

## CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA NO SATURADA BAJO EL CAMPO DE GOLF DE BANDAMA (GRAN CANARIA) MEDIANTE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

E. Estévez<sup>1</sup>, R. Lovera<sup>2</sup>, J.C. Tapias<sup>3</sup>, M.P. Palacios-Díaz<sup>4</sup>, M. Himi<sup>2</sup>, M.C. Cabrera<sup>1</sup> y A. Casas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física. Campus Universitario de Tafira. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 35017-Las Palmas de Gran Canaria. e-mail: [eeestevez@provinves.ulpgc.es](mailto:eeestevez@provinves.ulpgc.es)

<sup>2</sup> Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona. Martí i Franquès s/n, 08028-Barcelona. e-mail: [albert.casas@ub.edu](mailto:albert.casas@ub.edu)

<sup>3</sup> Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología. Facultad de Farmacia. Universidad de Barcelona. Avda. Joan XXIII s/n, 08028-Barcelona. e-mail: [jtapias@ub.edu](mailto:jtapias@ub.edu)

<sup>4</sup> Dpto. de Patología Animal, Producción animal y Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria. [mpalacios@dpat.ulpgc.es](mailto:mpalacios@dpat.ulpgc.es)

**RESUMEN.** El conocimiento de la geometría y propiedades hidráulicas de la zona no saturada es fundamental para evaluar la dinámica del drenaje subsuperficial del agua que se infiltra desde la superficie del terreno, tanto si se trata de agua de lluvia como de excedentes de riego. Este interés aumenta cuando el riego se realiza con agua regenerada, como sucede en el campo de golf de Bandama que desde 1976 está siendo regado con agua regenerada de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria. El campo de golf de Bandama está situado al borde de la caldera volcánica del mismo nombre y ocupa una extensión aproximada de 30 ha, de las cuales se riegan por aspersión unas 14.5 ha. En el presente trabajo se plantea determinar las características del subsuelo bajo el campo de golf mediante tomografía de resistividad eléctrica, con particular interés en tratar de delimitar las zonas de drenaje preferente que condicionan la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos subyacentes.

**ABSTRACT.** Knowledge of geometry and hydraulic properties of the unsaturated zone is essential to assess the dynamics of the subsurface drainage of water that seeps from the ground surface, whether it is rain water as excess of irrigation. This interest increases when irrigation is conducted with reclaimed water, as it happens on the golf course of Bandama which since 1976 is being watered with reclaimed water from the wastewater treatment plant (WWTP) of the city of Las Palmas de Gran Canaria. The golf course of Bandama is located on the edge of the volcanic caldera of the same name and occupies an area approximately 30 hectares of which some 14.5 ha being irrigated by sprinkling. This work aims at determining subsurface characteristics of golf course using electrical resistivity tomography, with particular interest for delimiting areas of preferential drainage which affect vulnerability to contamination of the underlying aquifers.

### 1.- Introducción

El uso de aguas regeneradas para el riego es una práctica cada vez más utilizada y en Gran Canaria se ha llevado a cabo desde hace más de treinta años. Según el Consejo Insular de Aguas de Gran Canarias en la actualidad, supone más del 8% del total de recursos hídricos de la isla, con un destino casi exclusivo para riego. Sin embargo, se desconoce en gran medida los efectos que puede tener esta práctica en el medioambiente.

El proyecto TRAGUA del programa CONSOLIDER ha abordado el estudio de la utilización de aguas regeneradas desde varios puntos de vista. Dentro de este programa, en Gran Canaria se ha seleccionado el campo de golf de Bandama para llevar a cabo un estudio detallado conducente a evaluar la posible afección al acuífero como consecuencia de dicho riego, que se lleva a cabo desde 1976 con aguas regeneradas en la EDAR de Las Palmas de Gran Canaria. El estudio incluye el sistema completo suelo-zona no saturada-acuífero, por lo que ha sido necesaria una caracterización detallada de cada capa que debe atravesar el agua desde que se infiltra hasta que alcanza el acuífero.

