

EL RESERVORIO GEOTÉRMICO CRETÁCICO DE LISBOA, UN POTENCIAL RECURSO AUTÓCTONO POR EXPLORAR

R. Marrero¹, A. Costa¹, M.L. Ribeiro¹

¹ Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada da Portela, Bairro do Zambujal, Apartado 7586, Alfragide 2610-999, Amadora, Portugal. rayco.diaz@lneg.pt

Resumen: En la cuenca sedimentaria de Lisboa (Portugal) hay evidencias de la existencia en las formaciones cretácicas de acuíferos profundos productivos con una elevada temperatura y una baja salinidad, que son susceptibles de ser utilizados como recursos geotérmicos de baja entalpía. En este artículo se presentan las principales características del Reservorio Geotérmico Cretácico (RGC) en la región de Lisboa, el cual será estudiado detalladamente en un proyecto que se llevará a cabo durante los 3 próximos años y cuyo objetivo principal es establecer un modelo físico-químico conceptual del mismo. Para ello, el programa de trabajo del proyecto incluye una serie de acciones a llevar a cabo detalladas en el presente artículo. Con la elaboración del modelo conceptual del RGC se pretende: determinar la profundidad y sentido de la circulación; los procesos de interacción agua-roca; identificar las áreas de recarga y origen y tiempo de residencia del fluido; definir la geometría y su potencial geotérmico; explicar la transferencia de calor y las variaciones del gradiente geotérmico; identificar las zonas más vulnerables. El desarrollo de este tipo de proyectos de investigación es crucial para adquirir mayores niveles de sostenibilidad energética y ambiental a través del uso racional de los recursos geotérmicos autóctonos en la región de Lisboa.

Palabras clave: Geotermia de baja entalpía, Cretácico Inferior, Lisboa, Modelo Conceptual.

1. INTRODUCCIÓN

Las grandes cuencas sedimentarias suelen ser favorables para la formación de importantes acuíferos profundos que, admitiendo un gradiente geotérmico normal (33°C/km), también son susceptibles de ser explorados como reservorios geotérmicos de baja entalpía, como sucede en las cuencas sedimentarias de París o Madrid. En la cuenca de Lisboa (Portugal), el gradiente geotérmico es relativamente bajo (22°C/km), pero la existencia de fluidos geotérmicos de baja entalpía fue confirmada por los sondeos de prospección de petróleo Barreiro-1, 2, 3 y 4 y Monsanto-1, que identificaron acuíferos profundos con temperaturas superiores a los 75°C (CORREIA et al., 2002) (Figura 1).

Los principales reservorios geotérmicos identificados en la región de Lisboa son (CARVALHO et al., 1990): (1) los sedimentos detríticos del Miocénico, que presentan buenas transmisividades ($\sim 150 \text{ m}^2/\text{d}$), pero cuyas aguas tienen una temperatura máxima que no supera los 32°C; (2) las arenas y areniscas del Cretácico Inferior de edad Albiense-Aptiense y Valanginiense, con transmisividades menores que el Miocénico ($\sim 25 \text{ m}^2/\text{d}$), pero con aguas de temperaturas en torno a los 50°C a 1500 m de profundidad; (3) los calcáreos Jurásicos, con temperaturas ligeramente superiores a los 75°C, pero a una profundidad de 2500 m aproximadamente (CORREIA et al., 2002) (Figura 1). Por tanto, en relación a los parámetros de profundidad-temperatura-transmisividad, el Cretácico Inferior presenta *a priori* las mejores características de los tres reservorios geotérmicos identificados en la región de Lisboa.

En este artículo se presentan las principales características del Reservorio Geotérmico Cretácico (RGC) en la región de Lisboa, el cual será estudiado detalladamente en un proyecto que se llevará a cabo entre los años 2012 y 2014 y cuyo objetivo principal es establecer un modelo físico-químico conceptual del mismo. El desarrollo de este tipo de proyectos de investigación es crucial para adquirir mayores niveles de sostenibilidad energética y ambiental a través del uso racional de los recursos geotérmicos autóctonos en la región de Lisboa.

