



La revista de los  
Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos

3579 SEPTIEMBRE 2016

REVISTA DE  
OBRAS PÚBLICAS

# R O P



Número  
monográfico  
en colaboración  
con AETOS

## MONOGRÁFICO TÚNELES

El agua y los túneles  
por **Carlos Oteo Mazo**

Condicionantes y singularidades en el diseño  
de la línea 5 del metro de Riad  
por **Pedro Ramírez Rodríguez, Alberto Gómez-Elvira López**  
y **Xavier Torelló Ciriano**

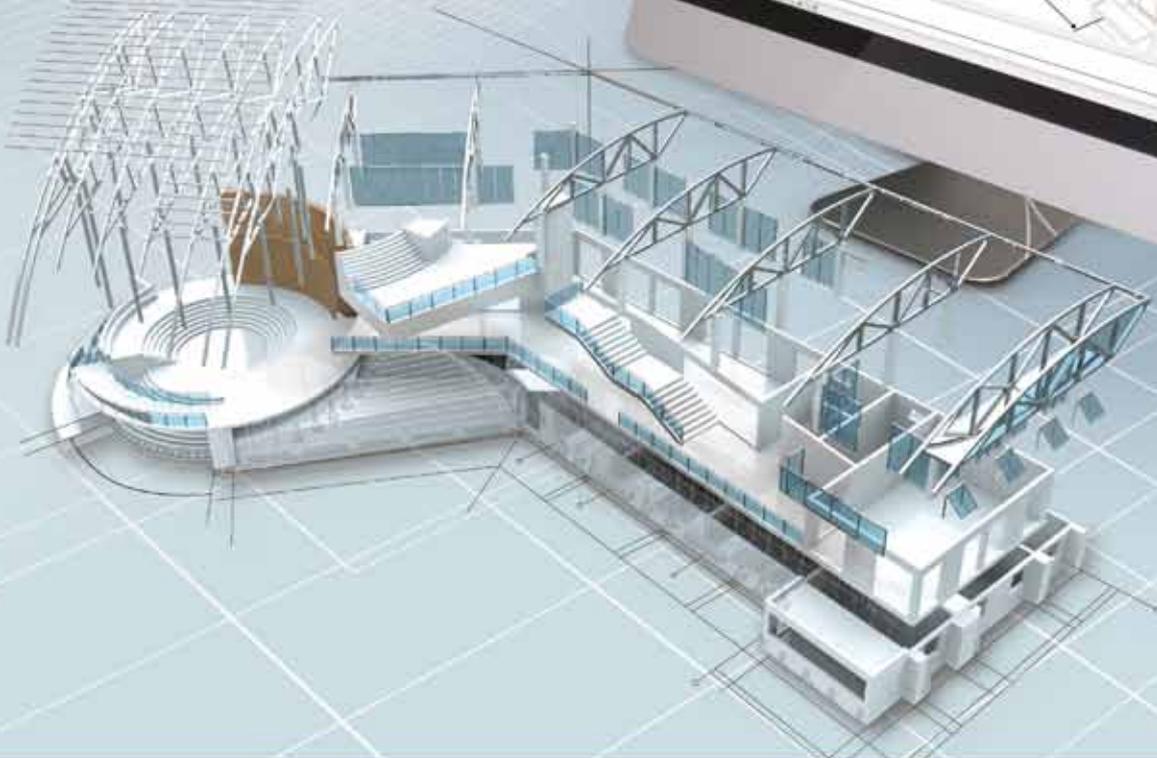
Crossrail C305: el reto de construir  
24 km de túnel en el centro de Londres  
con 4 tuneladoras

por **Alejandro Sanz Garrote, Francisco González,**  
**Juan Ares Santos, Roger Escoda Estelrich** y  
**Enrique Fernández González**



## CAD Rentable para Los Diseñadores de Arquitectura

- | Licencia perpetua de precio razonable
- | Totalmente compatible con DWG
- | APIs compatibles, fácil de migrar
- | Características fáciles de usar
- | 550,000 usuarios mundiales





Es un hecho que la profunda crisis económica de los pasados años viene suponiendo en España una fuerte caída de la actividad para nueva construcción de infraestructuras civiles, que ha incentivado, si no obligado, un aumento extraordinario de la presencia en el mercado exterior de las empresas españolas del sector. Así mismo, es una realidad reconfortante a día de hoy, y esperanzadora para el futuro, que la preparación y experiencia acreditadas por la ingeniería civil española, forjadas brillantemente con sus actuaciones en la etapa anterior a la crisis con una cuota muy relevante de túneles y obras subterráneas, vienen siendo la palanca motriz de su proyección y protagonismo, sin duda muy destacados, en los proyectos internacionales de obra civil más singulares y con mayor inversión, en los que la tecnología disponible en túneles y obras subterráneas tienen, cada vez más, un papel sobresaliente y decisivo.

En este contexto geográfico globalizado para la ingeniería civil española, AETOS (Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas) continúa considerando, como objetivos prioritarios, desarrollar en colaboración con otras entidades nacionales y extranjeras, canales y eventos para formación especializada, difusión del conocimiento y puesta al día e investigación, que además, supongan oportunidades de relación y contraste con otras ingenierías internacionales, especialmente de los países latinoamericanos. De este modo, AETOS espera proporcionar un impulso significativo para mantener en el futuro, y en todo el mundo, la actual posición de privilegio de la técnica española dentro de este campo de actividad.

Este nuevo número monográfico de la Revista de Obras Públicas, ya el octavo, constituye una clara muestra de todo lo anterior, tanto por la altura e innovaciones técnicas en el contenido de sus artículos, como por el ámbito geográfico internacional de los proyectos tratados y de sus autores participantes. Valga como anticipo el siguiente breve resumen de su contenido.

La aportación de C. Oteo expone la interacción del túnel con su acuífero envolvente durante la construcción y explotación, identificando la problemática general que puede darse, e ilustrándola con soluciones a casos reales, incluyendo diversos sistemas constructivos para el túnel y diferentes técnicas para las intervenciones necesarias. P. Ramírez et al, dentro del diseño de los 13 km de túnel y estaciones de la Línea 5 del Metro de Riad, describen los problemas más relevantes de las obras subterráneas, en un macizo calcáreo karstificado, con acuífero superficial muy complejo y ambiente agresivo para el hormigón, llegando a soluciones singulares que compatibilizan los riesgos de las excavaciones y de afección al entorno urbano, con los estrictos condicionantes de plazo. A. Sanz et al. narran el reto de construir 24 km de túnel, en el centro de Londres y tan solo en cuatro años, con cuatro tuneladoras pasando por cavernas, y detallan las innovaciones técnicas y logísticas en los frentes de ataque, diseño y empleo de las EPB, extracción de detritus, suministro de materiales y fabricación de dovelas, que han permitido una optimización del plazo y costes iniciales, logrando un impacto mínimo en el entorno urbano.

