

MODELADO MATEMÁTICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS DE UN
ACUÍFERO ALUVIAL COSTERO, CON VISTA AL APROVECHAMIENTO GEOTERMAL
DEL ESPACIO SUBTERRÁNEO URBANO

Mancuso, M.A.

malvamancuso@ufsm.br

<http://www.cesnors.ufsm.br/professores/malva/>

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM/CESNORS – Brasil

Carol, E.

eleoc Carol@yahoo.com.ar

CONICET - Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) - Argentina

Kruse, E.

kruse@fcnym.unlp.edu.ar

CONICET - Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) - Argentina

Jorge, C.

cjorge@lnec.pt

<http://www.lnec.pt/organizacao/dg/ngea/CJorge>

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) - Portugal

RESUMEN

El acuífero aluvial estudiado está situado en la costa del Río Tajo (Lisboa, Portugal). El acuífero presenta un espesor saturado de hasta 40 m, caracterizada por intercalaciones de arenas, limos y arcillas. Las aguas subterráneas reciben la influencia de la salinidad del río Tajo, no siendo utilizadas para consumo humano. Las temperaturas, de hasta 20,9°C, observadas en las columnas de agua de 16 pozos de monitoreo, permiten el análisis del potencial de su utilización para el aprovechamiento geotermal de baja entalpía en edificios. Con el objetivo de simular el flujo y la dinámica de la distribución espacial de las temperaturas, considerando la influencia de las estructuras subterráneas existentes en el ambiente urbano, fue definido un modelo hidrogeológico numérico para el área. La hidráulica del acuífero fue simulada utilizando el programa MODFLOW 2000. El área de 1,3 km² fue dividida en células de 10 x 10 m y, verticalmente, en 3 capas con espesores variables. La simulación fue realizada en estado estacionario hasta la calibración, considerando los niveles de agua observados en 16 pozos de monitoreo. Para la simulación de la distribución de temperaturas fue utilizado un modelo de transporte de solutos, desarrollado a partir del programa MT3DMS, considerando 42 datos de temperaturas, observados a distintas profundidades.

A partir de los resultados fue posible identificar, en 3D, las temperaturas del acuífero distribuidas por debajo del área urbana y localizar posibles interferencias externas en las

temperaturas naturales. La elaboración del modelo hidrogeológico numérico de flujo, combinado con el de transporte, permite considerar la influencia de las barreras hidráulicas provocadas por estructuras de ingeniería, asociando, también, factores como la condición de frontera térmica proporcionada por el Río Tajo. A partir de estos resultados es posible realizar las simulaciones del efecto de sistemas de intercambio térmico para la climatización de edificios.

PALABRAS CLAVE: modelado, temperatura, flujo, hidrogeología urbana, geotermia

ABSTRACT

The studied alluvial aquifer is located in between the River Tagus (Lisbon, Portugal) and the outcropping volcanic rock and limestone rock. The aquifer, with saturated thickness of 40 m, shows vertical stratification with layers of medium to fine sands, clay and silt. Groundwater quality is influenced by the salinity of Tagus River and is not being used for drinking purposes. Groundwater temperature is up to 20,9°C and was observed on the water column of 16 piezometers. This temperature allows the analysis for the potential use of groundwater to supply low enthalpy geothermal systems in buildings. To simulate flow and temperature on the alluvial aquifer was considering the influence of engineering underground structures paced in the urban area. Base on MODFLOW 2000 code software was developed a numerical hydrogeological model for the studied area. The modeled area of 1.34 km² area was discretized into 10 x 10 m cells in x and y directions, and 3 layers of variable thickness in the z direction. The model calibration for steady state was achieved based on groundwater level data collected in 16 piezometers. For the solute transport model was applied MT3DMS code. The calibration was achieved based on 42 temperature data observed at different depths on the water column. It was running a 3D temperature model for the urban underground area, that's allowed to assess the interferences on the natural system. The flow model coupled with the heat transport model showed the influence of hydraulic barriers due underground engineering structures and others as Tagus River and channels boundaries. Based on the results was possible to simulate the effect of thermal interchange systems used for building air-conditioning.

