



CONGRESO IBÉRICO
DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS

CIAS 2014

del 8 al 10 de septiembre de 2014

Valencia

LIBRO DE ACTAS

J. Jaime Gómez-Hernández

Javier Rodrigo Ilarri

Editores

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



FUNDACIÓN CENTRO INTERNACIONAL
DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA



J. Jaime Gómez-Hernández
Javier Rodrigo-Illarri
Editores

CIAS2014

II CONGRESO IBÉRICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Valencia, del 8 al 10 de septiembre de 2014

AMPHOS²¹
SCIENTIFIC AND STRATEGIC ENVIRONMENTAL CONSULTING



AQUALOGY
Where Water Lives



Instituto de Ingeniería del
Agua y Medio Ambiente

IIAMA

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Colección Congresos UPV

© Editores:

J. Jaime Gómez-Hernández
Javier Rodrigo-Illari

© 2014, Editorial Universitat Politècnica de València
www.lalibreria.upv.es / Ref.: 6175_01_01_01

ISBN: 978-84-9048-239-1 (versión impresa)

Queda prohibida la reproducción, la distribución, la comercialización, la transformación y, en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de la totalidad o de cualquier parte de esta obra sin autorización expresa y por escrito de los autores.

Impactos hidrogeológicos causados por la construcción del AVE en el entorno de la Sagrada Familia (Barcelona)

Estanislao Pujades Garnes¹, Enric Vázquez-Suñé², Laura Culí³, Jesús Carrera Ramírez⁴, Alberto Ledesma⁵, Anna Jurado⁶

Palabras clave: túnel, efecto barrera, construcción subterránea

Resumen

El túnel del AVE que atraviesa Barcelona fue construido con una tuneladora tipo EPB. El trazado del túnel pasa bajo la Sagrada Familia (declarada patrimonio de la humanidad por la UNESCO), y debido a los riesgos que entrañaba la construcción, un comité designado por la UNESCO actuó como observador externo durante la excavación del túnel. Las dos principales preocupaciones eran los movimientos del suelo producidos por la construcción y los impactos causados por la obra sobre el acuífero. Ambas se tuvieron en cuenta durante la fase de diseño del túnel para evitar eventos inesperados durante la construcción.

La metodología seguida consistió en:

¹ GHS, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA), CSIC, Barcelona, Spain, estanislao.pujades@gmail.com

² GHS, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA), CSIC, Barcelona, Spain, enrich.vazquez@idaea.csic.es

³ GHS, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA), CSIC, Barcelona, Spain, lauraculi@hotmail.com

⁴ GHS, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA), CSIC, Barcelona, Spain, jesus.carrera@idaea.csic.es

⁵ Dept. Geotechnical Engineering and Geosciences, Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTech, Barcelona, Spain, alberto.ledesma@upc.edu

⁶ GHS, Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA), CSIC, Barcelona, Spain, annajuradoelices@gmail.com

- 1) caracterizar detalladamente el lugar (geología e hidrogeología),
- 2) predecir analítica y numéricamente el impacto causado en el acuífero,
- 3) predecir los movimientos del suelo relacionados con las oscilaciones del agua subterránea (causadas por la construcción) y
- 4) controlar el comportamiento del medio (agua subterránea y suelo) antes, durante y después de la excavación del túnel.

Los principales impactos hidrogeológicos observados fueron un efecto barrera moderado causado por el túnel, cuya magnitud coincidió con las predicciones realizadas, y la modificación del nivel piezométrico debido a la conexión hidráulica de diferentes capas. El seguimiento del comportamiento del suelo reveló dos tipos de movimientos, a corto y a largo plazo. El primero fue relacionado con el paso de la tuneladora, mientras que el movimiento a largo plazo se vinculó con el efecto barrera creado por la construcción.

Este trabajo propone un procedimiento realista para estimar impactos hidrogeológicos debidos a la excavación de túneles con tuneladora. La metodología descrita permite mejorar la construcción de túneles en áreas urbanas.