C. Herranz et al, muestran lo más relevante del diseño de una caverna en el centro de Los Ángeles para cruce ferroviario; además de un proceso constructivo complejo comprobado con análisis numérico, como aspectos singulares se han desarrollado soluciones para impermeabilizar la estructura frente a gas metano y sulfuro de hidrógeno, así como para resistir la elevada sismicidad de la zona.

R. Justa y M. Canals, explican la excavación del túnel bitubo de Olesa, con 185 m<sup>2</sup> de sección y atravesando suelos terciarios cementados; la información geotécnica adicional, con mejor evaluación de las propiedades del terreno y de la importancia del agua freática llevadas al modelo numérico, ha permitido pasar del método “alemán” al convencional “de avance y destroza”, excavando con medios mecánicos potentes. J. A. Sáenz de Santa María et al, detallan la restauración del impacto hidrogeológico superficial, generado por el túnel bitubo de Pajares para el AVE, que ha comprendido actuaciones de sellado de dolinas, encauzamiento con canal y restauración ambiental, reduciendo las infiltraciones en el túnel. F. Sánchez trata el colapso, afectando a la ladera cercana, del túnel carretero de Xicotepec, en la costa de Veracruz, al atravesar arcillas blandas en el contacto de basaltos sobre el basamento calcáreo, y después de lluvias intensas; la solución se comprobó con análisis numérico, y consistió en inyecciones en el tubo colapsado, con refuerzo de la sección incluyendo contrabóveda.

**Pedro R. Sola Casado.**  
**Secretario general de AETOS**

# SUMARIO

La revista decana de la  
prensa española no diaria

**Director**

Antonio Papell

**Redactoras Jefe**

Paula Muñoz  
Diana Prieto

**Fotografía**

Juan Carlos Gárgoles

**Publicidad**

MM Mass Media  
Hermosilla 64 6ºB  
T. 91 431 08 39

**Imprime**

Gráficas 82

**Depósito legal**

M-156-1958

**ISSN**

0034-8619

**ISSN electrónico**

1695-4408

**ROP en internet**

<http://ropdigital.ciccp.es>

**Suscripciones**

[http://ropdigital.ciccp.es/  
suscripcion.php](http://ropdigital.ciccp.es/suscripcion.php)  
[suscripcionesrop@ciccp.es](mailto:suscripcionesrop@ciccp.es)  
T. 91 308 19 88

**Edita**

Colegio de Ingenieros de  
Caminos, Canales y Puertos  
Calle Almagro 42  
28010 - Madrid

## PRESENTACIÓN

---

## TÚNELES

---

- 6 El agua y los túneles**  
Carlos Oteo Mazo
- 
- 18 Condicionantes y singularidades en el diseño de la línea 5 del metro de Riad**  
Pedro Ramírez Rodríguez, Alberto Gómez-Elvira López y Xavier Torelló Ciriano
- 
- 36 Crossrail 305: el reto de construir 24 km de túnel en el centro de Londres con 4 tuneladoras**  
Alejandro Sanz Garrote, Francisco González, Juan Ares Santos, Roger Escoda Estelrich y Enrique Fernández González
- 
- 54 Diseño de caverna en el centro de Los Ángeles**  
Carlos Herranz, Zsolt Horvath, Justin Lianides y Derek Penrice



---

**68** **Los suelos cementados y su comportamiento en el túnel de Olesa de Montserrat (Barcelona)**  
Rolando Justa Cámara y Marc Canals i Borràs

---

**82** **Restauración del impacto hidrogeológico superficial generado por los túneles de Pajares en el arroyo de Alcedo (León, noroeste de España)**  
José A. Sáenz de Santa María Benedet, Pablo Valenzuela Mendizábal, María José Domínguez-Cuesta, Carlos López Fernández y Mónica Meléndez-Asensio

---

**92** **El colapso del túnel Xicotepéc I**  
Fermín Sánchez Reyes

**Consejo de Administración**

**Presidente**

Miguel Aguiló Alonso

**Vocales**

Juan A. Santamera Sánchez  
José Polimón López  
José Javier Díez Roncero  
Juan Guillamón Álvarez  
Luis Berga Casafont  
Roque Gistau Gistau  
Benjamín Suárez Arroyo  
José Antonio Revilla Cortezón  
Francisco Martín Carrasco  
Ramiro Aurín Lopera

**Comité Editorial**

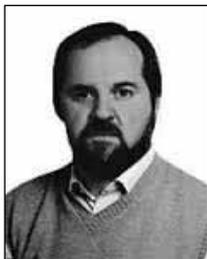
Pepa Cassinello Plaza  
Vicente Esteban Chapapriá  
Jesús Gómez Hermoso  
Conchita Lucas Serrano  
Antonio Serrano Rodríguez

**Foto de portada**

Montaje de tuneladoras.  
Crossrail C305 - Tramo Y



# Restauración del impacto hidrogeológico superficial generado por los túneles de Pajares en el arroyo de Alcedo (León, noroeste de España)



**José Antonio Sáenz de Santa María Benedet**  
Licenciado en Ciencias Geológicas.  
Propietario de Gehma Geología y Geotecnia



**Pablo Valenzuela Mendizábal**  
Licenciado en Geología.  
Investigador, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo



**María José Domínguez-Cuesta**  
Doctora en Geología.  
Profesora Titular, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo



**Carlos López Fernández**  
Doctor en Geología.  
Profesor Titular, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo



**Mónica Meléndez-Asensio**  
Licenciada en Geología.  
Instituto Geológico y Minero de España

## Resumen

La perforación de los Túneles de Pajares, con 24,6 km de longitud y 700 m de profundidad media, a través de la Cordillera Cantábrica (NO España) ha causado un importante impacto hidrogeológico superficial en el Valle de Alcedo consistente en: (i) el desarrollo de 25 dolinas de colapso entre 2007 y 2014 en materiales aluviales cuaternarios depositados sobre unas calizas y (ii) la total infiltración del caudal superficial del arroyo de Alcedo a través de 7 sumideros. Estudios previos identificaron el origen kárstico del problema y estimaron el volumen medio de infiltración en unos 0,4 hm<sup>3</sup>/año (10 l/s aprox.). Con posterioridad, se han realizado nuevas investigaciones geotécnicas e hidrogeológicas para caracterizar en detalle la zona de estudio: (i) levantamiento topográfico, (ii) perforación de sondeos y zanjeo, (iii) prospección geofísica, (iv) aforos regulares del caudal superficial y (v) análisis del periodo de retorno del arroyo. La solución adoptada para atajar la infiltración superficial ha sido el sellado de las dolinas de colapso, la construcción de un canal de hormigón sobre el área afectada por procesos kársticos y su restauración ambiental. La ejecución de estos trabajos ha implicado la reducción en un 7,2 % del volumen total drenado por los Túneles de Pajares, desde 350 l/s hasta 325 l/s.

## Palabras clave

Túneles de Pajares, dolinas de colapso, infiltración, canal, restauración ambiental

## Abstract

*The perforation of the Pajares Tunnels, with 24.6 km long and 700 m average depth, through the Cantabrian Range (NW Spain) caused a very important surficial hydrogeological impact on the Alcedo Valley consisting on: (i) the development of 25 sinkholes from 2007 to 2014 in Quaternary alluvial materials covering calcareous rocks, and (ii) the whole infiltration of the surficial flow of the Alcedo stream trough 7 active ponors. Previous studies identified the karstic origin of the problem and estimated the mean water volume of infiltration in 0.4 hm<sup>3</sup>/year (approx. 10 l s<sup>-1</sup>). New geotechnical and hydrogeological studies were planned to characterize in depth the study area: (i) topographic survey, (ii) borehole drilling and trench digging, (iii) geophysical prospecting, (iv) regular gauging of the surficial flow, and (v) analysis of the water flow return period. The chosen solution for stopping surficial infiltration was the sealing of the sinkholes and ponors, the construction of a concrete channel over the area affected by karst processes and its environmental restoration. After the completion of these actions, the infiltration from the Alcedo Stream to the tunnels was eliminated. The completion of these works involved a 7.2% reduction of total water volume drained by the Pajares Tunnels, from average 350 l s<sup>-1</sup> to 325 l s<sup>-1</sup>.*

## Keywords

*Pajares Tunnels, sinkholes, infiltration, channel, environmental restoration*

## 1. Introducción

La ejecución de proyectos de obra subterránea en áreas kársticas conlleva generalmente una extensa y variada problemática. La alteración del régimen hidrogeológico natural constituye uno de los impactos más frecuentes, dando lugar a variaciones del nivel piezométrico, secado de manantiales y arroyos, inundaciones o desarrollo de procesos de subsidencia y colapso (dolinas de colapso o *sinkholes*) en las formaciones superficiales que recubren el substrato karstificado (Gutiérrez et al., 2014). Todo ello causa daños medioambientales severos y frecuentes conflictos con la población local (Chiocchini y Castaldi, 2011).

Varios autores han analizado el origen y evolución de este tipo de impactos superficiales, en su mayoría relacionados con la perforación de túneles (Guerrero et al., 2008; Song et al., 2012; Vincenzi et al., 2014), aunque también se han documentado casos debidos a actividades mineras (De Bruyn and Bell, 2001; Lolcama et al., 2002) e industriales (Gutiérrez-Santoalla et al., 2005). Son menos frecuentes los trabajos que describen las medidas de mitigación tomadas ante este tipo de fenómenos (Walthman, 2008, Song et al., 2012; Brian et al., 2013), cuya ejecución suele estar condicionada por la disponibilidad presupuestaria, el impacto social y ambiental, así como la afección a poblaciones, infraestructuras u otros intereses económicos.

Las particulares características de cada caso hacen que la investigación previa sea de vital importancia a la hora de determinar las acciones de rehabilitación pertinentes. La realización de aforos, piezometrías, cartografías geológica y geomorfológica, sondeos y la aplicación de métodos geofísicos (Gutiérrez et al., 2014) se utilizan habitualmente para el desarrollo de modelos tridimensionales de las condiciones subterráneas sobre las que se debe actuar. Entre los métodos de rehabilitación más frecuentes destacan la canalización o impermeabilización de arroyos superficiales (Walthman, 2008) y el tratamiento de dolinas de colapso mediante inyecciones de lechada de cemento, relleno con hormigón ciclópeo, métodos de compactación del terreno e impermeabilización mediante arcillas y geosintéticos (Klein-hans y Van Rooy, 2016).

### *Los Túneles de Pajares*

Los denominados Túneles de base de Pajares constituyen la principal infraestructura de la nueva Línea ferroviaria de Alta Velocidad León-Asturias. Perforados entre 2005 y 2009, sus dos tubos paralelos de 24,6 km de longitud, conectados

entre sí y con el exterior por un sistema de galerías auxiliares, atraviesan la Cordillera Cantábrica a una profundidad media de 700 m (Míguez Bailo, 2005). La perforación a través de una zona estructural y litológicamente compleja (Alonso y Rubio, 2009), en la que se han identificado 20 sistemas acuíferos (Garrido Ruiz et al., 2009), ha dado lugar a una amplia problemática hidrogeológica con implicaciones medioambientales y sociales. Entre las afecciones generadas destacan: (i) los problemas de abastecimiento de agua en varias poblaciones debido al secado de manantiales, (ii) la pérdida de caudal en varios arroyos, y (iii) el efecto drenante de los túneles sobre los acuíferos perforados, dando lugar a un trasvase entre ambas vertientes de la Cordillera Cantábrica (Álvarez Díez et al., 2009). Además, la infiltración de agua en los túneles podría suponer un problema para las condiciones de seguridad requeridas en una línea ferroviaria de alta velocidad.

