariamente también clubes de golf y ayuntamientos, disminuyendo volúmenes equivalentes de la dotación de agua dulce.

- **Uso ambiental**

En España algunos de los ejemplos más notables:

- La recuperación del Parque Natural de la Albufera de Valencia desde las EDAR de Pinedo, Sueca y Albufera Sur, con un caudal de 155 hm<sup>3</sup>/año. Similar a la recuperación de los humedales de l'Empordà (Girona).
- La recarga de acuíferos mediante inyección de agua regenerada en Cataluña, con una previsión de 42 hm<sup>3</sup>/año en 2015.
- El freno de la barrera de intrusión salina en el Llobregat (Barcelona) mediante un sistema con capacidad para producir 15.000 m<sup>3</sup>/día.

- **Uso recreativo**

Andalucía

En Estepona y Marbella, las EDAR de estos municipios tienen un efluente de 35.000 m<sup>3</sup>/día y 81.000 m<sup>3</sup>/día, respectivamente, que tratan mediante sistema secundario. La imperiosa necesidad de riego de campos de golf, parques recreativos y complejos deportivos, conlleva a su ampliación técnica mediante tratamiento terciario, de 65.000 m<sup>3</sup>/día en el caso de Estepona y 26.500 m<sup>3</sup>/día en Marbella. Esto permitiría liberar recursos de buena calidad procedentes del embalse de la Concepción y acuíferos de la zona. El aumento de la demanda urbana presionará a sucesivas ampliaciones de las EDAR en la costa andaluza y en concreto en la Costa del Sol Occidental.

Sucesivamente, las actuaciones de reutilización se repiten para la EDAR Cerro del Águila (Mijas, Málaga), EDAR Arroyo de la Miel (Benalmádena, Málaga), EDAR Peñón del Cuervo y EDAR de Guadalhorce (Málaga).

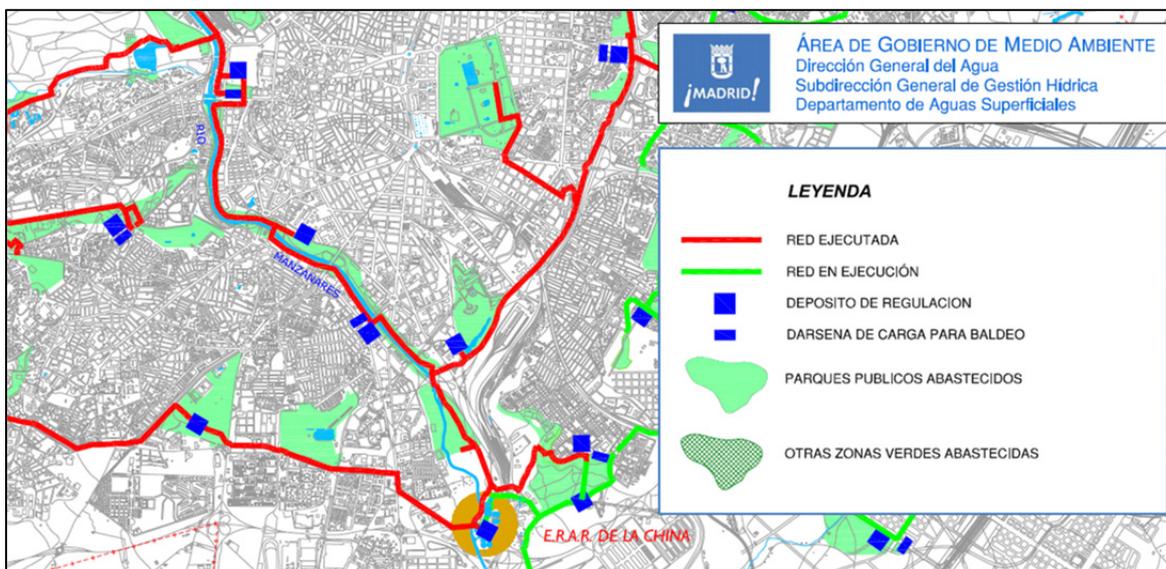
- **Uso urbano**

Madrid

A través del Canal de Isabel II, se realizó el Plan de Depuración y Reutilización del Agua en la Comunidad de Madrid (Plan Dpura, 2010), con la construcción de nuevas infraestructuras para la reutilización del agua procedente de EDAR y su uso posterior en zonas verdes públicas, baldeo de viales, limpieza de alcantarillado, entre otros. Lo que supuso un ahorro total aproximado de agua potable de 22,7 hm<sup>3</sup>/año; aprovechándose por ejemplo un 10% para el baldeo de calles. Sólo en la Red Sur Este se han utilizado 8,5 hm<sup>3</sup>/año, encabezando el uso urbano de la reutilización del agua en la capital madrileña (Figura 3), según los datos del Balance Hídrico del Plan.

El Retiro, parque del Oeste, Casa de Campo, Cuña Verde de Latina, Fuente del Berro o Enrique Tierno Galván son algunos de los parques que se riegan con agua reciclada. Según la Comunidad, con el uso de agua regenerada se ha podido llegar en agosto de

2014 a reservas de agua potable por encima del 76% (Noticia de Europa Press, 29/08/2014).



