

## LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN ESPAÑA: EJEMPLOS DE APLICACIÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO CONSOLIDER-TRAGUA

### TREATED URBAN WASTEWATER REUSE IN SPAIN: THE CONSOLIDER-TRAGUA PROJECT CASE STUDY EXAMPLES

De Bustamante, I.<sup>1</sup>, Cabrera, M.C.<sup>2</sup>, Candela, L.<sup>3</sup>, Lillo, J.<sup>4</sup> y Palacios, MP.<sup>5</sup>

#### Resumen

La reutilización de aguas depuradas en España se realiza desde hace décadas, siendo uno de los países en los que esta práctica está más extendida. Sin embargo, no se llega a reutilizar más del 5% del total de las aguas residuales recogidas, aunque en algunos casos, como en Canarias, el agua depurada ha llegado a suponer un 20% del agua consumida. En este artículo se presentan tres ejemplos de reutilización de aguas depuradas con una importante incidencia en los aspectos ambientales y asociados a condiciones hídricas diversas. Los estudios se están llevando a cabo dentro del Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA cuyo objetivo es abordar de manera integrada los aspectos implicados en la reutilización de aguas residuales procedentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. Las zonas seleccionadas para los estudios de campo se sitúan en Andalucía donde el agua regenerada se aplica a filtros verdes y riego de cultivos para la obtención de biodiesel; Canarias para riego de campos de Golf y Cataluña donde el agua es inyectada para generar una barrera hidráulica contra la intrusión marina del acuífero. En los tres casos estudiados se incide en los aspectos suelo-agua-planta y sus impactos en el medio.

**Palabras clave:** Reutilización, Aguas regeneradas, Zona no saturada, España

#### Abstract

The treatment of urban waste water is imperative to prevent environmental pollution. Reuse of treated waste waters for irrigation or aquifer recharge allows the partial recovery of the treatment costs. Moreover, the reuse emerges as an alternative water resource in arid and semi-arid areas. However, the effects of those applications in the soil-plant system, water systems and aquifers remains very little known. Those effects depend on the receptor system features, and for this reason they must be identified and well defined prior the reuse of the treated waste water in order to know the environmental response. The aim of this paper is to show the work regarding the reuse of waste waters from urban treatment plants that is nowadays carried out in three different scenarios (Canarias, Catalonia and Sevilla). The comparison and discussion of results involving the establishment of a common methodology is foreseen.

Even if Spain is one of the European countries where more waste water is reused, the amount of reused water is still very little significant, taking into account that the reuse potential is around 10 times over the actual level (Hochstrat et al., 2005). Recent legislation (Real Decreto 1620/2007, BOE 2007) transposes the water framework European directive (Directive 2000/60/EC) and incorporates the concept and definition of reclaimed (regenerada) water.

In the framework of the CONSOLIDER\_TRAGUA Research Program, several aspects involved in the urban waste water reuse are considered from an integrated approach (Gómez et al., 2009). Among those aspects, it is included the assessment of the effects of that reuse in the physical environment. Three cases are investigated, considering their differences in geography, hydrology, and reuse technologies: a) the hydraulic barrier against the saline intrusion in the Llobregat Delta (Barcelona, Catalonia), b) the irrigation of the golf course of Bandama (Gran Canaria, Canary Islands), and c) the land application (green filter) in Carrión de los Céspedes (Sevilla).

In the Llobregat Delta, a control of a saline intrusion is exerted by the installation of a positive hydraulic barrier by injection of treated wastewater derived from the treatment plant of Depurbaix that started in 2007 (Cazurra, 2008). The injected waste water is from the tertiary stage and it has undergone an additional treatment consisting of ultrafiltration, inverse osmosis, and ultraviolet disinfection. As a complement to the conventional water analyses (physicochemical parameters, major ions), 170 emerging compounds are being monitored, including pharmaceuticals (antibiotics, drugs), personal care products, pesticides/herbicides, steroids and hormones, gasoline additives, antiseptics, etc. The monitoring of those compounds is essential because not all of them are eliminated during the treatment. Bimonthly sampling surveys are being carried out in the influent and effluent of the treatment plant, and in the wells from the local (at 1 km distance) and regional network (more than 2.5 km distant from the injection wells). The first results show that not all compounds detected in the

<sup>1</sup> Dpto. de Geología. Universidad de Alcalá de Henares. Tf: +34918854921, irene.bustamante@uah.esr

<sup>2</sup> Dpto. de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España. Tf: +3428454478, mcabrera@dfis.ulpgc.esr

<sup>3</sup> Dpto. de Ingeniería del Terreno. Universidad. Politécnica de Cataluña. España. Tf: +34934076868, lucila.candela@upc.edu

<sup>4</sup> Dpto. de Biología y Geología, Universidad Rey Juan Carlos. Tf +34914887016, javier.lillo@urjc.es

<sup>5</sup> Dpto. de Producción animal. Universidad. de Las Palmas de Gran Canaria. España. Tf: +3428454353, mpalacios@dpat.ulpgc.es

Artículo enviado el 04 de noviembre de 2009

Artículo aceptado el 22 de enero de 2010

influent were eliminated in the tertiary treatment. However, under the additional treatment most of them are removed, and only 11 remain with a concentration above 0.1 µg/L (Teijón et al., 2008). The data from the sampling surveys carried out in the wells of the local network during 2007 and 2008 point out the presence of up to 26 out of the 170 analyzed compounds in the groundwater prior to the injection. Caffeine, Gemfibrozil, Hydrochlorotiazine and Iopromide occur in with a concentration above 0.5µg/L. Iopromide is related to the natural recharge of the aquifer, as this compound is not detected in the treated waste water.

The research in the golf course of Bandama is focused in the processes affecting to the water applied to the soil and the vadose zone, from the start of the water infiltration up to its arrival to the aquifer. The golf course has an extension of 14.5 ha, being irrigated with treated waste water by a spraying system since 1976. A desalination method is being applied to reduce the water salinity since 2002. Irrigation frequencies are variable, depending of the year's season, reaching up to a maximum of 7 mm/day. The irrigated specie is Kikuyu (*Pennisetum clandestinum*), a C4 grass well adapted to warm and saline environments. The rocks in the area constitute the volcanic cone and caldera of Bandama, and they consist of basaltic lavas and pyroclastics deposits of 2000 years in age. These rocks are overlaying older basaltic and fonolitic rocks (up to 13 Ma) with intercalated alluvial conglomerates, that are outcropping in the caldera. The Gran Canaria island is considered as a unique aquifer with a piezometric domo-like surface (Custodio y Cabrera, 2008), that in the area of the golf course is located at 250 m of depth. The uppermost part of the vadose zone is constituted by a soil 0.5-1 m thick, but the water preferentially flows through fractures in the rest of the vadose zone, and in lesser extension through porosity. The study of the soil has been based on unaltered samples. Two different types of soils have been identified, with different behavior regarding water infiltration and ion mobility and biological activity (Palacios et al., 2009). To collect samples of the water in soil, a lysimeter has been installed in situ at 60 cm depth. In addition, sampling surveys are carried out in a gallery (El Culatón) located 50 m beneath the golf course, to get representative samples of the water that flowing through the vadose zone is reaching the aquifer. Nowadays, a periodic sampling of the irrigation, lysimeter, gallery and selected wells waters is being carried out. Analyses of water included physicochemical parameters, major ions, heavy metals and selected emerging compounds determinations, including nicotine, methamizol, paraxanthine, ibuprofen, cafeine, fluoxetine, and permethrine. The water samples from the lysimeter show that there is a noticeable increment in Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y B, derived from a high soil lixiviation. The composition of the water samples from the gallery points out that it may be draining a perched aquifer affected by the irrigation (Cabrera et al., 2009). Regarding the emerging pollutants, nicotine and caffeine are detected in the most of the analyzed samples, being the rest of compounds in variable amounts (ng/L).

In Carrión de los Céspedes, a new green filter has been designed for water reuse, biomass production and aquifer recharge. The design basis is the control of the conditions in order to identify the effects of the green filter. Four plots of ground have been prepared for the crops, two as blank parcels to be irrigated with clean water (from a well); and the other two to be irrigated with treated waste water. Two species have been selected to perform the study: *Jatropha curcas* L. y *Paulownia tomentosa*. The quality of the applied water fits those requirements established by the 1.a Annex of the R.D. 1620/2007. The study of the soil and materials underlying was based on geophysical (Electric Resistivity Tomography, Lillo et al., 2009) and geological (drill core sampling and outcrops study) methods. Three lithological units have been identified beneath an organic-rich agricultural soil: a) the uppermost unit is composed of fine to very fine sands (plagioclase, quartz, illite, kaolinite, calcite, and minor halite) with low water content, displaying a variable thickness (0-2 m); b) the main unit is formed by clayey silts (plagioclase, quartz, illite, montmorillonite, kaolinite, calcite, and minor halite), displaying a thickness over 10 m, with frequent carbonate nodules and paleosol structures; c) the lowermost unit, the regionally so-called "blue marls unit", a non-permeable unit that is considered the lower limit of the aquifers.

