



Convenio de investigación



“Estudio de seguimiento hidrogeológico de la Línea 7 del Metro de Madrid”

INFORME DE ASESORAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

19/06/2008

Pedro Martínez Santos
Profesor Ayudante Doctor
Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

Eugenio Sanz Pérez
Profesor Titular de Universidad
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid

El presente informe se enmarca dentro del convenio de investigación “Estudio de seguimiento hidrogeológico de la Línea 7 del Metro de Madrid” suscrito por Geotecnia y Cimientos S.A. y la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid.

CONTENIDOS

1. Introducción y objetivos	2
2. Problemática	2
3. Modelo conceptual de flujo inducido	3
4. Resultado de las analíticas químicas y mineralógicas	4
4.1 <i>Analíticas mineralógicas</i>	4
4.2 <i>Analíticas químicas</i>	5
4.2.1 Hidroquímica convencional	5
4.2.2 Hidroquímica isotópica	6
5. Consecuencias prácticas de la alteración del flujo subterráneo	7
5.1 <i>Aumento de huecos por disolución</i>	7
5.2 <i>Aumento de huecos por transformación de glauberita en yeso</i>	10
5.3 <i>Aumento de huecos por erosión física de las evaporitas</i>	11
5.4 <i>Procesos de expansividad</i>	11
5.5 <i>Aumento de volumen por cristalización de yeso y otros sulfatos</i>	11
6. Conclusiones y recomendaciones	11
7. Fuentes bibliográficas	13

1. Introducción y objetivos

El presente informe compila por escrito los resultados y conclusiones de gran parte de los trabajos realizados dentro del “Estudio Hidrogeológico de la Línea 7 del Metro de Madrid” a lo largo del período transcurrido entre mayo y octubre de 2008.

Este informe es relativamente parco en detalles en beneficio de la claridad de exposición, puesto que su objetivo es más resaltar aquellos resultados que estimamos más relevantes desde el punto de vista práctico que documentar el problema de forma exhaustiva. Por otra parte, muchos de los detalles de los trabajos realizados a lo largo del tiempo –especialmente en lo relativo a la evolución hidrogeológica e hidroquímica del sistema– pueden consultarse en distintos informes elaborados por Geocisa, los cuales se citan en la bibliografía.

El informe se estructura de la siguiente manera: en primer lugar se aporta una breve visión de conjunto de la problemática generada por la evacuación de aguas a través del poceto de recogida del túnel del metro situado en el PK 2+880 de la Línea 7 del Metro de Madrid, entre las estaciones de “Jarama” y “San Fernando de Henares”. A partir de una serie de analíticas y balances con enfoque mineralógico, hidroquímico e isotópico se establecen algunas de las consecuencias prácticas más relevantes al respecto. Por último planteamos nuestras conclusiones y recomendaciones.

2. Problemática

A lo largo de los meses previos al planteamiento de este estudio se habían venido observando distintas anomalías asociadas a uno de los pocetos de recogida de aguas ubicados en el túnel de la Línea 7 del Metro de Madrid. A lo largo de este informe nos referimos indistintamente a él como “poceto” o pozo de bombeo.

Por un lado se había producido un incremento considerable del caudal recogido (de 3 l/s en septiembre de 2007 a casi 60 l/s en junio de 2008). Se observaba asimismo que la práctica totalidad de dicho caudal manaba de las paredes del poceto, con un aporte mucho más pequeño de los dos ramales del túnel de Metro que en él convergen.

Además, la depuradora situada aguas abajo en el cauce del río Jarama puso de manifiesto la existencia de anomalías en la calidad química de las aguas evacuadas, cuyas analíticas dieron posteriormente salinidades hasta seis veces superiores a la del agua del mar. Estas últimas incluyen la presencia de cloruros procedentes de halitas, raras en esta zona del dominio terciario Madrid.

Por último se observó que algunos de los pozos de regadío ubicados en la misma margen del río Jarama –cuyo fondo se encuentra a una cota superior a la del poceto– se habían secado a lo largo de este intervalo de tiempo.

El presente estudio se deriva de la necesidad de conocer el origen de las filtraciones y los depósitos de sales observadas en el poceto, así como de establecer sus posibles consecuencias desde el punto de vista práctico.