Introducción

El túnel del AVE que cruza Barcelona en dirección suroeste-noreste fue construido con una tuneladora tipo EPB (*Earth Pressure Balance*). El trazado del túnel no pasa bajo ningún edificio, pero sí frente a la basílica de la Sagrada Familia (Patrimonio de la Humanidad desde 2005) (Figura 1). La proximidad del túnel a la Sagrada Familia, atrajo la atención de políticos y ciudadanos que temían por la integridad del monumento durante la construcción. Tal era la preocupación que los representantes de la Sagrada Familia, algunas asociaciones de ciudadanos y algunos sectores políticos se opusieron a la construcción. De hecho, hubo movilizaciones ciudadanas contra el túnel y un intenso debate político. Debido a esto, las especificaciones de la construcción fueron más estrictas de lo habitual con el fin de evitar eventos inesperados y reducir al mínimo los impactos de la construcción alrededor de la Sagrada Familia. Los impactos potenciales se estimaron previamente a la construcción, el

proyecto inicial se modificó para reducirlos al máximo y además, se adoptaron medidas de seguridad adicionales.

El proyecto inicial tenía previsto construir el túnel excavando entre pantallas (*cut and cover method*) pero esta opción fue rechazada debido a que las pantallas habrían creado un gran impacto en el acuífero. El nivel habría sido modificado más de 3 m. Además, al excavar entre pantallas, la construcción habría tenido un gran impacto en la ciudad. En consecuencia, el túnel se construyó con una tuneladora (TBM). Las dos principales medidas de protección adoptadas en las zonas adyacentes a la Sagrada Familia para reducir el impacto y los riesgos de la construcción fueron: 1) construir una pantalla de pilotes no secantes (BPW) con el objetivo de reducir los asientos causados por la tuneladora bajo la Sagrada Familia, y 2) excavar un pozo de mantenimiento justo antes de la Basílica (Pujades *et al.*, 2014a) cuyo objetivo era reparar la tuneladora para que esta estuviera en óptimas condiciones a su paso junto a la Sagrada Familia. Además de esto, los principales impactos fueron considerados y estimados. Estos se resumen a continuación.

Los impactos hidrogeológicos más importantes causados por la construcción de un túnel en un acuífero son el efecto de barrera (S_B) y el efecto de dren (Vázquez-Suñé *et al.*, 2005). El primero aparece cuando una estructura impermeable se construye en la zona saturada, lo cual reduce la transmisividad efectiva. Esto dificulta el paso del agua y se traduce en ascensos del nivel aguas arriba y descensos aguas abajo (Ricci *et al.*, 2007, Deveughèle y Zokimila, 2010). El efecto barrera puede implicar consecuencias geotécnicas, ambientales e incluso puede afectar infraestructuras pre-existentes (Custodio y Carrera, 1989; Tambara *et al.*, 2003). El efecto dren es causado por túneles permeables, los cuales están diseñados para drenar el agua del acuífero. El principal impacto es un descenso de niveles que puede tener consecuencias ambientales y/o geotécnicas (Vicenzi *et al.*, 2009 y Butscher, 2012). Ambos impactos pueden determinarse antes de la construcción numérica y/o analíticamente (Goodman, 1965 y Pujades *et al.*, 2012b).

Otros impactos asociados a la construcción de túneles con tuneladora son los relacionados con la excavación de pozos utilizados para mantenimiento, emergencia y/o salidas de ventilación (Ni y Cheng, 2011). El drenaje, que suele ser necesario para excavar estos pozos profundos, provoca descensos alrededor de la excavación y modifica el comportamiento del acuífero. Entre los impactos potenciales, los asientos son los más temidos.

Por último, los efectos más perceptibles durante la excavación con tuneladora son los movimientos de suelo. Estos movimientos pueden ser divididos en movimientos a corto y a largo plazo. Los primeros se deben principalmente a: 1) la pérdida de suelo durante la excavación (Ercelebi *et al.*, 2011), 2) la inyección de lechada y 3) los empujes de la tuneladora sobre el terreno para avanzar. Los movimientos a largo plazo se observan después del proceso de excavación, y suelen estar asociados a la redistribución del estrés, a la consolidación del suelo después del drenaje causado por la construcción del túnel y, tal vez, a la consolidación del suelo producida por cambios en el agua subterránea inducidos por la interacción entre el túnel y el acuífero (Ercelebi *et al.*, 2011) (efectos barrera o dren).