Este trabajo presenta los resultados del estudio geofísico llevado a cabo en el Campo de Golf de Bandama para caracterizar la parte superficial de la zona no saturada con el objetivo de evaluar la dinámica del drenaje subsuperficial del agua que se infiltra desde la superficie del terreno, tanto si se trata de agua de lluvia como de excedentes de riego.

### 2.- Zona de estudio

El campo de golf está situado en la cuenca del barranco de Las Góteras, al NE de Gran Canaria (Figura 1). Los materiales que afloran en la zona son lavas y piroclastos basálticos con 2000 años de antigüedad muy poco alterados. Estos materiales fueron emitidos en las erupciones que dieron lugar al Pico y la Caldera de Bandama y cubrieron de cenizas más de 50 km<sup>2</sup> (Hansen y Moreno, 2008).

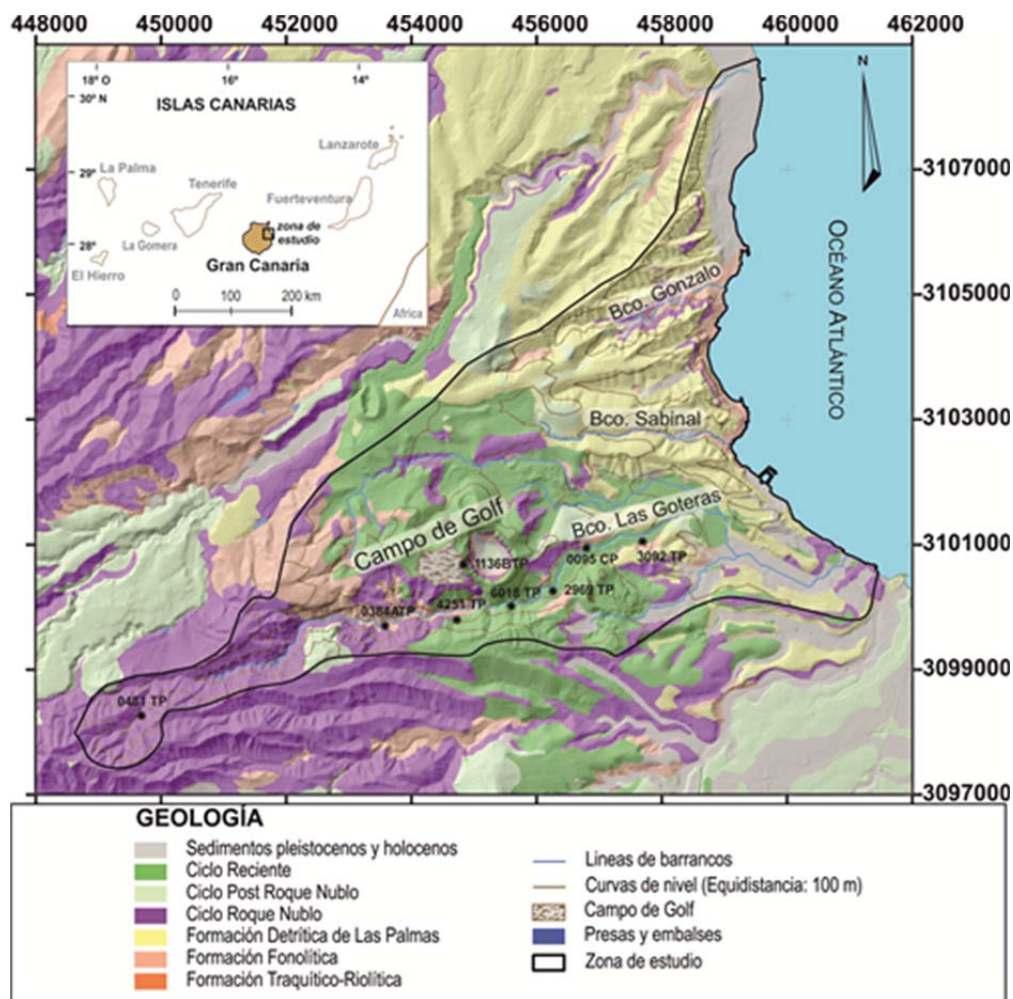


Fig. 1. Localización de la zona de estudio donde se indica la situación del campo de golf de Bandama y de los puntos de agua de la Red de Control; se muestra la geología superficial de la zona (modificada de Balcells et al., 1990)