3. Modelo conceptual de flujo inducido

En condiciones naturales, e incluso dentro del régimen posterior a la urbanización de la zona, el flujo subterráneo regional en el área de estudio descarga al río Jarama, cuyo cauce discurre a alrededor de 1 km del poceto de recogida. La cota del lecho del río Jarama en dicha zona se encuentra varios metros por encima de la del pozo de bombeo, que tiene una profundidad de unos 40 m.

El poceto se encuentra ubicado en la zona de contacto entre las facies de transición y las evaporitas del dominio terciario de Madrid. Se trata por tanto de una zona entre margosa y yesífera, de baja permeabilidad y coeficiente de almacenamiento, donde los sondeos realizados han dado, de techo a muro, un nivel de unos 10m de espesor de gravas secas seguido de intercalación de diversas capas de margas y yesos hasta unos 30 m de profundidad, a partir de las cuales predominan las margas hasta los 45 m y los yesos en adelante.

En un primer momento se observó caudal recogido por el poceto crecía de forma exponencial con el tiempo, a la par que se antojaba exagerado para un entorno hidrogeológico de estas características. Esto hacía pensar en una permeabilidad inusitadamente alta, amén de una fuente prácticamente ilimitada de agua. Al margen de establecerse la necesidad de cegar el poceto, como primera hipótesis de trabajo se planteó una posible conexión hidráulica de carácter reciente entre el túnel del metro y el río Jarama a la altura del pozo. Dicha conexión habría propiciado una inversión del flujo subterráneo preexistente, actuando primero el poceto como un dren situado por debajo de la cota del río, y, tras la instalación de bombas de achique, como un pozo hidráulico.

El incremento de los caudales evacuados (de 1-2 l/s a 60 l/s en pocos meses), es similar al observado en fugas de embalses construidos en materiales yesíferos, y puede justificarse por la karstificación del yeso inducida por la circulación subterránea del agua desde el río hasta el pozo.

A efectos de confirmar este nuevo modelo conceptual de flujo se perforó una batería de piezómetros, cuyas características y evolución hidrodinámica e hidroquímica pueden consultarse en distintos trabajos de seguimiento elaborados por Geocisa (2008a, 2008b, 2008c) así como en tablas de datos todavía no disponibles en formato de informe. Dicha evolución parece refrendar la hipótesis realizada, si bien existen algunas alteraciones que pueden explicarse por los trabajos realizados para impermeabilizar el poceto y por tanto contener la karstificación del medio.

En último término, dichos trabajos han tenido como consecuencia la recuperación y estabilización de los niveles piezométricos, así como la reducción de caudales de

infiltración en el túnel hasta una magnitud comparable a la aforada con anterioridad a plantearse el problema. Sin embargo, de acuerdo con los datos disponibles cabe reseñar que el nuevo estado de equilibrio difiere del inicial en tanto en cuanto las propiedades naturales del acuífero han sido distorsionadas por procesos de karstificación inducida. Así, la estabilización del nivel piezométrico se ha alcanzado varios metros por debajo de su cota original, lo que parece responder a un considerable incremento en la permeabilidad del medio. De la misma manera, y como se expone más adelante, los caudales que en la actualidad se filtran a la vía hablan de un problema contenido con éxito por el momento pero no definitivamente resuelto.

A continuación se exponen los resultados de diversas analíticas y balances cuyo objeto es establecer, al menos de forma cualitativa, las implicaciones prácticas del régimen de flujo inducido.

4. Resultados de las analíticas mineralógicas y químicas

4.1 Analíticas mineralógicas

La realización de analíticas mineralógicas se deriva de la identificación visual de niveles de halita en los sondeos de investigación, por tratarse de un mineral relativamente raro para la zona de estudio (no así en latitudes algo más meridionales). Tienen por tanto como objetivo confirmar la presencia de la misma, puesto que la halita juega un importante papel como agente acelerador de los procesos de disolución del yeso (ver epígrafe 5).

Según los reconocimientos de visu en los testigos de los sondeos y con la técnica de difracción de rayos X, se han detectado, además de yeso y halita, las siguientes especies minerales:

- Minerales principales y secundarios: yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), thenardita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), anhidrita (CaSO_4), halita (NaCl), magnesita (CO_3Mg).
- Accesorios y trazas: pirofilita, magnesita, eugsterita, cuarzo y moscovita.

