

# La modelización tridimensional del flujo del agua subterránea y transporte de calor en la gestión de recursos geotérmicos someros en zonas urbanas

## *The Three-dimensional modelling of groundwater flow and heat transport in the management of shallow geothermal resources in urban areas*

Alejandro García Gil<sup>1</sup>, Eduardo Garrido Schneider<sup>1</sup>, José Ángel Sánchez Navarro<sup>2</sup>, Enric Vazquez-Suñé<sup>3</sup> y Jesús Mateo Lázaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Unidad de Zaragoza. Manuel Lasala 44, 9ºB 50006, Zaragoza. agargil@unizar.es; egarrido@igme.es

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra Universidad de Zaragoza, c/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza. joseange@unizar.es; jesusmateo@eid.es

<sup>3</sup> GHS, Grupo de Hidrogeología Subterránea (IDAEA), CSIC, c/ Jordi Girona, 18-26, 08034 Barcelona. enric.vazquez@idaea.csic.es

### ABSTRACT

*The management of the thermal use of groundwater in shallow urban aquifers requires a numerical model capable of reproducing the impacts of actual exploitations and of predicting further impacts in the future. In this work, the numerical model developed for the management of shallow geothermal resources in the city of Zaragoza (Spain) is presented. The model allows to explain the data coherent with the fluid physics and the heat transport in porous media and also provide predictions for the thermal impacts at mid- and long-term. Finally, the possibilities and advantages derived from the use of the numerical modelling for the concession process of new exploitation licenses are described.*

**Key-words:** *Urban hydrogeology, shallow geothermal Resources, management and numerical modelling.*

### RESUMEN

*La planificación del uso geotérmico del agua subterránea en acuíferos someros urbanos requiere un modelo numérico capaz de reproducir los efectos de la explotación actual y ser capaz de predecir los impactos derivados de dicha actividad. En este trabajo se presenta el desarrollo preliminar de un modelo numérico que puede contribuir a mejorar la gestión de los recursos geotérmicos someros en la ciudad de Zaragoza. El modelo numérico permite implementar toda la información hidrogeológica y térmica recopilada, explicar esta información de forma coherente reproduciendo la física de fluidos y termodinámica en medios porosos y predecir a medio y largo plazo los impactos producidos. Finalmente se muestran las posibilidades y ventajas derivadas del uso del modelo numérico en la gestión de permisos de concesión de derechos de explotación para nuevos aprovechamientos.*

**Palabras clave:** *Hidrogeología urbana, recursos geotérmicos someros, gestión y modelos numéricos.*

*Geogaceta*, 61 (2017), 59-62  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 14 de agosto de 2016  
Revisión: 3 de noviembre de 2016  
Aceptación: 25 de noviembre 2016

## Introducción

La utilización de energías renovables constituye la principal estrategia adquirida por la comunidad internacional en el proceso de mitigación de los efectos del cambio climático. Por ello, en el contexto de la geotermia somera (<400 m), el desarrollo y expansión de las tecnologías utilizadas para aprovechar las propiedades térmicas del subsuelo ha experimentado una aceleración importante en los últimos años (Lund y Boyd, 2015). La ciudad de Zaragoza representa una ciudad pionera en España y de referencia internacional en la utilización de

recursos geotérmicos someros por medio de sistemas abiertos (García-Gil *et al.*, 2015); de los 60-80 MW instalados en España (GEOPLAT, 2010) en la ciudad de Zaragoza se superan los 30 MW (Garrido *et al.*, 2010) instalados en instalaciones de bombas de calor en sistemas abiertos. Esto se debe a las excelentes condiciones hidrodinámicas del acuífero aluvial urbano, conformado por los importantes depósitos fluviales correspondientes a las terrazas de los ríos Ebro, Gállego y Huerva, los cuales confluyen en la propia área metropolitana de la ciudad. Ésta tecnología de explotación de recursos geotérmicos se ha ido introdu-

ciendo en los últimos 25 años de forma totalmente ajena a cualquier proceso de planificación urbana o de estrategia energética. Para evitar el estancamiento y promover el uso de estos recursos renovables el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) iniciaron en 2009 una línea de colaboración con el objetivo de caracterizar los aprovechamientos geotérmicos existentes y evaluar el impacto térmico generado mediante el establecimiento de una red de monitorización geotérmica. El fin último de esta colaboración es obtener una herramienta de apoyo a la planificación de los aprovecha-