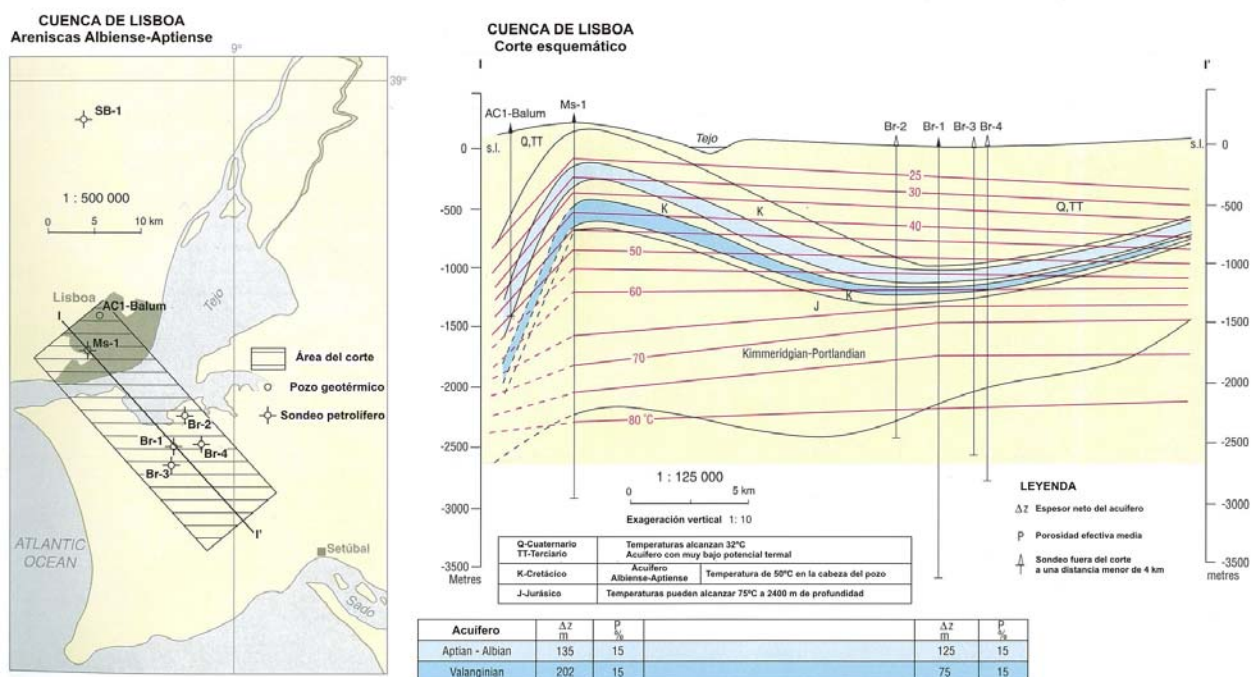


Figura 1. Localización de la cuenca sedimentaria de Lisboa y del corte esquemático con los pozos geotérmicos y sondeos de prospección petrolífera en el área de Lisboa. También se muestran las principales características de los diferentes acuíferos termales. Modificado de CORREIA et al. (2000).

2. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

La región de Lisboa pertenece, desde el punto de vista hidrogeológico, al límite suroccidental de la Orla Mesoceno-zoica Occidental y al borde septentrional de la Cuenca Terciaria de los ríos Tajo y Sado (ALMEIDA et al., 2000). La Orla Occidental está constituida por una serie de sedimentos de más de 3 km de potencia, depositada en una fosa tectónica originada por el hundimiento (basculamiento) del Macizo Hercínico. Están presentes rocas de edades comprendidas entre el Triásico y la actualidad siguiendo una secuencia normal, aunque con una importante laguna estratigráfica en el Cretácico Superior, de cuya edad son dos importantes formaciones eruptivas: el Macizo Sub-Volcánico de Sintra (100-72 Ma) y el CVL o Complejo Volcánico de Lisboa (75-72 Ma). La cuenca del Tajo-Sado representa a su vez una cuenca sedimentaria de 1500 m de espesor constituida por diferentes formaciones que van desde el Paleógeno hasta la actualidad en una secuencia normal.

La cuenca de Lisboa, donde se encuentra el RGC, es una estructura sinclinal disimétrica cuyo eje está orientado NE-SW, aproximadamente paralelo al actual valle del río Tajo. Este sinclinal se encuentra parcialmente modificado por varias fallas y pliegues, como la falla de Vila Franca de Xira o el anticlinal de Monsanto. Los límites aproximados de la cuenca son: al oeste con el Macizo Sub-Volcánico de Sintra; al sudeste con el anticlinal de Moita y el diapiro de Pinhal Novo; al sur con la Serra da Arrábida.