Nine 3-piezometer nests were installed reaching depths of 2, 6 and 10 m. Textural, mineralogical, physicochemical analyses, water content and density were determined in samples from the drill cores. After the installation of piezometers, and prior to start the irrigation, a sampling survey was carried out to obtain the base line composition of ground water. Analyses of water included physicochemical parameters and major ions, coliforms and helminth eggs and emerging pollutants. The compositional data show high mineralized waters with high concentrations of Cl<sup>-</sup> and Na<sup>+</sup>. Thus, most of the samples correspond to Cl-Na waters, with some variations to Cl-Na-Mg, and Cl-Na-Ca. No pollution has been detected from the ammonia, organic carbon or nitrate data. Regarding the emerging pollutants, nicotine, paraxanthine, caffeine and cotinine have been detected, probably related to regional flows of ground water.

**Key words:** Reuse, reclaimed water, vadose zone, Spain.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de depurar los efluentes, en especial los de origen urbano, producidos como consecuencia de la actividad humana para evitar la contaminación ambiental es un hecho incuestionable. Además, la reutilización de las aguas depuradas para usos diversos, como el regadío o la recarga artificial de acuíferos, permite la recuperación parcial de los costes derivados del proceso de depuración y especialmente en las zonas áridas y semiáridas proporciona

un recurso de agua alternativo. Por ello, la reutilización es una práctica cada vez más extendida.

Si bien desde finales del siglo XX el agua procedente de depuradora ha sido utilizada para diversos fines, se ha producido un incremento generalizado en los últimos años (Levine y Asano, 2004, Durham et al, 2005; Hochstrat et al., 2005). Los usos derivados de su aplicación pueden ser diversos y abarcan desde los menos restrictivos (p.e riego de bosques) hasta los más exigentes (riego de productos agrícolas para

su consumo en fresco), siempre y cuando se consigan unos criterios de calidad del agua mínimos para que su utilización sea segura. Posiblemente, el uso más extendido sea en la agricultura, por la existencia de numerosas ventajas derivadas del enriquecimiento en nutrientes, implicaciones socio-económicas, reducción de la dosis de aplicación de abonos y posibilidad de gestionar los efluentes de una forma más efectiva (Candela et al., 2007).

A partir de los años 70, surge el concepto de aguas depuradas (reclaimed, newater, regeneradas, etc.) en numerosos países (Israel, EEUU, España, entre otros), aplicable a las aguas depuradas cuya calidad las hace susceptibles de ser reutilizadas, aunque con un enfoque desde el punto de vista sanitario (FAO) mayoritariamente. Sin embargo se desconocen los efectos desfavorables que pudieran producirse, tanto en el sistema planta-suelo como en las aguas superficiales y los acuíferos subyacentes para minimizar su impacto. Recientemente y como respuesta a la gran reutilización de aguas residuales urbanas tratadas en agricultura, se viene demostrando un creciente interés por la presencia de los denominados productos farmacéuticos y de uso personal (PPCPs) en las aguas subterráneas y superficiales (Sedlak et al., 2000). Estos efectos, que dependen en gran medida de las características del medio receptor, deben ser caracterizados previamente a la reutilización de este tipo de agua.

El objetivo de este artículo es presentar los trabajos actualmente en desarrollo dirigidos a la reutilización del agua procedente de depuradoras urbanas y que de forma coordinada se lleva a cabo en España en tres escenarios diferentes (Canarias, Cataluña y Sevilla). La comparación de resultados y la discusión de los mismos se realizan a partir del establecimiento de una metodología común.

## USOS AMBIENTALES DE LA REUTILIZACIÓN EN ESPAÑA

España es el país europeo con mayor déficit hídrico donde los recursos hídricos no convencionales, como la desalación o el agua procedente de depuradora, constituyen una parte importante de la gestión integrada de los recursos hídricos de forma generalizada. Paralelamente, también es uno de los países que más agua reutiliza aunque en cantidades poco significativas; no se llega a reutilizar más del 5% del volumen de las aguas residuales captadas, aunque según estudios recientes, el potencial de reutilización unas 10 veces superior al nivel actual (Hochstrat et al., 2005). Entre las causas de la escasa reutilización, cabe citar la ausencia de protocolos de tratamiento para las aguas regeneradas en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), ausencia de criterios claros tanto en la elección de tecnologías para tratamientos avanzados como en los instrumentos que permitan establecer las ventajas económicas y sociales de la reutilización.

Recientemente, la ausencia de indicadores de calidad de las aguas reutilizables en función de los usos se ha visto subsanada mediante la publicación de legislación específica al respecto, con el Real Decreto 1620/2007 (BOE, 2007) por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Este Real Decreto desarrolla la legislación pendiente tras la publicación del Plan Hidrológico Nacional (11/2005) a la vez que da cumplimiento a las exigencias del Reglamento de Dominio Público Hidráulico y transpone la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) e incorpora el concepto y la definición de 'agua regenerada', cuyo uso requerirá una concesión administrativa que se concederá según la posterior utilización del agua. En el Real Decreto, se distinguen los siguientes usos: urbano, agrícola, industrial, recreativo y ambiental y en su anexo I se recogen los criterios de calidad diferenciados según los usos, aportando límites de obligado cumplimiento. Los criterios definidos tienen la consideración de mínimos obligatorios exigibles, incluyendo parámetros físico-químicos y sanitarios. Además, para el resto de los parámetros es necesario que las aguas depuradas cumplan con las condiciones necesarias para el vertido de aguas residuales según se recoge en el Real Decreto 1315/1992 (BOE, 1992).

La Tabla 1 resume los usos y las calidades de agua indicadas en el citado Real Decreto, comparándolas con los datos recogidos por Levine y Asano (2004) basados en las normas de la EPA. La tabla no incluye otros criterios que se especifican en la norma española, que en función de los usos contempla el control de otros contaminantes, como *Legionella sp.* si existe riesgo de aerolización o nitratos si se va a proceder a recarga de acuíferos.

## EJEMPLOS DE REUTILIZACIÓN EN EL PROYECTO CONSOLIDER-TRAGUA

En el marco del proyecto de investigación CONSOLIDER-TRAGUA, iniciado en 2006, se aborda de manera integrada los diferentes aspectos implicados en la reutilización de aguas residuales procedentes de EDARs (Gómez et al., 2009). Entre los diversos objetivos planteados se incluye la realización de un inventario de aguas residuales potencialmente aptas para su reutilización, el establecimiento de protocolos de tratamiento en función de sus características cualitativas, los aspectos económicos y estimación del impacto de su reutilización sobre el medio físico.

Un aspecto importante del proyecto está constituido por la investigación de la reutilización de aguas orientados a la recarga de acuíferos y a regadío. Los estudios se desarrollan en tres áreas (Cataluña, Andalucía y Canarias; Fig. 1) caracterizadas por su diversidad geográfica, condiciones hídricas diferenciadas y la reutilización del agua regenerada mediante diversas metodologías. Las aguas regeneradas se aplican al establecimiento de una barrera hidráulica

**Tabla 1: Comparación entre los usos y criterios de calidad del agua a reutilizar según el Real Decreto 1620/2007 para España y los usos recogidos por Levine y Asano (2004) según la adaptación de la Environmental Protection Agency de USA**

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA		
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos	Tratamientos
<b>Uso Urbano</b>				
1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios	Nemátodos intestinales < 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> = 0 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <10 mg/L Turbidez ≤ 2 NTU	Sin restricción de acceso: Riego de jardines, sistemas contra incendios, construcción, fuentes, usos en edificios (lavabos, aire acondicionado)	DBO ≤ 10 mg/L Turbidez ≤ 2 NTU CF = ND Cl <sub>2</sub> residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario, Filtración y Desinfección
1.2 Servicios: Riego de zonas verdes urbanas, baldeo de calles, sistemas contra incendios, lavado industrial de vehículos	Nemátodos intestinales < 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> <200 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <20 mg/L Turbidez ≤ 10 NTU	Riego de zonas con acceso restringido: Campos de Golf, cementerios, usos residenciales, cinturones verdes	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl <sub>2</sub> residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario y Desinfección
<b>Riego agrícola</b>				
2.1 Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco	Nemátodos intestinales < 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> <100 UFC /100 mL * Sólidos en suspensión <20 mg/L Turbidez ≤ 10 NTU	Cultivos comestibles: Cultivos para consumo humano sin cocinar	DBO ≤ 10 mg/L TSS ≤ 2 mg/L CF ≤ ND/100 mg/L Cl <sub>2</sub> residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario, Filtración y Desinfección

**Tabla 1: Cont.**

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA		
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos	Tratamientos
2.2 Riego de productos para consumo humano con tratamiento industrial posterior Riego de pastos Acuicultura	Nemátodos intestinales < 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> <1000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <35 mg/L	Cultivos no comestibles o que necesitan procesado: Forrajes, fibras, cultivos de semillas, pastos, viveros comerciales, granjas de césped, acuicultura	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl <sub>2</sub> residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario y Desinfección
2.3 Riego de cultivos leñosos que impida el contacto del agua con los frutos, flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo, cultivos industriales no alimentarios, forrajes, cereales y semillas oleaginosas	Nemátodos intestinales < 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> <10000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <35 mg/L			
<b>Uso Industrial</b>				
3.1 Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria y otros usos industriales.	Nemátodos intestinales - Sin límite <i>Eschericia coli</i> <10000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <35 mg/L Turbidez ≤ 15 NTU	Sistemas de refrigeración, aguas de proceso, aguas de caldera, actividades de construcción y aguas de limpieza	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L	Secundario y Desinfección
Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria	Nemátodos intestinales - 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> <1000 UFC /100 mL* Sólidos en suspensión <35 mg/L			
3.2 Torres de refrigeración y condensadores evaporativos	Nemátodos intestinales - 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> = 0 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <5 mg/L Turbidez ≤ 1 NTU			

Tabla 1: Cont.