La metodología seguida para evaluar los impactos potenciales consistió en:

- 1) Caracterización del terreno.
- 2) Estimación numérica y analítica de los posibles impactos.
- 3) Seguimiento durante la construcción.
- 4) Validación del proceso de estimación empleado comparando lo esperado con las observaciones realizadas. La eficiencia de la BPW (para reducir los movimientos del suelo) también se evaluó mediante el análisis de los datos obtenidos durante la construcción.

El objetivo de este trabajo es triple: 1) demostrar la utilidad de los métodos empleados para cuantificar impactos hidrogeológicos debidos a la construcción de túneles, 2) proponer una metodología realista para mejorar la eficiencia y reducir los riesgos durante la construcción de túneles con tuneladora en zonas urbanas y 3) discutir los principales impactos observados durante la construcción del túnel del AVE.

Aspectos generales

Características de la construcción

Cercanía a la Sagrada Familia

La Sagrada Familia se encuentra en el centro de Barcelona (Figura 1), ocupa un área aproximada de 12.000 m² y su altura es cercana a los 150 m (Figura 2). El AVE, cuya profundidad (en el sitio de estudio) y radio son 30 y 5,8 m respectivamente, pasa a 10 m de la fachada de la Sagrada Familia. El túnel en este sector fue perforado en Octubre del 2010.

Pantalla de pilotes (BPW)

Una pantalla de pilotes fue construida con el fin de proteger a la Sagrada Familia de los movimientos provocados por el paso de la tuneladora (Figura 2). La pantalla, formada por pilotes no secantes, tenía 230 m de longitud. Los pilotes, cuyo diámetro y profundidad eran de 1,5 y 41 m respectivamente, fueron construidos cada 2 m. La pantalla se construyó entre agosto de 2009 y abril de 2010. Sus características están descritas con más detalle en Rodríguez y Blanco (2012).

Pozo de Padilla

El pozo de Padilla (a unos 350 m de distancia de la Sagrada Familia) se excavó con el objetivo de reparar la tuneladora y prepararla para su paso junto a la Sagrada Familia. La excavación del pozo se realizó entre pantallas y con la ayuda de pozos de bombeo (4 pozos de bombeo). El recinto utilizado consistió en pantallas (desde la superficie hasta 46,5 m de profundidad) y en pilotes secantes de jet-grouting (de 42,5 m a 61,5 m de profundidad). La profundidad máxima de excavación fue de 41 m, y el descenso provocado en el interior por los pozos de bombeo fue de 45 m (58 m de profundidad). El recinto de jet-grouting redujo la permeabilidad in situ del acuífero (capas profundas) en un factor de 10, pero aun así, el flujo que lo atravesaba era considerable (Pujades *et al.*,

2014a). Por lo tanto, el drenaje produjo descensos en el exterior de la excavación. Los aspectos relacionados con el diseño y la excavación del pozo de Padilla están explicados con detalle en Pujades *et al.*, 2014a.