Consideramos que los análisis realizados delatan la presencia de algunos minerales de la facies típica de las evaporitas miocenas del sur de Madrid, y que según la bibliografía consultada pueden ordenarse de techo a muro de la siguiente manera:

- Yeso
- Thenardita / glauberita
- Halita / glauberita
- Halita

La anhidrita suele hacerse presente en forma de pequeñas capas lenticulares intercaladas entre la halita, thenardita, glauberita y arcillas.

A parte de estos minerales, es casi segura la presencia de otros que suelen acompañar a los anteriores y que son los siguientes:

- | | |
|---------------------------------|---|
| ▪ Glauberita | $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ |
| ▪ Mirabilita (Cienpozuelita) | $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ |
| ▪ Polihalita | $\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ |
| ▪ Epsomita (sal de Vaciamadrid) | $\text{Mg}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ |

Estimamos que este último mineral es seguramente el causante de la alta concentración en magnesio de las aguas subterráneas (ver sección 4.2.1), y no la magnesita, que es mucho menos soluble. Esta hipótesis cobra fuerza a la vista de la composición de las aguas subterráneas recogidas tanto en el pozo como en los piezómetros, que presentan un alto contenido en cloruros, sulfatos, magnesio, potasio y calcio. Esta composición encaja muy bien con las facies litológicas existentes, los minerales identificados, y otros que probablemente estén acompañándolos.

4.2 Analíticas químicas

4.2.1 Hidroquímica convencional

Según los análisis de agua realizados en el pozo, piezómetros, entradas al túnel, y río Jarama, se pueden hacer las siguientes observaciones:

El agua del pozo de bombeo es de facies clorurada sódica, con alto contenido en cloruros (52%), sodio (28%), sulfatos (10%), magnesio (7%) y potasio (1,5%). Según el punto de toma de la muestra y su fecha llegan a observarse concentraciones exageradamente altas, superando los 120.000 mg/l y 60.000 mg/l de cloruros y sodio respectivamente. Las máximas concentraciones corresponden al poceto, mientras que los ramales del túnel que en él convergen dan valores mucho más normales.

Esto apunta a la existencia de circulación de agua, así como a la disolución de halita, thenardita y glauberita. Seguramente hay además procesos activos de transformación de yeso a glauberita. El alto contenido en magnesio probablemente se debe a la disolución de la epsomita, y quizá a la polihalita. El quimiograma del pozo de bombeo presenta una variabilidad poco importante.

El agua de los piezómetros suele tener una facies sulfatada sódica, con un mayor o menor contenido en cloruros. El contenido en iones de un análisis tipo sería aproximadamente: sulfatos (60%), sodio (30%), cloruros (25%), otros (5%), lo cual sugiere la presencia de glauberita y thenardita.

El mayor contenido en cloruros se da en los piezómetros más profundos, que es donde se encuentran las halitas en mayor abundancia. Esto concuerda con la secuencia estratigráfica y mineralógica, que de techo a muro se dispone así: 11 m de gravas y arenas del nivel superior de terraza fluvial; capa de margas y yesos hasta 30 m de profundidad; tramo de alto contenido en halita entre 39 y 42 m (aunque la halita puede aparecer desde los 20 m de profundidad); margas verdosas hasta los 45 m y yesos hasta los 56 m.

El agua del río Jarama y la que circula por las gravas de la terraza, proveniente de la infiltración del agua de lluvia y de las posibles pérdidas de la red de aguas pluviales y de alcantarillado, son aguas agresivas que recargan los materiales evaporíticos, haciendo que los procesos de kartificación puedan ser activos. La presencia de aguas subsaturadas en los piezómetros respecto de la halita, thenardita y glauberita indica que el agua es capaz de disolver estos minerales.