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA		
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos	Tratamientos
Usos Recreativos				
4.1 Riego de campos de golf	Nemátodos intestinales - 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> = 200 UFC /100 mL Sólidos en suspensión < 20 mg/L Turbidez ≤ 10 NTU	Incluidos en el riego de zonas con acceso restringido	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl <sub>2</sub> residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario y Desinfección
4.2 Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales en los que está impedido el acceso al público	<i>Eschericia coli</i> = 10000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión < 35 mg/L	Pesca, remo y otras actividades recreativas sin contacto directo con el cuerpo humano	DBO ≤ 30 mg/L Turbidez ≤ 2 NTU CF ≤ ND mg/L Cl <sub>2</sub> residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario y Desinfección
Prohibido en España		Masas de agua sin restricciones en el contacto con el cuerpo humano (natación, etc.)	DBO ≤ 10 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl <sub>2</sub> residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario, Filtración y Desinfección

**Tabla 1: Cont.**

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA		
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos	Tratamientos
Usos ambientales				
5.1 Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno	<i>Eschericia coli</i> = 1000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión < 0 mg/L	Recarga de acuíferos: recuperación, control de la intrusión marina y control de la subsidencia	Específicos para cada caso	
5.2 Recarga de acuíferos por inyección directa	Nemátodos intestinales - 1 huevo/10 L <i>Eschericia coli</i> = 0 UFC /100 mL Sólidos en suspensión < 10 mg/L Turbidez ≤ 2 NTU			
5.3 Riego de bosques, zonas y de otro tipo no accesible al público Silvicultura	Turbidez ≤ 2 NTU			
5.4 Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares)	La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso	Humedales artificiales, mejora de humedales naturales y sostenimiento de cauces	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl2 residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario, Desinfección

ND = No detectados

UFC = Unidades formadoras de colonias

TSS = Total de sólidos disueltos

CF = Coliformes fecales

\* realizando un muestreo a tres clases con valores fijados

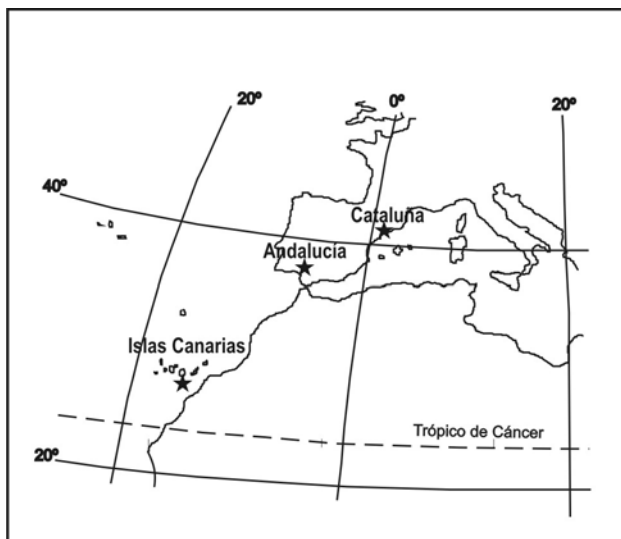


Figura 1. Situación geográfica de las tres áreas de estudio seleccionadas para la reutilización de las aguas regeneradas

contra la intrusión marina, para regadío de campos de golf en el mantenimiento de filtros verdes.

### Barrera hidráulica contra la intrusión salina. Delta del Llobregat (Barcelona)

El delta del río Llobregat, formación sedimentaria de 97 km<sup>2</sup> de extensión situada en las proximidades de Barcelona (Fig. 1) constituye uno de los mejores ejemplos hidrogeológicos estudiados desde los años 60 del que existen innumerables publicaciones al respecto (Custodio, 1981; Candela et al 1988; Iribar et al., 1997; Abarca et al., 2006;). El delta, desarrollado al pie de la Cordillera Litoral Catalana, está formado por materiales cuaternarios de naturaleza detrítica depositados sobre materiales de edad pliocena, a excepción de las zonas de borde donde descansa sobre materiales más antiguos.

A nivel hidrogeológico, la formación deltaica está caracterizada por la presencia de tres acuíferos: el valle Bajo, el acuífero superficial y el acuífero profundo. El primero de estos se extiende por el actual valle aluvial del río hasta el estrechamiento del valle, donde se divide en dos acuíferos separados por una cuña de limos grises de 40 m de potencia. La cuña de limos confina la formación acuífera profunda, salvo en las zona de borde donde desaparece y los dos acuíferos pasan a estar hidráulicamente conectados por unas arenas finas. El acuífero confinado, de 6m de espesor medio, está constituido por materiales cuaternarios detríticos (arenas finas y gravas) y se extiende a lo largo de casi toda la superficie deltaica, prolongándose hacia el mar por debajo de la cuña de limos (Fig. 2). El acuífero superior, inicialmente surgente, no está sometido a explotación dada la elevada contaminación de sus aguas. El acuífero inferior ha constituido una fuente importante de abastecimiento para las industrias implantadas en el zona

y ha estado sometido a una gran explotación, que ha conducido a un descenso piezométrico generalizado desde los años 70 y a las presencia de intrusión marina en diversos sectores. Los valores de contenido de cloruros en algunos de los pozos muestreados llegaron alcanzar valores de hasta 20.000 mg/L.

A lo largo de los años se han realizado diversos estudios encaminados al estudio y posible control de la cuña de intrusión marina en el acuífero profundo, aunque no es objetivo de esta publicación realizar

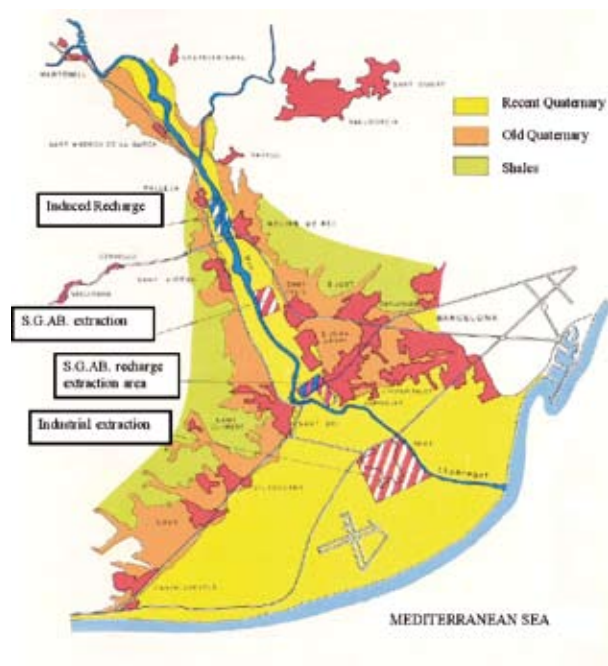


Figura 2. El Delta del Llobregat (Barcelona). A) Situación geográfica y B) perfil longitudinal donde se observa la presencia de los dos acuíferos separados por la cuña de limos (marrón).

una extensa revisión. Entre las propuestas cabe destacar la construcción de una barrera hidráulica positiva de inyección, similar a la que existe actualmente en funcionamiento en el Orange County Water District (California), mediante agua regenerada procedente de la planta de tratamiento Depurbaix (Cazurra, 2008).

La primera fase de la barrera, objeto de este artículo, consta de 4 pozos de inyección aunque el P4 no está operativo actualmente, (Fig. 3) de 70 m de profundidad, separados 300 m entre si y totalmente penetrantes en el acuífero inferior. Se sitúan paralelos a la línea de costa a una distancia de 1500 m. Los pozos se perforaron en 2006, presentan un diámetro de 610 mm y presentan 6 m de rejilla perforada a lo largo del nivel acuífero. Según resultados de los ensayos hidráulicos efectuados después de la perforación, los valores de transmisividad oscilan entre 700 y 2000 m<sup>2</sup>/día (P1 y P3 respectivamente) y 100-200 m<sup>2</sup>/ día (P2 y P4) (Ortuño et al. 2008; Teijon et al., 2008).