**Figura 3.** Estado de la red de distribución de agua regenerada del Ayuntamiento de Madrid. Ampliación de la Red Sur Este (Modificado a partir del Ayuntamiento de Madrid, 2011).

### Aragón

Destaca la eficiencia en depuración de Zaragoza (99% del agua residual). La ciudad ha conseguido ser la sede de la Oficina de Naciones Unidas para el decenio internacional “*El agua fuente de vida*” y ha sido nombrada European Green Capital 2016. Todos los vertidos son tratados mediante dos EDAR La Almozara (1989) con un caudal de 34.560 m<sup>3</sup>/día y La Cartuja (1993) con un caudal de 259.200 m<sup>3</sup>/día, es una EDAR única en España que realiza todos sus tratamientos totalmente cubierta reduciendo las emisiones a la atmósfera. Actualmente se están estudiando la reutilización de las aguas residuales para el riego y limpieza de calles como alternativa al uso de aguas de la capa freática.

#### - **Uso industrial**

El porcentaje de la reutilización de las aguas residuales regeneradas en usos industriales en España es muy bajo (ver Figura 1), según el PNRA en 2006 fue de 0,3% pero las perspectivas para 2021 es llegar al 21% de reutilización. Sin embargo existen casos ejemplares de reutilización:

### Madrid

La *Papelera Holmen Paper* (Fuenlabrada, Madrid), a partir de las aguas residuales de la EDAR del arroyo Culebro, ha conseguido, mediante un tratamiento avanzado realizado por DRACE, sustituir el 100% del agua procedente de la red de aguas potables del Canal

de Isabel II, lo que supone un ahorro superior a 4 hm<sup>3</sup>/año, consumo equivalente al de una población de 80.000 habitantes. La inversión realizada por la empresa ha sido de 10 M.€, lo que supone un coste de 2,5 €/m<sup>3</sup> de agua regenerada (Pernaute et al., 2012).

Además la calidad exigida por esta empresa para el agua regenerada tiene en cuenta los criterios establecidos tanto en el RD de reutilización (5 parámetros) como en el Real Decreto 140/2003 para aguas potables (15 parámetros) y otros 15 parámetros más (Tabla 3) lo que hace que los límites sean muy exigentes para una industria.

Tabla nº 1: Requisitos de calidad de agua producto		
Grupo I - Parámetros exigidos por el RD 1620/2007		
Parámetro	Unidades	Límites RD 1620/2007
Turbidez	UNF	1
Sólidos en suspensión	mg/L	5
<i>E. coli</i>	ufc/100mL	Ausencia
<i>Legionella spp.</i>	ufc/L	< 100
Nematodos Intestinales	Huevos/10L	1
Grupo II - Parámetros adicionales exigidos		
Parámetro	Unidades	Valores
Índice Langelier (LSI)		- 1,5 / +1,0
Nitrógeno Amoniacal	mg N/L	1
Fósforo (Ortofosfato)	mg P/L	0,2
Cloro Total	mg Cl <sub>2</sub> /L	0,3 - 3,0
Cloro Libre	mg Cl <sub>2</sub> /L	0,3 - 2,0
Conductividad	µS/cm	500
pH		6,5 - 8,5
Nitritos	mg N/L	0,5 (a)
Cloruros	mg Cl/l	50
Color	uds Pt-Co	30
Hierro	mg Fe/L	0,2 (a)
Recuento de colonias a 22 °C	ufc/1 mL	Sin cambios anómalos
Nitratos	mg N/L	5
Magnesio	mg Mg/L	15
Silice	mg Si/L	10
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	100
<i>Clostridium perfringens</i>	ufc/100 mL	Ausencia (a)
Coliformes totales	ufc/100 mL	Ausencia (a)
Enterococos	ufc/100mL	Ausencia (a)
Grupo III - Parámetros de seguimiento		
Parámetro	Unidades	Valores
Aluminio	mg Al/L	0,2 (a)
Antimonio	µg Sb/L	5 (a)
Arsénico	µg As/L	10 (a)
Boro	mg B/L	1 (a)
Cadmio	µg Cd/L	5 (a)
Cianuros	µg CNL	50 (a)
Cobre	µg Cu/L	2 (a)
Cromo	µg Cr/L	50 (a)
Fluoruros	mg F/L	1,5 (a)
Hidrocarburos Policíclicos (HPAs)	µg/L	0,1 (a)
Manganeso	mg Mn/L	0,06
Mercurio	µg Hg/L	1 (a)
Niquel	µg Ni/L	20 (a)
Pesticidas (organodorados y fosforados)	µg/L	0,5 (a)
Plomo	µg Pb/L	25 (a)
Sodio	mg Na/L	200 (a)
Trihalometanos (THMs)	µg/L	100 (a)

(a) Límites establecidos en el RD 140/2003 de calidad del agua potable

**Tabla 3.** Requisitos de calidad de agua producto de la Papelera Holmen Paper (Pernaute et al., 2012).

### Comunidad Valenciana

El proyecto PROSOCOM (IVACE, 2012), en el que participan los institutos tecnológicos ITC-AICE, AIMME, AINIA y AITEX ha puesto de relieve que las aguas procedentes de polígonos industriales monosectoriales pueden simplificar la gestión del agua residual e incrementar sus posibilidades de reciclaje, los resultados ponen de manifiesto que mediante un tratamiento terciario compuesto por un proceso físico-químico, filtros de arena y membranas de ultrafiltración se podrían reciclar altos porcentajes de agua depurada.