4.2.2 *Hidroquímica isotópica*

Sin ser del todo concluyentes, y admitiendo otras posibles interpretaciones, los resultados del contenido isotópico de O18, D y T permiten hacer las siguientes observaciones:

- El contenido de O18 y D de todas las muestras de los piezómetros oscila entre 7 y 8, que son valores típicos del agua subterránea de Madrid, y que corresponden a los de infiltración del agua de lluvia en la época de recarga de invierno (-7.73 O18, -53.7 D) (CEDEX 1994).
- El agua del pozo de bombeo (-5.23 O18, -32.78 D) es un valor raro para las aguas subterráneas. Menos raros, pero también anómalos, son los de la vía y los de la estación 10.
- Los valores del agua del pozo de O18 y D se acercan al agua de lluvia de primavera en Madrid (alrededor de -4 O18, -25 D, según CEDEX (1994)), estación en la que no suele haber recarga por no conseguirse el superávit en los balances hidrológicos. Sin embargo la primavera de este año 2008 ha sido excepcionalmente lluviosa, por lo que la recarga ha debido desplazarse a esta estación. Por el contrario, las precipitaciones fueron escasas el pasado invierno.

Esto parece confirmar que el agua de lluvia representada en el río Jarama circuló rápidamente por los conductos kársticos de los yesos hasta llegar al pozo. Sin embargo, parece ser que los piezómetros no pincharon estos conductos y que han muestreado el agua matriz del acuífero. En la vía y en la estación 10 parece existir una mezcla del agua de circulación rápida y el agua matriz. Es lógico pensar que también podría haber habido una mezcla en los conductos kársticos, si bien seguramente en menor proporción.

Según el contenido en Tritio, el agua del río Jarama corresponde con el agua de lluvia de 2008. Los valores de T del agua de los piezómetros son bastante semejantes y podrían corresponder con aguas infiltradas de hace unos veinte años. El agua del poceto parece ser una mezcla de agua meteórica y agua más antigua.

Aparentemente estos resultados de O18 y D del pozo son contradictorios con los del Tritio (1.45 UT), que parecen corresponder con un agua bastante antigua. Sin embargo cabe una explicación: suponiendo que el agua matriz de los yesos tenga 0UT y que el agua del Jarama, que es de la lluvia en primavera, tuvo 4.12 UT, habría que hacer una mezcla de ambas aguas en la proporción 60/40 para que diera, aproximadamente, el valor de 1,45 UT. Si esta misma proporción la utilizamos para los valores de O18 de la lluvia de primavera (4 O18) saldría una media ponderada de alrededor de 5.

Esta hipótesis podría confirmarse determinando el contenido isotópico de O18 en muestras de agua correspondientes al agua de lluvia de primavera de 2008. Sin embargo, ante la ausencia de muestras disponibles es necesario solicitar las analíticas al CEDEX. También sería interesante tener información del contenido de Tritio de los piezómetros.

5. Consecuencias prácticas de la alteración del flujo subterráneo

La interacción del agua con los minerales detectados en el sustrato yesífero, y con otros que seguramente están presentes, dan lugar a una serie de procesos y reacciones químicas que pueden acarrear consecuencias geotécnicas importantes, llegando a comprometer la estabilidad del túnel del metro y de las cimentaciones de los edificios circundantes. Dichos procesos incluyen el aumento de huecos tanto por erosión como por disolución y mediante transformaciones mineralógicas. Incluyen además distintos procesos expansivos.

Si bien no hay datos suficientes para cuantificar la posible importancia de todos estos procesos, se ha hecho un esfuerzo por dar una aproximación en orden de magnitud en aquellos casos en los que ha sido posible.

5.1 Aumento de huecos por disolución

La disolución puede darse en algunas de las sales presentes de manera muy significativa. Así, la solubilidad de algunos de estos minerales a 20° C y pH 7 se detalla en la Tabla 1.

Pensamos que la disolución de estos minerales ha podido tener una importancia significativa en la zona de estudio, por lo que a continuación se detalla.

La halita es una sal muy soluble, del orden de 185 veces más que el yeso. El agua que está en contacto con la halita la disuelve de manera inmediata, y en cuestión

de horas o días se pueden formar grandes huecos si el caudal es importante, tal como ha ocurrido en el entorno del pozo y muy posiblemente en el tramo acuífero que va desde el mismo hasta el cauce río Jarama.