3. ANTECEDENTES

La mayor parte de los estudios existentes sobre los recursos geotermales en la región de Lisboa se han centrado en las aguas subterráneas de Alfama y Estoril. Las famosas Termas de Estoril (Cascais), utilizan un agua hipersalina Cl-Na a 35°C de temperatura procedente de pozos poco profundos y nacientes en formaciones de areniscas, margas y carbonatos margosos del Cretácico

Inferior. En el barrio lisboeta de Alfama también está documentada la existencia y aprovechamiento, desde la antigüedad, de varios nacientes de aguas de naturaleza $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ y con temperaturas entre 20 y 34°C (RAMALHO y LOURENÇO, 2005). Estos nacientes han sido relacionados históricamente con la ascensión, a través de fallas relativamente profundas, de aguas provenientes de las formaciones cretácicas a profundidades cercanas a los 500 m (ALMEIDA, 1952). Las aguas de estos nacientes, calificadas de minero-medicinales por las autoridades competentes de la época, fueron aprovechadas en balnearios públicos hasta hace sólo 40 años; en la actualidad estos nacientes están totalmente sellados y sus aguas son canalizadas para el río Tajo por conductos cuya posición exacta es desconocida (RAMALHO y LOURENÇO, 2005).

Existen, aunque escasos, algunos casos concretos y documentados de aprovechamiento de los recursos geotérmicos de baja entalpía de la región de Lisboa: como el pozo de 1500 m de profundidad del Hospital de las Fuerzas Aéreas en Lumiar y el pozo de 475 m de profundidad en los Servicios Sociales de las Fuerzas Armadas en Oeiras (CARVALHO y CARDOSO, 1994; LOURENÇO y CRUZ, 2005). En la actualidad, ambos pozos se encuentran fuera de servicio por problemas técnicos.

El pozo de Lumiar, que estuvo operativo entre los años 1992 y 2001, extraía un caudal de 5 l/s de agua potable $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ a 50°C con una mineralización total de 0,44 g/l que fue utilizada para calefacción ambiente y como agua caliente sanitaria (ACS) del Hospital (CARVALHO y CARDOSO, 1994). Los geotermómetros químicos aplicados al fluido del pozo AC1-Balum de Lumiar dieron una temperatura máxima de 70°C para las formaciones del Cretácico Inferior de donde eran bombeadas, mientras que los datos isotópicos de δD y $\delta^{18}\text{O}$ indicaron que se trata de un agua de origen meteórico con un leve enriquecimiento relativo en deuterio, relacionado posiblemente con procesos de reducción bacteriana durante la formación de H_2S en un ambiente confinado (A.CAVACO-CFG, 1989). El análisis del contenido en ^{14}C permitió datar el agua en 12750 años de antigüedad, una vez efectuada la corrección de $\delta^{13}\text{C}$ para compensar la reacción con los carbonatos de la roca, indicando una velocidad de circulación relativamente lenta (A.CAVACO-CFG, 1989). El pozo de Oeiras, operativo durante un tiempo indeterminado, extraía un caudal de 6 l/s de un agua $\text{HCO}_3\text{-Na}$ a 30°C que fue utilizada para calefacción ambiente del edificio de los Servicios Sociales con el apoyo de bombas de calor (LOURENÇO y CRUZ, 2005).

A principio de la década de 1990, además de los pozos de Lumiar y Oeiras, también estaban en proyecto otras tres operaciones geotérmicas en la cuenca de Lisboa. Dos de ellas estaban destinadas a la producción de ACS en los Hospitales de Santa María y San José, ambos en el área metropolitana de Lisboa (DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA, 1988), mientras que la otra operación estaba destinada a la climatización y producción de ACS en una Residencia para ancianos, en la localidad de Caxias (Oeiras). Finalmente, por las informaciones disponibles hasta ahora, la falta de financiación sólo permitió la ejecución y el posterior aprovechamiento del recurso geotérmico en la residencia de Caxias, la cual todavía no ha sido posible visitar para evaluar su estado actual.