### Cataluña

En Tarragona se están reutilizando las aguas de las EDAR's de Vilaseca y Tarragona con un caudal de agua regenerada de 7 hm<sup>3</sup>/año se ampliará en dos fases hasta 20 hm<sup>3</sup>/año, para abastecer a las industrias del Polo Químico de Tarragona. Este caudal es apto para los sistemas de refrigeración de las industrias y permite sustituir al captado del río Ebro (InfoEnviro, 2013). El coste unitario total se ha calculado en 0,6515 €/m<sup>3</sup> (sin contar con los costes analíticos del RD 1620/2007) la calidad del agua reutilizada es de 34 microS/cm frente a la calidad actual CAT de 1054 microS/cm.

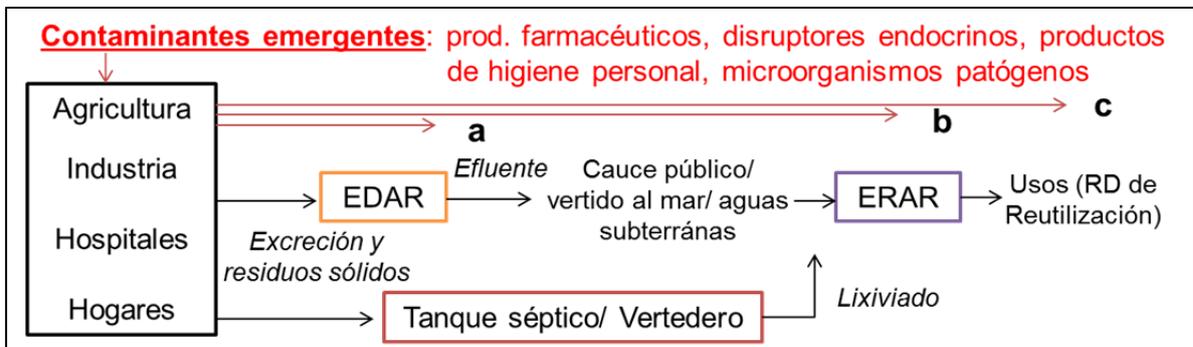
En Terrassa la EDAR Les-Fonts recibe un agua residual con 3500 microS/cm y el tratamiento terciario consigue llegar a 1200 microS/cm (Tabla 4; Cabrera y Seguí, 2010).. Es la 4º planta con mayor caudal en España de regeneración de aguas residuales y la primera en recibir un afluente con una salinidad superior a 2000 mg/l. Los costes de este tratamiento avanzado suponen 1,12 €/m<sup>3</sup> para una producción de 647.000 m<sup>3</sup>.

Parámetro	Unidad	Valor promedio	
		Afluente	Efluente
Materia en suspensión	mg/l	35	4
Turbiedad	UNT	15	2
DBO <sub>5</sub>	mg/l	25	7
DQO	mg/l	125	30
Conductividad	S/cm	3,500	1,200
Coliformes fecales	UFC/100 ml	10 <sup>7</sup>	< 10

**Tabla 4.** Valores promedio del afluente y efluente del tratamiento terciario avanzado de la EDAR de Terrassa Les-Fonts (Cabrera y Seguí, 2010)

#### 4. CONTAMINANTES EMERGENTES

Los productos que usamos en nuestra vida diaria, ya sea productos de higiene personal o medicamentos, alcanzan en parte el flujo de aguas residuales (Figura 4), puesto que no toda su concentración se absorbe por el organismo, o bien cumplen su función (gel, champú, desodorante, cosméticos...) y son arrastrados tras el lavado, con lo cual llegan al cómputo de contaminantes en el agua residual urbana. Sin embargo, no solo los hogares sino también los hospitales son fuente importante de la entrada de contaminantes emergentes en el sistema de saneamiento. Por otro lado, la agricultura de regadío afecta significativamente por el uso de pesticidas que posteriormente son lavados del suelo por escorrentía, con alta carga residual. En el caso de la ganadería, por la asistencia veterinaria con medicamentos en gran cantidad; no solo es fuente potencial de contaminación de las aguas superficiales sino también de las aguas subterráneas.



**Figura 4.** Rutas de exposición y eliminación de los contaminantes emergentes: a) en EDAR, b) en ERAR, c) concentración residual que supera los niveles anteriores, persiste en el medioambiente y es susceptible de reincorporarse en algún uso de reutilización. (Elaboración propia).