KEYWORDS: modeling, temperature, flux, urban hydrogeology and geothermic

INTRODUCCIÓN

La presencia de estructuras de ingeniería en el subsuelo involucra la existencia de

distintos efectos ambientales, entre ellos modificaciones en las condiciones de flujo y en la calidad de las aguas subterráneas, debido al efecto de barrera hidráulica (Mancuso et. al. 2010 y 2011a). Otras modificaciones, como pérdidas de cañerías de distribución de aguas o cloacales, pérdidas de tanques de almacenamiento de líquidos, barreras a la renovación de agua dulce en zonas costeras etc., también pueden ocasionar interferencias en los parámetros físico químicos del medio subterráneo (Mancuso et. al. 2011b). Por otro lado, la demanda energética en los centros urbanos viene aumentando la solicitud de estudios sobre el potencial de aprovechamiento térmico para uso en edificios (Fossoul, et al., 2010). Considerando la complejidad del espacio subterráneo en ambientes urbanos y la multiplicidad de su uso, este trabajo fue desarrollado con el objetivo de simular el flujo y la dinámica de la distribución espacial de las temperaturas de las aguas subterráneas, en el acuífero aluvial costero del barrio de Alcántara (Lisboa, Portugal).

En el área de estudio se reconoce la presencia de un acuífero aluvial, delimitado en su base por el Complejo Volcánico de Lisboa (basaltos) y, parcialmente al Norte, por rocas calcáreas compactas (Almeida, 1986) (Figura 1).

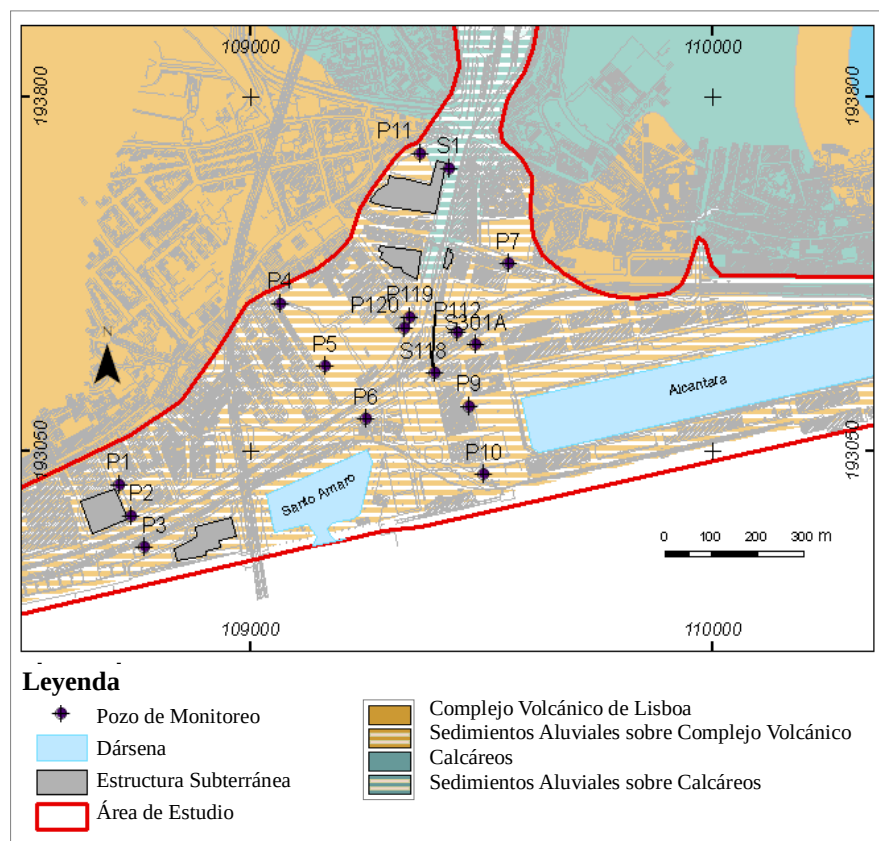


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio

El acuífero aluvial corresponde a una faja situada entre los basaltos del complejo volcánico de Lisboa y el Río Tajo. Está constituido principalmente por arenas medias a finas, a veces con pequeños guijarros, restos de conchillas y fragmentos de rocas, niveles areno-arcillosos y arcillo arenosos. En el área subyacente al Canal de Alcántara se observan niveles de arcillas limosas, en especial en las proximidades de la base del acuífero. El acuífero presenta un espesor saturado de hasta 40 m, y las aguas subterráneas reciben la influencia de la salinidad del río Tajo, no siendo utilizadas para consumo humano. Las temperaturas, de hasta 20,9°C, observadas en las columnas de agua de 16 pozos de monitoreo, permiten el análisis del potencial de su utilización para el aprovechamiento geotermal de baja entalpía en edificios (Mancuso, et al. 2011b).

METODOLOGIA

Considerando la influencia de las estructuras subterráneas existentes en el ambiente urbano, fue definido un modelo hidrogeológico numérico para el área, incluyendo la modelación numérica para la simulación de la dinámica de las aguas subterráneas que a su vez abarca las interacciones del agua subterránea con las aguas superficiales del río Tajo, de las dársenas, canales y el efecto en ellas provocado por la presencia de estructuras y barreras hidráulicas presentes en el subsuelo. Entre las estructuras subterráneas se destacan el Canal Alcántara, que se encuentra en contacto directo con la base permeable del acuífero, playas de estacionamiento, desagües pluviales, pasaje peatonal y estructuras para bombeo.

Para la caracterización de la dinámica del agua subterránea y variación térmica se consideraron datos de 16 pozos de monitoreo (GAPRES, 2008 y Oliveira et al., 2008) y 144 perforaciones realizadas en el área permitieron la caracterización geológica del acuífero. El sistema presenta porosidad granular y su conductivade hidráulica (k) varía entre 0,01 m/d y 17 m/d, de acuerdo a ensayos Lefranc realizados en el área (Mancuso et al., 2011b). Instrumentos de medición continua instalados en los 16 pozos de monitoreo, a profundidades distintas, indicaron variaciones de los niveles freáticos concordantes con las variaciones de la marea, que oscilan entre 0,2 m y 2,1 m.

La simulación del flujo subterráneo se basó en los principios indicados por Anderson y Woessner (1992). Para la elaboración del modelo matemático se adoptaron condiciones de borde y las características impuestas por el medio, considerando el comportamiento del acuífero libre dispuesto sobre el basalto que se asume como base impermeable.

Se consideró que se trata de un acuífero anisótropo y heterogéneo, sujeto a la recarga por la infiltración de aguas meteóricas y por la influencia del sistema de drenaje de las

aguas superficiales, natural e impuesto por la acción humana. En este último caso por las pérdidas de la red de abastecimiento de agua y desagües. Para la simulación y calibración del sistema se adoptó una recarga espacialmente variable, con valores medios del orden de 169 mm/año de acuerdo a lo definido por Oliveira et al (2008).

De acuerdo a los datos de nivel freático medidos en los pozos de monitoreo, se planteó como condiciones de borde un flujo constante en el límite Norte del área (interface entre los basaltos y los calcáreos) y carga hidráulica constante, en las áreas de afloramiento del acuífero cárstico. Los valores de flujo subterráneo en estos bordes se obtuvieron de los resultados del modelo matemático regional (Mancuso et al, 2008) para el cual en un área de aproximadamente 11 km², se tuvieron en cuenta los sedimentos aluviales, los basaltos y los calcáreos. El límite Sur del modelo es el Río Tajo, que es considerado como un borde de carga hidráulica constante (0 m.s.n.m.) en el estado estacionario.

Para la modelación se utilizó el código de diferencias finitas MODFLOW (Harbaugh et al. 2000). El área de estudio, con extensión de 1,34 km² fue dividida en una malla constituida por 170 líneas y 284 columnas, con celdas de 10 m en la dirección x, 10 m en la dirección y, y 3 capas de espesor variable en la dirección z, conformando en total una malla con 39.864 celdas.

Para la simulación del sistema fueron incluidos en el acuífero aluvional los siguientes elementos del subsuelo:

- 1) barreras hidráulicas: playas de estacionamientos subterráneos, pasaje peatonal y estación de bombeo;
- 2) desagües de aguas pluviales en contacto con los niveles de agua del acuífero: Canal de Alcántara;
- 3) cuerpos de agua superficiales: dársenas de Santo Amaro y de Alcántara.

Con base en el modelo matemático de flujo calibrado, fue simulada la distribución espacial de las temperaturas en acuífero costero.

Los instrumentos instalados próximos al río Tajo indican que hay variación de temperatura en la columna de agua del acuífero. Las aguas más profundas (–15,9 m.s.n.m.), presentan temperaturas constantes, del orden de 19,7°C, en cuanto que se observa la disminución de la temperatura hacia la superficie, donde alcanza 18,9°C (-0,97 m.s.n.m.) (Mancuso et al. 2011b). Los datos evidencian las zonas de interacción entre el acuífero y las aguas superficiales (Río Tajo, desagües pluviales y dársenas). La variabilidad temporal de la temperatura a lo largo del día, evidencia la influencia de las oscilaciones de la marea en el sistema. Fueron observada temperaturas de hasta 20,9°C, en las columnas de agua de los pozos de monitoreo.

Para la simulación de la distribución de temperaturas en el sistema, fue utilizado un modelo de transporte de solutos, desarrollado a partir del programa MT3DMS (Zheng & Wang, 1999, 2006), considerando 42 datos de temperaturas, observados a distintas profundidades.

RESULTADOS

En el proceso de calibración, en régimen permanente, se tuvo en cuenta como carga hidráulica inicial la cota topográfica. De acuerdo con los resultados, el flujo subterráneo se produce en sentido al río Tajo, al Canal Alcántara y a las dársenas. El flujo sufre un desvío donde intercepta las estructuras subterráneas más profundas, encontrándose los niveles ligeramente elevados en sus proximidades. En las áreas más bajas, las cotas medias no sobrepasan los 0,5 m s.n.m. En la margen izquierda del Canal predominan cotas piezométricas del orden de 0,3 m s.n.m., que se elevan hacia el norte (área de afloramiento de los calcáreos) y en dirección al área de afloramiento de los basaltos. Las conductividades hidráulicas (k) resultantes de la calibración presentan variaciones de 0,1 a 15 m/d, con los valores más elevados en las áreas próximas a la costa. El resultado de la calibración del modelo matemático indicó un error medio absoluto de 0,2 m, el desvío standard de 0,2 m. Los niveles piezométricos resultantes indican cotas medias de 0 m.s.n.m en las proximidades de las áreas de descarga de las aguas subterráneas, como el río Tajo, las dársenas y el Canal de Alcántara, y cotas de 2,5 m s.n.m, en la margen izquierda del Canal, en la dirección del área de afloramiento del calcáreo.

El modelo térmico fue evaluado después de la simulación de 100 días de transporte (Figura 2), a partir de modelo de flujo en régimen permanente. Los datos de temperatura de las condiciones iniciales de frontera que resultaron en la estabilidad del modelo térmico fueron: 1) temperatura de 18,9°C: para los desagües de aguas pluviales en contacto directo con los niveles de agua del acuífero con abertura para el Río Tajo, dársenas de Santo Amaro y de Alcántara, Río Tajo y recarga del acuífero; 2) temperatura de 19,8°C: para el flujo subterráneo en las fronteras norte del área; 3) temperatura de 20,5°C: para la base del sistema.

Considerando el análisis de error resultante del modelo de simulación de transporte, realizada con base en datos de temperatura media, de la zona intermediaria del acuífero, obtenidos a partir de las lecturas de 13 piezómetros, la simulación presentó un error medio de 0,06°C, un error medio absoluto de 0,5°C y un desvío standard de 0,65°C.

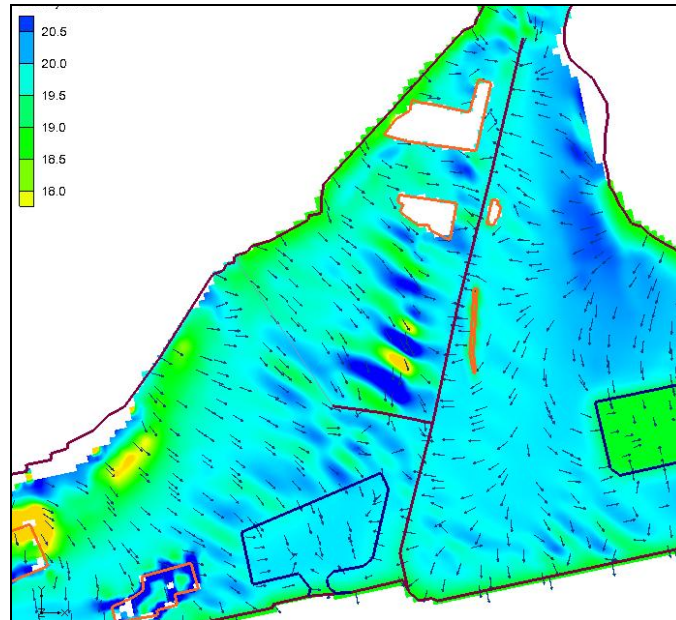


Figura 2. Temperatura en la tercera camada del acuífero (indicada en °C)

A partir del modelo térmico de la distribución de las temperaturas en el acuífero, fue simulado, por un período de 40 días, el funcionamiento de un sistema de aprovechamiento geotérmico previsto para una futura edificación (simulado en MODFLOW y MT3DMS). El sistema consistió en un pozo de bombeo (80 m³/d, con temperatura del agua a 19°C) y un pozo de inyección (con agua a temperatura de 30°C), localizados a una distancia de 140 m entre sí. Los resultados indican que no ocurre interferencia entre los dos pozos durante ese período (Figura 3).