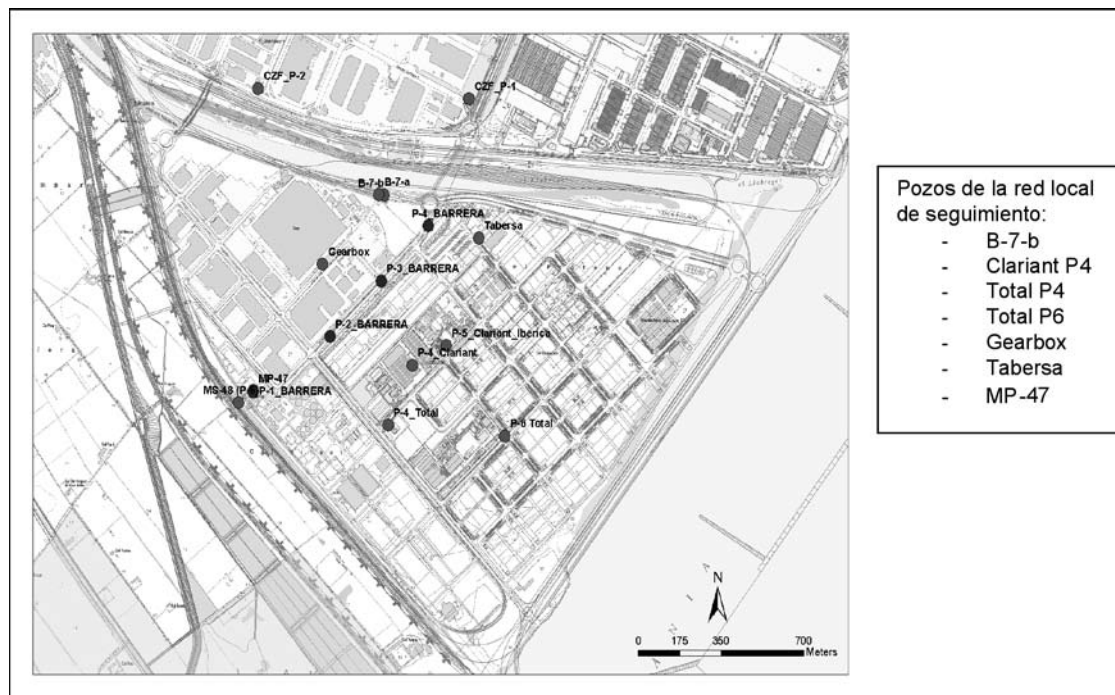


Figura 3. Situación de los pozos de inyección y muestreo correspondientes al estudio de la barrera hidráulica del Delta del Llobregat

En marzo de 2007 se inició la inyección de 2.500 m<sup>3</sup>/día de agua regenerada y el total de agua inyectada a finales del mismo año se estima en 244.000 m<sup>3</sup>. El agua inyectada está constituida por agua residual depurada en la EDAR mediante tratamiento terciario, y posteriormente sometida a ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección ultravioleta. Para una mayor descripción de los trabajos realizados se remite al lector a los artículos de Ortuño et al., (2008) y Cazorra (2008).

Como complemento al proyecto global llevado a cabo por la Agencia Catalana del Agua-ACA, en este estudio se ha controlado la presencia de 170 compuestos emergentes, prioritarios y metales pesados considerados de interés en muestras de agua procedentes de la depuradora, aguas regeneradas para inyección y pozos del acuífero (Tabla 2).

Los contaminantes emergentes (Daughton, 2001) constituyen un grupo de compuestos químicos de origen muy diverso caracterizados por su elevada producción y consumo, lo que comporta su continua presencia en el medio ambiente, por lo que no necesitan ser persistentes para ocasionar efectos negativos. Entre ellos se incluyen fármacos (antibióticos, analgésicos, etc.), productos para diagnóstico, esteroides y hormonas, antisépticos, productos para el cuidado personal (protectores solares, fragancias, etc.), aditivos de gasolina, etc. Aunque en su mayoría son compuestos orgánicos, se diferencian de los agroquímicos por presentar múltiples grupos funcionales. Este hecho añade complejidad a su transporte y degradación en el medio ambiente, y a las técnicas analíticas necesarias para su monitoreo. En general estos compuestos no son ni acumulativos ni volátiles, aunque los perfumes son tóxicos, bioacu-

mulativos, persistentes y volátiles. Los efectos que pueden llegar a producir en el hombre y en la biota son desconocidos y al ser introducidos de una forma continua en el medio se convierten en contaminantes persistentes, incluso si su periodo de degradación es corto. Su origen en el medio ambiente es diverso (Daughton, 2001). El mayor porcentaje procede de los fármacos excretados a través de la orina y heces y que se incorporan al agua de las redes de saneamiento. En otras ocasiones, su presencia se origina a partir de lixiviado de vertederos, escorrentía en zonas con animales estabulados, descarga directa de aguas negras debido a tormentas e incluso a partir de la producción de proteínas por plantas modificadas genéticamente (conocido como biofarming).

La necesidad de un control exhaustivo de la calidad del agua a inyectar es prioritaria dado que no todos los contaminantes son eliminados en el tratamiento terciario (Ternes et al., 2002). El gran interés existente sobre los contaminantes emergentes desconocidos o no reconocidos como tales en el medio acuático (Sedlak et al., 2000), reside en el desconocimiento de sus efectos sobre el medio ambiente y la salud humana. Por otro lado, se debe destacar la legislación existente sobre presencia de 'sustancias prioritarias de necesario control', en el apartado 5 del artículo 16 de la Directiva 2000/60/CE (anexo X). A todo ello se debe añadir la aprobación por el Gobierno de España del Real Decreto 1620/2007, comentado anteriormente.

Las campañas de muestreo y medida de niveles se realizan en pozos de la red local (situados en un radio inferior a 1 km de los pozos de inyección) y de la red regional (situados a una distancia de hasta 2,5 km, sin muestrear) en coordinación con el ACA y la

**Tabla 2. Relación de los compuestos emergentes analizados en los puntos de la red local, depósito, efluente e influente (tratamiento terciario) en el Delta del Llobregat**

<b>Fármacos</b>	N-acetyl-4-amino-antipirine (4-AAA)	Hexachlorobenzene
4-amino-antipirine (4-AA)	Naproxen	Pentachlorobenzene
4-dimethylaminoantipirine (4-DAA)	N-formyl-4-amino-antipirine (4-FAA)	Alfa-hexachlorocyclohexane
4MAA	Nicotine	Beta-hexachlorocyclohexane
Acetaminophen	Ofloxacin	Gamma-hexachlorocyclohexane (lindane)
Antipyrine	Omeprazole	Delta-hexachlorohexane
Atenolol	Paraxanthine	Alachlor
Benzafibrate	Paroxethine	Tetra-brominated diphenyl ether
Biphenylol	Propranolol hydrochloride	Penta-brominated diphenyl ether 2
Caffeine	Ranitidine	Penta-brominated diphenyl ether 3
Carbamazepine	Salbutamol	<b>Hidrocarburos aromáticos policíclicos</b>
Carb,Epoxide	Sotalol	Acenafteno
Cefotaxime	Sulfamethoxazole	Acenaftileno
Chlorophene	Terbutaline	Antraceno
Ciprofloxacin	Triclosan	Benzo (b) fluoranteno
Clofibric acid	Trimethoprim	Benzo (a) antraceno
Codeine	<b>Productos de higiene personal</b>	Benzo (a) fluoranthene
Diatrizoate	3-(4-methylbenzylidene) camphor	Benzo (a) pireno
Diazepan	Benzophenone-3	Benzo (k) fluoranteno
Diclofenac	Celestolide	Chrysene
Erythromycin	Ethylhexyl methoxycinnamate	Fluoranteno
Fenofibrate	Galaxolide	Fluoreno
Fenofibric Acid	Octocrylene	Naftaleno
Fenoprofen	Octyl-triazone	Fenantreno
Fluoxethine	Phantolide	Pireno
Furosemide	Tonalide	<b>Otros contaminantes prioritarios</b>
Gemfibrozil	Traseolide	2,3,7,8-tetrachloro-dibenzo-p-dioxin
Hydrochlorothiazide	Metales	2,7/2,8-dichloro-dibenzo-p-dioxin
Ibuprofen	Ni	Alpha-Endosulfan
Indomethacine	Cd	Atrazine
Ketoprofen	Hg	Beta-endosulfan
Ketorolac	Pb	Chlorfenvinphos
Mefenamic Acid	<b>Contaminantes prioritarios volátiles</b>	Chlorpyriphos-Methyl
Mepivacaine	1,2,3-trichlorobenzene	Diuron
Methylprednisolone 6-alpha sodium succinate (Urbason)	1,2,4-trichlorobenzene	Endosulfan sulphate
Metoprolol	1,3,5-trichlorobenzene	Isoproturon
Metronidazole	Hexachloro 1,3-butadiene	Simazine

\* Para facilitar la consulta de los compuestos se ha optado por conservar la terminología anglosajona

Comunitat d'Usuaris del Delta del Llobregat (CUA-DLL). Los muestreos son bimestrales para la red local y las medidas in situ de T, CE, pH y Eh se realizan de forma quincenal. Además se incluye la toma de muestras integradas de influente y efluente en trata-

miento terciario (Depurbaix) y del depósito de agua para inyección.