Tabla 1. Solubilidad de las sales consideradas a 20°C bajo condiciones de pH=7

<i>Mineral</i>	<i>Composición</i>	<i>Solubilidad (g/L)</i>
Halita	Na Cl	360,0
Thenardita	Na ₂ (SO ₄)	322,6
Mirabilita	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	280,0
Yeso	CaSO ₄ · 2H ₂ O	2,5 *
Anhidrita	CaSO ₄	2,0 **

* Aumenta entre 5.9-6.3 g/L en presencia de aguas con alta concentración de sulfatos de magnesio y en Na.

** Es aún más sensible que el yeso en presencia de otras sales.

A partir de los datos de caudales disponibles, así como de la calidad química del agua en el entorno del poceto, se ha realizado un cálculo en primera aproximación del volumen de halita desalojado a lo largo del tiempo transcurrido desde febrero de 2008 (primeras analíticas químicas disponibles) hasta el momento en que se procedió a cegar el poceto (junio de 2008). Para ello ha sido necesario realizar distintas simplificaciones, que se detallan a continuación:

- El volumen de agua desalojado es una media ponderada del caudal por el tiempo transcurrido, discretizando el mismo entre cada dos datos consecutivos
- Sólo se ha considerado disolución de halita (y no de otras sales), puesto que este proceso es posiblemente responsable de la mayor parte de los huecos generados. El cálculo es por tanto una estimación a la baja.
- A falta de otros parámetros químicos se asume que sodio y cloro combinan entre sí para formar NaCl hasta que uno de los dos se agota.
- Se asume que las analíticas químicas disponibles son representativas de cada litro de agua que ha entrado en el poceto.
- Dado el carácter general de esta estimación, se ha asumido también que todo el caudal desalojado proviene del poceto, cuando en realidad una pequeña parte (alrededor de 1-2 l/s) son aportados por los túneles.

Los resultados de los cálculos que detallan a continuación en la Tabla 2 deben por tanto tomarse en orden de magnitud:

Tabla 2. Estimación del volumen de huecos generado por disolución de halita

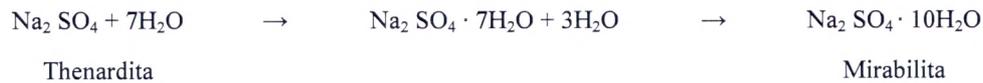
Parámetro	Cálculo	Resultado
Concentración aproximada de sal por litro	C	125 g/l
Media ponderada del caudal de entrada al pozo de bombeo	Q	18 l/s
Masa de NaCl que entra al pozo por segundo	$M = C \cdot Q / 1,000$	2,25 kg/s
Masa de NaCl que entra al pozo por día	$M_d = M \cdot 86,400$	194.400 kg/d
Masa de NaCl desalojada desde febrero (150 días)	$M_T = M_d \cdot 150$	29.160.000 kg
Densidad media del NaCl	D	2.160 kg/m ³
Volumen de huecos generado por disolución de NaCl	$V = M_T / D$	13.500 m³

Considerando que el proceso de karstificación se desarrolla tanto a partir del pozo como a partir del cauce del río Jarama, y tomando como referencia el área y profundidad del cono de descensos, es posible hacer una estimación de la porosidad equivalente del medio en función del volumen de huecos generado. Así, para un área de 200.000 m² y una profundidad media de 35m, y teniendo en cuenta las simplificaciones antes comentadas, se ha llegado a un valor de porosidad inducida por la evacuación de agua durante el período de referencia en torno al 0.2%. Esta cifra se da en términos absolutos con respecto a la porción de matriz yesífera considerada. Es decir, debe añadirse a la porosidad del sistema en condiciones no perturbadas (y no considerarse como un porcentaje sobre la misma).

Sin embargo, es necesario tener en cuenta la naturaleza de los procesos kársticos, que por concentración de huecos pueden dar lugar a colapsos que afecten tanto a la estabilidad del túnel del Metro como de las edificaciones circundantes. De acuerdo con los datos existentes, pensamos que el hecho de que no se hayan producido colapsos importantes hasta la fecha puede explicarse no sólo por las distintas inyecciones practicadas a lo largo de los últimos meses sino también por la presencia de un paquete suficientemente grueso de margas superpuesto los yesos.