Una de las zonas más visiblemente afectadas ha sido el Valle de Alcedo, una pequeña cuenca fluvial de alto valor natural situada dentro de la Reserva de la Biosfera “Alto Bernesga”, en el norte de la provincia de León. La perforación de los túneles a 450 m de profundidad bajo esta zona en marzo de 2007 fue el detonante de una importante alteración del régimen hidrogeológico. Entre 2007 y 2014 se documentó en superficie la aparición y evolución de 25 dolinas de colapso, así como la infiltración de la totalidad del flujo superficial de la cuenca alta del arroyo de Alcedo a través de 7 sumideros aparecidos en su cauce (Valenzuela et al., 2015) (Fig. 1). En 2008 se ejecutó un proyecto de sellado de las dolinas de colapso existentes en ese momento, así como una canalización provisional del arroyo mediante una losa de hormigón con el fin de reducir la entrada de caudal a las obras del túnel y mitigar el necesario bombeo. Acabada la excavación, en octubre de 2010, se produjo una avenida que dio lugar a la aparición de nuevas dolinas de colapso y a la socavación y fractura de la canalización en diversos puntos, con el consecuente agravamiento del problema.

Todas las dolinas de colapso se desarrollaron en materiales cuaternarios no consolidados de origen aluvial y coluvial depositados sobre un sustrato karstificado formado por calizas de la Fm. Láncara (Cámbrico Inferior-Medio). El abatimiento del nivel piezométrico generado por la perforación de los túneles afectó tanto al acuífero kárstico como a los materiales superficiales, dando lugar a la actuación de procesos de subfusión que desencadenaron los fenómenos de colapso en los depósitos cuaternarios. La continua infiltración de la totalidad del caudal superficial, estimado

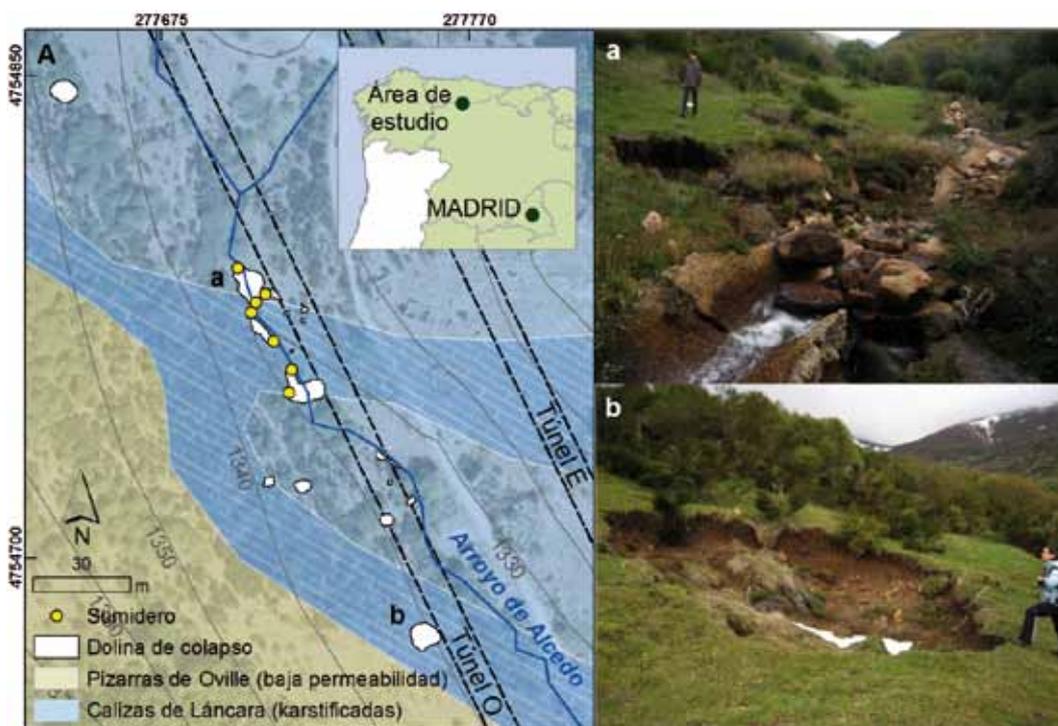


Fig. 1. Situación del valle de Alcedo. A. Localización de las dolinas de colapso y sumideros aparecidos en el valle de Alcedo; a y b. Detalles de las dolinas de colapso representadas en el mapa geológico sobre la proyección del tubo oeste de los túneles

en 0,4 hm<sup>3</sup>/año (10 l/s aprox.), hacia los túneles no solo potenció los procesos de colapso, sino que supuso el aislamiento del curso alto del arroyo con respecto al resto de la red hidrográfica, con el consecuente impacto ecológico (Valenzuela et al., 2015).

A pesar de no tratarse del único caso de este tipo documentado en el área de influencia de los Túneles de Pajares, el elevado impacto geotécnico, hidrogeológico, ecológico y visual de las afecciones generadas en el Valle de Alcedo impulsó al Ministerio de Fomento del Gobierno de España y al ADIF (Administrador de Infraestructura Ferroviaria) a elegir el área descrita para llevar a cabo la primera actuación dirigida a reducir la infiltración de caudal y realizar una restauración ambiental de la zona afectada por las dolinas de colapso y del flujo superficial.

## 2. Caracterización del problema

### 2.1. Metodología

Las campañas de estudios geológicos e hidrogeológicos realizados durante la fase de proyecto y ejecución de los túneles, así como el estudio de Valenzuela et al. (2015), han identificado el origen kárstico de los procesos de colapso e

infiltración descritos anteriormente. Con el objetivo de conocer en detalle las condiciones del área de actuación, se planificó una nueva campaña de prospección con especial énfasis en la determinación del espesor del recubrimiento superficial y la presencia y distribución de cavidades y conductos kársticos en el mismo. Así, se llevó a cabo un levantamiento topográfico de detalle, se perforaron sondeos y se ejecutaron perfiles de tomografía eléctrica. Por otra parte, para medir con exactitud la pérdida de caudal se llevó a cabo una campaña de aforos diferenciales y un estudio hidrológico e hidráulico que ha permitido realizar una predicción del comportamiento del arroyo de Alcedo para varios periodos de retorno.

### Levantamiento topográfico

La utilización de una estación topográfica robotizada Leica TCRA 1203 R 100 con prisma de 360° circular y de un GPS Leica RX 1200 de doble frecuencia con corrección diferencial permitió realizar un levantamiento topográfico de detalle, con curvas de nivel equidistantes 1 m y puntos topográficos que definen los rasgos del terreno de menor escala, como las dolinas de colapso. Dichos trabajos se realizaron sobre un área de 6,5 ha, a lo largo de 500 m del cauce del arroyo de Alcedo.