Durante las últimas dos décadas, se está generando gran preocupación por la cantidad de contaminantes orgánicos emergentes que han sido o están siendo identificados y cuantificados en el medio ambiente por su continuo *input* en el medioambiente. Esto también ha sido posible gracias al progreso tecnológico en relación con los métodos analíticos cromatográficos, que permiten la identificación y cuantificación del compuesto en valores menores al nivel de 1 ng/L.

La materia orgánica remanente de los efluentes tras el tratamiento convencional contiene muchos compuestos xenobióticos orgánicos y recalcitrantes, incluyendo compuestos disruptores endocrinos, antibióticos, y otros (Fatta-Kassinos y Michael, 2013) que alteran gravemente el ecosistema acuático (Hernando et al., 2006).

El efluente final de una EDAR contiene aún una gran variedad de contaminantes convencionales y específicos o emergentes, en amplios rangos de concentración. En España, la mayor ocurrencia de contaminantes emergentes en efluentes secundarios son los siguientes (Pérez et al., 2010; Carballa et al., 2004; Hijosa-Valsero, M., 2010):

ketoprofeno, naproxeno, ibuprofeno, diclofenaco, iopromida, carbamazepina, ácido salicílico, sulfometoxazol, ciprofloxacino, estrona, 17 $\beta$ -estradiol, cafeína, galaxolida, tonalida. Agrupados por familias, según Pérez et al. (2010) el cálculo de concentraciones en masa para el caso del río Llobregat, tendrían el orden siguiente: Productos farmacéuticos > alkylfenoles (detergentes) > pesticidas > drogas ilícitas >> estrógenos.

En el estudio de Gómez et al. (2007) de la EDAR de Málaga con vertido directo al mar (próxima a una importante área turística y agrícola, así como un hospital que vierte aguas residuales sin tratar a la red de saneamiento) se monitorizaron durante un año la concentración de algunos contaminantes emergentes (Tabla 5).

Compuesto	Influyente ( $\mu\text{g/l}$ )		Efluyente ( $\mu\text{g/l}$ )		Tasa de Eliminación (%)	Tipo
	Rango	Media	Rango	Media		
Ibuprofeno	34–168	84	0.24–28	7.1	92	Fármaco (antiinflamatorio, antipirético)
Paracetamol	29–246	134	<LOD–4.3	0.22	100	Fármaco (analgésico)
Cafeína	52–192	118	1.4–44	12	90	Alcaloide estimulante
1,7-Dimetilxantina	48–111	79	0.60–50	18	77	Compuesto derivado de la Cafeína
DCDD	<LOD–4.3	0.7	<LOD–1.2	0.2	71	Compuesto derivado del Triclosan
Dipirona	4.7–24	14	2.4–7.5	4.9	65	Fármaco (analgésico, antipirético)
Clorfenvinfos	<LOD–3.7	0.9	<LOD–1.0	0.3	67	Plaguicida de uso veterinario animal
Triclosan	0.39–4.2	1.8	0.08–0.40	0.2	89	Cosmético (antibacteriano, desinfectante)
Diclofenaco	0.2–3.6	1.5	0.14–2.2	0.9	40	Fármaco (analgésico y antiinflamatorio)
Bisfenol A	0.72–3.4	1.4	0.14–0.98	0.38	73	Aditivos plásticos
Carbamazepina	0.12–0.31	0.15	0.11–0.23	0.13	13	Fármaco (anticonvulsivo)
Codeína	2.8–11	5.2	0.9–8.1	3.7	29	Fármaco (analgésico) y droga (narcótico)
Permetrina	<LOD–0.3	0.12	<LOD–0.08	0.04	67	Insecticida (acaricida) de higiene personal

**Tabla 5.** Contaminantes emergentes presentes en la entrada y salida de una EDAR de Málaga (Modificado a partir de Gómez et al., 2007).

La tasa de eliminación (calculada sobre la media) indica que muchos de los compuestos tuvieron altas tasas de eliminación (>80%). Destacan por la carga del influente de ibuprofeno y paracetamol, que se consideran unos de los fármacos residuales más comunes en aguas superficiales.

Sin embargo, los contaminantes emergentes no sólo engloban los productos farmacéuticos y sus metabolitos derivados, hormonas, productos tóxicos no biodegradables, productos de higiene personal, sino también microorganismos patógenos como enterovirus, *Cryptosporium* y *Giardia*, que son muy resistentes a los procesos de desinfección tradicionales (cloración, ozonización). Estos dos últimos patógenos no tienen recogidas recomendaciones en el RD de Reutilización, OMS Guidelines (2006) y USEPA Guidelines (2004). Además, entre otros microorganismos emergentes, la EPA identificó en la “Contaminant Candidate List 2” en 2005, a varias bacterias (*Aeromonas hydrophilia*, *Helicobacter pylori*, *Mycobacterium avium intracellulare*), virus (*Calicivirus*, *Adenovirus*, *Coxsackievirus*, *Echovirus*) y protozoos (*Microsporidia*).