Esta caldera de origen freatomagmático tiene 900 m de diámetro y 250 m de profundidad y el campo de golf se localiza en su sector occidental. Por tanto, la ladera este de la caldera, representa un corte natural que permite la observación directa de la zona no saturada, conformada por una capa superficial de piroclastos muy recientes que cubren lavas e ignimbritas basálticas Pliocenas (in situ y deslizados), que a su vez están situados sobre materiales fonolíticos miocenos, entre los que se intercalan conglomerados aluviales que afloran en el interior de la caldera.

El campo de golf de Bandama consta de 18 hoyos cuyas calles y greens ocupan una dimensión aproximada de 14.5 has regados por aspersión desde 1983. Las frecuencias de riego varían entre el invierno y el verano, cuando las dosis alcanzan máximos de 7 mm/día. Desde el punto de vista climatológico, el campo de golf de Bandama está situado en una zona con un módulo pluviométrico anual algo superior a los 300 mm, mientras que la temperatura media es de 19°C (con 22°C en verano y 16°C en invierno).

### 3.- Contexto edafológico e hidrogeológico

Palacios et al. (2009) caracterizaron el suelo del campo de golf, distinguiendo dos tipos diferentes en función de su origen: in situ y transportado (Figuras 2 y 3). Dada la geología de la zona, el suelo in situ (muestreado en la calle 7) está conformado por piroclastos basálticos poco alterados con una potencia de 0.25-0.5 m, sobre los que se ha desarrollado una cubierta de alteración franco-arenosa.

El suelo transportado desde cotas superiores de la misma vertiente de la isla fue utilizado para la construcción de las calles (*fairways*) 1, 2 16 y 18 del campo de golf. Este tipo de suelo fue muestreado en la calle 2, tiene un grosor similar al suelo in situ y es de naturaleza arcillo-limosa. Estudios posteriores (Estévez et al., 2011) han identificado un comportamiento diferente de ambos suelos y han demostrado que la gran variabilidad de los parámetros del suelo están influenciadas por el manejo del riego, el tipo de suelo, la calidad y cantidad de agua y la estacionalidad del muestreo.



**Fig. 2.** Localización del área de estudio, sobre un modelo digital del terreno en tres dimensiones (Google Earth, 2009) donde se sitúa el campo de golf, el Barranco de Las Goteras, la Caldera, el Pico de Bandama, la galería El Culatón, el rezume y los dos lisímetros (L.1 y L.2). En azul se distinguen las calles de suelo transportado (modificado de Estévez et al., 2011)

A partir de 2002 la instalación de un sistema de tratamiento terciario de desalación, ha disminuido sensiblemente la salinidad del agua regenerada (1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y a partir de diciembre de 2011 la calidad ha mejorado aún más hasta alcanzar 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este cambio en la calidad del agua de riego produjo un efecto directo en los parámetros medidos en el suelo y en el agua recogida en los lisímetros instalados en el campo, apuntando a una desestabilización de los agregados del suelo (Estévez et al., 2011).

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 subyacente al campo de golf está formado por materiales volcánicos y el flujo del agua subterránea sigue el esquema general para la isla (de cumbre a costa), en esta zona en concreto de OSO a ENE, según se puede deducir de la distribución de la piezometría que ha permanecido prácticamente estable en el período entre 1997 y 2011 (Cabrera et al., 2009, Estévez et al., 2012). El nivel piezométrico general se sitúa a más de 250 m de profundidad y a 100 m por debajo del fondo de la caldera.