### Perforación de sondeos

Se perforaron dos sondeos con recuperación de testigo en dos puntos situados a lo largo del cauce del arroyo de Alcedo con un doble objetivo: (i) la caracterización del substrato calcáreo afectado por procesos kársticos y (ii) la determinación del espesor y características de los materiales cuaternarios de origen mixto que recubren el macizo rocoso.

### Perfiles de tomografía eléctrica

La utilización de un equipo Syscal Switch Pro 72 permitió la realización de 8 perfiles de tomografía eléctrica en el área de estudio: 5 de ellos paralelos al cauce del arroyo de Alcedo y otros 3 perpendiculares al mismo. Los perfiles se diseñaron con una longitud de entre 132,5 y 177,5 m y una separación entre electrodos de 2,5 m, alcanzando profundidades de medida variables entre 26 m y 35 m. En todos los casos se emplearon configuraciones de medida dipolo-dipolo y Schlumberger-Wenner. El procesado de los datos se llevó a cabo con el software Electre Pro.

### Campaña de aforos diferenciales

Desde octubre de 2014 hasta diciembre de 2015 se llevó a

cabo un control del caudal del arroyo en 3 estaciones de aforo: dos situadas aguas arriba, localizadas en los dos arroyos que convergen en la zona afectada por las dolinas de colapso y los sumideros, y otra, aguas abajo de dicha zona. En los puntos de medida se instalaron módulos de acequia prefabricada de hormigón de 5 m de largo y con una sección uniforme que permite el paso de un caudal máximo de 100 l/s. Dichas acequias fueron instaladas con una pendiente estable del 2 ‰, con el fin de generar un flujo de tipo laminar.

### Estudio hidrológico e hidráulico

Los caudales de avenida del arroyo de Alcedo para unos periodos de retorno de 2, 2.5, 5, 50, 100 y 500 años se han calculado mediante la aplicación Caumax, desarrollado por el Cedex para la Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Además, con el fin de calcular la anchura de la lámina de agua para el paso de las avenidas de distintos periodos de retorno se ha generado un modelo hidráulico del tramo objeto de estudio mediante el software HEC-RAS 4.0, desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU.

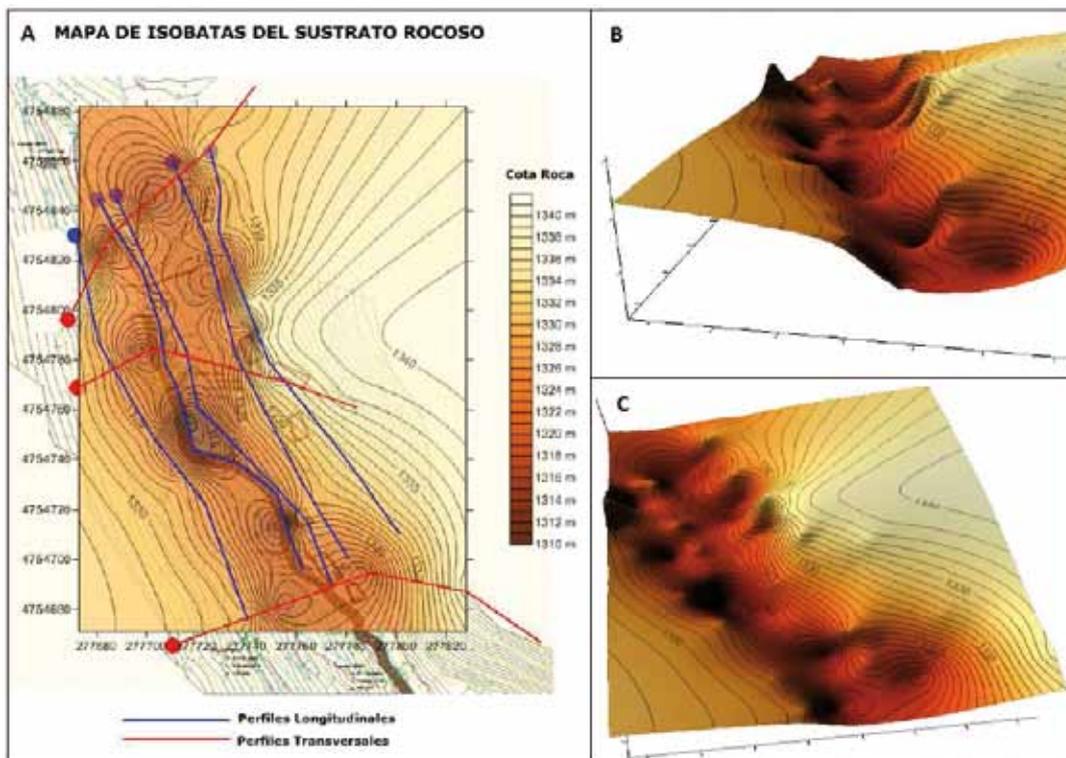


Fig. 2. A. Disposición de los perfiles realizados durante la campaña de prospección geofísica. B y C. Modelo 3D de la superficie del sustrato rocoso

## 2.2. Resultados

En los perfiles de tomografía eléctrica es posible identificar tres unidades diferentes. En la parte superior de los mismos se observa una unidad caracterizada por variaciones importantes de resistividad (200-5.000 ohm/m) y un espesor también variable, no apareciendo al sur de la zona de trabajo y alcanzando 10 m de potencia al norte de la misma. Esta unidad se ha interpretado como la formación superficial de origen aluvial y coluvial presente en el valle, afectada por procesos de lavado y presencia de cavidades no saturadas, lo que explicaría los elevados valores de resistividad en algunos puntos. Por debajo, se ha identificado una segunda unidad caracterizada por valores de baja resistividad (5-100 ohm/m), interpretada como un conjunto de materiales saturados en agua pertenecientes a la base de la formación superficial y al techo alterado del sustrato rocoso calcáreo. Por último, en la parte inferior de los perfiles se observa una unidad caracterizada por valores muy elevados de resistividad (300-40.000 ohm/m), que se interpreta como el sustrato rocoso formado por las calizas de la Fm. Láncara. Los sectores caracterizados por los valores más altos de resistividad se han interpretado como cavidades kársticas no saturadas. El techo del sustrato rocoso, representado en un mapa de isobatas (fig. 2), se encuentra a una profundidad que oscila entre los 2 y los 14 m y muestra una gran irregularidad, interpretada como expresión de las estructuras kársticas existentes en su superficie.