En la Unión Europea, la responsabilidad de la gestión de los riesgos químicos recae en la industria a través del Reglamento REACH, el cual tendrá total efecto en 2018. Por otro lado la regulación a través de la Directiva de Sustancias Prioritarias (Directiva 2013/39/UE que modifica la anterior Directiva 2008/105/CE y la Directiva 2000/60/CE), transpuesta a legislación española por el Real Decreto 60/2012, de 21 de enero, sobre las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas, limita la concentración de las sustancias contaminantes en masas de aguas superficiales y subterráneas bajo la Directiva Marco del Agua, con el objetivo de proteger la salud ecológica y las fuentes de agua potable. Como parte de las actividades de monitorización en toda la UE a partir de la DMA, en 2011 se propuso realizar una lista control de contaminantes emergentes y en 2013 fueron incluidos 15 de ellos (Clayton, H., 2011; Chatain, B., 2013).

Actualmente, la base de datos armonizada en Europa llamada “Norman Network” ([www.norman-network.net](http://www.norman-network.net)) recopila no solo los contaminantes emergentes sino sus técnicas de detección y monitorización, además de forma georreferenciada. Según esta base de datos, los contaminantes emergentes (CEs) se definen como “*una sustancia actualmente no incluida en programas de monitorización medioambiental rutinarios y que debe ser objeto de futura legislación dado sus probados efectos adversos y/o persistencia*”. Además define una sustancia emergente como “*una sustancia que ha sido detectada en el medioambiente, pero que actualmente no está incluida en programas de monitorización rutinarios y cuyo destino, comportamiento y efecto (eco)toxicológico no es lo suficientemente conocido*”.

Por otro lado, no solo preocupa el efecto tóxico individual sino cuando actúa en sinergia y su toxicidad se magnifica al combinarse con otros contaminantes. En el contexto normativo, la Directiva IPPC 96/61/EEC exige el desarrollo de tecnología y gestión para minimizar la contaminación a través de sistemas de reciclado del agua. Además, a partir

de la Directiva Marco del Agua se deben adoptar medidas específicas contra la contaminación del agua por contaminantes, individualmente o por grupos, que presenten un riesgo significativo en el medio acuático (Fatta-Kassinos y Michael, 2013).

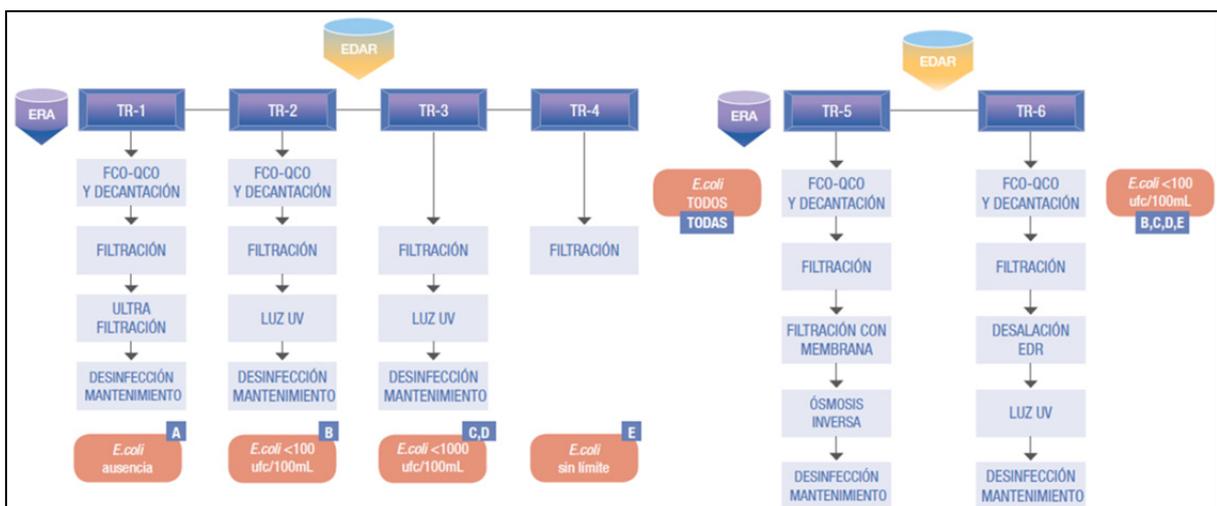
La reutilización de aguas residuales tratadas para irrigación en agricultura no está exenta de algunos riesgos derivados de la aplicación indeseada de CE en el medioambiente y los cultivos. De hecho, no está claro si existe un efecto negativo de algunos fármacos antimicrobianos en la simbiosis planta-microorganismo (Chander et al., 2005) aunque sí tienen un efecto directo en la microbiota natural y en la formación de cepas resistentes (Gao y Pedersen, 2005)

### Tratamientos de eliminación

Los tratamientos de depuración de las EDAR están basados en su mayoría en un proceso de tres etapas consistentes en: sedimentación primaria, reactor biológico (donde ocurren los procesos microbiológicos) y tratamiento terciario (Figura 5).