Durante el desarrollo del proyecto, se implantó una red de control de puntos de agua a lo largo del barranco de las Goteras (Figura 2), que permitió caracterizar el sistema acuífero en el que se están explotando fundamentalmente materiales fonolíticos por medio de pozos de diferentes profundidades.

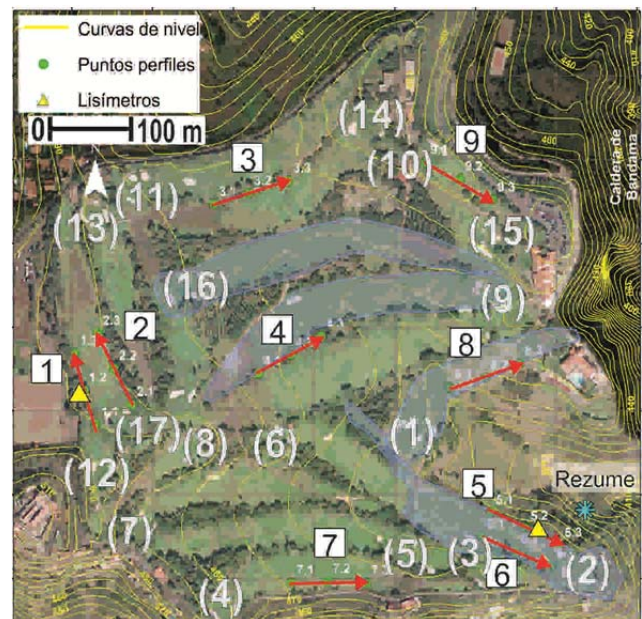
Esta red de control, incluyó el muestreo de una galería de agua (El Culatón) situada a 60 m bajo el campo de golf, en el escarpe Oeste de la caldera de Bandama (Figura 2). Esta galería se ubica por encima del nivel freático insular y representa un nivel colgado desarrollado en el contacto entre dos unidades de materiales deslizados del Grupo Roque Nublo. Estas zonas de contacto se caracterizan por la presencia de material arcilloso triturado que constituyen las unidades de despegue durante el deslizamiento en bloques diferenciados (Estévez et al., 2011). Es de destacar la existencia de un rezume de agua desde las cotas más bajas del Campo de Golf hacia el Barranco de Las Goteras.

#### 4.- Metodología

La metodología de estudio para caracterizar el subsuelo del campo de golf de Bandama ha sido la tomografía de resistividad eléctrica (Griffiths y Barker). Esta técnica ha mostrado su utilidad en muchas aplicaciones hidrogeológicas y ambientales aunque se ha utilizado muy pocas veces para el estudio del subsuelo en campos de golf (Lovera et al., 2011).

Para conseguir el objetivo propuesto de determinar las variaciones laterales y verticales de los materiales situados bajo el campo de golf se han efectuado 9 perfiles cubriendo lo más homogéneamente posible la totalidad del campo. Cada perfil tiene de 94 m de longitud y alcanza aproximadamente 20 m de profundidad, suficiente para los objetivos del estudio. La ubicación de los perfiles sobre el campo estuvo condicionada por la morfología de las calles y en cualquier caso evitando entorpecer el desarrollo del juego durante el registro de los datos. La figura 3 muestra la localización de cada una de ellas.

Las secciones de tomografía eléctrica se adquirieron con un resistivímetro SYSCAL PRO de 48 electrodos con un dispositivo Wenner-Schlumberger y 2 metros de separación entre los electrodos. Las coordenadas UTM del centro, inicio, final y de cada perfil se midieron con un navegador GPS Garmin que en las condiciones óptimas de trabajo del campo de golf proporcionaron una precisión de  $\pm 5$  m.