Los parámetros controlados en los diversos muestreos (Tabla 2) incluyen: elementos mayoritarios, contaminantes emergentes y sustancias prioritarias

(2008/105/EC), análisis microbiológicos y metales pesados. Los compuestos emergentes seleccionados son fármacos, productos para la higiene personal, metales, contaminantes volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y otros contaminantes prioritarios. Los análisis se realizaron en los laboratorios químicos de las universidades de Jaén y Almería.

Los primeros resultados obtenidos apuntan a que en las muestras del efluente de la depuradora no todos los compuestos detectados en el influente son completamente eliminados por el tratamiento terciario, y algunos de ellos presentan concentración superior de  $0,1\mu\text{g/L}$  (Teijón *et al.*, 2008). Sin embargo, una vez sometidas las muestras a ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección ultravioleta la mayoría son eliminados. Solo 11 compuestos se detectan en concentración superior a  $0,1\mu\text{g/L}$ , aunque siempre en concentración inferior al del efluente. Los resultados obtenidos evidencian que el tratamiento final al que se somete al agua procedente del terciario produce un agua regenerada de gran calidad apta para su inyección en la barrera hidráulica.

Por lo que respecta a los resultados de las aguas subterráneas, procedentes del muestreo realizado en los pozos de la red local en 2007 y 2008 se observa la presencia de compuestos emergentes en el acuífero en la fase previa a la inyección. Se han detectado un total de 26 compuestos de los 170 analizados. De ellos 21 son fármacos, 4 productos para la higiene personal y un contaminante prioritario. La Cafeína, Gemfibrozil, Hydrochlorotiazine e Iopromide aparecen en concentración superior a  $0,5\mu\text{g/L}$ . La cafeína es un compuesto alcaloide presente en numerosas bebidas de consumo habitual; el Gemfibrozil, sustancia utilizada para disminuir los niveles de triglicéridos en sangre, el Hydrochlorothiazide es un diurético y el Iopromide es un medio de contraste radiológico. De todos ellos, el Iopromide no se ha de-

tectado en el agua regenerada a inyectar en ningún muestreo, por ello se deduce que su presencia está asociada a la recarga natural del acuífero.

### Riego campo de golf en Canarias

Dada la escasez de recursos hídricos existente en Gran Canaria (Islas Canarias), la reutilización de aguas depuradas para riego es una práctica utilizada desde finales de los años 60. En la actualidad, supone el 8% de los recursos hídricos en la isla y se han implementado tratamientos terciarios con desalinización por ósmosis inversa así como una importante infraestructura para la distribución del agua regenerada por la isla (Moreno y Guerra, 2004).

La reutilización de aguas regeneradas se centra en el Campo de Golf de Bandama situado al NE de la isla, (Fig. 4) cuyo objetivo es el estudio integrado a medio-largo plazo de los procesos que sufre el agua aplicada en el suelo y en la zona no saturada desde que se infiltra hasta su llegada al acuífero infrayacente. Está situado en una zona con una pluviometría media de 300 mm y la temperatura media es de  $19^\circ\text{C}$  (con  $22^\circ\text{C}$  en verano y  $16^\circ\text{C}$  en invierno). La precipitación durante el invierno 2008/09 ha sido especialmente lluviosa, alcanzando los 440 mm.

El campo de golf tiene una superficie de 14,5 ha. Desde 1976 ha sido regado por aspersión con agua depurada sometida a diversos tratamientos para mejorar su calidad y a partir del año 2002 se aplican métodos de desalación para reducir su salinidad. Las frecuencias de riego, determinadas por el green keeper, varían de invierno a verano, donde las dosis alcanzan máximas de 7 mm/día. La especie regada es el Kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*), una gramínea C4 muy bien adaptada a los ambientes cálidos y suelos salinos

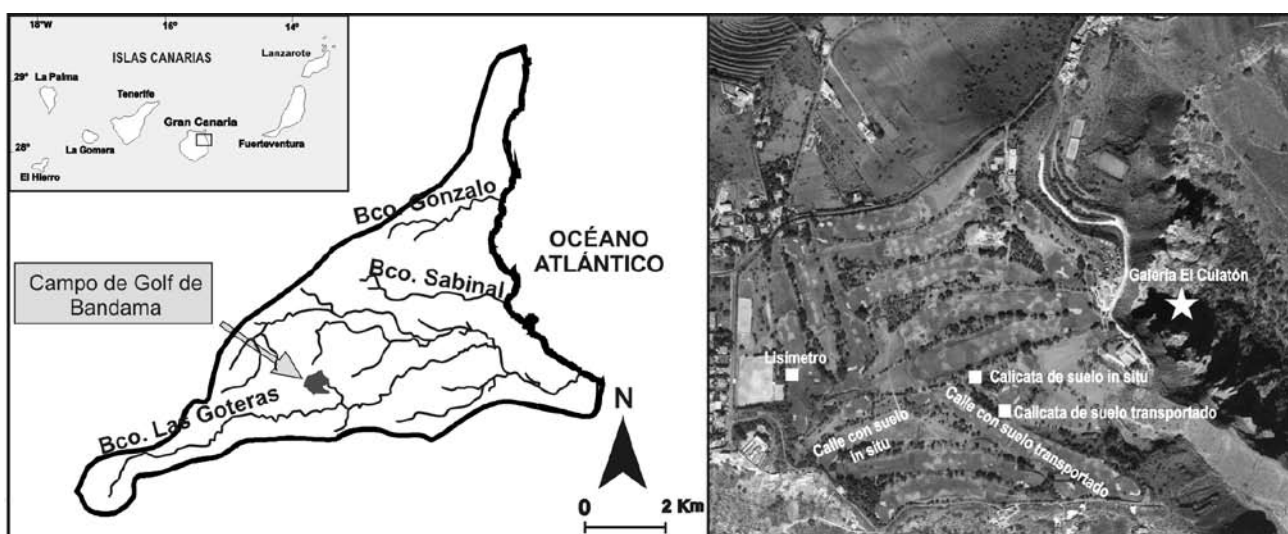


Figura 4. Localización del área de estudio en la isla de Gran Canaria. A) zona N4 de la Planificación Hidrológica de la Isla. B) situación del lisímetro y de la galería de agua muestreados

Los materiales que afloran en la zona (y constituyen la caldera y el cono volcánico de Bandama) son lavas y piroclastos basálticos de 2000 años de antigüedad y, por tanto, muy poco alterados. Estos materiales se sitúan sobre materiales basálticos y fonolíticos más antiguos (hasta 13 Ma) entre los que se intercalan conglomerados aluviales, que afloran en el interior de la Caldera.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la isla se considera un acuífero único con una superficie piezométrica en forma de domo que alcanza máximos en el centro de la isla. El acuífero infrayacente al campo de golf está formado fundamentalmente por materiales volcánicos situados en las medianías de la isla y el flujo del agua subterránea se produce de OSO a ENE, según se puede deducir de la piezometría realizada en 2009 a partir del inventario de puntos de agua de la zona (Fig. 5). En el área del campo de golf, el nivel piezométrico se encuentra a unos 250 m de profundidad. La parte superficial de esta zona está constituida por un suelo de poco espesor (0,5-1 m), mientras que en el resto de la zona no saturada, el agua debe circular preferentemente por fracturas, aunque dependiendo de la naturaleza de los materiales, cierta fracción puede fluir por porosidad.

La caracterización del perfil del suelo se ha realizado mediante la toma de muestras inalteradas. Para el muestreo del lixiviado a través del suelo se ha instalado *in situ* un lisímetro a 60 cm de profundidad. En el escarpe Oeste de la Caldera, a unos 50 m por debajo del campo de golf, se muestreó una galería de agua (galería El Culatón) cuyas muestras se consideraron representativas del agua que circula por la zona no saturada desde el campo de golf hasta el acuífero.

Actualmente se realiza el muestreo periódico del agua de riego, agua del lisímetro, agua de la galería y agua de pozos seleccionados. Las determinaciones analíticas incluyen elementos mayoritarios (pH, Conductividad eléctrica, Residuo Seco, sodio, potasio, Calcio, Magnesio, Cloruros, Sulfatos, Carbonatos, Bicarbonatos, Nitratos, Amonio, Fósforo, Boro, Cobre, Hierro, Manganeseo y Zinc) compuestos emergentes seleccionados, y metales pesados. Los compuestos emergentes analizados incluyen nicotina, atenolol, metamizol, paraxantina, ibuprofeno, cafeína, fluoxetina y permetrina. Esta previsto aumentar la base de datos de compuestos en los próximos muestreos.