Entre las tecnologías de tratamiento terciario de aguas residuales para obtención de aguas regeneradas se utilizan los siguientes procesos y unidades:

- 1) Sistema físico-químico y decantación (en línea, convencional o avanzado) con procesos de adsorción (Carbón Activo) y coagulación-floculación (Fangos Activos)
- 2) Filtración (arena, anillas, membranas o tamiz), y sistemas de microfiltración por membranas (ultra-filtración y ósmosis inversa).
- 3) Air-stripping (intercambio de fase en el contaminante)
- 4) Sistema biológico (MBR) o degradación biológica
- 5) Desinfección (cloración, ozonización, UV) ó Procesos Avanzados de Oxidación



**Figura 5.** Tratamientos de regeneración sin desalación (TR-1-2-3-4) y con desalación (TR-5-6) propuestos (MAGRAMA, 2010).

El rendimiento del proceso de stripping es bajísimo en comparación con la degradación biológica por biotransformación del contaminante, en parte porque generalmente tienen una baja volatilidad (Suarez et al., 2010).

Los procesos de sorción y formación de flóculos favorecen la eliminación por sedimentación primaria y secundaria, respectivamente (Donner et al., 2010), sin embargo aunque para algunos CE's como hormonas o antiinflamatorios sea efectivo; para otros como antibióticos, diazepaminas etc., este proceso no es funcional.

Los procesos de desinfección para eliminación de contaminantes biológicos patógenos y de contaminantes químicos emergentes remanentes tras la depuración biológica, deben ser los que apliquen procesos avanzados (i.e.: procesos fotocatalíticos)

En la literatura científica está bastante extendido que los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs) son bastante eficaces para la mayoría de contaminantes y entre los que destacan muchos contaminantes emergentes. Los PAOs a su vez pueden englobar procesos no fotoquímicos (ozonización, procesos Fenton, oxidación electroquímica, radiólisis gamma, plasma no térmico, descarga electrohidráulica-ultrasonido) y procesos fotoquímicos (oxidación en agua sub/y supercrítica, procesos fotoquímicos, fotólisis del agua en UVV, UV/Peróxido de Hidrógeno, UV/Ozono, Foto-Fenton, fotocátalisis heterogénea).

En la Tabla 6 se han resumido los principales tratamientos y eficiencia media de eliminación.

<b>Tecnologías de tratamiento</b>	<b>Eficiencia media de eliminación (%)</b>	<b>Observaciones</b>
Fangos Activos (FA)	70 % (EPA, 2010)	Sistema convencional que no puede dar respuesta únicamente
Carbón Activo (CA)	60 % (EPA, 2010)	No forma productos tóxicos intermediarios y es menos caro que PAOs y membranas. Sin embargo con alto coste de regeneración tras su uso.
Desinfección por Cloro	65 % (EPA, 2010)	Depende mucho del contaminante emergente
Desinfección por UV	76 % (EPA, 2010)	
Desinfección por Ozono	88 % (EPA, 2010)	
Ósmosis Inversa	95 % (EPA, 2010)	Efectivo en la eliminación de aguas con múltiples contaminantes pero en bajas concentraciones.
PAOs como la fotocatalisis (TiO <sub>2</sub> )	90 % (Liang et al, 2013)	Efectivo con microcontaminantes pero se pueden formar compuestos tóxicos intermediarios si no se opera correctamente
MBR ó Biorreactores de membrana	>90 % contaminantes orgánicos (Trinh et al, 2012) 24-68 % prod. farmacéuticos (Trinh et al, 2012) 52-95 % prod. cuidado personal (Forrez et al, 2011) ↑ microorganismos patógenos (Radjenovic et al., 2007)	Altos costes de operación que reducen su uso a macro escala pero importante para suplir las limitaciones de los Fangos Activos

**Tabla 6.** Tecnologías de tratamiento y porcentaje de eliminación de contaminantes emergentes (Elaboración propia).

## 5. VIABILIDAD ECONÓMICA

En España no existe un mercado del agua regenerada, por lo que asignar un precio se vuelve arriesgado sin contar con la viabilidad técnica de cada proyecto en concreto. Actualmente la obtención de un proyecto viable no puede pagar su coste únicamente de subvenciones europeas, nacionales o inversiones de compañías privadas; que son escasas y temporales, sino que debe adoptarse una cultura del agua que favorezca el ahorro y reducción de la huella hídrica sin desatender la calidad final del agua producto.

En general el coste medio del agua depurada para reutilización en España asciende a 0,39 €/m<sup>3</sup>, más 0,26 €/m<sup>3</sup> si precisa de tratamiento de ósmosis para su reutilización, a este coste habría que sumar los costes de transporte y distribución así como de explotación y mantenimiento (Melgarejo, J., 2009). Este coste sigue siendo alto comparado con el precio del agua para uso agrícola (0,006 y 0,012 €/m<sup>3</sup>) mientras que para abastecimiento urbano (0,92 €/m<sup>3</sup>) sumado al coste de saneamiento (incluyendo tratamiento terciario: 0,67 €/m<sup>3</sup>) hace que el ciudadano español pague, de media, 1,60 €/m<sup>3</sup> (tarifa sin el coste de servicio del agua urbana). En cuanto al precio medio para el ciclo integral del uso industrial es de 2,07 €/m<sup>3</sup>. Las diferencias entre áreas geográficas ocurren por factores de disponibilidad, calidad, proximidad de los recursos hídricos, procesos, técnicas y costes necesarios para la potabilización, depuración del agua y cánones autonómicos (AEAS-AGA, 2013).