**Fig. 3.** Disposición de los 9 perfiles de tomografía eléctrica sobre el campo de golf de Bandama con la situación del punto central y los extremos de cada perfil y el sentido de adquisición (generalmente de sur a norte y de oeste a este). En color azul se distinguen las calles de suelo transportado. Se indica la situación de los lisímetros y del rezume. Entre paréntesis: número de hoyo

Para invertir los valores de resistividad aparente medidos y obtener la sección que se aproxime a la distribución de resistividades reales del subsuelo se utilizó el programa

RES2DINV (Loke, 2004). En este método, el modelo de subsuelo se divide en celdas de dimensiones determinadas cuyos valores de resistividad eléctrica se modifican de forma iterativa hasta conseguir un ajuste aceptable entre los datos experimentales y la respuesta teórica del modelo, siguiendo un proceso de optimización no-lineal de ajustes por mínimos cuadrados (Loke y Barker, 1996).

Entre las diferentes opciones del método, la técnica de inversión seleccionada después de varios ensayos y teniendo en cuenta las características litológicas de la zona de estudio, ha sido la denominada ajuste con suavizado o “*smoothness-constrained*” en la que a partir de un modelo inicial el método de optimización calcula los cambios de resistividad de cada celda de forma progresiva para disminuir la función objetivo. La forma típica de evaluar el grado de ajuste es el error cuadrático medio (RMS).

Después del proceso de inversión, el ajuste de la respuesta teórica de los modelos de resistividad con los datos experimentales ha sido excelente, de forma que el RMS de ajuste ha sido en todos los casos inferior al 4% (oscilando entre un mínimo error de 1,32% en el perfil 6 y un máximo de 3,40% en el perfil 8). Precisamente este perfil es el único que ha requerido la aplicación de corrección topográfica, ya que fue adquirido con una ligera pendiente. La corrección topográfica de este perfil se llevó a cabo asignando una cota de altura a cada electrodo a partir de un modelo digital del terreno.

## 5.- Resultados

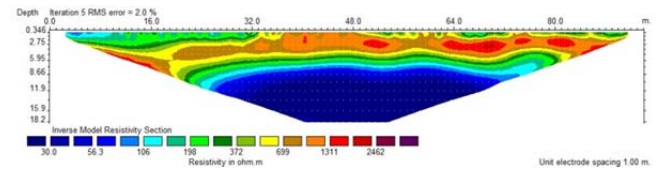
Las secciones de tomografía eléctrica obtenidas muestran un elevado contraste de resistividad, con valores que oscilan entre 30 ohm·m a más de 3000 ohm·m y para facilitar la interpretación de las secciones se ha mantenido la misma escala de colores en todos los perfiles.

Los resultados obtenidos después del proceso de inversión han permitido delimitar tres unidades bien definidas por sus valores de resistividad eléctrica. Una capa superficial de suelo, con mayor potencia en las áreas con suelo transportado, un segundo nivel de piroclastos porosos de alta resistividad eléctrica, que disminuye su potencia al aumentar la distancia al centro de emisión (Pico y Caldera de Bandama) y una capa profunda de baja resistividad eléctrica, atribuida a las ignimbritas pliocenas.

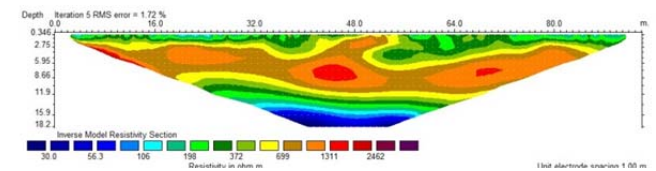
Las variaciones de grosor y propiedades de estas tres electrofacies características pueden apreciarse claramente a partir de la comparación entre las secciones de los perfiles 1, 3 y 9 (Figuras 4 a 6), adquiridos respectivamente al oeste, centro y este del campo en dirección a la caldera de Bandama, donde el grosor de los piroclastos aumenta, así como la profundidad de la capa de ignimbritas.