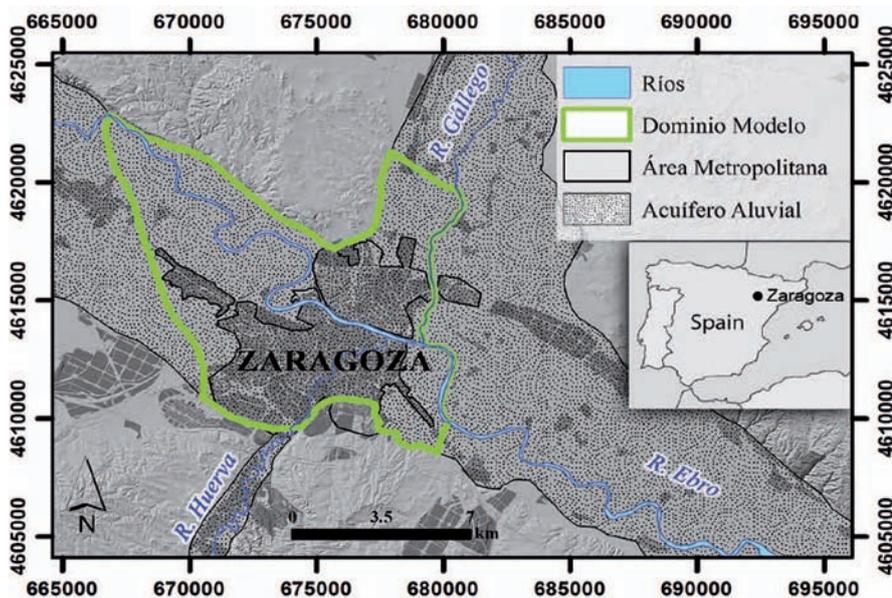


Fig. 1.- Localización de la zona de estudio y dominio del modelo numérico: WGS 1984 Complex UTM Zona 30 N. Versión en color de todas las figuras en la versión web del artículo.

Fig. 1.- Study area location and numerical model domain. WGS 1984 Complex UTM Zone 30N. Color version from all figures in web article version.

mientos de aguas subterráneas para garantizar a largo plazo el buen estado de la masa de agua, establecer los criterios téc-

nico-científicos para la concesión de nuevos derechos de explotación y garantizar los existentes.

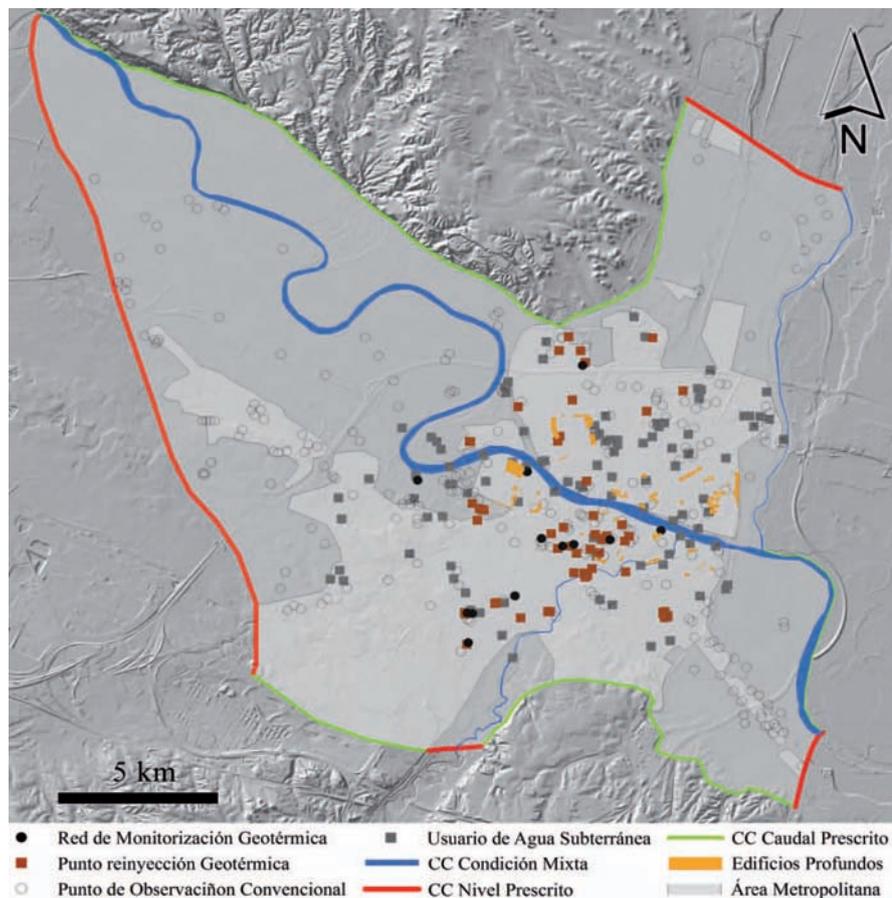


Fig. 2.- Condiciones de contorno del modelo numérico y red de control.

Fig. 2.- Boundary conditions of the numerical model and monitoring network.

### Aproximación al problema

La importancia del flujo de agua subterránea en los procesos advectivos de transporte de calor revela la necesidad de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico preciso para la predicción de la respuesta del acuífero a la explotación de los recursos geotérmicos someros y, por lo tanto, para la gestión energética del acuífero. La complejidad del sistema a explotar es un aspecto importante a considerar en un entorno urbano, no sólo debido a la heterogeneidad de los parámetros hidráulicos y térmicos, sino también a las numerosas estructuras del subsuelo existentes, así como a las diversas actividades de uso de las aguas subterráneas que varían temporal y espacialmente. Los diferentes procesos de flujo y de transporte de calor así como las condiciones de contorno existentes son múltiples. Por ejemplo, los sótanos de edificios profundos, sistemas de alcantarillado, redes de calefacción urbana, recarga superficial, extracción de aguas subterráneas, instalaciones geotérmicas superficiales o la interacción río-acuífero.

Los modelos de gestión térmica de acuíferos urbanos hasta la actualidad hacen una aproximación basada en sistemas SIG o modelos simplificados de análisis que toman en cuenta parcialmente los procesos de flujo de agua subterránea y transporte de calor. Estos modelos simplistas fueron diseñados para la administración, que no utilizan necesariamente hidrogeólogos especialistas. En consecuencia, las normativas, si existen, han intentado proporcionar una herramienta sencilla para una amplia gama de problemas complejos en entornos urbanos, sacrificando la precisión necesaria. Estos enfoques simplificados parecen ser menos eficaces, y han dado lugar a una condición jurídica internacional muy diversa que configura una barrera para el desarrollo de la energía geotérmica somera (Jaudin, 2013).

La complejidad existente en el entorno urbano para la gestión energética de los acuíferos someros escapa a toda solución analítica simple que resuelva el problema de transporte de calor en medios porosos, siendo por lo tanto necesario un modelo numérico que integre toda la información hidrogeológica, geotérmica y de infraestructura urbana.

### Modelo numérico

Mediante el código FEFLOW (Trefry y Muffels, 2007) se ha modelizado el flujo de

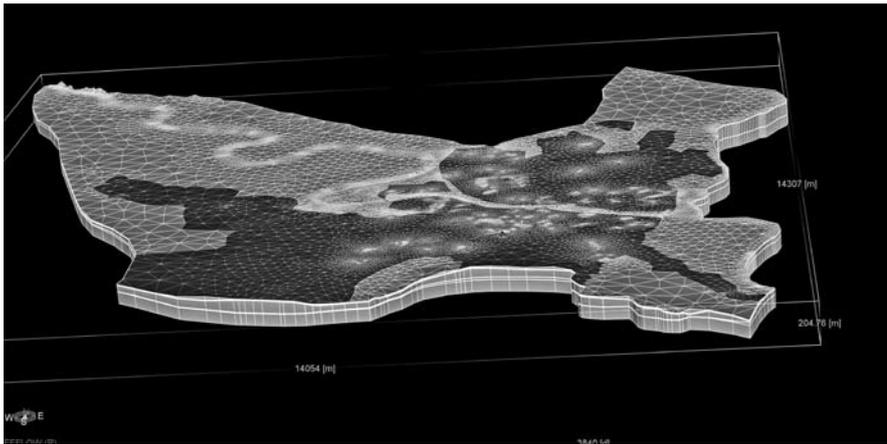


Fig. 3.- Malla tridimensional de elementos finitos no estructurada. El ámbito de la zona urbana se presenta sombreada en superficie.

Fig. 3.- 3D unstructured finite element mesh. Metropolitan area is shown in black.

agua subterránea y transporte de calor para el acuífero aluvial urbano de la ciudad de Zaragoza. Para cubrir el área de la ciudad y tratar adecuadamente la relación río-acuífero, el dominio seleccionado ocupa un área de 106 km<sup>2</sup> (Fig. 1). Para reproducir la relación río-acuífero se ha considerado una condición de contorno mixta transitoria donde el nivel de referencia varía en el espacio con la pendiente de los ríos y su magnitud varía en el tiempo de acuerdo con los hidrogramas correspondientes. Para calcular

los caudales de infiltración y descarga se ha considerado un valor del factor de goteo variable a lo largo de los cauces. Para simular las diferentes explotaciones geotérmicas en sistema abierto se ha prescrito un caudal en los puntos de captación e inyección donde se han asignado los caudales (y temperaturas) de explotación y su evolución temporal correspondiente. Respecto a las condiciones de contorno para el problema de transporte de calor se ha adoptado una temperatura prescrita en las condiciones de

Parámetros	Valores
Transmisividad	60-3000 m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup>
Coefficiente almacenamiento	1E-3-0.3 [-]
Espesor saturado	1-60 m
Porosidad	5-30%
Capacidad calorífica fluido	4,2 MJ·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup>
Capacidad calorífica sólido	2-2,52 MJ·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup>
Conductividad térmica fluido	0,65 W·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup>
Conductividad térmica sólido	0,52-2,9 W·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup>
Dispersividad longitudinal	0,1-5 m
Dispersividad trasversal	0,1-1,95 m

Tabla I.- Parámetros hidrodinámicos y térmicos utilizados en el modelo numérico.

Table I.- Hydraulic and heat transport parameters used in the numerical model.

contorno de nivel prescrito que corresponde con la temperatura de fondo del acuífero; temperatura constante a lo largo del año que habitualmente es ligeramente superior a la temperatura media anual de la zona. En las condiciones de contorno de los ríos se ha impuesto una temperatura prescrita transitoria acorde a las medidas de temperatura del agua en superficie. Además, como

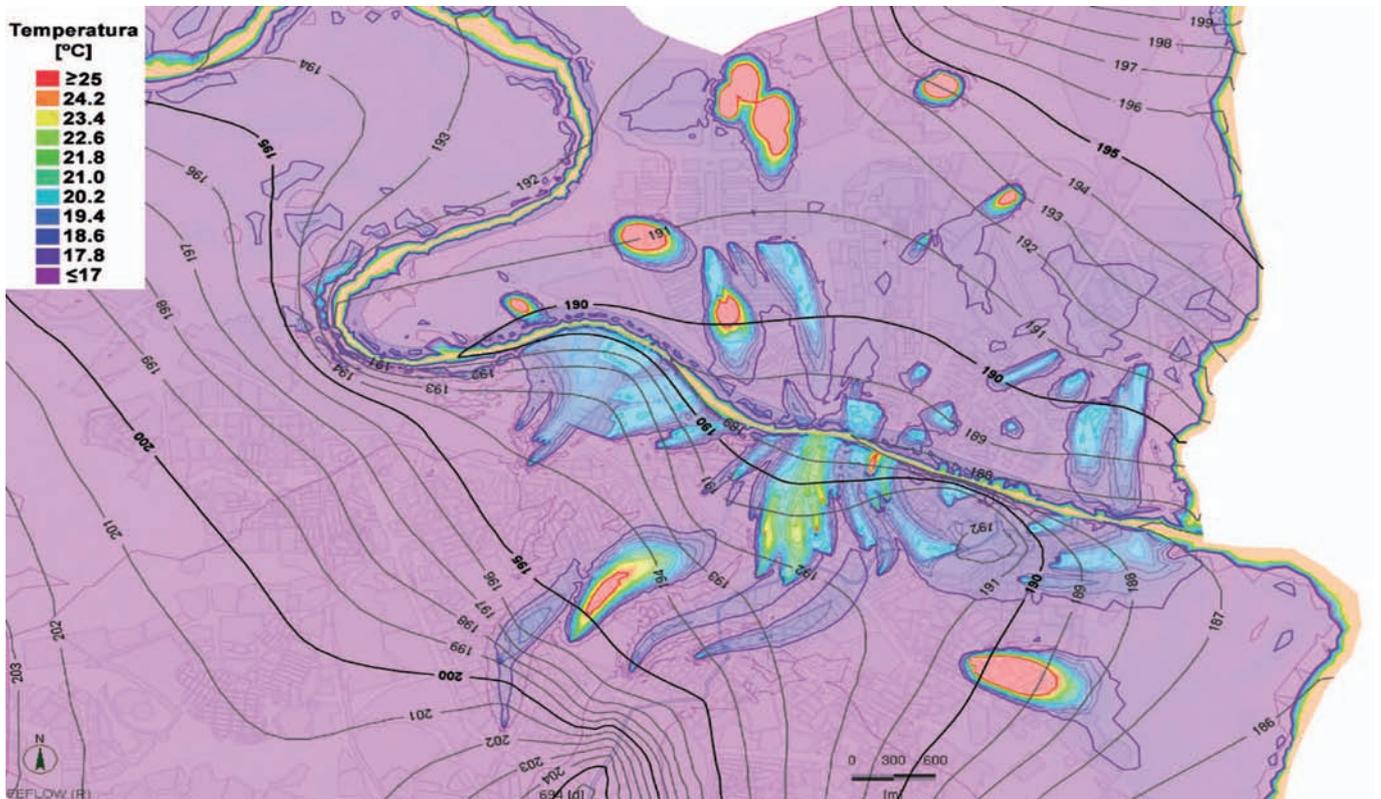


Fig. 4.- Resultados del modelo numérico para agosto de 2013: distribución de temperatura en el espacio y mapa de isopiezas.

Fig. 4.- Model results for August 2013: temperature distribution and head contour maps are shown.

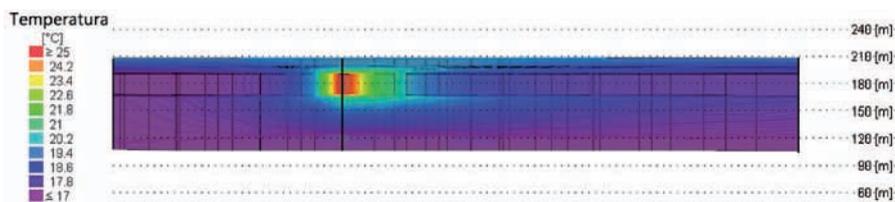


Fig. 5.- Sección transversal del modelo numérico en un aprovechamiento geotérmico en agosto 2013.

Fig. 5.- Cross section of the numerical model near a groundwater heat pump system in August 2013.

condición de contorno mixta se ha implementado la presencia de edificios profundos y el intercambio de calor con la atmósfera mediante el suelo como superficies a una temperatura predefinida separados por una conductancia térmica que permite simular entradas de calor por conducción desde la superficie y conducción-advención en el acuífero a partir de edificios profundos.

La discretización espacial de la malla tridimensional no estructurada (Fig. 3) se compone de 913.983 elementos finitos y 484.264 nodos repartidos en 21 capas. Existe un refinado horizontal de la malla hacia los puntos de explotación y los tres ríos existentes en el dominio. El refinado vertical se ha realizado aumentando el número de capas hacia las zonas de transición entre el sustrato terciario y el material aluvial acuífero, y entre la zona saturada y la zona no saturada. Ello permite reproducir los flujos de calor verticales producidos principalmente por conducción.

El modelo reproduce en régimen transitorio la explotación geotérmica desde 2004 hasta 2013 con incremento temporal de 1 día. La calibración del modelo se ha realizado a partir de los datos obtenidos de la red de monitorización geotérmica (Fig. 2) y puntos soporte (ver puntos de observación convencionales en la figura 2). Mientras que los puntos de la red de monitorización presentan datos con registros de cadencia horaria, las medidas obtenidas en puntos soporte procedentes del Inventario de Puntos de Agua (IPA) de la CHE tienen un carácter puntual en el tiempo, con medias discretas. Los datos obtenidos de los puntos soporte han servido para establecer el modelo hidrogeológico conceptual en el que se basa el numérico y calcular una piezometría estacionaria calibrando el mapa de transmisividades. A partir del modelo estacionario las medidas de alta resolución temporal han servido para solucionar el problema transitorio y calibrar la distribución en el espacio del coeficiente de almacenamiento. La calibración de los parámetros térmicos (porosidad, capacidad calorífica, conductividad térmica) se ha realizado uti-

lizando, por un lado los datos del régimen de explotación de los aprovechamientos geotérmicos (caudales y temperaturas) y los datos procedentes de la red de monitorización geotérmica utilizando los datos de temperatura con cadencia diaria.

Los parámetros utilizados se muestran en la tabla I. Una información más detallada acerca de los parámetros hidráulicos y térmicos utilizados, así como del proceso y resultados de la calibración, puede encontrarse en García-Gil *et al.* (2014).

## Resultados y discusión

En la figura 4 se muestran la distribución de temperaturas en planta y las isopiezas como resultado del modelo numérico para agosto de 2013. Se pueden apreciar los impactos de cada uno de los aprovechamientos geotérmicos. Es evidente la interacción térmica que pueden experimentar los aprovechamientos, tanto en sí mismos (autointerferencias) como entre distintos de ellos. Las plumas térmicas pueden extenderse más de 800 m aguas abajo y muchas de ellas confluyen en el río Ebro. Otro tipo de impactos térmicos se pueden observar procedentes del propio río Ebro y de edificios profundos. En la figura 5 se muestra en detalle una sección transversal a una pluma de calor generada por un aprovechamiento geotérmico. La figura muestra como la pluma se propaga por la capa acuífera saturada poniendo de manifiesto la importancia de la advención de calor producida por el agua subterránea. Además, se muestra el flujo de calor vertical por conducción hacia el sustrato Terciario y la zona no saturada. Esta conducción vertical supone un almacenamiento de calor que condiciona el comportamiento de la pluma en subsiguientes periodos de explotación.

Con los resultados expuestos se justifica la necesidad de esta aproximación numérica para establecer los criterios técnico-científicos para la concesión de nuevos derechos de explotación de recursos geotérmicos someros.

## Conclusión

La complejidad del entorno urbano hace de la modelización numérica una herramienta no solo útil y eficiente, sino única, para integrar toda la información de la masa de agua subterránea gestionada y tener una visión conjunta para la planificación del uso de los recursos geotérmicos someros.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco de los Convenios de Colaboración suscritos en 2009 y 2015 entre el Instituto Geológico y Minero de España y la Confederación Hidrográfica del Ebro para el estudio del impacto térmico generado por los pozos de climatización en la ciudad de Zaragoza y aplicación de un modelo de transporte de calor para simulación de alternativas de gestión de aprovechamientos geotérmicos. Este trabajo ha sido financiado, en parte, por el proyecto de la Universidad de Zaragoza nº UZ2014-CIE-04.

## Referencias

- García-Gil, A., Vázquez-Suñe, E., Garrido Schneider E., Sánchez-Navarro, J.A. y Mateo-Lázaro, J. (2014). The thermal consequences of river-level variations in an urban groundwater body highly affected by groundwater heat pumps. *Science of the Total Environment* 485-486: 575-587.
- García-Gil, A., Vázquez-Suñe, E., Sánchez-Navarro, J.A. y Mateo-Lázaro, J. (2015). Recovery of energetically overexploited urban aquifers using surface water. *Journal of Hydrology* 531: 602-611.
- Garrido, E., Sánchez Navarro, J.A. y Coloma, P. (2010). Aprovechamiento geotérmico somero del acuífero aluvial urbano de Zaragoza: primeros resultados. *Geogaceta*, 49: 119-122.
- GEOPLAT (2010). *Visión a 2030*. Ministerio Ciencia e Innovación. 51 p.
- Jaudin, F. (2013). *D2.2: General Report of the current situation of the regulative framework for the SGE systems*. REGEOCITIES, 50 p.
- Lund, J.W. y Boyd, T.L. (2015). En: *World Geothermal Congress 2015*. 51p.
- Trefry, M.G. y Muffels, C., (2007). FEFLOW: A finite-element ground water flow and transport modeling tool. *Ground Water* 45(5): 525-528.