Finalmente, el artículo 9 de la DMA aboga por la recuperación total de los costes y, en consecuencia, por la supresión de las subvenciones, lo que supone asumir plenamente el principio de “quien contamina paga” y análogamente “quien consume el agua paga”. En el Plan Nacional de Calidad de las Aguas estaba previsto niveles de inversión, hasta el año 2015, de más de 19.000 M €. Para esta recuperación de costes se está llevando a cabo la revisión tarifaria del agua dados los costes anteriormente explicados. Si el ciudadano español se equiparara con la media europea, la tarifa ascendería casi un 60% en el abastecimiento y un 100% en la depuración, lo que podría suponer una recaudación de 3.600 M € anuales (Martínez et al., 2010), que permitiría financiar infraestructuras como las de reutilización, hasta cubrir mejores expectativas de futuro en el Ciclo Integral del Agua. La oportunidad del sector podría ampliarse con la Colaboración Público Privada, aunque por el momento los casos prácticos reales sólo se centran en el abastecimiento, saneamiento y depuración, en los que el Estado concede la explotación de la infraestructura que acomete el sector privado por un largo periodo de tiempo (15-30 años), rentabilizándose la inversión a través del servicio de pago por demanda o pago por disponibilidad.

## 6. CONCLUSIONES

- Todas las demarcaciones hidrográficas incorporan como recurso no convencional la reutilización de aguas residuales. En este sentido las demarcaciones del Júcar y Segura son las que mayor volumen reutilizan. Por sectores se destaca el arco mediterráneo y los archipiélagos como las zonas donde se realiza mayor reutilización localizándose en las zonas de costa. El uso mayoritario es primero el agrícola, luego ambiental, recreativo, urbano e industrial y lo previsto para 2021 es que aumente al tercer puesto el industrial y detrás el urbano siendo el recreativo el último.
- Los planes hidrológicos han establecido objetivos de incremento en el volumen de reutilización para el segundo ciclo de planificación 2015-2021.
- El uso industrial debería desarrollarse y potenciarse ante los demás usos porque permitiría liberar un recurso de fuentes convencionales (masas de agua subterráneas y/o superficiales) y además en muchos casos no requeriría de una fuerte inversión en el caso de depuradoras próximas a polígonos industriales. En este sentido cabe destacar el ejemplo de la papelera Holmen-Paper en Madrid que utiliza agua regenerada de extraordinaria calidad para sus procesos productivos, lo que podría trasladarse a otros muchos sectores industriales.
- Los contaminantes emergentes no sólo engloban productos farmacéuticos y sus metabolitos sino también microorganismos patógenos como enterovirus, *Cryptosporium* y *Giardia*, que son muy resistentes a los procesos de desinfección tradicionales. Estos dos últimos patógenos no tienen recogidas recomendaciones en el RD de Reutilización, OMS Guidelines (2006) y USEPA Guidelines (2004). Además la EPA identificó, en 2005 entre los microorganismos emergentes, varias bacterias (*Aeromonas hydrophilia*, *Helicobacter pylori*, *Mycobacterium avium intracellulare*), virus (*Calicivirus*, *Adenovirus*, *Coxsackievirus*, *Echovirus*) y protozoos (*Microsporidia*). Todos estos microorganismos deberían ser contemplados con detenimiento en una nueva legislación sobre reutilización de aguas residuales e incluso productos residuales como el compost.
- El efluente final de una EDAR contiene aún una gran variedad de contaminantes convencionales y específicos o emergentes, en amplios rangos de concentración. Se ha comprobado que los PAOs (i.e.: fotocátalisis  $TiO_2$ ) son bastante eficaces en la eliminación de la mayoría de ellos.
- La reutilización de aguas residuales regeneradas para el riego agrícola no está exenta de algunos riesgos derivados de la aplicación indeseada de CEs en el medioambiente y los cultivos, se hace urgente realizar estudios sobre el efecto negativo de algunos fármacos antimicrobianos en la simbiosis planta-microorganismo y las repercusiones en la microbiota natural y en la formación de cepas resistentes como ya han puesto de manifiesto algunas investigaciones.

- El Plan Nacional de Calidad de las Aguas tiene previsto una inversión, hasta el año 2015, de más de 19.000 M €. Para la recuperación de costes se está revisando la tarifa del agua si el ciudadano español se equipara con la media europea, la tarifa ascendería casi un 60% en el abastecimiento y un 100% en la depuración, lo que podría suponer una recaudación de 3.600 M € anuales.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

AEAS-AGA. 2013. Estudio de Tarifas 2012.