Las secciones de tomografía eléctrica han permitido también determinar las características texturales de los suelos superficiales. Este hecho se aprecia muy claramente en la sección del perfil 6 (Figura 7) donde en la segunda parte del perfil sobre la gruesa capa de piroclastos de muy alta resistividad eléctrica destaca una capa de 2 m de grosor y baja resistividad eléctrica correspondiente a un suelo

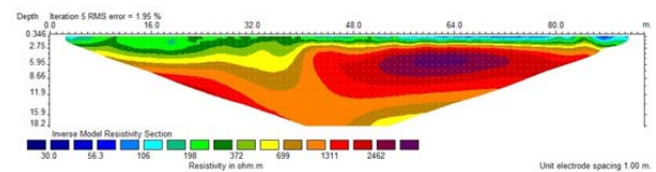
transportado de naturaleza arcillosa.



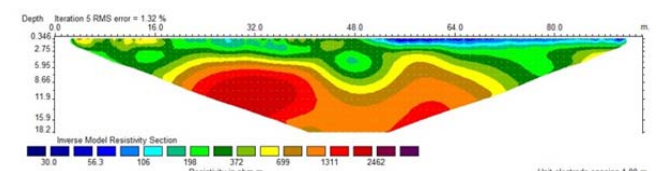
**Fig. 4.** Sección de resistividad eléctrica del perfil 1 situado en el extremo occidental del campo de golf donde el nivel de piroclastos es delgado y la profundidad del sustrato ignimbrítico de baja resistividad eléctrica (> 30 ohm·m) se encuentra a unos 5 m de profundidad



**Fig. 5.** Sección de resistividad eléctrica del perfil 3 situado en el extremo norte de la zona central del campo de golf donde se observa la capa de piroclastos es bastante más gruesa y que la profundidad del sustrato ignimbrítico de baja resistividad eléctrica se encuentra a más de 15 m de profundidad



**Fig. 6.** Sección de resistividad eléctrica del perfil 9 situado en el extremo nororiental del campo de golf, donde se observa el importante grosor de la capa de piroclastos de muy alta resistividad eléctrica y como desaparece el sustrato ignimbrítico que se encuentra a mayor profundidad

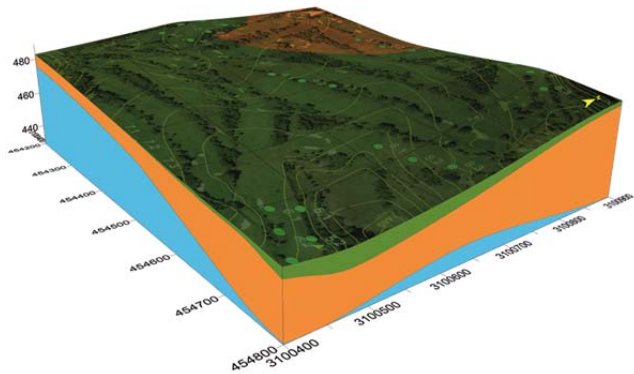


**Fig. 7.** Sección de resistividad eléctrica del perfil 6 situado en el extremo suroriental del campo de golf, donde en la segunda parte del perfil destaca una capa superficial de 2 m de grosor y baja resistividad eléctrica interpretada como un suelo transportado de naturaleza arcillosa

Con los resultados de todas las secciones de tomografía eléctrica se ha construido un modelo tridimensional del subsuelo donde se muestran las variaciones de grosor de las tres electrofacies distinguidas en cada una de las secciones de tomografía eléctrica (Figura 8).

Además se han delimitado las zonas preferentes de infiltración correlacionando los valores empíricos de resistividad eléctrica y de permeabilidad hidráulica vertical de las distintas formaciones, de forma que los niveles piroclásticos de mayor resistividad eléctrica son los más porosos y a su vez los de mayor permeabilidad hidráulica. En cambio, los suelos de baja resistividad eléctrica se

corresponden con suelos transportados de naturaleza más arcillosa y por tanto con una menor permeabilidad hidráulica. La existencia de un rezume bajo la capa de suelo de menor cota y mayor grosor y de una galería de agua en la pared de la caldera y bajo la capa de piroclastos, corroboran los resultados obtenidos.