La caracterización edafológica del campo de golf ha permitido identificar dos tipos de suelo: un suelo *in situ*, de naturaleza franco-arcillo-arenoso, y un suelo transportado de cotas superiores de la misma vertiente de la isla, de naturaleza arcillo-limosa. Los primeros resultados obtenidos de los análisis de suelo realizados en dos calles representativas de sendos suelos permiten concluir que ambos presentan una alta variabilidad incluso considerando separadamente cada zona homogénea respecto al manejo del agua (calle o rough). La evolución temporal de las muestras de suelo tomadas en dos campañas llevadas a cabo en 2008 y 2009 apunta a que el invierno 2008-09 (lluvioso) ha dado lugar a un lavado del mismo, con el probable efecto superpuesto, para los elementos poco móviles, de una mayor actividad biológica (caso del fósforo) (Palacios *et al.*, 2009). Asimismo, se ha observado un diferente comportamiento para ambos tipos de suelos: mientras el suelo *in situ* presenta un lavado mayor, los contenidos en

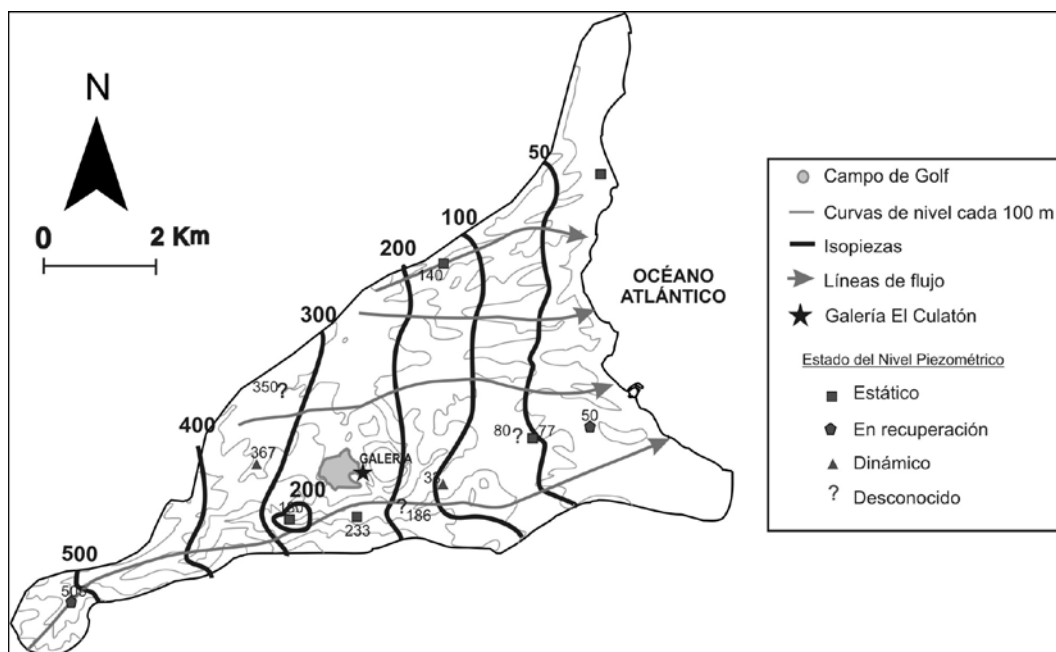


Figura 5. Piezometría de la zona N4 definida en la planificación hidrológica de Gran Canaria para 2009

sales se mantienen más estables para el suelo transportado (más arcilloso).

De los primeros resultados lisimétricos, puede inferirse que se produce un incremento en los iones de las aguas recogidas en el mismo respecto al agua de riego, causado por las elevadas fracciones de lavado que se usan en el campo de golf y originando un lixiviado de sales del suelo. Los iones que presentan incremento son:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  y B comparativamente con el aumento en  $\text{Cl}^-$  (atribuible a la concentración por evapotranspiración).

La comparación de los resultados químicos obtenidos para las aguas subterráneas de la zona, con el agua de la galería permiten concluir que esta galería presenta un agua químicamente diferente a los pozos de los alrededores, variable en el tiempo y que debe drenar un acuífero colgado al que llegan los retornos de riego del campo de golf (Cabrera *et al.*, 2009). Por lo que respecta a la presencia de contaminantes emergentes analizados, nicotina y cafeína están presentes en casi todas las muestras, La presencia del resto de compuestos es variable (siempre en cantidades de ng/L).

#### Filtros verdes. Carrión de los Céspedes (Sevilla)

En Carrión de los Céspedes (Fig. 1), el gobierno regional de Andalucía, a través de la Consejería de Medio Ambiente, dispone de una planta experimental de 35.000 m<sup>2</sup> donde se investigan técnicas convencionales y no convencionales de depuración de agua. Desde 2005, en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC) está en funcionamiento un Filtro Verde con una superficie de 2.000 m<sup>2</sup>, subdividido en dos parcelas (Fig.6). En la primera se cultiva una plantación de chopos (clon I-214 del *Populus euroamericana*) y de eucaliptos (*Eucaliptos camaldulensis*) en la otra. En estos sistemas, se obtienen rendimientos medios entre el 85-95% para los sólidos en suspensión, del 85-95% para la DBO<sub>5</sub>, el 80-90% para la DQO, entre el 50-90% para el nitrógeno, el 40-90% para el fósforo y del 99,9% para los coliformes fecales (Martín-García *et al.*, 2006).

En el marco del proyecto CONSOLIDER-TRAGUA, se ha diseñado un nuevo Filtro Verde con el objetivo de regenerar y reutilizar aguas depuradas, obtención de biomasa y recarga de acuíferos mediante infiltración a través del terreno. Para ello, se han acondicionado 4 nuevas parcelas de cultivo (2 regadas con aguas depuradas y 2 con agua de pozo, como parcelas de referencia), en las que se cultivarán *Jatropha curcas L.* y *Paulownia tomentosa*. La primera es una planta oleaginosa muy utilizada para la producción de biodiesel. La segunda es una especie arbórea de crecimiento rápido, con potencial utilización en plantas energéticas y muy resistente a la polución. La calidad del agua utilizada en la reutilización es la fijada en los puntos 5.1 (a) y 5.3 (a) del anexo 1.a del Real Decreto 1620/2007 (Tabla 1).



Figura 6. Esquema general de la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes-PECC (Sevilla) y localización de los piezómetros instalados y de las secciones geofísicas realizadas.

Para evaluar la variabilidad espacial de los materiales geológicos en la PECC, se aplicaron técnicas geofísicas basadas en tomografía eléctrica (Lillo *et al.*, 2009). Se realizaron varios perfiles transversales (Fig. 6).

En la parcela experimental, se han instalado 9 nidos de piezómetros con profundidades de 2, 6 y 10 m (Fig. 7). La perforación se realizó a rotación con un diámetro de 145 mm, entubándose con tubería ciega y ranurada de acero inoxidable de 65 mm. A partir de las muestras procedentes de los testigos continuos de la perforación se realizaron análisis texturales, fisicoquímicos y mineralógico y del contenido de humedad y densidad natural.

Tras la instalación y limpieza de los piezómetros, y antes de iniciar el riego y la recarga con aguas tratadas, se tomaron muestras de agua con el fin de obtener valores composicionales de base o referencia. Los parámetros analizados fueron: conductividad, pH, TSS, TOC, TC, IC, DBO<sub>5</sub>, DQO, turbidez, dureza, alcalinidad,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , coliformes totales, huevos de helminto y compuestos emergentes. Los análisis convencionales se realizaron en los laboratorios de la Fundación iMdea agua y los análisis de compuestos prioritarios y emergentes en los laboratorios del grupo de la Universidad de Almería.

De los datos aportados por la testificación de los sondeos, la tomografía eléctrica y las observaciones locales, se identifican tres unidades litológicas diferentes (Fig. 8). La unidad superficial está compuesta de arenas finas a muy finas, de color marrón rojizo, con bajo contenido en agua (mayor resistividad) y contenidos en arcilla en torno al 30%. Tiene un espesor