Por otra parte es necesario considerar que, con posterioridad a los trabajos de impermeabilización del poceto, se han seguido recogiendo filtraciones de moderada magnitud y elevada salinidad. La interpretación conjunta de este hecho con la evolución de los piezómetros observada tras la impermeabilización del poceto admite dos conclusiones: por un lado, tanto la estabilización de los piezómetros como el caudal recogido en la vía (del orden de 1-5 l/s/km lineal de túnel) parecen implicar que los trabajos de impermeabilización han sido suficientes para contener por el momento los procesos de karstificación acelerada que venían observándose durante la primera mitad de 2008. Sin embargo, las altas conductividades medidas en los rezumes del túnel apuntan a que el problema permanece latente. Se recomienda por tanto un cauteloso seguimiento hidrogeológico a largo plazo, de manera que pueda detectarse con suficiente antelación una posible reactivación del proceso.

Además cabe también poner de manifiesto que la thenardita y la mirabilita son asimismo sales muy solubles, con una cinética de días a meses. El proceso de disolución de estos minerales se produce a partir de sulfato sódico: a temperatura inferior a 33° C se separan la mirabilita o sulfato sódico hidratado con diez moléculas de agua, mientras que el anhidro o thenardita lo hace por encima de dicha temperatura, produciéndose la siguiente reacción:



Con el agravante de la presencia de cloruro sódico, que rebaja notablemente la temperatura de formación, hasta el punto que a los 18° C comienza la deposición de thenardita. El agua disuelve el sulfato sódico de la mirabilita y precipita el sulfato cálcico cristalizado (yeso), en condiciones de sobresaturación, que también podría disolverse si hay exceso de agua. La epsomita es también una sal de alta solubilidad, mientras que el yeso y la anhidrita presentan una solubilidad más moderada.

Por último, desde el punto de vista del cálculo realizado llama la atención el hecho de que el reactivo limitante en la combinación de cloro y sodio es precisamente éste último, sin que haya sido posible todavía dar una explicación al exceso de cloro más allá de posibles pérdidas en la red de alcantarillado.

5.2 Aumento de huecos por transformación de glauberita en yeso

Como ya se ha mencionado anteriormente es muy probable que exista glauberita asociada a la halita y a la thenardita. La presencia de agua o simplemente de humedad (condensación de detrás del revestimiento del túnel, por ejemplo), puede producir el reemplazamiento de la glauberita a yeso, con la formación de mirabilita. Esto conlleva una reducción del 28% en volumen, y por tanto la creación del huecos que podrían oscilar entre unos pocos milímetros y varios metros, ocasionando riesgo de colapsos. Este puede incrementarse por el aumento de la permeabilidad del macizo, que tenderá a favorecer la circulación de agua renovada y por tanto fenómenos de karstificación.

Este proceso de yesificación tiene una cinética mas o menos lenta en condiciones naturales, pero se pueden hacer muy rápida (días o meses), tal como se sospecha que ha ocurrido en el caso concreto que nos ocupa, al estar favorecida la renovación del agua por la captación que supone al túnel del metro y el pozo, que ha alterado las condiciones naturales anteriores al atraer las aguas de las capas superiores y del río Jarama. La presencia de estas aguas renovadas con alta capacidad para disolver y transformar la glauberita puede aumentar la tasa de interacción y acelerar estos procesos.

Esta transformación de mirabilita a yeso deja una disolución acuosa de sulfato sódico (mirabilita) que podría explicar el contenido en sodio de las aguas subterráneas drenadas por el pozo.

5.3 Aumento de huecos por erosión física de las evaporitas y niveles de arcillas interestratificadas.

Algunos materiales como la halita, el yeso e incluso los niveles de arcillas intercaladas podrían ser erosionados si el régimen de flujo subterráneo fuera turbulento. Aunque esto necesita el desarrollo de una red de conductos grandes, no puede descartarse que haya ocurrido en cierta medida en el entorno del pozo, sobre todo habida cuenta de los caudales que han llegado a extraerse.

5.4 Procesos de expansividad

La anhidrita es un mineral soluble y muy expansivo, a diferencia de la thenardita, el yeso o la halita, que son solubles pero no expansivos. En presencia del agua o de humedad, la anhidrita puede aumentar su volumen entre 30 y 67%.

5.5 Aumento de volumen por cristalización de yeso y otros sulfatos

La transformación de glauberita a yeso produce la precipitación mirabilita en los huecos dejados por la reducción de volumen, o de los creados por la disolución de las capas cercanas de halita, thenardita y epsomita. Esta reacción puede ser sin embargo reversible, y en condiciones de sobresaturación se pueden recrystalizar con el tiempo yesos de neoformación y otros sulfatos. La presión por cristalización de estos sulfatos es comparable a la expansividad de la anhidrita.

6. Conclusiones y recomendaciones

Dentro del presente estudio se han llevado a cabo una serie de trabajos enfocados a confirmar la hipótesis preexistente sobre el nuevo modelo de flujo regional inducido por la evacuación de aguas a través de un pozo ubicado en el túnel de la Línea 7 del Metro de Madrid y a establecer sus implicaciones prácticas.

- Los análisis mineralógicos han identificado halita, thenardita, anhidrita y yeso, principalmente. Sin embargo, es casi segura la presencia de glauberita, mirabilita, polihalita y epsomita. Según los análisis químicos de las aguas subterráneas, los procesos de disolución de la halita y thenardita, y la transformación probable de la glauberita a yeso han sido y son activos. Ello puede originar la formación de huecos por disolución del 28% de volumen en él reemplazamiento de la glauberita a yeso en cuestión de días/meses con el

consiguiente riesgo de colapsos en el túnel de Metro y en las edificaciones del entorno.

- En el caso concreto de la halita se ha hecho un cálculo aproximado del volumen de huecos generado por el desalojo de dicho mineral, obteniéndose un volumen superior a los $13,000\text{m}^3$. Dichos huecos posiblemente se concentran de forma fundamental en los alrededores del pozo, y en el tramo que va desde el mismo al cauce del río Jarama, no pudiendo descartarse que los flujos verticales hacia arriba hayan generado huecos a profundidades por debajo de los 40m. Si bien el volumen desalojado supone incremento en la porosidad media del orden de 0.2%, se recomienda la realización de un estudio geotécnico de estabilidad, así como el máximo cuidado en la auscultación del túnel y de las edificaciones circundantes a la zona de estudio. Dichos trabajos trascienden el marco del presente convenio.
- Los procesos de disolución han podido verse acelerados por el incremento de la interacción entre estos materiales sulfatados y las aguas renovadas subterráneas de la recarga procedente del río Jarama, o de la infiltración de las aguas meteóricas través de la terraza superior por el bombeo en el pozo y las entradas de agua al túnel del metro. Es importante tener en cuenta que con el tiempo estos materiales sulfatados van a seguir alterándose, por lo que es imprescindible el anteriormente citado estudio geotécnico, así como la vigilancia a largo plazo de la zona.
- Los isótopos de O18, D y T parecen indicar que el agua del pozo de bombeo tiene un origen meteórico reciente, procedente del río Jarama y/o de la infiltración del agua de la lluvia o pérdidas en la red de alcantarillado y de aguas pluviales en las gravas arenas de la terraza superior. Las del resto de los materiales sulfatados es agua más antigua.

→ entre mayo y octubre de 2008

Al hilo de lo anterior se establece una única recomendación:

- Desde el punto de vista geotécnico, y habida cuenta de la irreversibilidad de los cambios inducidos por la circulación del agua subterránea, debería hacerse un estudio geotécnico de estabilidad y una auscultación continua y exhaustiva a largo plazo en los edificios del entorno, así como en el túnel del Metro: la naturaleza kárstica del sistema subterráneo impide que puedan descartarse subsidencias y colapsos. Dicho estudio geotécnico escapa al carácter meramente hidrogeológico del presente informe. El estado latente del problema recomienda un seguimiento a largo plazo, enfocado siempre a detectar una posible reactivación del proceso.

7. Fuentes bibliográficas

CEDEX (1994). Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subterráneas de la Península Ibérica (pag.51)

Geocisa (2008a). Avance de los trabajos para estudio hidrogeológico en la L7 de metro Madrid.

Geocisa (2008b). Informe de resultados de los trabajos en el pozo de bombeo situado en el pk. 7-422 de la línea 7 de metro de Madrid.

Geocisa (2008c). Tratamiento de consolidación del terreno en el entorno del pozo de bombeo (PK7+422) de la Línea 7 de Metro de Madrid (San Fernando de Henares).