Los resultados obtenidos en los sondeos han confirmado la interpretación realizada a partir de los perfiles de tomografía eléctrica, mostrando indicios de la existencia de cavidades kársticas y espesores de materiales superficiales similares. En uno de los sondeos se observó un espesor de materiales no consolidados de 14 m sobre las calizas de la Fm. Láncara.

Los datos de aforo diferencial registrados al inicio del periodo de mediciones confirmaron una pérdida de caudal aproximada del 20 %, entre 4,11 y 6,86 l/s. Tanto los caudales medidos en los aforos como los caudales de avenida ordinarios y extraordinarios se utilizaron a la hora de dimensionar las medidas de solución adoptadas.

## 3. Diseño y ejecución de la solución proyectada

La solución adoptada consistió en la construcción de un canal de hormigón armado sobre la zona afectada por los procesos kársticos, con el fin de evitar la infiltración del flujo natural del arroyo de Alcedo hacia los túneles y restaurar su caudal ecológico. El proceso de ejecución de la obra constó de las siguientes fases:

### 3.1. Desvío del caudal del arroyo

Previamente al inicio de las obras, el caudal del arroyo de Alcedo fue desviado mediante una ataguía aguas arriba de la zona afectada por las dolinas de colapso y encauzado a través de una tubería de 200 m de longitud enterrada bajo el camino que discurre paralelo al arroyo. Dicha tubería conducía el caudal del arroyo aguas abajo de la zona afectada, justo antes de la estación de aforo, permitiendo el desarrollo de los trabajos.

### 3.2. Retirada de la cobertera superficial y excavación del canal

Una vez desbrozada la abundante vegetación existente en la zona de trabajo, se procedió a retirar y almacenar la cobertera arcillosa y húmica (los primeros 30 cm del suelo) de forma independiente al resto de materiales excavados con el fin de permitir su posterior reutilización. Para el acopio de dichos materiales se dispuso un área de 3.000 m<sup>2</sup> situada aguas abajo de la zona de actuación. Posteriormente, se procedió a la excavación del canal con una longitud de 220 m y una sección de 25 m<sup>2</sup>. Dicha sección es de tipo trapezoidal, estando diseñada de acuerdo a la avenida calculada para el periodo de retorno de 100 años, según criterio de la Confederación Hidrográfica del Duero. En el sector norte de la excavación, el gran espesor de materiales superficiales impidió alcanzar el sustrato rocoso, que sí fue alcanzado en el sector meridional. También se procedió a excavar las dolinas de colapso existentes a unos 5 m por encima del arroyo, en la ladera oeste del valle, confiriendo a los huecos una forma troncocónica invertida de unos 5 m de profundidad.

Las excavaciones y movimientos de tierra se llevaron a cabo utilizando medios convencionales: dos retroexcavadoras acompañadas de dos camiones de obra, que pudieron ser utilizados una vez acondicionado el camino de acceso que corre paralelo al arroyo de Alcedo en toda la zona de la actuación. Los 5.000 m<sup>3</sup> de escombros generados se componían de material arcilloso y arenoso con grandes bloques métricos, de litología heterogénea. Este material se almacenó provisionalmente en la zona de acopio citada anteriormente. Los grandes bloques fueron separados del conjunto para su utilización posterior. Así mismo, los restos del canal de hormigón armado provisional construido en 2008 fueron convertidos in situ en árido de tamaño grava gruesa, previa separación de los aceros del armado. Estas gravas sirvieron para mejorar el piso de los accesos principales de la obra.



**Fig. 3. Diversos aspectos de la obra. A. Relleno de los conductos kársticos; B. Excavación del canal y disposición del armado de la viga de fondo; C. Construcción de los diferentes paños de la canalización; D. Relleno del canal**

### 3.3. Sellado de los conductos kársticos

El sellado de los conductos kársticos, detectados tanto en la ladera oeste como en el fondo de la excavación, se logró mediante la ejecución de un relleno con hormigón ciclópeo, al que se incorporaron los bloques de tamaño medio (hasta 50 cm de diámetro) extraídos de la propia excavación (fig. 3A). Tras la ejecución de estos ‘tapones’ de hormigón, el resto de huecos excavados se rellenaron hasta la cota de la ladera o de la excavación del canal con escombros acopiados.

### 3.4. Estabilización de los materiales coluviales deslizados de la ladera derecha

Estudios previos habían constatado la existencia de procesos de inestabilidad de los materiales coluviales existentes en la ladera oeste del valle debido a la acción erosiva del arroyo de Alcedo sobre su base. Dichos procesos de inestabilidad se reactivaron e incrementaron durante la excavación de la caja del canal. Con el doble objetivo de proteger

al personal que intervenía en los trabajos de excavación, situados a unos 10 m bajo la cota topográfica, y estabilizar la ladera en un tramo de 60 m, se construyó un pedraplén de 8 m de altura sobre el que, posteriormente, se ejecutaría la aleta derecha del canal hormigonado. El pedraplén está constituido por bloques de piedra (de diámetro superior a 1,5 m) extraídos de la zona de acopio. En el fondo del zanjón de apoyo de este pedraplén se colocó una capa de hormigón en masa de 50 cm de espesor, con el objetivo de sujetar los bloques basales.

### 3.5. Construcción del canal

El canal de hormigón mantiene la misma sección trapezoidal de la excavación, salvo en su tramo inferior, donde su diseño tuvo que ser modificado debido a la existencia de elementos de valor arquitectónico y etnológico (ruinas de cabañas y molinos) en la margen izquierda del arroyo. Por esta razón, la aleta izquierda de la canalización se adaptó como un muro