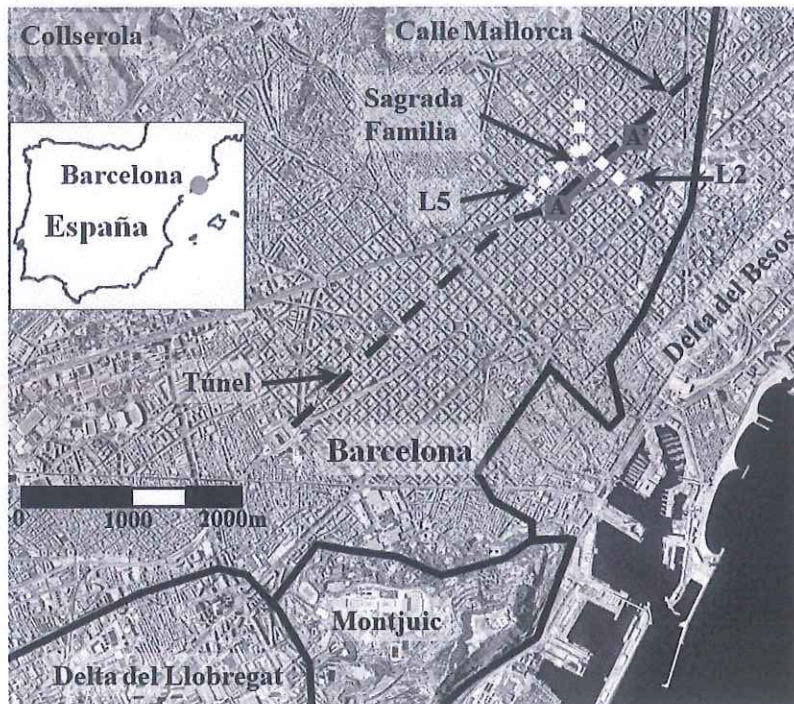


Figura 1. Localización del lugar de estudio. El trazado del AVE está marcado junto con la situación de Sagrada Familia. La línea (A-A') indica la sección donde la geología fue estudiada.

Geología

La geología se caracterizó en detalle a lo largo del túnel para conocer la litología, la continuidad lateral y vertical de los sedimentos, y, en general, la geometría de las estructuras geológicas (Figura 3 abajo). Esto se consiguió mediante la descripción de los materiales observados en sondeos realizados justo antes de la construcción (Figura 3 arriba). Además, la interpretación que se había realizado se verificó mediante los registros de Gamma Natural medidos en los sondeos. La Figura 3 muestra el perfil geológico de detalle. El relleno antrópico es de 1-2 m de espesor en toda la zona excepto por debajo de la

Sagrada Familia, donde su espesor alcanza los 5 m. Por debajo se encuentran los sedimentos cuaternarios, cuyo espesor varía a lo largo del perfil desde 20 a 1-2 m. En el Cuaternario no se observaron costras carbonatadas continuas, las cuales permiten identificar los ciclos del triciclo en otros lugares de Barcelona. Por último encontramos los materiales del Plioceno, el cual está afectado por una falla situada en la calle Cartagena (Figura 3). Identificar esta falla antes de la construcción del túnel fue importante debido a que los materiales de ambas partes son diferentes, y en consecuencia, los parámetros de la tuneladora debieron modificarse para adaptarse a los nuevos materiales.

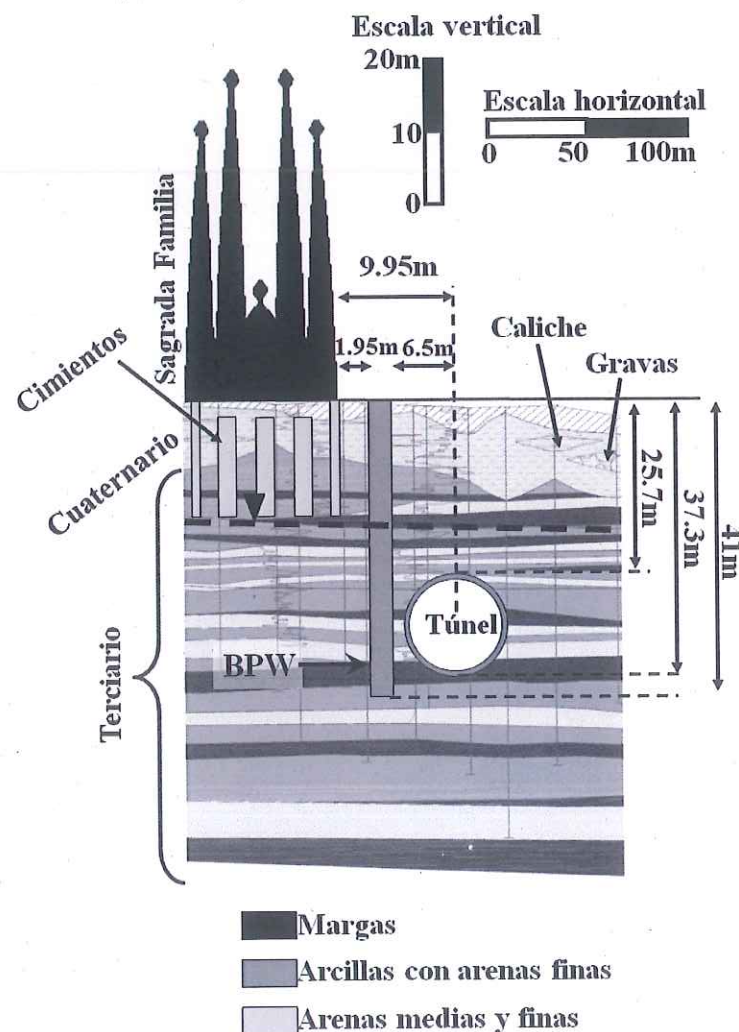


Figura 2. Geología en detalle de la zona de estudio. La proximidad del túnel a la Sagrada Familia, la situación de la BPW y la profundidad del túnel pueden ser observadas.

Hidrogeología

Descripción general

El llano de Barcelona se puede considerar como un acuífero muy heterogéneo verticalmente. Su transmisividad efectiva (T_{eff}) es de 100-200 m²/d. La conductividad hidráulica (k) de las capas de arcilla cuaternarias oscila entre 0,001 y 0,01 m/d y la k de las capas de arena y gravas cuaternarias oscila de 0,1 a 10 m/d. La k de los materiales finos del Plioceno es de 0,001-0,01 m/d mientras que la k de las capas de arena varía de 0,1 a 10 m/d. Estos valores se obtuvieron a partir de numerosos ensayos de bombeo realizados durante la construcción del AVE y otros proyectos (Pujades *et al.*, 2014a y Pujades *et al.*, 2014b).

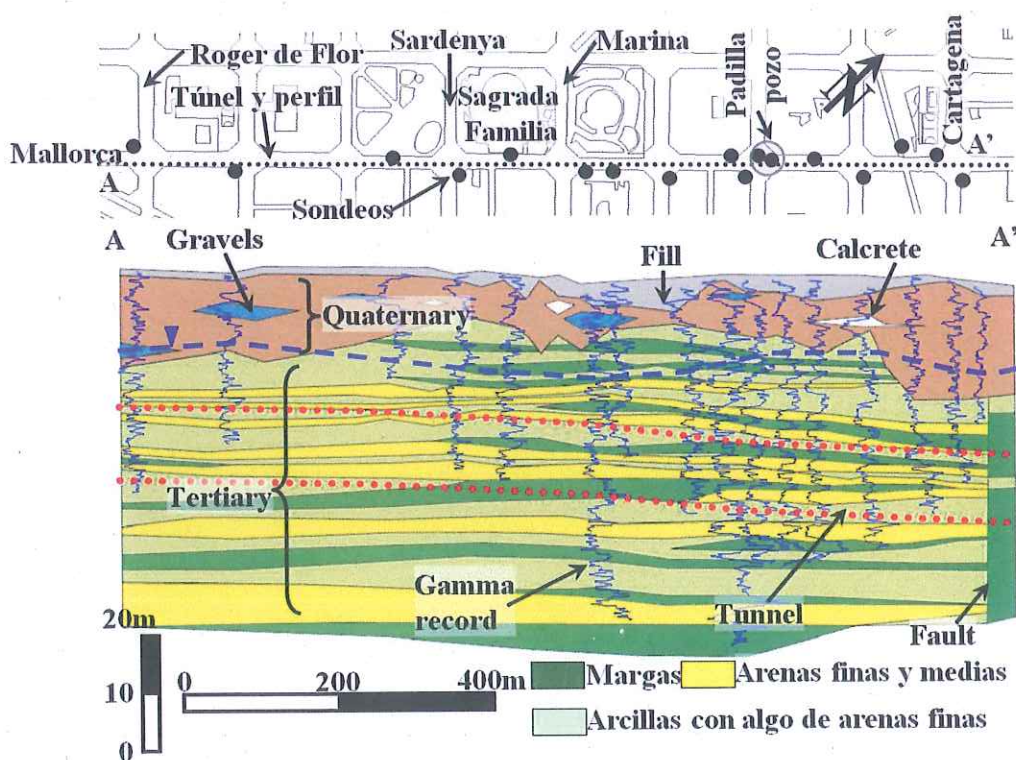


Figura 3. La vista en planta superior muestra la situación de los sondeos usados para realizar el perfil geológico mostrado abajo. Los registros de Gamma Natural usados están incluidos en el perfil.

Bombeos durante la construcción

Dos ensayos de bombeo se realizaron cerca de la Sagrada Familia (ambos en el pozo de Padilla). Mediante la interpretación de ambos ensayos se obtuvieron los parámetros hidráulicos del suelo (Pujades *et al.*, 2014a). Ambos ensayos fueron interpretados con el código de elementos finitos TRANSIN-IV (Medina y Carrera, 2003, y Medina *et al.*, 2000) y su interfaz visual VISUAL TRANSIN (UPC, 2003).

Tres bombeos más se realizaron en el pozo de Padilla, uno para caracterizar el jet-grouting hidráulicamente (mayo de 2012), otro para drenar el recinto durante la excavación (junio de 2010) y el último para facilitar la entrada de la tuneladora en el interior del pozo (agosto de 2010). Los dos primeros bombeos se realizaron desde el interior del recinto de pantallas, mientras que en el tercero, que provocó descensos de hasta 50 m, los pozos se situaron en el exterior, ya que el objetivo era rebajar el nivel fuera para facilitar la entrada de la tuneladora.

Hidrogeología en la zona de estudio

Varios piezómetros fueron instalados en la zona de estudio para conocer el comportamiento del agua subterránea (Figura 4). La posición de la rejilla era diferente para cada uno de los piezómetros. La mayoría estaban ranurados por completo, y solo algunos en las capas más profundas. En la Tabla 1 se pueden observar los tramos ranurados en cada piezómetro y la posición del nivel previamente al inicio de la construcción de la BPW. Las medidas muestran que el nivel piezométrico variaba con la profundidad. El nivel de las capas situadas a profundidades menores de 30 m estaba a cotas de 13-14 msnm, mientras que las presiones en las capas más profundas eran mayores. El nivel alcanzaba los 15-17 msnm en estas últimas capas. En la Figura 3 se puede observar una capa de margas que desconectaría hidráulicamente las capas superiores de las inferiores. Hay que tener en cuenta que, probablemente, la diferencia de niveles en condiciones naturales era mayor, ya que cuando estas medidas se tomaron ya existían algunos piezómetros que comunicaban las capas. Esta diferencia entre los niveles de las capas superficiales y profundas también se observó durante la construcción del pozo de Padilla.

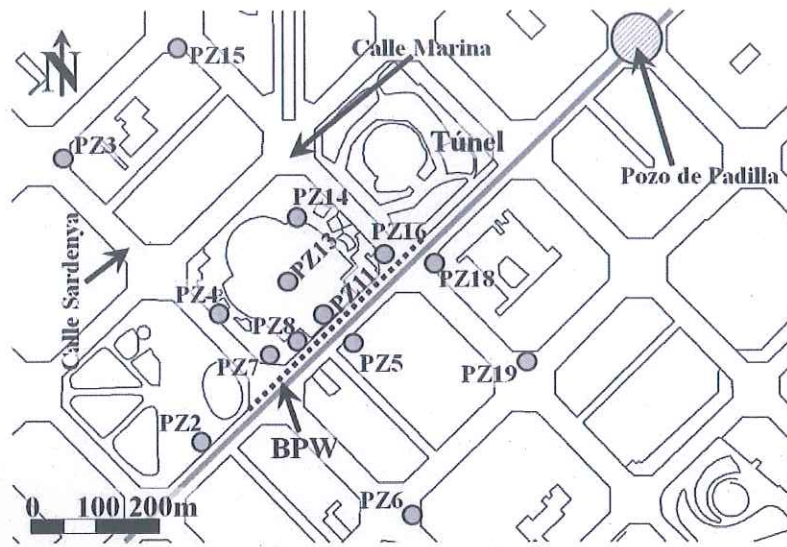


Figura 4. Situación de los piezómetros alrededor de Sagrada Familia.

Tabla 1. Características de los piezómetros situados cerca de Sagrada Familia. Los símbolos de la columna BPW indican el comportamiento del nivel en cada piezómetro durante la construcción de la pantalla de pilotes. En sombreado se muestran los piezómetros cuyo ranurado no sobrepasaba los 30 m.

Nombre	Nivel inicial (msnm)	BPW	Mín. Prof. ranurado (m)	Máx. Prof. ranurado (m)	Nombre	Nivel inicial (msnm)	BPW	Mín. Prof. ranurado (m)	Máx. Prof. ranurado (m)
PZ-2	15.2	↓	0	40	PZ-13	14.0	↑	0	25
PZ-3	16.9	↓	0	48	PZ-14	14.6	↑	0	29.5
PZ-4	15.6	↓	0	40	PZ-15	18.0	↓	0	45.8
PZ-5	15.0	↓	38	42	PZ-16	13.0	↑	0	23.5
PZ-6	15.5	↓	0	45.8	PZ-18	13.0	↑	0	35
PZ-7	15.6	≡	0	48	PZ-19	15.0	≡	0	37.5
PZ11	15.7	↓	31	37					

Preconsolidación del suelo

El estado de preconsolidación del suelo es importante para predecir los movimientos causados por oscilaciones del agua subterránea. La historia hidrogeológica de Barcelona, muestra que los niveles cayeron durante la década de los 60 (± 15 m en la zona de Sagrada familia) debido a los bombeos

(Vázquez-Suñé *et al.*, 2005), y posteriormente, una vez los bombeos cesaron, se recuperaron. El efecto de esta evolución fue el aumento de la preconsolidación de los sedimentos. Por lo tanto, los asentamientos causados por oscilaciones de nivel son pequeños y elásticos siempre y cuando no se sobrepasen los máximos descensos alcanzados en el pasado (Pujades, *et al.*, 2014a y Pujades *et al.*, 2014b).

Las características de la construcción del túnel sugerían que las oscilaciones provocadas en el agua subterránea serían menores que las máximas variaciones históricas.

Análisis y evaluación de los impactos

Predicciones Hidrogeológicas

El efecto de barrera (s_B) es consecuencia de la construcción de estructuras subterráneas (túneles, pantallas, etc.) poco permeables en la zona saturada. Esta interacción entre las estructuras y el acuífero da lugar a un aumento del gradiente entre la zona de aguas arriba y la de aguas abajo de la barrera (Pujades *et al.*, 2012). El efecto barrera se define como:

$$s_B = \Delta h_B - \Delta h_N \quad (1)$$

donde Δh_B es la diferencia de nivel entre dos puntos (cada uno situado a un lado de la barrera) y Δh_N es la diferencia de nivel entre los mismos puntos en condiciones naturales (sin presencia de la barrera).

La magnitud de s_B depende del lugar en el que es observado. Es posible distinguir dos tipos de efecto de barrera, el efecto barrera local (s_{BL}) y el efecto barrera regional (s_{BR}). s_{BL} es el ascenso máximo de nivel (o descenso) que se produce cerca de la barrera, mientras que s_{BR} es el impacto observado lejos de la barrera (Pujades *et al.*, 2012). Además de esto, es necesario decir que la distribución del efecto barrera en el acuífero depende de las condiciones de contorno de este. Si el contorno de aguas abajo es de nivel prescrito, el efecto barrera se acumula aguas arriba y viceversa, y cuando ninguno de los contornos