**Fig 8.** Sección 3D del subsuelo del campo de golf de Bandama mostrando las variaciones de grosor de las tres electrofacies distinguidas en las secciones de tomografía eléctrica: capa superior de suelo en color verde, capa de piroclastos en color marrón y capa inferior de ignimbritas en color azul. Las coordenadas UTM y los grosores están en metros

## 6.- Conclusiones

Los resultados de esta investigación muestran que la tomografía de resistividad eléctrica es una técnica muy útil para investigar de forma rápida y no destructiva la geometría y características litológicas del subsuelo bajo un campo de golf, incluso en medios geológicos complejos, como en el caso del campo de Golf de Bandama situado en el borde de una caldera volcánica.

Los valores de resistividad eléctrica han permitido identificar cada una de las unidades litológicas que constituyen el subsuelo del campo de golf proporcionando un modelo general que concuerda con las observaciones edafológicas efectuadas a partir de catas y del conocimiento geológico de la estructura volcánica donde se asienta el campo.

El modelo obtenido proporciona información detallada sobre la variabilidad lateral y vertical de cada una de las capas y a partir de una correlación empírica entre los valores de resistividad eléctrica y permeabilidad hidráulica permite delimitar las zonas preferentes de drenaje subterráneo que supongan un mayor riesgo a la vulnerabilidad del acuífero subyacente.

*Agradecimientos.* Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos CGL2009-07025, CGL2009-12910 y C03-02SD2006-00044 del Programa Consolider. Los autores expresan también su gratitud al Club de Golf de Bandama, y en particular al “greenkeeper” del campo Pelayo Guerra por facilitarnos la toma de datos experimentales. Los autores agradecen la asistencia de Annetty Benavides, Tatiana Cruz, Pilar Hernández, Vanessa Mendoza y Gema Naranjo durante la campaña de campo.

## 7.- Bibliografía

- Balcells, R., J.L. Barrera, y M.T. Ruiz, 1990. Mapa Geológico de España 1:25000 (MAGNA). IGME.
- Cabrera, M.C., M.P. Palacios, E. Estévez, T. Cruz, 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*. 120, 543-552.
- Estévez, E., M.C. Cabrera, J.R. Fernández, J.M. Hernández-Moreno, V. Mendoza-Grimón, y M.P. Palacios, 2010. 25 years using reclaimed water to irrigate a golf course in Gran Canaria. *Span. J. of Agric. Res.* 8, 95-101.
- Estévez, E., J.R. Fernández, A. Benavides, V. Mendoza-Grimón, F. Fonseca, T. Cruz, M.C. Cabrera, J.M. Hernández-Moreno, y M.P. Palacios-Díaz, 2011. Caracterización y evolución del suelo y el agua de un campo de golf de gran canaria regado desde 1976 con aguas regeneradas, en *Estudios de la zona no saturada del suelo*, Vol. X, ed. J. Martínez-Fernández y N. Sánchez-Martín, 35-40.
- Griffiths, D.H., y R.D. Barker, 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *J. Appl. Geophys.* 29, 211-226.
- Hansen, A., y C. Moreno, 2008. *El Gran Volcán. La Caldera y el Pico de Bandama*. Ediciones Consejería de Medio Ambiente y Aguas del Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- Loke M.H., y R.D. Barker, 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophys. Prosp.* 44, 131-152.
- Loke, M.H., 2004. RES2DINV. *Rapid 2D Resistivity and IP inversion using the least squares method* (version 3). User Manual. 133.
- Lovera, R., J.C. Tapias, M. Himi, E. Margui, I. Queralt, y A. Casas, 2011. Caracterización de la zona no saturada de campos de golf mediante tomografía de resistividad eléctrica. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, Vol. X, 103-108.
- Palacios, M.P.; Estévez, E.; Cabrera, M.C.; Hernández-Moreno, J.M.; González-Naranjo, V.; Cruz, T. y Fernández-Vera, J.R., 2009. Resultados preliminares de los efectos de la utilización de agua depurada para riego en el campo de golf de Bandama (Gran Canaria), *Estudios de la zona no saturada del suelo*, Vol. IX, ed. O. Silva y J. Carrera, 184-191.