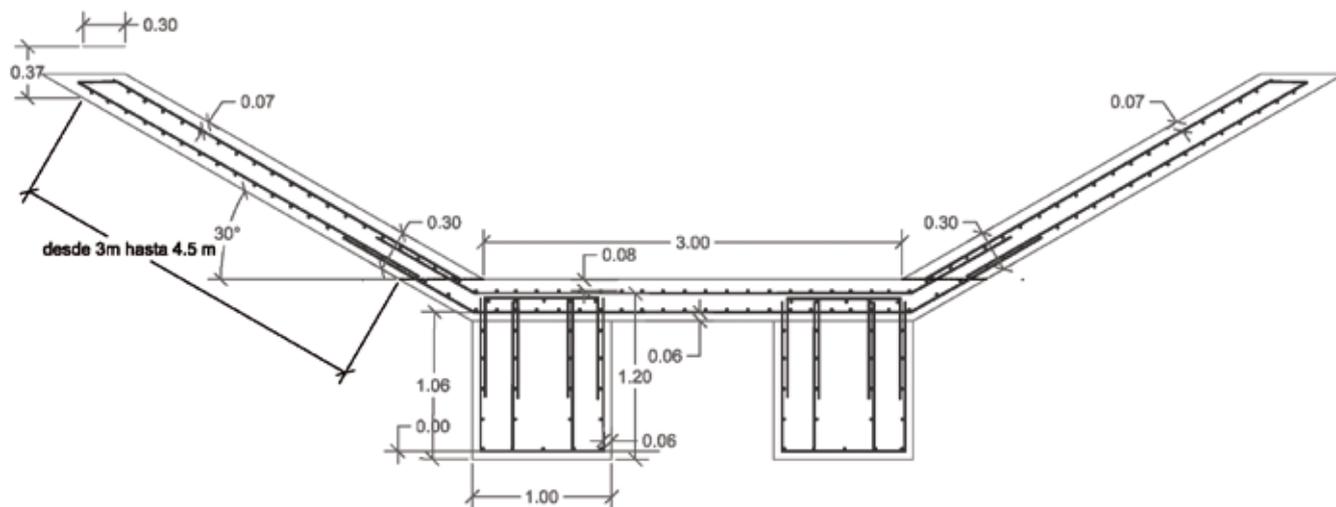


Fig. 4. Sección transversal tipo de la estructura del canal. Durante la fase de obra, las dos vigas de fondo proyectadas originalmente fueron sustituidas por una única viga de anchura equivalente

vertical a lo largo de un tramo de 60 m. Toda la estructura hormigonada se ejecutó sobre geomembranas colocadas en las paredes del terreno natural de la sección excavada.

El canal se ejecutó mediante la construcción de tramos de 7,5 m de longitud que fueron dispuestos sobre una viga de fondo de hormigón armado. Con una inclinación de 45°, dicha viga recorre longitudinalmente toda la estructura, y sus juntas de dilatación no coinciden con las del canal. Su función es el atado de todos los tramos que componen el canal y la creación de una amplia base que permita distribuir los esfuerzos ejercidos por la estructura sobre los materiales superficiales en todas aquellas zonas donde la excavación no alcanzó el substrato rocoso (figs. 3B, 3C y 4).

En cada tramo se hormigonaron sucesivamente la losa basal y las aletas de la sección. La losa de base, de 30 cm de espesor, se diseñó con un atado a la viga de fondo. A su vez, las aletas laterales del canal van atadas a la losa basal. El conjunto se convierte así en una única estructura, capaz de resistir procesos de socavación generados por la posible aparición de nuevas dolinas de colapso. En los encuentros entre tramos se colocaron juntas de plástico de tipo 'water stop', con el objeto de evitar la infiltración de agua a través de los mismos.

### 3.6. Enterramiento del canal

Una vez construido el canal se procedió a su revestimiento mediante geomembranas. Seguidamente, la estructura fue

enterrada, utilizando para ello los materiales aluviales extraídos, desprovisto de grandes bloques. El relleno alcanzó un espesor de 1 m en el fondo del canal y de 30 cm en la coronación de las aletas, de acuerdo con las prescripciones acordadas con los servicios de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León (figs. 3D y 5). En conjunto, la totalidad de material que recubre el canal de hormigón supone un volumen de 600 m<sup>3</sup>. Una vez ejecutado el enterramiento, se procedió a realizar un 'peinado' de las laderas para homogeneizar la superficie topográfica del conjunto, manteniendo el ángulo aproximado de 16° de la ladera natural anterior a la intervención. Por último, en la zona baja del canal se excavó un 'cauce de aguas bajas' de 1 m de ancho por unos 50 cm de profundidad (fig. 5).

### 3.7. Reconstrucción de las transiciones

Uno de los puntos más delicados de la obra fue el tratamiento de las transiciones entre el canal y el terreno natural, aguas arriba y aguas abajo de la zona sobre la que se realizó la actuación. Para la ejecución de las mismas, con el fin de evitar las filtraciones de agua en estos puntos hacia el macizo rocoso, se realizó una excavación de 2 m por debajo de la cota inferior del canal. En ella se procedió a la colocación de bloques calizos de tamaño métrico y morfología tabular, seleccionados entre el material inicialmente excavado y que fueron consolidados con hormigón en masa entre las juntas. Se realizaron tres niveles de estos materiales que garantizan una estanqueidad completa del fondo del





**Fig. 6.** Apariencia del área del arroyo de Alcedo antes y después de los trabajos ejecutados. **A.** Situación previa, con la presencia de dolinas de colapso (octubre 2013); **B.** Situación al finalizar los trabajos (octubre 2015); **C.** Apariencia actual, donde se aprecia el inicio del proceso de revegetación (abril 2016)

aguas bajas. Por último, a intervalos de 20 m dentro del cauce de aguas bajas se dispusieron piedras que permiten crear pequeñas cascadas, frenando la velocidad del agua y dando al conjunto el aspecto de un arroyo natural de montaña.

### 3.9. Recuperación ambiental y de las infraestructuras

La última fase de la ejecución del proyecto consistió en la recuperación de las infraestructuras afectadas durante el desarrollo de las obras, en concreto la pista de acceso al valle y un manantial situado aguas abajo de la zona afectada por los trabajos. Por último, se llevó a cabo una revegetación tanto en las márgenes del arroyo de Alcedo como en las zonas auxiliares de obra (zona de acopio y parque de maquinaria), con el fin de lograr la recuperación ambiental e integración paisajística de toda el área. Dicha revegetación ha consistido en la plantación de especies autóctonas arbustivas (*Salix sp.*, *Crataegus monogyna*, *Cytisus sp.*), de especies helófitas (*Scirpus sp.*, *Juncus sp.* y *Carex sp.*), así como siembra de pradera.

Una vez acabadas las obras de relleno y restauración, los materiales sobrantes se dispusieron en el hueco de una antigua cantera de calizas existente en la zona. Con esta actuación se restauró la superficie topográfica de dicha explotación minera, evitando además el traslado de material a un vertedero controlado situado a gran distancia de la zona de intervención.