4. CARACTERÍSTICAS DEL RESERVORIO GEOTÉRMICO CRETÁCICO

El análisis de los datos existentes indica que el acuífero del Cretácico Inferior (Albiense-Aptiense) que constituye el RGC está formado principalmente por arenas y areniscas silíceas blanquecinas y carbonatos margosos, que dan lugar a la formación de “Grés (areniscas en portugués) de Almargem”. Desde el punto de vista hidrogeológico se trata de un sistema multi-acuífero, semi-confinado y generalmente artesiano, donde las formaciones suprayacentes del Paleógeno y/o del CVL actúan como acuitardos. Es un acuífero de porosidad predominantemente fisural coexistiendo

parcialmente con circulación intergranular, con valores de porosidad efectiva media de 15% aunque puede alcanzar en algunas zonas hasta 25% (CORREIA et al., 2002). La potencia máxima observada de dicho acuífero es de 200 y 560 m en los márgenes sur y norte del río Tajo, respectivamente. La transmisividad media es de 25 m²/d, pero varía desde los 2 m²/d en el pozo geotérmico de Lumiar a 10 km del Tajo hasta 70 m²/d en los sectores donde la profundidad del reservorio es menor, como en los márgenes de dicho río (e.g. área industrial de Vialonga o Central Tejo) o donde no se produzca recristalización en relación a las intrusiones basálticas del CVL (CARVALHO et al., 1990). Los datos existentes sugieren que el RGC posee transmisividades que permiten caudales de explotación de ~ 10 l/s (CARVALHO et al., 1990).

Asumiendo desde un punto de vista conservativo una porosidad del 15% para el acuífero Albiense-Aptiense, CORREIA et al. (2002) calcularon un potencial geotérmico de $0.5 \cdot 10^{18}$ J, que representan 1.7 GJ/m² si se asume que los recursos geotérmicos identificados de dicho acuífero abarcan un área aproximada de 290 km². No obstante, una de las principales limitaciones de la utilización del acuífero Albiense-Aptiense como recurso geotérmico deriva de la complejidad estructural del mismo, ya que se encuentra deformado y compartimentado por fallas y filones basálticos procedentes tanto del CVL como del Macizo Sub-Volcánico de Sintra, que modifican lateral y verticalmente las condiciones hidrogeológicas y geotérmicas del mismo (CARVALHO et al., 1990).

Tabla I. Características del Reservorio Geotérmico Cretácico (Albiense-Aptiense) en la región de Lisboa a partir de la información de los pozos y sondeos conocidos hasta el momento.*El pozo AC1-Sidul no atraviesa completamente las formaciones del Albiense-Aptiense.

Punto de medida	Municipio	Profundidad total (m)	Profundidad techo-muro (m)	Tª máxima (°C)
Monsanto-1	Lisboa	2885.4	337-528	~ 30
Barrero-1, 2, 3	Almada	3611, 2425, 2606,3	900-1100	~ 55
Barreiro-4	Almada	2833	1225-1432	~ 55
AC1-Balum	Lisboa	1495	1290-1495	52
AC1-Sidul	Lisboa	~600	450-600*	32
SS.FF.	Oeiras	475	?	30
Central Tejo	Lisboa	345	191-345	32
Nacientes de Alfama	Lisboa	-	-	34
Termas de Estoril	Cascais	-	-	35
Pozos del área industrial de Vialonga	Vila Franca de Xira	>250	210-390	35

5. PROGRAMA DE TRABAJO

Dadas las características del RGC descritas anteriormente, se ha planteado llevar a cabo un estudio enfocado en una evaluación en términos de recursos hidrogeológico, es decir, el recurso geotérmico será estudiado con la perspectiva de un recurso hídrico subterráneo cuya calidad y cantidad conviene asegurar para un aprovechamiento más eficiente y sostenible del mismo. Para ello, en este proyecto se ha propuesto un enfoque multidisciplinar de la integración de los datos geológicos, hidrogeológicos, geofísicos, geoquímicos, etc., junto a un modelado geoquímico. Eventualmente la misma metodología podría ser aplicada para evaluar el potencial geotérmico de otros acuíferos en ambientes geológicos similares.