Ayto. de Madrid. 2010. Plan Dpura. Balance Hídrico del Plan. Reutilización de Aguas Residuales: <http://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Ayuntamiento/Medio-Ambiente/Agua/Balance-hidrico-del-Plan>

Ayto de Zaragoza. 2012. European Green Capital 2016: Gestión de las Aguas Residuales. Cap. 9. <http://www.zaragoza.es/ciudad/medioambiente/>

Barceló, D., Petrovic, M. (Eds). 2011. Waste Water Treatment and Reuse in the Mediterranean Region. Vol. 14. In The Handbook of Environmental Chemistry.

Blanco A., Ordóñez, R., Hermosilla, D., San Pío., I., y Rodríguez., L. 2009. 100% Reutilización de agua para fabricar 100% papel recuperado. Holmen Paper. Revista InfoENVIRO.

Cabrera, L., y Seguí, L. 2010. Terciario más desalación de la EDAR de Terrasa-Les Fonts. Retos de la reutilización planificada. Congreso ICITEMA.

CEDEX. 2008. Realización de una base de datos sobre los sistemas de reutilización de aguas depuradas en España, Madrid.

CEDEX. 2012. Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua.

Chatain, B. 2013. Surface waters: 12 new controlled chemicals, three pharmaceuticals on watch list. European Parliament Press Service, 7 February.

Clayton, H. 2011. Emerging contaminants and the water framework directive. European Commission, DG Environment, Unit D1 – Water. EEA Workshop on emerging contaminants in European Waters, Copenhagen, 5–6 December.

Consulta de los Planes Hidrológicos (recientemente aprobados): <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-cuenca/>

Consulta del borrador del Plan Nacional de Reutilización (PNRA): <http://www.magrama.gob.es/es/agua/participacion-publica/pnra.aspx>

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 diciembre de 2008, relativa a las normas de calidad ambiental (NCA) en el ámbito de la política de aguas.

Europa Press. Noticia de prensa 29/08/2014: <http://www.europapress.es/madrid/noticia-comunidad-ya-riega-agua-reciclada-zonas-verdes-equivalentes-2000-campos-futbol-20140829143738.html>

FAO. 2013. Reutilización del agua en la agricultura ¿Beneficios para todos?. Informe sobre temas hídricos de la FAO.

Forrez I, Carballa M, Fink G, Wick A, Hennebel T, Vanhaecke L, Ternes T, Boon N, Verstraete W. 2011. Biogenic metals for the oxidative and reductive removal of pharmaceuticals, biocides and iodinated contrast media in a polishing membrane bioreactor. *Water Res* 45 (4):1763–1773

Gómez, M.J., Martínez Bueno, M.J., Lacorte, S., Fernández-Alba, A.R. Agüera, A. 2007. Pilot survey monitoring pharmaceuticals and related compounds in a sewage treatment plant located on the Mediterranean coast. *Chemosphere*, Volume 66, Issue 6, pp. 993-1.002

Hernando, M.D., Mezcuca, M., Fernández-Alba, A.R., Barceló, D. 2006. Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments. *Talanta*, 69, pp. 334–342.

IVACE. 2012. Proyecto PROSOCOM: Diseño y promoción de soluciones ambientales para el impulso de procesos industriales sostenibles y competitivos en la Comunidad Valenciana. <http://aitex.es/es/noticias/noticias-textiles/proyectosdestacados/1282-nueva-metodologia-para-el-reciclaje-de-aguas-residuales-en-poligonos-industriales>

Liang R, Hu AM, Li WJ, Zhou YN. 2013. Enhanced degradation of persistent pharmaceuticals found in wastewater treatment effluents using TiO<sub>2</sub> nanobelt photocatalysts. *J Nanopart Res* 15 (10). doi:10.1007/S11051-013-1990-X

MAGRAMA (antiguo MIMAM). 2005. Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. 840 pp.

MAGRAMA. 2010. Guía para la Aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas.

Martínez, A., Albiol, C., Masana, J. 2009. La financiación del ciclo del Agua en España. Problemática y retos de futuro. *Presupuesto y Gasto Público* 57/2009: 51-75.

Norman Network. Base de datos europea de contaminantes emergentes: [www.norman-network.net](http://www.norman-network.net)

Pernaute, C., Suárez, J., Ontañón, N. 2012. Reportaje: Tratamiento Terciario Avanzado. EDAR de la Cuenca Media-Alta del Arroyo-Culebro (Madrid). *Revista RETEMA*.

Puig, A. 2012. Reutilización de las Aguas Residuales. Exposición “*Entre ríos anda el juego*”.

Real Decreto 1620/2007, por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas.

Real Decreto 60/2011, de 21 de enero, sobre las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas.

Revista InfoENVIRO. 2013. Reportaje: Estación Regeneradora de Aguas de Camp de Tarragona. <http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/files/1/7453,ERA-Camp-de-Tarragona.pdf>

Trinh T, van den Akker B, Stuetz RM, Coleman HM, Le-Clech P, Khan SJ (2012) Removal of trace organic chemical contaminants by a membrane bioreactor. *Water Sci Technol* 66 (9):1856–1863

United States Environmental Protection Agency (2010) Treating contaminants of emerging concern: a literature review database. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC