

AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS

Canarias se puede considerar como uno de los mejores laboratorios hidrogeológicos del mundo. Por una parte, en la isla coexiste un amplísimo abanico de procesos volcánicos, desde aquellos asociados a materiales muy básicos a otros asociados a materiales muy diferenciados, todo ello en un área de apenas 2.000 km², algo insólito en una región volcánicamente activa. Por otro lado, las islas cuentan con una amplísima red de galerías subterráneas y pozos, que permiten estudiar desde el subsuelo prácticamente cualquier fenómeno geológico presente en la isla. Esta red de extracción de aguas subterráneas permite además acceder al acuífero a distintas alturas, latitudes y longitudes, hecho que también es insólito a nivel mundial. Las galerías y pozos constituyen el principal sistema de abastecimiento de agua para la población, por lo que existe un claro vínculo social y económico con el agua subterránea.

El presente libro, incluye las lecturas de la reunión científica que tuvo lugar en la isla de Tenerife durante el mes de Noviembre 2012, en ella participaron científicos y profesionales de todo el país participando en las siguientes sesiones en las que se divide el presente documento;

- El agua en los terrenos volcánicos, tecnologías de aprovechamiento
- Estudio de los recursos hídricos subterráneos
- Obras hidráulicas y aprovechamientos superficiales
- Nuevas tecnologías, depuración y calidad de aguas
- Gestión integral del agua e hidrología forestal

El libro es de interés para académicos, ingenieros, consultores, y profesionales vinculados con la hidrología y el aprovechamiento de aguas en terrenos volcánicos.



ISBN 978-84-616-3860-4

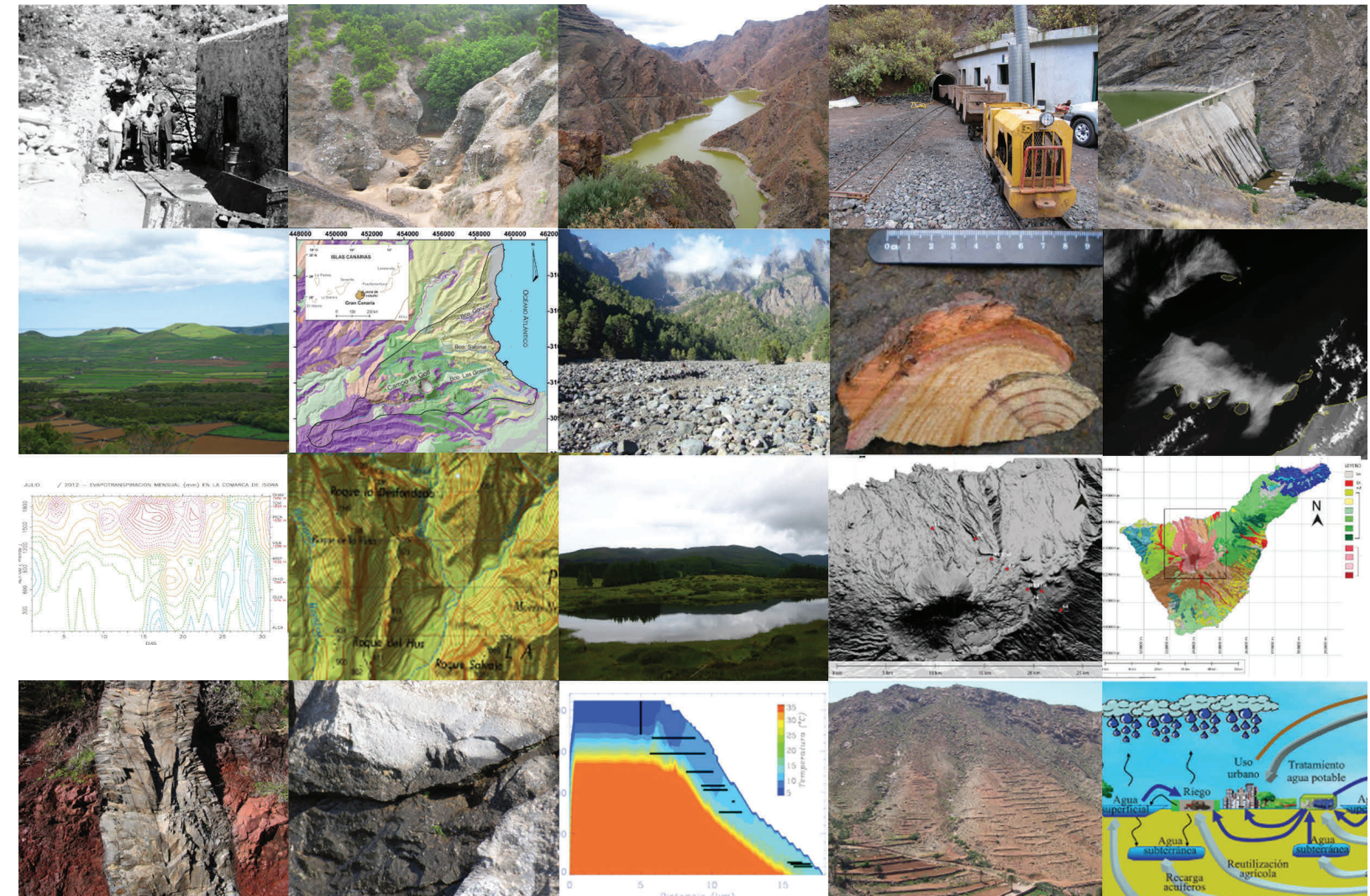


9 788461 638604 >

AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS

Juan Carlos Santamarta Cerezal et al.

AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS



AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRRENOS VOLCÁNICOS

Reunión científica nacional sobre el estudio de los recursos
hídricos en islas volcánicas

Dirección y Coordinación Editorial
Dr. Ing. Juan Carlos Santamarta Cerezal

AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS.

1; Estudio de los recursos hídricos subterráneos, 2; Estudio de las Obras hidráulicas y aprovechamientos superficiales, 3; Nuevas tecnologías en la producción y aprovechamiento del recurso, 4; Gestión integral del agua, hidrología forestal.

COMITÉ CIENTÍFICO

Selección de capítulos revisados por pares ciegos

DIRECCIÓN Y COORDINACIÓN EDITORIAL

Juan Carlos Santamarta Cerezal

jcsanta@ull.es

DISEÑO Y MAQUETACIÓN DE LA PORTADA

Alba Fuentes Porto

alhafuentesporto@hotmail.com

EDITA:

Colegio de Ingenieros de Montes

Calle Cristóbal Bordiú, 19 28003 Madrid

915 34 60 05

DEPÓSITO LEGAL: TF 205-2013

ISBN: 978 -84 - 616 -3860 -4

272p. ; 29 cm.

Primera Edición: Junio 2013

© Los Autores, Tenerife, 2013

Como citar este libro;

Santamarta Cerezal, J.C. (ed.) et al. (2013). Avances en la investigación de los recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Reunión científica nacional sobre el estudio de los recursos hídricos en islas volcánicas. Universidad de La laguna. Nov 2012.Tenerife. 272 pp.

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier sistema de almacenar información sin el permiso escrito del autor y editores.

LOS TRABAJOS DEL PROGRAMA CONSOLIDER-TRAGUA EN GRAN CANARIA: ESTUDIO DE LA AFECCIÓN AL MEDIO POR LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN LA CUENCA DEL BARRANCO DE LAS GOTERAS

Estévez, Esmeralda. Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.
eeestevez@proyinves.ulpgc.es

Cabrera, M^a del Carmen . Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Palacios-Díaz, M^a del Pino . Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Annetty Benavides. Dpto. de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.

Cruz-Fuentes, Tatiana. Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Hernández-Quesada, M^a del Pilar. Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Mendoza-Grimón, Vanesa. Departamento de Patología Animal, Producción Animal y Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Fernández-Vera, Juan Ramón. Laboratorio Fitopatológico y Agroalimentario. Cabildo Insular de Gran Canaria. España.

Hernández-Moreno, José Manuel. Departamento de Edafología y Geología. Universidad de La Laguna. España.

RESUMEN: En España el uso de aguas regeneradas está muy extendido y se practica desde hace décadas. A pesar del elevado déficit hídrico, el volumen de aguas regeneradas en España no supera el 5% del total de las aguas residuales producidas, aunque en Canarias ha alcanzado el 20% de los recursos hídricos consumidos. En la cuenca del Barranco de Las Goteras (Noreste de Gran Canaria) se riega el campo de golf de Bandama desde hace más de treinta años con aguas regeneradas. El Proyecto nacional CONSOLIDER-TRAGUA ha abordado de manera integrada los aspectos implicados en la reutilización. Su objetivo en Gran Canaria ha sido estudiar la incidencia al medio circundante del campo de golf y especialmente al acuífero subyacente. Entre las posibles consecuencias ambientales de la reutilización, la presencia de contaminantes emergentes en el agua subterránea está adquiriendo especial interés. Tras caracterizar el agua regenerada, el suelo y el sistema de riego del campo de golf, se ha comprobado la importancia del manejo del riego. Asimismo, se ha caracterizado cualitativamente el acuífero, se ha descrito el flujo subterráneo y se ha identificado la presencia de 80 contaminantes emergentes en el agua de riego y el agua subterránea. Además, se ha identificado la existencia de otras fuentes de contaminación o de entrada de contaminantes emergentes al acuífero, como son las fugas

desde fosas sépticas, las roturas en la red de alcantarillado, el riego con aguas regeneradas en otras parcelas agrícolas de la cuenca y la aplicación de productos fitosanitarios en las mismas.

1. INTRODUCCIÓN

El continuo descenso de volumen y calidad de las reservas naturales de agua dulce, junto con los principios de conservación del medio ambiente para un desarrollo sostenible, han dado lugar al planteamiento de soluciones alternativas para atenuar el déficit. Entre estas alternativas se encuentra la reutilización de aguas residuales (Figura 1), cuya contribución está en aumento gracias a los avances en los procesos de tratamiento que dan lugar a aguas regeneradas de calidades aceptables. Además, este recurso no convencional ofrece una garantía de suministro superior a la de las fuentes convencionales, especialmente en zonas semiáridas. Si se consideran los requisitos económicos y financieros de la reutilización, además del valor de las aguas regeneradas en el balance global de costes y beneficios ambientales, se puede concluir que este recurso puede competir con otras alternativas en muchos casos, sobre todo si se tiene en cuenta el concepto de sostenibilidad (Mujeriego 2009).

Debido a que la agricultura es la actividad que demanda más agua, el uso agrícola es la aplicación más extendida y constituye el destino principal del agua regenerada (Jiménez y Asano, 2008). En España el consumo medio estimado en el 2000 fue de 200 hm³ (MIMAN, 2000). En las islas en que se reutiliza el agua regenerada, la principal aplicación es el riego, tanto agrícola como de campos de golf y parques y jardines (Delgado 2009).

En general, el uso de aguas regeneradas para el riego agrícola implica un aporte de nutrientes que permite reducir la cantidad de fertilizantes y modifica las características de los suelos (Marrero y Palacios 1996; Palacios et al 2005).

La aprobación en España del RD 1620/2007, de 7 de diciembre (BOE 2007), por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (Anexo I), ha permitido disponer de un marco normativo con el que respaldar el uso del agua regenerada y potenciar la incorporación de la reutilización en los planes de gestión integrada de los recursos de las diversas cuencas. 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 de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE). En él se establecen indicadores de calidad en función del uso (urbano, agrícola o industrial) y se incorpora el concepto de agua regenerada (Tabla 1).

Gran parte de los usos contemplados tienen una afeción, directa o indirecta, a los acuíferos. Además del uso del agua regenerada para recarga de acuíferos, el uso para el riego, sea de parques o jardines, campos de golf o agrícola, da lugar a que parte del agua utilizada llegue a los acuíferos en forma de retornos. Además, el mantenimiento de humedales y similares también puede suponer un aporte notable a los acuíferos en determinadas condiciones hídricas. Los criterios de calidad necesarios para estos usos son variables, pero en todos los casos se

refieren a los sólidos en suspensión, turbidez y contenido biológico, por lo que cada caso ha de ser estudiado por separado para que parámetros como la salinidad no sean un problema para los acuíferos.

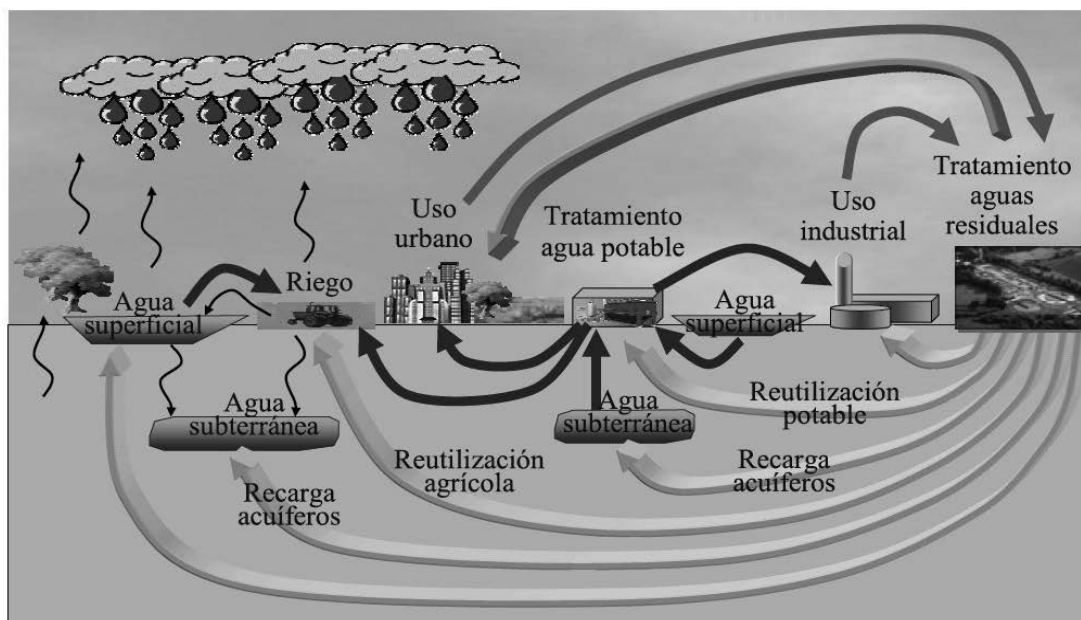


Figura 1; Nuevo ciclo del agua. (Asano 1998, modificada por Delgado 2009)

Tabla 1; Definición de aguas regeneradas, aguas depuradas y reutilización de aguas según el RD 1620/2007, de 7 de diciembre.

AGUAS REGENERADAS	Aguas residuales depuradas que, en su caso, han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan
AGUAS DEPURADAS	Aguas residuales que han sido sometidas a un proceso de tratamiento que permita adecuar su calidad a la normativa de vertidos aplicable.
REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS	Aplicación, antes de su devolución al dominio público hidráulico y al marítimo terrestre para un nuevo uso privativo de las 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 en función de los usos a que se van a destinar

A pesar de que este RD ha surgido para respaldar y potenciar el uso del agua regenerada, está suponiendo un obstáculo debido a sus exigencias burocráticas, como son la adaptación de las concesiones por parte de los usuarios, o por los elevados costes del control analítico asociados a la elevada frecuencia de análisis requerida (Bravo 2009). Por otro lado, en el caso de la reutilización para riego agrícola, las calidades de agua exigidas no tienen en cuenta aspectos agronómicos ni las condiciones climáticas de la zona, el manejo del riego, las características del suelo o las tolerancias del cultivo a regar (Marrero y Palacios, 1996).

2. EL PROGRAMA CONSOLIDER TRAGUA

El programa de investigación CONSOLIDER- TRAGUA: Tratamiento y reutilización de aguas residuales para una gestión sostenible (2006-2012), ha abordado de manera integrada los diferentes aspectos implicados en la reutilización de aguas residuales. Ha sido desarrollado por un sólido equipo pluridisciplinar formado por 24 grupos de investigación, que se agrupan en cuatro temáticas: Tratamientos intensivos en aguas residuales, Control y Evaluación de la Calidad de las Aguas, Reutilización de Aguas para al Recarga de Acuíferos y Riegos e Impacto Socioeconómico de la Reutilización (Figura 2). Como objetivos del Programa se contemplan la realización de un inventario de aguas residuales con potencial en reutilización, la obtención de protocolos de tratamiento en función de sus características y de las económicamente mejores tecnologías disponibles, métodos estándar de análisis químico, microbiológico y toxicológico, información sobre el impacto que las aguas tendrán sobre el medio y el correspondiente análisis económico. También contempla la creación de un programa de postgrado con al menos un máster reglado y un programa de doctorado.

Dentro del grupo dedicado a Reutilización de aguas para la recarga de acuíferos y riegos, se han llevado a cabo estudios concretos en diversos ambientes: filtros verdes y al riego de cultivos para la obtención de biodiesel en Sevilla; riego de chopos en Granada, inyección de agua regenerada en una barrera hidráulica contra la intrusión marina en el delta del Llobregat y afección por la utilización a medio-largo plazo en Gran Canaria (Cabrera et al. 2009; Cabrera et al. 2012).

Los trabajos desarrollados dentro del Programa CONSOLIDER-TRAGUA en Canarias se han enfocado en el estudio de las posibles afecciones al medio por la reutilización de aguas depuradas a medio y largo plazo. Para llevar a cabo los estudios se seleccionó el Campo de Golf de Bandama, que desde 1976 se riega con agua depurada de la EDAR de la ciudad de las Palmas de Gran Canaria. La principal ventaja de dicho emplazamiento es que se dispone de un largo historial de datos agronómicos del propio campo y que en todo momento se facilitó el acceso al mismo, la instalación de instrumentación y la toma de muestras por parte del Real Club de Golf de Las Palmas.

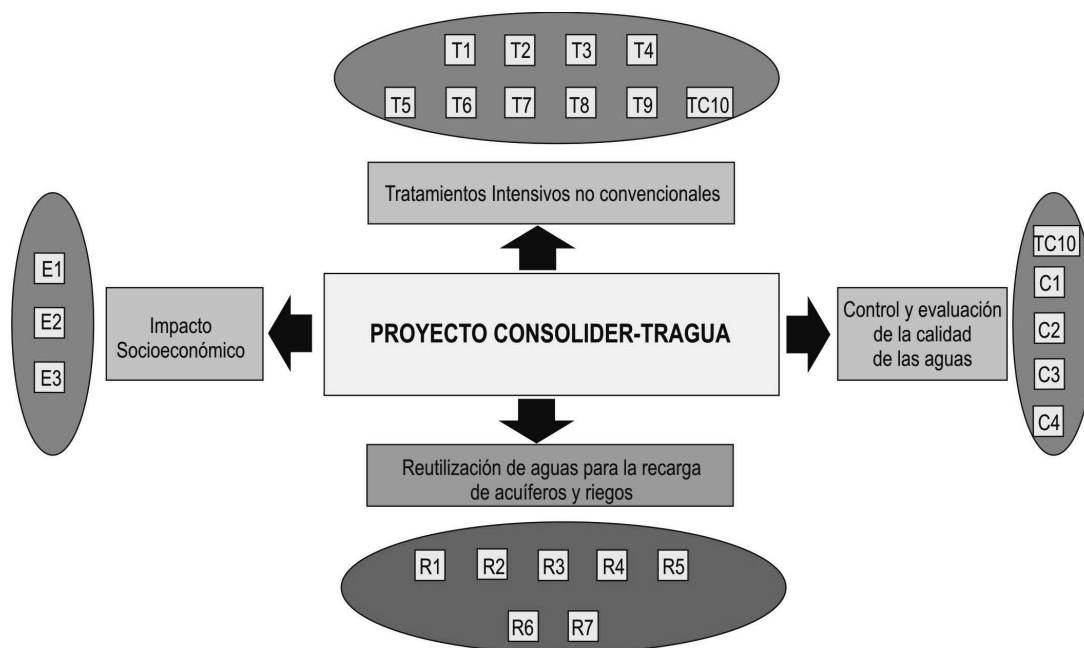


Figura 2; Esquema de los diferentes grupos que integran el Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA (Cabrera et al, 2009a)

3. EL CASO DE GRAN CANARIA: EL RIEGO CON AGUAS REGENERADAS EN EL CAMPO DE GOLF DE BANDAMA

El campo de golf de Bandama es uno de los más antiguos de España. Fue fundado en 1891 con el nombre Las Palmas Golf Club y trasladado en 1957 al Llano de Bandama, pasando a denominarse desde entonces Real Club de Golf de Las Palmas (Hansen y Moreno 2008). Actualmente es visitado por unas 200 personas/día. El campo de golf está emplazado en la zona hidrológica N4 de la Planificación Hidrológica de Gran Canaria de 1999 (CIAGC 1999). Con una superficie de 41 km², la zona comprende las cuencas hidrográficas del barranco principal de Las Goteras y de los barrancos secundarios: Sabinal y Gonzalo (Figura 3). La altitud varía desde un máximo aproximado de 850 m hasta el mar. En la zona alta la precipitación media es de 700 mm/año y en la costa 150 mm/año. Este campo de golf se localiza en el sector central de dicha cuenca (cotas 400-500 m), ocupando aproximadamente 0.3 km². La precipitación y temperatura medias son de 300 mm/año y 19°C respectivamente, con un máximo de 22°C en el mes más cálido y 16°C en el más frío y con una humedad mínima del 78% en invierno y máxima del 85% en verano. La evapotranspiración (ET) calculada por Thornthwaite (Jensen et al. 1990) en la estación agroclimática más cercana y representativa, para el periodo 1961-1990, es de 746 mm (<http://sig.marm.es/siga/>).

La caracterización integral de la zona ha consistido en: un estudio geológico de detalle, una recopilación de la información hidrogeológica en el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria y un inventariado de captaciones de agua subterránea de la cuenca en la que se encuentra

el campo de golf, a partir del cual se implantó una red de control trimestral (entre enero de 2009 y septiembre de 2011), para muestrear agua de riego y agua subterránea. La caracterización en profundidad del campo de golf se ha realizado mediante una campaña de tomografía eléctrica cuyos resultados están en fase de interpretación. Además, se han llevado a cabo varios muestreos de suelo y de agua lixiviada.

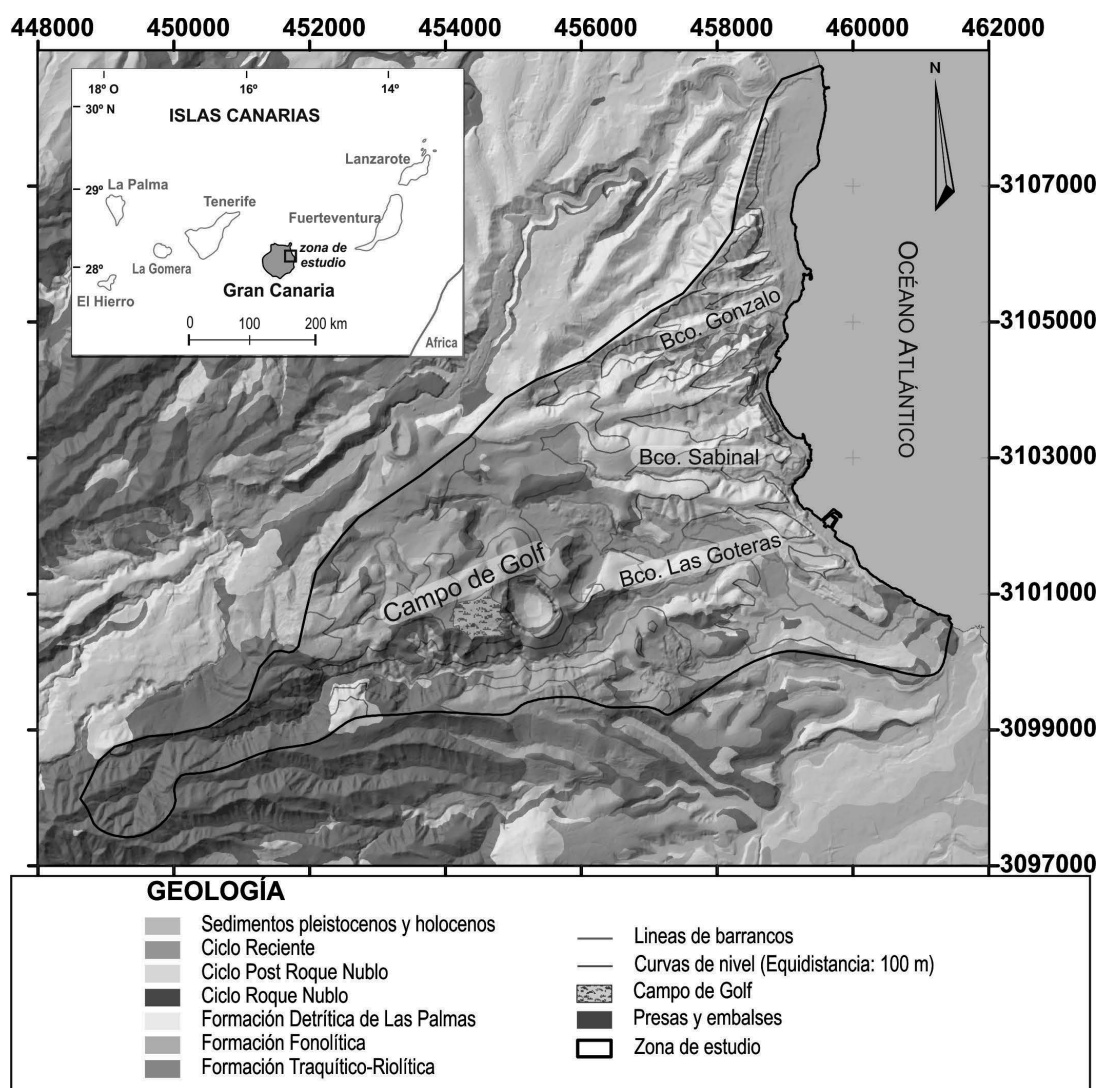


Figura 3; Localización de la zona de estudio, del campo de golf de Bandama y de los tres barrancos principales. Se muestra la geología superficial de la zona (modificada de Balcells et al., 1990).

3.1. El agua de riego

El campo de golf se riega desde 1976 con agua depurada en la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Las Palmas de Gran Canaria. Para llevar a cabo este estudio, se recopiló información a partir de informes de riego desde 1989 hasta la actualidad. A partir del análisis de los resultados recopilados y obtenidos se pudo estudiar la evolución temporal de la calidad del agua de riego del campo de golf. Entre 1989 y 2002, el agua regenerada presentaba una conductividad eléctrica media de 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A partir del 2002, tras la instalación en la EDAR de un sistema de tratamiento terciario de desalación por ósmosis inversa, se produjo un salto cualitativo en la mejora de la calidad del agua (CIAGC 1999). Desde enero de 2008 hasta agosto del 2009, el agua de riego alcanza valores de conductividad eléctrica que oscilan alrededor de los 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A partir de los muestreos llevados a cabo desde noviembre de 2009, se observó que la salinidad descendió hasta alcanzar una media de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una composición química diferente (Figura 4).

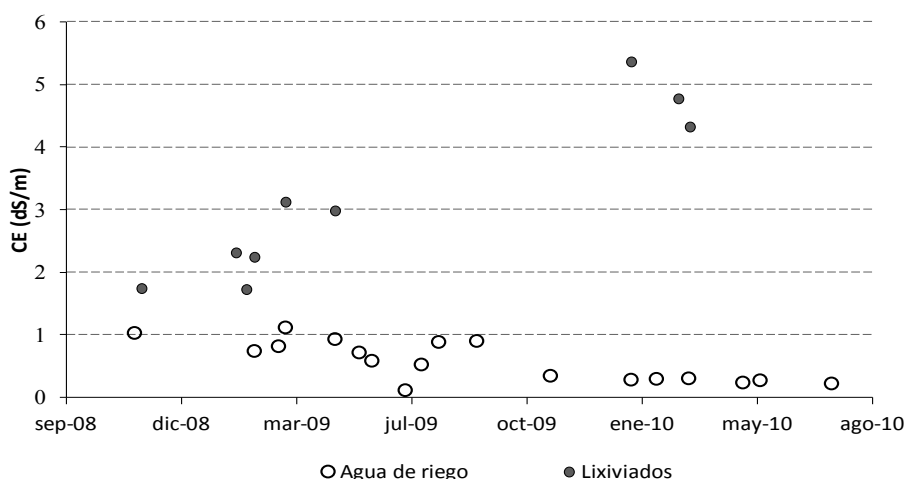


Figura 4; Evolución de la conductividad eléctrica (CE) de las muestras de agua de riego y de los lixiviados del suelo durante el periodo 2008-2010. (Modificado de Estévez et al, 2011).

3.2. Lixiviado del suelo

Los lixiviados en el primer metro de suelo, se muestrearon utilizando lisímetros de succión pasiva (Decagon Devices, Inc.) instalados en dos calles del campo de golf en febrero del 2010. Presentan en general mayor concentración de sales respecto al agua de riego debido al lavado de iones. Paradójicamente, a partir del cambio en la calidad del agua de riego, la salinidad del agua lixiviada en el lisímetro se incrementa en mayor medida (Figura 4). A partir de enero del 2010, con agua de riego de menor salinidad respecto al periodo anterior, la concentración de K disminuyó un orden de magnitud, la concentración de sulfato se redujo hasta la mitad, y las de Ca y Mg se mantuvieron constantes. En el lixiviado, el valor de K y SO_4 se

duplicó y el de Ca y Mg se triplicó a partir de dicha fecha. Este hecho puede ser consecuencia de una desestabilización de los agregados del suelo (Estévez et al, 2011).

3.3. Caracterización litológica y análisis del suelo

El campo de golf se emplaza sobre lavas y piroclastos basálticos con 2000 años de antigüedad, emitidos en las erupciones datadas más recientes de la isla (Balcells et al. 1990, Hansen y Moreno 2008). Estas erupciones cubrieron de cenizas más de 50 km² y dieron lugar al Pico y a la Caldera de Bandama (Figura 4). Esta última, con 900 m de diámetro y 250 m de profundidad, se formó a partir de una erupción altamente explosiva originada por la interacción entre la cámara magmática y las aguas subterráneas. Los materiales emitidos se situaron sobre materiales basálticos del Grupo Roque Nublo con 4 M.a. (in situ y deslizados) y fonolíticos más antiguos (8-13 Ma). Intercalados entre estos últimos y aflorando en el interior de la Caldera existen conglomerados aluviales, que pueden ser correlacionados con el Miembro inferior de la Formación Detrítica de Las Palmas (Figura 3).

Los suelos del campo de golf (in situ) se han desarrollado sobre piroclastos basálticos que forman capas de diferente grado de alteración y carbonatación. Los suelos de superficie están poco alterados, muestran un grado de carbonatación variable y presentan una textura franco-arenosa. Pueden clasificarse como Andosoles vítricos. Varios muestreos (01/2008, 03/2009, 11/2009 y 11/2010) del horizonte superficial del suelo (primeros 15 cm) en algunas calles y roughs del campo de golf, han permitido diferenciar la existencia de varias calles con un suelo in situ (franco-arenoso) y otras calles cubiertas con un suelo transportado desde cotas superiores de la misma vertiente de la isla, con naturaleza limo-arcillosa.

El análisis químico de las muestras tomadas ha demostrado una tendencia a mayores valores de Materia Orgánica (MO) y P en el suelo transportado (hasta 180 mg/kg) que en el suelo in situ (hasta 120 mg/kg), lo que refleja una mayor capacidad de adsorción del suelo más arcilloso (transportado). La variación en la calidad del agua de riego a partir de agosto del 2009 dio lugar a un cambio en la composición química del suelo, produciendo una disminución de los contenidos de B y de la salinidad del suelo. Este último parámetro también se ve afectado por la variación estacional, con una disminución que coincide con el final del periodo húmedo (marzo del 2009), lo que pone de manifiesto la importancia de las fechas seleccionadas para programar los muestreos en este tipo de estudios (Estévez et al. 2011)

Al comparar el suelo de la calle con el del rough que la rodea, se observó una gran variación en la mayoría de los parámetros. Los factores que lo explican tienen que ver tanto con la influencia del cambio en la calidad y cantidad de agua, como con el efecto estacional de la época del muestreo. Esta variabilidad es inferior en las calles, lo que confirma un manejo del riego menos cuidadoso en el rough (Estévez et al, 2011).

4. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍMICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La información hidrogeológica previa incluye un inventario exhaustivo de 56 puntos de agua llevado a cabo en 1997 (CIAGC 1997). Dentro de los trabajos del Programa CONSOLIDER-TRAGUA, se actualizó esta información en 2009 mediante un inventario de puntos de agua que permitió obtener medidas del nivel piezométrico, tomar muestras de agua y entrevistar a los propietarios de 16 captaciones. A partir de estos datos, se implantó una red de muestreo trimestral desde enero de 2009 hasta septiembre de 2011, que incluyó 8 captaciones de agua subterránea (Tabla 2 y Figura 5) y el agua de riego del campo de golf.

4.1. Caracterización hidrogeológica

El análisis de los datos tomados ha permitido caracterizar un sistema acuífero en el que se están explotando fundamentalmente materiales fonolíticos por medio de pozos de diferentes profundidades. La tabla 2 resume las características constructivas e indica las formaciones geológicas explotadas en los puntos de agua incluidos en la red de control.

Tabla 2; Relación de los puntos de agua de la red de control (Estévez et al. 2010).

Nº del pozo	Cota (m)	Prof. (m)	Cota fondo (m)	Fm explotada	Tipo de agua	CE del agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0481 TP	712	207,6	504,4	Roque Nublo	HCO ₃ -Na	<500
0384ATP	301	132,8	168,2	Fonolitas	Cl-HCO ₃ -Na	1500 -1700
4251 TP	275	70	205	Fonolitas	Cl-SO ₄ -Na	1400 -1800
6018 TP	214	31,5	182,5	Basaltos Recientes	Cl-Na	2300 -2600
2969 TP	185	158	27	Basaltos Recientes-Fonolitas	HCO ₃ -Na	2800 -3100
0095 CP	153	96	57	Basaltos Recientes-Fonolitas	Cl-Na	2900
3092 TP	110	34,2	75,8	Fonolitas	Cl-Na	3300 - 3600
Galería (1136BTP)	452	~40	452	Roque Nublo deslizado	Cl-Na	1600 - 1900

Los pozos responden al esquema tradicional, con 3 m de diámetro y galerías horizontales y catas en algunos casos, construidos mediante excavaciones a mano o con explosivos. Los caudales diarios medios equivalentes extraídos en los pozos son en general menores a 1 L/s. Los niveles del agua se han mantenido constantes en todos los pozos, excepto en el pozo 4251 TP, que extrae el agua de galerías secundarias poco profundas.

La galería El Culatón (1136BTP), con 40 m de longitud, parece a unos 60 m bajo el campo de golf (Figura 5), a favor de una fractura desarrollada en sentido SO-NE, en el torrente

denominado El Culatón (Hansen y Moreno 2008). Representa un nivel colgado desarrollado en el contacto entre dos unidades de materiales deslizados del Grupo Roque Nublo, ubicado a 400 m, por encima del nivel freático insular. Estas zonas de contacto se caracterizan por la presencia de material arcilloso triturado que constituyen unidades de despegue producidas durante el deslizamiento en bloques diferenciados de la brecha Roque Nublo. Según los aforos llevados a cabo trimestralmente durante la red control el caudal que mana de la galería es constante y oscila alrededor de 0,05 L/s.

La tentativa de piezometría realizada a partir de los datos obtenidos en el inventario del 2009 (Figura 5) muestra que el flujo responde al modelo general de la isla, siguiendo la dirección OSO-ENE, de cumbre a costa y que el nivel piezométrico general se sitúa a 250 m bajo el campo de golf. Sin embargo, estos pozos tienen profundidades diferentes, por lo que los niveles medidos en los mismos deben ser tomados con precaución. Se distinguió la existencia de un flujo de agua subterránea desde el campo de golf hacia dicho barranco y una zona de explotación preferente en el Barranco de Las Goteras, como atestigua la gran cantidad de pozos que hay en su fondo.

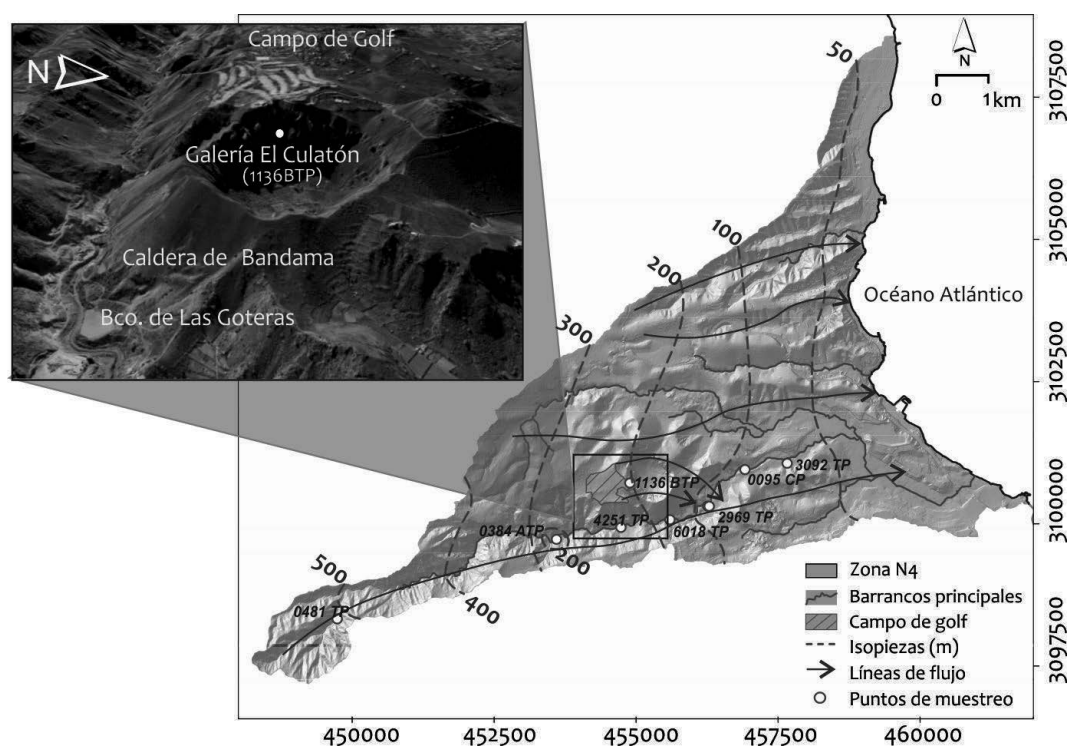


Figura 5; Situación de los puntos seleccionados para la red de control de agua subterránea y piezometría tentativa de la zona de estudio según los datos del inventario de 2009. Izquierda: imagen 3D tomada del Google Earth con la situación de la galería El Culatón (punto 1136 BTP de la red de control), el campo de golf de Bandama, la Caldera de Bandama y el barranco de Las Goteras. Modificado de Cabrera et al. 2009b.

4.2. Caracterización hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica del agua subterránea responde al modelo insular, de forma que la salinidad del agua aumenta de cumbre a costa, paralelamente con el tiempo de residencia del agua en el acuífero y el aporte de aguas de recarga cada vez más salinas según aumenta la cercanía al mar. La Figura 6 muestra los diagramas de Stiff modificados de los puntos inventariados en 2009 y el mapa de isocontenidos en nitrato medidos en la misma campaña. Se observa que en la cumbre las aguas son bicarbonatadas sódicas y menos mineralizadas y que hacia la costa aumenta la salinidad y pasan a ser cloruradas sódicas, siguiendo el esquema hidrogeoquímico establecido para la isla (SPA-15 1975). El pozo 2969TP presenta un agua bicarbonatada sódica con mayor salinidad que el resto, pH medio de 5,7 y temperatura de 25°C, por lo que se puede inferir un aporte de CO₂ endógeno. Durante la red control llevada a cabo en la zona (2009-2011), se pudo deducir que las facies descritas no se ven significativamente modificadas en el tiempo. En ambos periodos la separación entre isolíneas en la región central de la zona de estudio induce a intuir procesos de dilución alrededor del campo de golf, siguiendo las líneas de flujo (Cabrera et al. 2009).

La concentración de nitratos en las aguas subterráneas del curso medio-bajo del barranco de Las Goteras (Figura 6) alcanza concentraciones de 200 mg/L, superando por tanto los umbrales establecidos para dicho compuesto (50 mg/L) según la normativa actual (Directiva CEE 676/91, de 19 de diciembre). Este hecho queda patente en la designación como Zona Vulnerable a la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura, descrita en el Decreto del Gobierno de Canarias 49/2000, de 10 de abril (B.O.C. n° 48, de 19.4.00). Varios factores que podrían explicar esta elevada concentración de nitratos son la existencia de fosas sépticas en el curso alto del barranco (CIAGC 2009), el abono excesivo en cultivos localizados a lo largo del barranco y las insuficiencias en la red de saneamiento, con fugas puntuales durante los últimos años.

La comparación entre la química de la galería El Culatón (situada junto al campo de golf) y la de los pozos situados en el barranco (Figura 6), permite deducir que se trata de dos tipos de agua diferente. De la galería mana un agua clorurada sódica con un claro exceso de Na y un contenido superior en Na+K y Cl y menor en Ca, Mg, SO₄, HCO₃ y NO₃, mientras que el agua subterránea en el barranco muestra un aumento progresivo en salinidad según disminuye la cota dentro de un mismo patrón. Así, se puede concluir que la galería puede ser considerada un punto de muestreo del agua mezcla entre el agua que abandona el suelo en el campo de golf y el agua que circula por niveles colgados del acuífero insular desde cotas más altas.

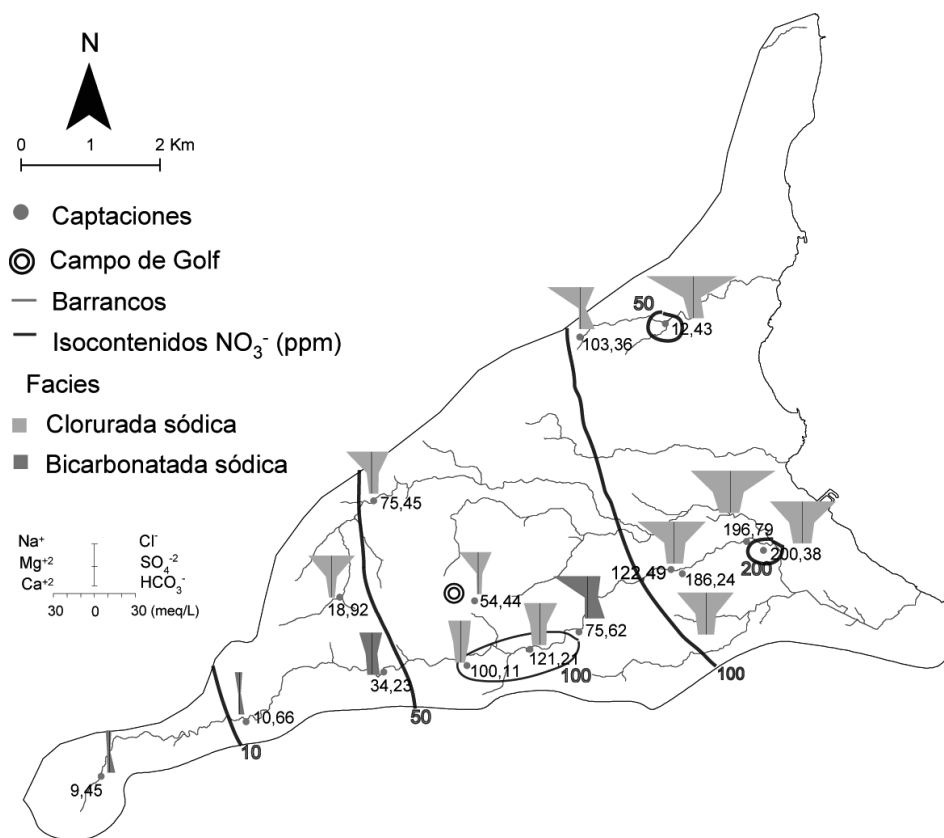


Figura 6; Diagramas de Stiff modificados para los pozos inventariados en enero de 2009 y mapa de isocontenidos en nitrato medidos en la misma campaña. Los valores consignados en cada punto son mg/L de nitratos (Estévez et al. 2012).

5. LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

5.1. Introducción

En los últimos años, el desarrollo de nuevos métodos analíticos con mayor sensibilidad, ha permitido alertar de la presencia en el medio ambiente de contaminantes de preocupación emergente (Contaminants of Emerging Concern, según la USEPA). Esta preocupación se refiere al desconocimiento del riesgo que su presencia pueda suponer (en la salud humana y el medio ambiente), de las frecuencias en las que se encuentran, o de las fuentes de contaminación (Daughton 2004). Por todo ello, el estudio de estos compuestos de interés creciente, se ha convertido en una de las líneas de investigación prioritarias de los principales organismos dedicados a la protección de la salud pública y medioambiental, tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia para la Protección del Medio Ambiente (EPA) o la Comisión Europea.

La limitada disponibilidad de métodos para su análisis, y el escaso conocimiento acerca de su presencia e impacto en los distintos compartimentos ambientales explica que no hayan sido regulados. Sin embargo, algunos productos fitosanitarios e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, entre otros, ya han sido incluidos en la lista de sustancias prioritarias en aguas superficiales (DIR 2008/105 EC), que determina la concentración máxima admisible ($\mu\text{g L}^{-1}$) de los compuestos listados. Además, los Anexos I y II de la citada Directiva incluyen listas de sustancias sujetas a revisión para su identificación como posibles “sustancias prioritarias” o posibles “sustancias peligrosas prioritarias”. Aunque sin umbrales determinados, en estos Anexos se incluyen compuestos farmacéuticos, compuestos fluorados, aditivos de la gasolina, nuevos pesticidas polares, y retardantes de llama. En cuanto al agua subterránea, la Directiva 2006/118/EC relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro (Directiva Hija) establece un umbral máximo de $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ para las sustancias activas de los plaguicidas, incluidos los metabolitos y los productos de degradación y reacción que sean pertinentes.

Además del origen agrícola asociado al uso de productos fitosanitarios, las fuentes de contaminación con emergentes, principalmente fármacos o productos para la higiene personal, están relacionadas con efluentes de EDAR y hospitales, con las excretas de los animales o con fugas desde fosas sépticas (Hernando et al. 2006). El uso de medicamentos para el tratamiento de humanos y animales tiene como resultado la aparición de los mismos en las aguas residuales debido a la excreción tanto de los compuestos ingeridos como de sus metabolitos (Halling-Sørensen et al. 1998; Daughton y Ternes 1999).

La introducción de emergentes en el medio ambiente a través de riego con aguas regeneradas es una vía de gran relevancia en las zonas semiáridas donde la reutilización constituye una práctica importante (Kinney et al. 2006).

Dentro de los objetivos del Programa CONSOLIDER-TRAGUA y de forma coordinada con el Laboratorio de Química Analítica de la Universidad de Jaén, se ha llevado a cabo un muestreo trimestral para evaluar la presencia de contaminantes emergentes y sustancias prioritarias (2008/105/CE) en el acuífero en estudio, y en el agua de riego del campo de golf de Bandama, durante la red de control vigente. Los primeros resultados de estos trabajos (desde julio de 2009 a mayo 2010) han sido publicados en Estévez et al. 2012b.

La tabla 3 presenta el listado de compuestos detectados, agrupados en: Fármacos, Pesticidas, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), Contaminantes Orgánicos Volátiles (COV) y Retardantes de Llama. Se detectaron sólo el 43% de los 183 contaminantes analizados: 42 farmacéuticos, 20 pesticidas, 12 HAP, 2 COV y 2 retardantes de llama. Los compuestos más frecuentes fueron cafeína, nicotina, clorpirifós etil, fluoreno, fenantreno y pireno.

Tabla 3; Listado de contaminantes detectados, divididos en las clases: fármacos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), pesticidas, contaminantes orgánicos volátiles (COV) y retardantes de llama. *: Detectado al menos una vez en agua subterránea (AS) a una concentración superior a 0,1 μgL^{-1} , x: detectado al menos una vez en agua regenerada (AR) a una concentración superior a 0,1 μgL^{-1} , **negrita:** detectado siempre en todas las muestras, en *cursiva:* detectado siempre en AR pero nunca en AS, subrayado: detectado en dos muestreos en AS pero nunca en AR, **sombreado:** sustancias prioritarias en aguas superficiales según la DIR. 2008/105/CE. Modificado de Estévez et al. 2012.

FÁRMACOS Y DROGAS DE ABUSO				PRODUCTOS FITOSANITARIOS	
Acetaminofén	Claritromicina	Ibuprofeno	Oxacilina	4,4'-DDE	Hexaclorobutadieno
<i>Ácido flufenámico</i> ^x	C. benzalconio ^{**}	Ketoprofeno	Propranolol	4,4'-DDT	Isoproturón
Ácido mefenámico	Codeína	Lincomicina	<i>Propifenzona</i>	Alfa-Endo-sulfán	Metoxicloro
Antipirina	Danofloxacín	Mebendazol	Sulfadime-toxina	Atrazina	Oxifluorfen
Atenolol	Difenidra-mina	Metadona	Sulfametizol	Clorfenvin-fos	Pentaclorobenceno
Benzoilecgonina	EDDP	Miconazol	Sulfametoza-zol	Clorpirifós etil *	Procimidona
Bezafibrato	Efedrina	Morfina	Sulfapiridina	<i>Diazinón</i>	Propazina
Cafeína	Eritromicina ^x	Nicotina*	Teobromina ^{**}	Diurón	Simazina
Carbamazepina	Estrona	Nifuroxazida [*]	Teofilina ^x	Gamma-HCH	Terbutilazina
Cimetidina	<u>Fenilefrina</u>	Ofloxacina	Trimetoprima	Hexacloro-benceno	<i>Terbutrina</i>
Cis-Diltiazem	Gemfibrozilo				
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS				R. DE LLA-MA	COV
Acenaftileno	Benzo(b) fluoranteno	Criseno	Fluoreno	TEP	124 TCB
Benzo(a) antra-ceno	Benzo(g,h,i) perileno	Dibenzo(a,h) antraceno	Indeno (1,2,3-d)pireno	TBP	135 TCB
Benzo(a)pireno	Benzo(k) fluoranteno	Fenantreno	Pireno		

Las concentraciones detectadas fueron siempre inferiores de 50 ng L^{-1} , aunque algunos productos farmacéuticos y el pesticida Clorpirifós etil (Tabla 3), se detectaron ocasionalmente en concentraciones más altas. Esta sustancia prioritaria para aguas superficiales supera el umbral máximo (0.1 $\mu\text{g L}^{-1}$) permitido para pesticidas en aguas subterráneas (2006/118/CE).

La mayor presencia de compuestos en el agua regenerada que en el acuífero pueden explicarse por la existencia de procesos de adsorción y degradación, así como la detección muy frecuente de algunos contaminantes en agua regenerada que nunca se detectaron en el agua

subterránea (ácido flufenámico, propifenazona, terbutrina y diazinón). Además, la eritromicina se detectó siempre en el agua regenerada (superando ocasionalmente $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$), y solamente una vez en el agua subterránea. Sin embargo, algunos compuestos (fenilefrina, nifuroxazide y miconazol) nunca detectados en el agua regenerada, se detectaron siempre en el agua subterránea. Este hecho y el mismo rango de concentración en los diferentes grupos, independientemente de la procedencia del agua, indicaron la influencia de fuentes alternativas de contaminación (fosas sépticas, prácticas agrícolas y fugas en la red de alcantarillado).

La detección generalizada en el agua subterránea de compuestos de alto potencial de adsorción, y la independencia de la concentración frente al origen y la profundidad de los pozos, apunta a la existencia de fenómenos de flujo preferencial como posible ruta de entrada a través de macroporos del suelo y fisuras de los materiales volcánicos atravesados.

6. CONCLUSIONES

El estudio de un caso real de riego con agua regenerada en el campo de golf de Bandama ha demostrado la influencia de los cambios en la calidad y cantidad del agua de riego, el efecto estacional de la época de muestreo y el manejo del riego en la afección de esta práctica al medio (suelo, zona no saturada y acuífero).

En el acuífero de la cuenca de las Goteras se explotan fundamentalmente materiales fonolíticos mediante pozos de diferentes profundidades, cuyos niveles piezométricos y composición química del agua se han mantenido prácticamente estables desde 1997, siguiendo el modelo insular general. El nivel piezométrico general se sitúa a más de 200 m de profundidad por debajo del campo de golf, pero existe una galería de agua a 60 m de la superficie del mismo, que corresponde a un nivel colgado que se mezcla con los lixiviados del campo.

A partir del análisis de contaminantes emergentes y del mapa de isocontenidos en nitratos se ha detectado la influencia de fuentes alternativas de contaminación, además del riego de campos de golf, como son las prácticas agrícolas, el riego con aguas regeneradas en el barranco y las fugas desde fosas sépticas o en la red de alcantarillado. Además no se descarta la existencia de flujos preferenciales a través de fracturas de las principales formaciones explotadas (fonolitas Miocenas y brechas deslizadas), que suponen un proceso importante en el comportamiento hidrogeológico de materiales volcánicos.

La alta frecuencia de detección de varios contaminantes emergentes (caféina, nicotina, clorpirifós etil, fluoreno, fenantreno y pireno) y la alta concentración de determinados compuestos (como el antibiótico eritromicina o el plaguicida clorpirifós etil), ponen de manifiesto la importancia de proseguir con estos trabajos para poder cuantificar el riesgo que supone su ubicua presencia en el agua subterránea, así como el estudio del proceso de eliminación natural de los contaminantes emergentes a través de la zona no saturada. El conocimiento de estas sustancias químicas ayudará a identificar los contaminantes específicos dirigidos a

la investigación y el monitoreo futuro, el origen y las vías de entrada al medio, o las acciones futuras para controlar su presencia o eliminación.

AGRADECIMIENTOS.

El presente trabajo se enmarca en el Programa CONSOLIDER-TRAGUA (CSD2006-00044) y el proyecto REDESAC (CGL2009-12910-C03-02). Se agradece a los propietarios de los pozos y al Real Club de Golf de Las Palmas. Los análisis han sido realizados en el Laboratorio Fitopatológico y Agroalimentario del Cabildo de Gran Canaria y en el Laboratorio del Grupo de Investigación de Química Analítica de la Universidad de Jaén.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Balcells, R.; Barrera, J.L. y Ruiz, M.T. 1990. Mapa geológico de España a escala 1:25000 (MAGNA). IGME.
- Bravo Cos, R. 2009. Aspectos técnicos, jurídicos y económicos de la tramitación de concesiones de aguas regeneradas. En: XXVII Congreso Nacional de Riegos. Murcia.
- Cabrera, M.C., de Bustamante, I. y Candela, L. 2009a. Los trabajos del proyecto CONSOLIDER-TRAGUA: Estudios de la afección a las aguas subterráneas por la reutilización de aguas regeneradas. En Contaminación y protección de los recursos hídricos, 13-22. AIH-Grupo Argentino.
- Cabrera, M.C.; Palacios, M.P.; Estévez, E.; Cruz, T.; Hernández-Moreno, J.M. y Fernández-Vera, J.R. 2009b. 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 120(4): 543-552.
- Cabrera, M.C.; de Bustamante, I.; Casas, A.; Candela, L.; Lillo, J.; Palacios, M.P. y Tapias, J.C. 2012. Estudios de reutilización de aguas regeneradas en diversas zonas de España en el marco del Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA. Geotemas 13.
- Candela, L.; Fabregat, S.; Josa, A.; Surio, J.; Vigués, N. y Mas, J. 2007. Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: Application in a golf course (Girona, Spain). Science of the Total Environment 374: 26-35.
- CIAGC (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria). 1999. Plan Hidrológico de Gran Canaria. BOC 939, Decreto 82/1999 de junio.
- CIAGC (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria). 1997. Inventario de puntos de agua, zona N4. Datos internos, sin publicar.
- CIAGC (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria). 2009. Estudio general de la demarcación Hidrológica de Gran Canaria. <http://www.aguasgrancanaria.com>
- Daughton, C.G. 2004. Non-regulated water contaminants: emerging research. Environ Impact Asses Rev (24): 711-32.
- Daughton, C.G. and Ternes, T.A. 1999. Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change? Environ Health Perspect 107 (6):907-38.
- Delgado, S. 2009. Presente y Futuro de la reutilización de aguas en Canarias, Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote. En Discursos Discurso leído en el acto de su recepción como Académico Correspondiente en Tenerife de la Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote.
- Estévez, E.; Cruz, T.; Benavides, A. ; Palacios-Díaz, M. P.; Fernández-Vera, J. R. y Cabrera, M.C. 2010. Caracterización hidrogeológica de Bandama (NE de Gran Canaria) para la identificación de los posibles efectos producidos por la utilización de aguas regeneradas. En Jornadas sobre “El cono-

- cimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15”Acto de homenaje póstumo al Ingeniero D. José Sáenz de Oiza. Las Palmas de Gran Canaria.
- Estévez, E.; Fernández-Vera, J. R.; Benavides, A.; Mendoza-Grimón, V.; Fonseca, F.; Cruz T.; Cabrera, M. C., Hernández-Moreno, J.M. y Palacios-Díaz, M. P. 2011. Caracterización y evolución del suelo y el agua de un campo de golf de Gran Canaria regado desde 1976 con aguas regeneradas. En Jornadas ZNS 11. Salamanca.
- Estévez, E.; Palacios, M.P.; Cruz, T.; Benavides, A.; Rodríguez-Díaz, M.D.; Fernández-Vera, J.R.; Molina-Díaz, A.; Robles-Molina, A. y Cabrera, M.C., 2012a. Evaluación de la afección al acuífero del NE de Gran Canaria por el riego con aguas regeneradas en un campo de golf. En: Las aguas subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI. Ed. AIH-Grupo Español.
- Estévez, E.; Cabrera, M.C., Molina-Díaz, A.; Robles-Molina, J. and Palacios-Díaz, P. 2012b. Screening of emerging contaminants and priority substances (2008/105/EC) in reclaimed water for irrigation and groundwater in a volcanic aquifer (Gran Canaria, Canary Islands, Spain). *Science of the Total Environment* 433: 538–546.
- Halling-Sørensen, B.; Nors Nielsen, S.; Lanzky, P.; Ingerslev, F.; Holten, H.C. and Jørgesen, S.E. 1998. Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment. *Chemosphere* 36: 357-393.
- Hansen, A. y Moreno, C. 2008. El Gran Volcán. La Caldera y el Pico de Bandama. Ediciones Consejería de Medio Ambiente y Aguas del Cabildo de Gran Canaria. 360 pp + mapas.
- Hernando, M.D.; Mezcuca, M.; Fernández-Alba, A.R. and Barcelo, D. 2006. Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments. *Talanta* 69: 334–342.
- Jensen, M.E.; Burman, R.D. and Allen, R. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements (Chapter 5). In: *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. 60-74. ASCE Manuals and Reports No 70Am Soc Civil En., New York.
- Jensen, K.; Matsuno, Y.; Van der Hoek, W. y Cairncross, S. 2001. Limitations of irrigation water quality guidelines from a multiple use perspective. *Irrigation and Drainage Systems* 15: 117–128.
- Jiménez, B y Asano, T. 2008. Water reuse: an international survey of current practice issues and needs. International Water Association, Scientific and technical Report, N°20, London. 628pp.
- Kinney, C.A.; Furlong, E.T.; Werner, S.L. and Cahill, J.D. 2006. Presence and distribution of wastewater-derived pharmaceuticals in soil irrigated with reclaimed water. *Environ. Toxicol. Chem.* 25, 317–326.
- Marrero, A. y Palacios, M. P. 1996. Depuración y reutilización de aguas en Gran Canaria. Consorcio Insular de Aprovechamiento de Aguas Depuradas de Gran Canaria, 55 pp.
- MIMAN, 2000. Libro Blanco del Agua. 637 pp.
- Mujeriego, R. 2009. Aspectos socioeconómicos de la reutilización planificada del agua. En: Conferencia Nacional sobre la reutilización del agua, ADECAGUA (Asociación para la Defensa de la Calidad de las Aguas), Madrid.
- Palacios, M.P.; Tejedor, M.T. y Hernández-Moreno, J.M. 2005. Recomendaciones para el riego con aguas depuradas en la Macaronesia, 229-256. PROYECTO AQUAMAC, Técnicas y métodos para la gestión sostenible del agua en la Macaronesia, Ed. ITC y Cabildo de Lanzarote.