El objetivo principal del proyecto es la elaboración de un modelo físico-químico conceptual del RGC que favorezca la caracterización, protección y gestión adecuada de los recursos geotermales de baja entalpía del Cretácico Inferior (Albiense-Aptiense) en la región de Lisboa. Para elaborar

dicho modelo, ha sido necesario definir un programa de trabajo a lo largo de 6 fases divididas en una serie de actividades concretas a realizar entre 2012 y 2014 para alcanzar los objetivos específicos que se muestra en la Tabla II:

Tabla II. Programa de trabajo del proyecto y objetivos específicos

Fase	Actividad	Definición	Objetivos
1- Síntesis bibliográfica y pre-selección de las zonas de estudio de detalle	1	Síntesis bibliográfica e integración en una base de datos	Integrar la información histórica existente para optimizar la gestión y consulta durante el proyecto
	2	Análisis e identificación de las zonas para estudios de detalle y de las áreas de mayor carencia de información	
	3	Búsqueda e inventario de puntos de medida en las zonas seleccionadas para estudios de detalle	
2 - Modelo geométrico tridimensional del RGC	4	Integración de los datos procedentes de pozos, sondeos y de los estudios geofísicos de sísmica de reflexión en un modelo tridimensional.	Determinar la geometría del RGC y sus límites
3 - Trabajo de campo en las zonas seleccionadas para estudios de detalle	5	Perfiles térmicos	Determinar el sentido de la circulación del fluido y las propiedades hidráulicas del RGC; determinar y explicar las variaciones del gradiente geotérmico, para identificar los procesos que controlan el calor en el RGC y su potencial geotérmico.
	6	Medidas de nivel piezométrico y ensayos de caudal/recuperación	
	7	Toma de muestras del fluido en los puntos seleccionados y medidas <i>in situ</i> (temperatura, pH, conductividad eléctrica, etc.)	Caracterizar la calidad físico-química y bacteriológica de las aguas subterráneas del RGC para estimar la línea base actual y poder detectar en el futuro posibles variaciones por causas naturales (e.g. mayor recarga) y/o antrópicas (e.g. contaminación); identificar el origen, áreas de recarga y tiempo de residencia del fluido en el sistema.
	8	Análisis de laboratorio de: iones mayoritarios y minoritarios; sílice disuelto; isótopos estables de oxígeno, hidrógeno, carbono, etc.; radiocarbono	
4 - Modelado geoquímico del RGC	9	Simulación de los procesos de interacción agua-roca a través del programa de modelización y especiación química PHREEQC (PARKHURST y APPELO,1999)	Determinar la naturaleza del medio por el cual se produce la circulación así como la profundidad y sentido del flujo; determinar la evolución físico-química y térmica del fluido durante la circulación, así como los minerales supersaturados o próximos a la saturación con los que podría haber estado en contacto.
	10	Aplicación de geotermómetros químicos (Na-K-Ca-Mg, sílice disuelto, etc.)	Determinar la temperatura de equilibrio del RGC
5 – Mapas de vulnerabilidad	11	Elaboración de mapas de vulnerabilidad a partir del Índice de Susceptibilidad (Susceptibility Index - SI)	Identificar las zonas de mayor vulnerabilidad para proponer acciones que favorezcan su protección y una gestión adecuada del recurso

Con la información obtenida en las fases previas del proyecto, se elaborará un modelo físico-químico conceptual que intentará explicar los diferentes procesos que tienen lugar en el RGC, como la circulación subterránea, la transferencia de calor, la relación del RGC con otros acuíferos de la región, el papel de las fallas y las formaciones geológicas en los procesos hidrogeoquímicos que afectan al sistema, etc.

Una vez establecido el modelo físico-químico conceptual y la línea base de conocimiento del RGC en la región de Lisboa, en una fase posterior (entre los años 2015 y 2018) se pretende modelar matemáticamente. El modelado matemático tiene como objetivo la comprensión de los parámetros que controlan la circulación regional de las aguas subterráneas y el transporte de calor y solutos en el RGC. De esta forma se podría evaluar su comportamiento bajo diferentes escenarios de explotación y así determinar si es apto para soportar extracciones y temperaturas adecuadas para un aprovechamiento a largo plazo del mismo.