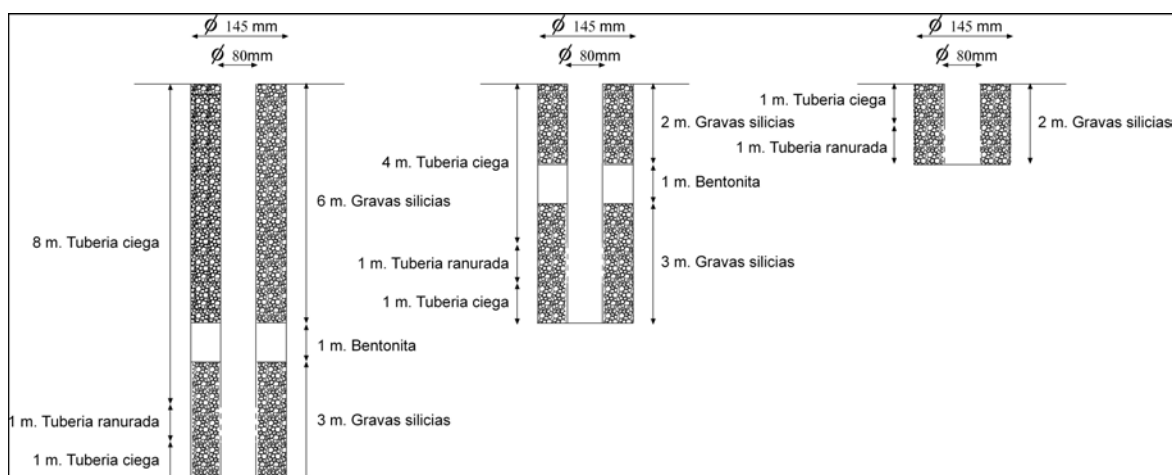


Figura 7. Esquema de nido de piezómetro en la parcela experimental de Carrión de los Céspedes

variable de 0-2 m, y sobre ella se ha desarrollado un suelo agrícola con abundante materia orgánica. Mineralógicamente, esta unidad está formada por calcita, cuarzo, halita, albita, anortita, illita y caolinita. La unidad principal está formada por limos arcillosos de color ocre a verde con abundantes nódulos y algunos niveles precipitación de carbonatos, con aspecto radicular, lo que sugiere origen paleoedáfico. Sobre esta unidad se ha desarrollado un suelo agrícola con abundante materia orgánica y algunos pequeños nódulos carbonatados. Su espesor es superior a 10 m, ya que su base no se ha cortado en ningún sondeo y presenta una mineralogía formada por calcita, cuarzo, anortita, albita, illita, montmorillonita y caolinita, apareciendo también halita en los tramos verdosos del perfil de los sondeos. Por último una unidad subyacente, descrita regionalmente como unidad de las margas azules, formada por arcillas calcáreas de color gris azulado, prácticamente impermeables y que actúan como límite inferior de los acuíferos.

En la figura 9 se han representado en el diagrama de Piper los resultados de las muestras de agua de los piezómetros analizada. Las aguas están muy mineralizadas, con altos contenidos en cloruros y sodio, presentando los valores más bajos los piezómetros PE-16 y PE-21, con profundidades de 10 m y 2 m respectivamente. Así todas las aguas pueden clasificarse como cloruradas sódicas, excepto la PE-16 que es clorurada sódico-magnésica, la PE-20 clorurada sódico-cálcica y la PE-21 clorurada cálcico-sódica. Esta composición tiene su origen en los materiales que componen la zona, que presentan contenidos de halita en varios tramos. En cuanto a los parámetros indicadores de algún tipo de contaminación, como carbono orgánico, nitratos y amonio, están dentro de los rangos normales, sin presentar signos de contaminación.

Respecto a compuestos prioritarios y emergentes, en el PE-1, PE-10 y PE-19, se ha detectado nicotina (entre 0,059 y 0,206  $\mu\text{g/L}$ ), paraxantina (metabolito de la cafeína, entre 0,112 y 0,125  $\mu\text{g/L}$ ), cafeína (entre 0,068 y 0,403  $\mu\text{g/L}$ ) y cotinina (metabolito de la

nicotina, entre 0,014 y 0,052  $\mu\text{g/L}$ ). Aunque la presencia de estos compuestos de difícil degradación es típica de aguas residuales, dado que la parcela no ha estado sometida a riego con este tipo de aguas, su presencia debe estar asociada a flujos regionales.

## CONCLUSIONES

En España la reutilización de aguas depuradas constituye una práctica cada vez más extendida. Su aplicación ha sido objeto de regulación jurídica mediante la publicación del R.D. 1620/2007, en cumplimiento de las directrices recogidas en la Directiva Marco del Agua (entre otras). En esta normativa se establece la necesidad de que el agua a reutilizar cumpla unas normas de calidad mínimas dependiente de su uso. Sin embargo, la sostenibilidad de esta práctica va a depender también de la afección que se produzca al medio (planta, suelo, acuífero).

Si bien de forma general se puede apuntar que la afección al medio hídrico depende en gran medida de los tratamientos aplicados para su depuración, la afección a los acuíferos varía notablemente dependiendo de factores climáticos, tipos de suelo, materiales y funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos. Se debe destacar que las condiciones del medio, el tiempo de tránsito del agua por la zona no saturada y las características del flujo en el acuífero tienen una gran importancia sobre los procesos de atenuación y transporte de los compuestos químicos. Por ello, es necesario que previo a cualquier proyecto de reutilización se incluya la realización de estudios específicos de investigación o demostración en la zona de aplicación, que permitan valorar posibles futuros efectos no deseados (dilatados en el tiempo) de difícil solución.

En el marco del Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA, la selección de las zonas de estudio y su detallada caracterización constituyen un ejemplo de buenas prácticas. En todos los casos se está prestando un especial interés a la posible contaminación a los



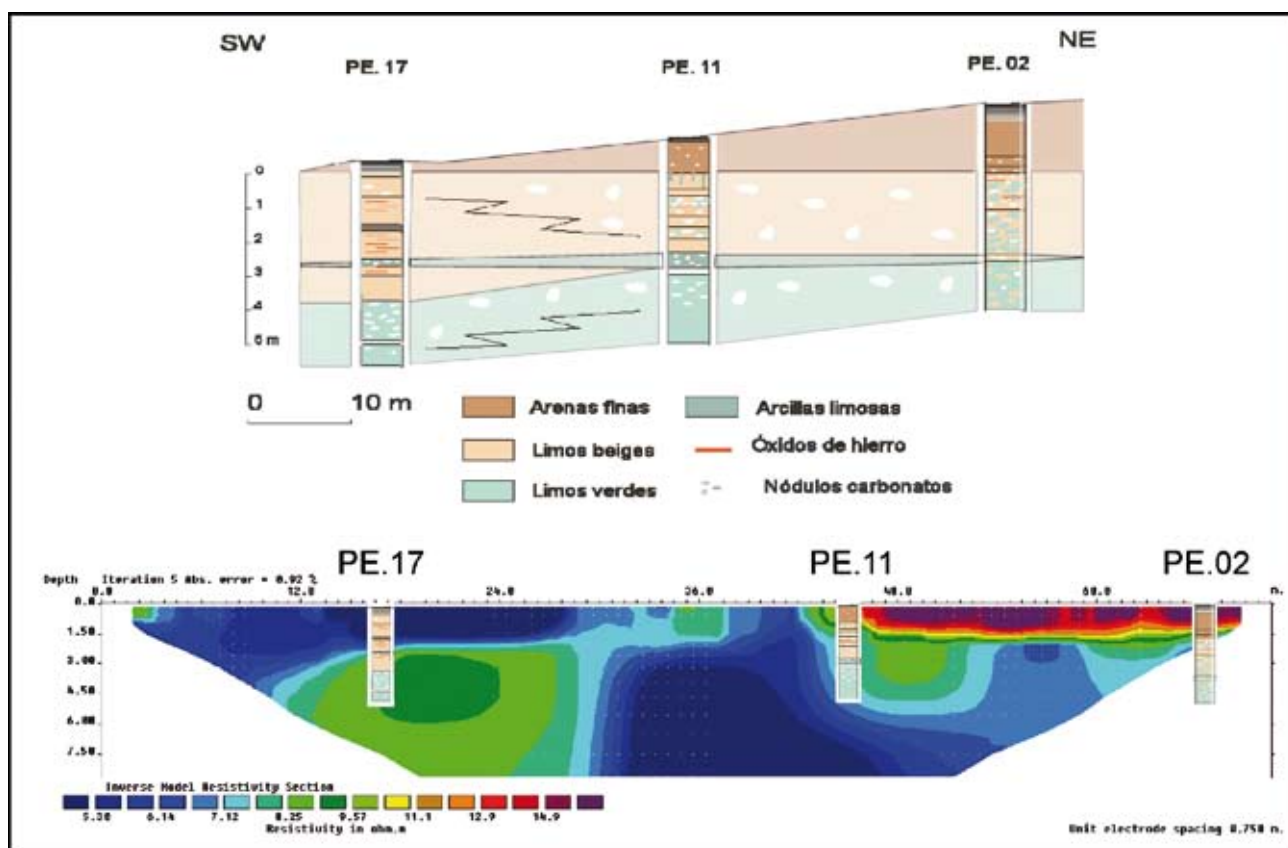


Figura 8. Unidades litológicas y perfil de resistividad obtenidos en la parcela experimental de Carrión de los Céspedes