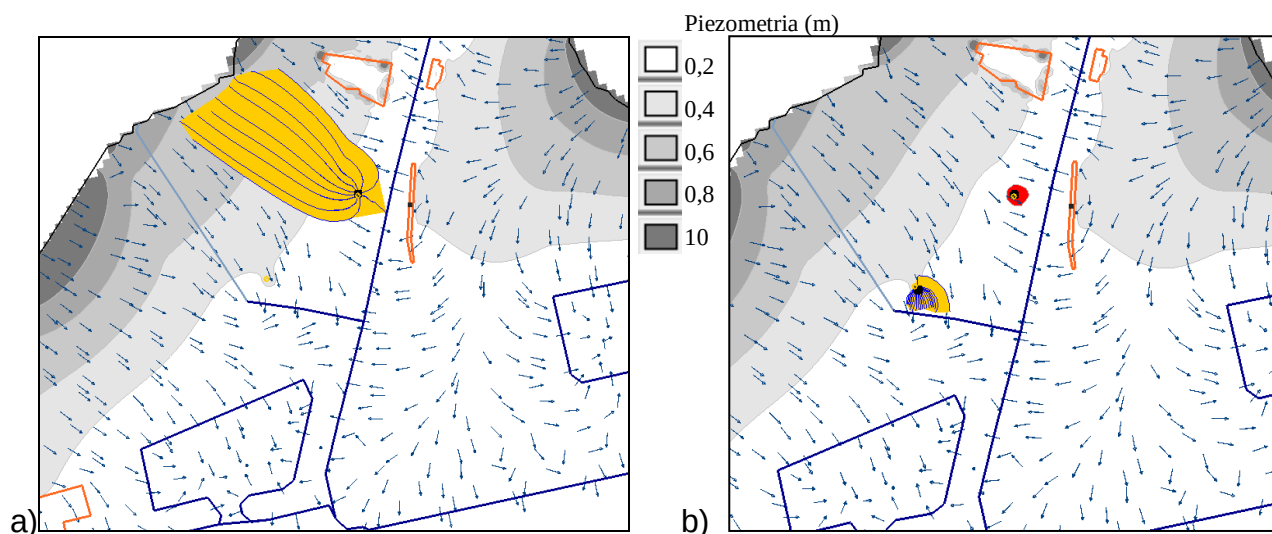
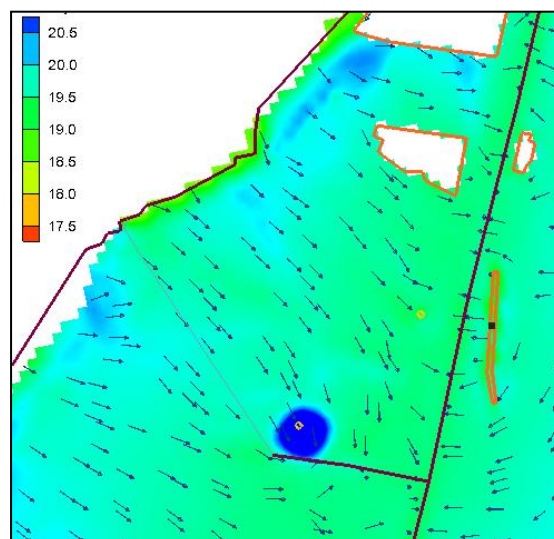


Figura 3. Piezometría y zona de captura resultante de simulación de flujo en estado estacionario, considerando: a) pozo de extracción de agua del acuífero aluvial para aprovechamiento geotérmico (80 m³/d a temperatura de 19°C); b) inyección de agua (80 m³/d a 30°C).

Figura 4. Aumento de la temperatura (indicada en °C) en las proximidades del pozo de inyección de agua (80 m³/d a 30°C), después de 40 días de funcionamiento.



DISCUSIÓN

La caracterización y simulación efectuada presentaron resultados representativos de la dinámica subterránea del acuífero aluvial en Alcántara. A partir de este abordaje fue posible identificar la influencia de las barreras impermeables, provocada por las estructuras subterráneas actualmente existentes en el subsuelo, así como la influencia de las zonas de entrada de agua del Río Tajo. Estos caminos preferenciales de entrada de agua fría (del orden de 18,7°C), resfrían el acuífero en las zonas superficiales e intermediarias. Entretanto, este resfriamiento no llega a attingir las zonas más profundas, que mantienen las temperaturas en aproximadamente 20,4°C. El sistema presenta, también, algunas zonas anómalas, con temperaturas de 17°C, estos casos deben ser estudiados aisladamente. Las estructuras interfieren en el flujo y en la temperatura del agua subterránea, favoreciendo, en general, el aumento de la temperatura en locales donde se observa menor velocidad del agua. Estas estructuras interfieren en el reciclaje de esa agua.

El Canal (Canero) proporciona una elevada interacción entre las aguas superficiales y subterráneas, afectando las temperaturas en toda la zona central de acuífero, representando su equilibrio con las aguas superficiales del Río Tajo.

El modelo matemático de flujo asociado al modelo de transporte MT3DMS, una vez calibrado, fue aplicado para la simulación de un sistema de aprovechamiento geotérmico de baja entalpia, en el ambiente subterráneo construido. De acuerdo con los resultados, es posible simular y evaluar la inyección de agua de elevada temperatura asociado a la extracción de agua para el resfriamiento de un futuro edificio en un ambiente subterráneo

urbano. En el caso de estudio, los resultados indican la viabilidad de funcionamiento del sistema teórico propuesto.

CONCLUSIONES

La elaboración del modelo hidrogeológico numérico de flujo, combinado con el de transporte, permite considerar la influencia de las barreras hidráulicas provocadas por estructuras de ingeniería, asociando, también, factores como la condición de frontera térmica proporcionada por el Río Tajo. Los resultados indicaron la posibilidad de extender las simulaciones del efecto de sistemas de intercambio térmico para la climatización de edificios de forma a evaluar distintos sistemas e integrar su funcionamiento en un único acuífero. Actualmente, está en desarrollo la evaluación de otros posibles sistemas de aprovechamiento geotérmico de baja entalpia en este espacio subterráneo construido.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Almeida, F. M. (1986) *Carta Geológica do Concelho de Lisboa*. Direcção-geral de Geologia de Minas. Serviço Geológico de Portugal. Gravado e Composta em Geocart. Serviço Cartográfico do Exército. Escala 1:10000.
- Anderson M.P. and Woessner W.W. (1992) *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic Press. San Diego. 381p.
- Mancuso, M., Deluchi, M, Kruse, E. (2011a) *Condiciones hidrogeológicas de un acuífero aluvial costero en una zona urbanizada con ocupación del espacio subterráneo: Alcántara, Lisboa, Portugal*. VII Congreso Argentino de Hidrogeología. V Seminário Hispano Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Captación y Modelación. Org. Asociación Internacional de hidrogeólogos – Grupo AArgentina. AIH/IAH. Octubre. Salta. Argentina. 7p.
- Mancuso M.A., Kruse E., Deluchi, M., Jorge, C., Gonçalves, A. (2011b) *Potential impact of groundwater salinity stratification on concrete and metal of a tunnel to be build under a coastal urban aquifer, Portugal*. 13 th AFTES International Congress. Association Françaises des Tunnels et de L'Espace Souterrain. 17 a 19 de Outubro de 2011. 8p.
- Mancuso M.A., Kruse E. and Deluchi, M. (2010) *A utilização de modelação numérica hidrogeológica como instrumento de apoio no planeamento da ocupação do espaço urbano subterrâneo*. Encontro Nacional sobre o Espaço Subterrâneo e a sua Utilização. LNEC. Comissão Portuguesa de Túneis (CPT), Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG). Lisbon. Portugal. ART025.8 p.

Fossoul, et al., Orban, P. Dassargues, A. (2010) *Modelling Groundwater Pumping and coupled heat transport in a alluvial aquifer: Tes using different codes and optimization*. In XVIII International Conference on Ground Water Resources CMWR 2010. J. Carrera ed. CIMNE, Barcelona 2010.8p.

GAPRES. (2008) *Ligação Desnívelada da Linha de Cascais e do Porto de Lisboa à Linha de Cintura. Relatório Factual (Definitivo)*. Refª 67/2008/08/GER-1080, Setembro de 2008. Lisboa, Portugal. 11 p.

Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G. (2000) MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—User guide to modularization concepts and the ground-water flow process. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.

Oliveira, M. M., Ferreira, J.P.C.L., Mancuso M. A., Novo, M.E. and Henriques, M.J. (2008) *Modelo Matemático do Escoamento Subterrâneo no Vale de Alcântara. Relatório das Tarefas 1, 2, e 3.1*. Relatório LNEC 318/2008 – NAS. Lisbon, Portugal. 80 p.

Zheng, C. (2006) *MT3D/MT3DMS: Modular Three-Dimensional Transport Model*. International Ground Water Modeling Center, IGMCI, Newsletter. Volume XXIV ISSUE 1, Contaminant Transport Modeling.

Zheng, CH., and Wang, P.P. (1999) *MT3DMS—A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in ground-water systems*. Documentation and user's guide: U.S. Army Corps of Engineers Contract Report SERDP-99-1.

AGRADECIMENTOS

A la Fundação para la Ciência e a Tecnologia – FCT, Lisboa por el apoyo financiero.

A la REFER, (los datos aquí presentados fueron obtenidos durante estudios realizados por el LNEC y pertenecen a la REFER).