6. CONCLUSIONES PRELIMINARES

Una de las áreas que *a priori* presenta actualmente las características más favorables para llevar a cabo estudios de detalle es el margen norte del río Tajo, a la altura del barrio lisboeta de Alcântara, donde se encuentra el pozo AC1-Sidul. Este pozo de aproximadamente 600 m de profundidad, con características artesianas, permitió durante 10 años extraer para fines industriales un caudal de 10 l/s de agua a 32°C de temperatura sin producir, aparentemente, descensos significativos del nivel piezométrico. El agua extraída era de buena calidad, exceptuando algunos depósitos de hierro y manganeso que tenían que ser eliminados mediante un pre-tratamiento antes de su uso, según la información disponible. Actualmente existe un proyecto de construcción de un Hospital en las proximidades del pozo AC1-Sidul, que aún se encuentra en fase de elaboración. Por tanto, sería una nueva oportunidad para evaluar si el potencial geotérmico que existe en el subsuelo es susceptible de suplir a largo plazo las necesidades de un Hospital, por ejemplo, de calefacción ambiental y/o ACS, sin poner en peligro la sostenibilidad, en términos de caudal y temperatura, del recurso.

Gran parte del éxito de la geotermia de baja entalpía está basado en la convergencia espacial entre recurso y consumidores y adecuación del fluido geotérmico a sus posibles usos. En este contexto, el pozo AC1-Sidul u otros que puedan ser reaprovechados o incluso perforados en el área de Lisboa, especialmente en los márgenes del río Tajo, representan una excelente oportunidad para el fomento del aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía en las cuencas sedimentarias portuguesas.

7. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto está integrado en la beca post-doctoral SFRH/BPD/76404/2011 financiado por la Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) de Portugal, y cuenta con el apoyo logístico e institucional del Laboratorio Nacional de Energía y Geología (LNEG), la Câmara Municipal de Lisboa-Gabinete de Alfama y la Direcção Geral de Energia e Geologia. R. Marrero quiere agradecer todo el apoyo y colaboración prestada por R. Hidalgo de Petrathem S.L., los investigadores E. Ramalho, C. Rosa y D. Rosa, del LNEG y la profesora C. Silva de la Universidad de Lisboa.

8. REFERENCIAS

ALMEIDA, A. (1952): “Lisboa, Capital das Águas”. Revista Municipal. Separata dos nºs 49 e 50, 27 pp.

ALMEIDA, C., MENDONÇA, J.J.L., JESUS, M.R., GOMES, A.J. (2000): “Actualização do Inventário dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental”. Centro de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa e Instituto da Água, vol. 1 e 2.

A.CAVACO-CFG (1989): “Etude Geochimique du fluide geothermal de Balum-Lumiar (Portugal)” Complement au Rapport N°89 CFG 62, 4 pp.

CARVALHO, J.M., CARDOSO, A.A.T. (1994): “The Air Force Hospital Geothermal Project in Lisbon”. Geothermics’94 in Europe Document n°230, Ed. BRGM, Orléans, France, pp. 441-448.

CARVALHO, J.M., BERTHOU, P.Y., SILVA, L.F. (1990): “Introdução aos Recursos Geotérmicos da Região de Lisboa”. Livro Homenagem a Carlos Romariz – Secção de Geologia Económica e Aplicada, Lisboa, pp. 332-356.

CORREIA, A., RAMALHO, E., RODRÍGUEZ DA SILVA, A.M., MENDES-VICTOR, L.M., DUQUE, M.R., AIRES-BARROS, L., SANTOS, F.M., AUMENTO, F. (2002): “Portugal” En: Atlas of Geothermal Resources in Europe (Eds: Suzanne Hurter y Ralph Haenel), GGA, Hannover, Alemanha, 92 pp. + 89 placas; pp. 47-49.

DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA (1988): “Utilização de Recursos Geotérmicos de Baixa Entalpia do Reservatório Cretácico em Hospitais de Lisboa”. Projetos Portugueses de Demonstração-Energia N° GE/82/88-PO. Internal Report, 4 pp.

LOURENÇO, M. C., CRUZ, J. (2005): “Aproveitamentos geotérmicos em Portugal continental”. XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros, Ponta Delgada, 26-29 Mayo, 9 pp.

PARKHURST, D.L. APPELO, C.A.J. (1999): “User’s guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations”. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report, pp. 99-4259.

RAMALHO, E. C. y LOURENÇO, M. C. (2005): “As águas de Alfama – a riqueza esquecida da cidade de Lisboa”. Edição Especial Boletim de Minas, 40 (1), pp. 5-24.