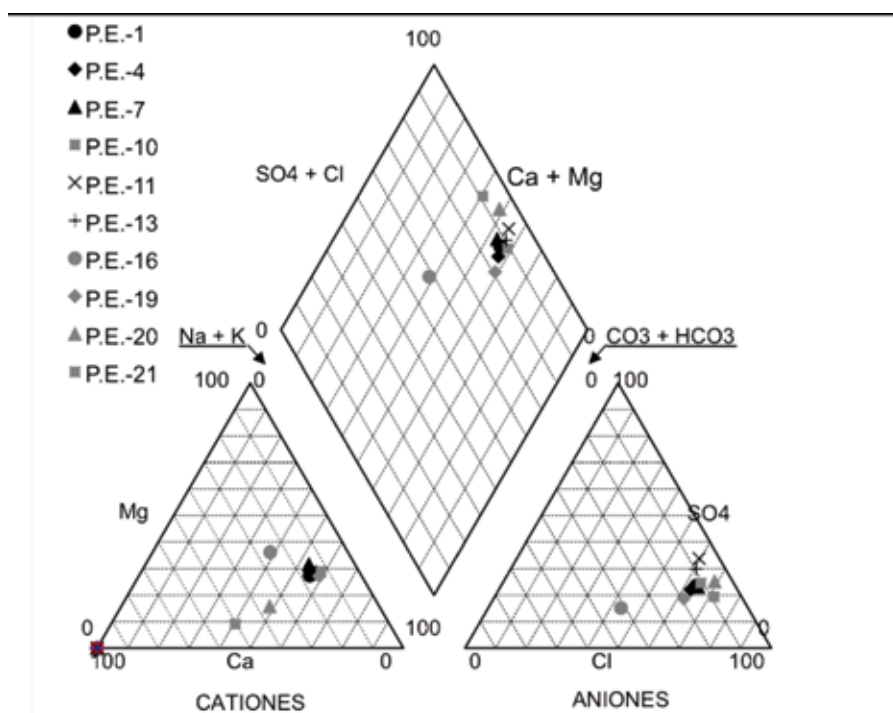


Figura 9. Diagrama de Piper de las muestras de agua analizadas en la parcela experimental

acuíferos por compuestos emergentes (fármacos, productos de perfumería, etc.). Se debe destacar que en los tres casos estudiados se detectó en el acuífero la presencia de compuestos emergentes cuya procedencia no parece estar asociada a las prácticas de reutilización aplicadas actualmente. El origen debe buscarse en la incorporación a la recarga natural de los acuíferos de aguas no tratadas, vertidas a cauces de ríos directamente conectados con las aguas subterráneas o lixiviados producidos en la red sanitaria que afectan directamente a los acuíferos subyacentes.

A lo largo del desarrollo de proyecto, la integración de los datos obtenidos permitirá identificar los aspectos hidrológicos de interés en las diversas aplicaciones, y en especial evaluar los procesos que tienen lugar en el suelo, la zona no saturada y el propio acuífero e identificando los posibles contaminantes que lleguen al mismo.

## AGRADECIMIENTOS

Los trabajos presentados se llevan a cabo en el marco del Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA (CSD2006-00044), financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Asimismo se agradece al Real Club de Golf de Las Palmas su colaboración en la realización de los trabajos llevados a cabo en el Campo de Golf de Bandama, a la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA) su colaboración en los trabajos realizados en la Planta de Carrión, a la Fundación Mapfre la financiación de algunos de los trabajos desarrollados en Carrión, a la Agencia Catalana del Agua por la información proporcionada y colaboración en el proyecto.

## REFERENCIAS

Abarca, E., E. Vázquez-Suñé, J. Carrera, B. Capino, D. Gámez, & F. Battle. 2006. Optimal design of measures to correct seawater intrusion. *Water Resources Research*, W09415, doi: 10.1029/2005 WR004524.

B.O.E. 288/1992: Real Decreto 1315/1992, de 30 de octubre por el que se modifica parcialmente el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos Preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril. Pp. 40563-40565.

B.O.E. 294/2007: Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Pp. 50639-50661.

Candela, L., R. Olea & E. Custodio. 1988. Lognormal kriging for the assessment of reliability in groundwater quality control observation networks. *Journal of Hydrology*, 103: 67-84.

Candela, L., Fabregat, S., Josa, A., Suriol, J., Mas, J., & N. Vignes. 2007. Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: application in a golf course (Girona, Spain). *Science of Total Environment* 374: 26-35

Cabrera, M.C., M.P. Palacios, E. Estévez, T. Cruz, T., J.M. Hernández-Moreno y J.R. Fernández-Vera. 2009. La reutilización de aguas regeneradas para riego de un campo de golf: evolución geoquímica y probable afección a un acuífero volcánico (Islas Canarias). *Boletín Geológico y Minero*, en prensa.

Cazurra, T. 2008. Water reuse of south Barcelona's wastewater reclamation plant. *Desalination*, 218: 43-51.

Custodio, E. 1981. Sea water encroachment in the Llobregat and Besos areas near Barcelona (Catalonia, Spain). Intruded and relict groundwater of marine origin. *Proceedings of 7th SWIM, Uppsala. Sweriges Geologiska Undersokning, Rappoter och Meddelanden, Uppsala*. 27:120-152.

Custodio, E. y M.C. Cabrera. 2008. Synthesis of the Canary Islands hydrogeology. *Hydrogeology of volcanic rocks, SIHD-2008, Djibouti*, 51-56.

Daughton, C.G. 2001. Pharmaceutical in the Environment: Overarching Issues and Overview. En: *Pharmaceuticals and personal Care Products in the Environment: Scientific and Regulatory Issues*, Daughton y Jones-Lepp (Eds). *Symposium Series 791; American Chemical Society, Washington D.C.* pp. 2-38. ([www.epa.gov/esd/chemistry/pharma/book-summary.htm](http://www.epa.gov/esd/chemistry/pharma/book-summary.htm)).

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

Durham, B., A.N. Angelakis, T. Wintgens, C. Thoe-ye & L. Sala. 2005. Water recycling and reuse. *En eureau\* countries. Trends And challenges. Technical Workshop: The integration of reclaimed water in water resource Management*. Lloret de Mar, Girona. España.

Gómez, M.J., A. Agüera, M.J. Bueno, M.M. Gómez, S. Herrera, I. Muñoz, & A.R. Fernández-Alba. 2009. Caracterización química de las aguas residuales. Metodología analítica y resultados. 4ª Reunión del Programa Consolider Tragua, Alicante, 17-19 de junio de 2009. URL.: [http://www.consolider-tragua.com/posters\\_alicante.htm](http://www.consolider-tragua.com/posters_alicante.htm)

Hochstrat R., T. Wintgens, T. Melin, P. Jeffrey. 2005. Wastewater reclamation and reuse in Europe - a model-based potential estimation. *Water Supply*, 5-1: 67-75.

Iríbar, V., J. Carrera, E. Custodio & A. Medina. 1997. Inverse modeling of seawater intrusion in the Llobregat delta deep aquifer. *Journal of Hydrology*, 198: 226-244.



- Levine, A.D. & T. Asano. 2004. Recovering sustainable water from wastewater. *Environmental Science And Technology*, 38(11):201A-208A.
- Lillo, F.J., D. Gómez, T. Martín, F. Carreño, I. De Bustamante & P.L. López. 2009. Using Electrical Resistivity Tomography to evaluate the infiltration in Land Application Systems. A case study in the Carrión de Los Céspedes. *Desalination and Water Treatment*, 4: 111-115.
- Martín García, I.; J.R. Betancort Rodríguez, J.J. Salas Rodríguez, B. Peñate Suárez, J.R. Pidre Bocado & N. Sardón Martín. 2006. Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población. Mejora de la calidad de los efluentes. Edit. Junta de Andalucía. 126pp. Sevilla
- Moreno, E. & J.L. Guerra. 2004. La gestión del agua en Gran Canaria, una política hidráulica en condiciones extremas. II Simposium sobre sostenibilidad: recursos hídricos. Zaragoza.
- Palacios, M.P., E. Estévez, M.C. Cabrera, J.M. Hernández-Moreno, V. González-Narango, T. Cruz & J.R. Fernández. 2009. Resultados preliminares de los efectos de la utilización de agua depurada para riego en el campo de golf de Bandama (Gran Canaria). En O.Silva et al. (eds.. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo, Vol. IX, en prensa).
- Pettygrove, G. S. & T. Asano. 1984. Irrigation with reclaimed municipal wastewater. A guidance manual, California State Water Res.Control Board. Davis. California. 540 pp.
- Sedlak D.L., J.L. Gray & K.E. Pinkston. 2000. Understanding microcontaminants in recycled water. *Environmental Science and Technology*, 34(23): 509A-5515A
- Ortuño Gobern, F; J.M. Niñerola Pla, G. Teijón Ávila & L. Candela Lledó. 2008. Desarrollo de la primera fase de la barrera hidráulica contra la intrusión marina en el acuífero principal del delta del Llobregat. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*; Vol. XXVIII, 503-509
- Teijón Ávila, G., K. Tamoh, F. Ortuño Gobern, J.M. Niñerola Pla & L. Candela Lledó. 2008. Resultados preliminares de los muestreos realizados en la barrera hidráulica del Llobregat. Primera fase *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*; Vol. XXVIII, 503-509. 510-515.
- Ternes T., M. Meisenheimer, D. Mcdowell, F. Sacher, H. Brauch, B. Haist-Gulde, G. Preuss, U. Wilme & N. Zulei-Seibert. 2002. Removal of pharmaceuticals during drinking water treatment. *Environmental Science and Technology* ,36:3855-3863.