### 4. Discusión y conclusiones

La ejecución de los trabajos concluyó en otoño de 2015, restaurándose el flujo del arroyo de Alcedo a través del canal a partir del mes octubre del mismo año. Los primeros aforos realizados tras la restauración del flujo registraron una pérdida de caudal del 10 %; dicha circunstancia se ha interpretado como resultado de la saturación de los 600 m<sup>3</sup> de materiales aluviales de relleno del nuevo canal de hormigón, que se comportan como un acuífero poroso artificial. Desde principios de noviembre de 2015 no se han registrado nuevas pérdidas de caudal. Por su parte, los aforos del cau-

dal total drenado por los túneles, realizados en el emboquille norte de los mismos, han registrado una disminución estable del mismo (350 l/s a 325 l/s) desde junio de 2014, fecha correspondiente al momento en el que el caudal del arroyo se desvía por la tubería del camino como paso previo a la ejecución de los trabajos.

Los resultados anteriormente citados permiten concluir que los trabajos de canalización y restauración ambiental llevados a cabo en el Valle de Alcedo han restablecido con éxito el flujo superficial del arroyo afectado, permitiendo de nuevo su conexión con el resto de la red hidrográfica, además de reducir significativamente el caudal infiltrado en los Túneles

de Pajares. Además, los trabajos de recuperación ambiental desarrollados han minimizado el impacto de las obras en un área de especial valor ecológico (fig. 6).

### Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a D. Antonio Gutiérrez Blanco (director general de ADIF entre 2013 y 2014), quien autorizó la utilización académica de los datos obtenidos en la obra de impermeabilización descrita. Así mismo, expresan su agradecimiento a D. José María Jiménez, director de las obras de la Variante de Pajares (ADIF) y a las empresas Acciona Infraestructuras, Tragsa y Tragsatec. **ROP**

### Referencias

- Alonso, J.L., Rubio, A., 2009. La estructura geológica de la sección del Túnel de Pajares. En: Pando, L., López Fernández, C., De la Rubia Mir, L. (Eds.), Jornadas técnicas de la Variante de Pajares. Comunicaciones presentadas. Universidad de Oviedo, Oviedo, 29-39.
- Álvarez Díez, J., Vinding Fallesen, J., Garrido Ruiz, M.S., Lombardero Barceló, M., Marcos Bermejo, F., Monge Cristóbal, J.C., Serrano Martín, L., 2009. Hidrogeología de los Túneles de Pajares. En: Míguez Bailo, R. (Ed.), Túneles de Pajares. ADIF, 167-208.
- Chiocchini, U., Castaldi, F., 2011. *The impact of groundwater on the excavation of tunnels in two different hydrogeological settings in central Italy*. Hydrogeology Journal, 19, 651-669.
- De Bruyn, I.A., Bell, F.G., 2001. *The occurrence of sinkholes and subsidence depressions in the Far West Rand and Gauteng Province, South Africa and their engineering implications*. Environmental and Engineering Geoscience, VII (3), 281-295.
- Garrido Ruiz, M.S., Serrano Martín, L., Míguez Bailo, R., Lombardero Barceló, M., Fernández-Serrano Sánchez, M., Álvarez Díez, J., 2009. El Estudio Hidrogeológico de los Túneles de Pajares. In: Pando, L., López Fernández, C., De la Rubia Mir, L. (Eds.), Jornadas técnicas de la Variante de Pajares. Comunicaciones presentadas. Universidad de Oviedo, Oviedo, 77-86.
- Guerrero, J., Gutiérrez, F., Bonachea, J., Lucha, P., 2008. *A sinkhole susceptibility zonation based on paleokarst analysis along a stretch of the Madrid-Barcelona high-speed railway built over gypsum- and salt-bearing evaporites (NE Spain)*. Engineering Geology, 102 (1-2), 62-73.
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., Jourde, H., 2014. *A review on natural and human induced geohazards and impacts in karst*. Earth-Science Reviews, 138, 61-88.
- Gutiérrez-Santolalla, F., Gutiérrez-Elorza, M., Marín, C., Desir, G., Maldonado, C., 2005. *Spatial distribution, morphometry and activity of La Puebla de Alfindén sinkhole field in the Ebro River valley (NE Spain), applied aspects for hazard zonation*. Environmental Geology, 48, 360-369.
- Hunt, B.B., Smith, B.A., Adams, M.T., Hiers, S.E., Brown, N., 2013. *Cover-collapse sinkhole development in the cretaceous Edwards limestone, central Texas*. En: Land, L., Doctor, D.H., y Stephenson, J.B. (Eds.), National Cave and Karst Research Institute [NCKRI] Symposium. *Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst; proceedings of the Thirteenth multidisciplinary conference*, 2, 89-102.
- Kleinhans, I., Van Rooy, J.L., 2016. *Guidelines for sinkhole and subsidence rehabilitation based on generic geological models of a dolomite environment on the East Rand, South Africa*. Journal of African Earth Sciences, 117, 86-101.
- Lolcama, J.L., Cohen, H.A., Tonkin, M.J., 2002. *Deep karst conduits, flooding and sinkholes: lessons for the aggregate industry*. Engineering Geology, 65, 151-157.
- Míguez Bailo, R., 2005. *The Pajares Tunnels*. Revista de Obras Públicas, 3460, 7-32.
- Song, K.I., Cho, G.C., Chang, S.B., 2012. *Identification, remediation and analysis of karst sinkholes in the longest railroad tunnel in South Korea*. Engineering Geology, 135-136, 92-105.
- Valenzuela, P., Domínguez-Cuesta, M.J., Meléndez-Asensio, M., Jiménez-Sánchez, M., Saenz de Santa María, J.A., 2015. *Active sinkholes: A geomorphological impact of the Pajares Tunnels (Cantabrian Range, NW Spain)*. Engineering Geology, 196, 158-170.
- Vincenzi, V., Gargini, A., Goldscheider, N., Piccinini, L., 2014. *Differential hydrogeological effects of draining tunnels through the Northern Apennines, Italy*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47 (3), 947-965.
- Waltham, T., 2008. *Sinkhole hazard case histories in karst terrains*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 41, 291-300.



La revista de los  
Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos

3579 SEPTIEMBRE 2016

REVISTA DE  
OBRAS PÚBLICAS

# R O P



Número  
monográfico  
en colaboración  
con AETOS

## MONOGRÁFICO TÚNELES

El agua y los túneles  
por **Carlos Oteo Mazo**

Condicionantes y singularidades en el diseño  
de la línea 5 del metro de Riad  
por **Pedro Ramírez Rodríguez, Alberto Gómez-Elvira López**  
y **Xavier Torelló Ciriano**

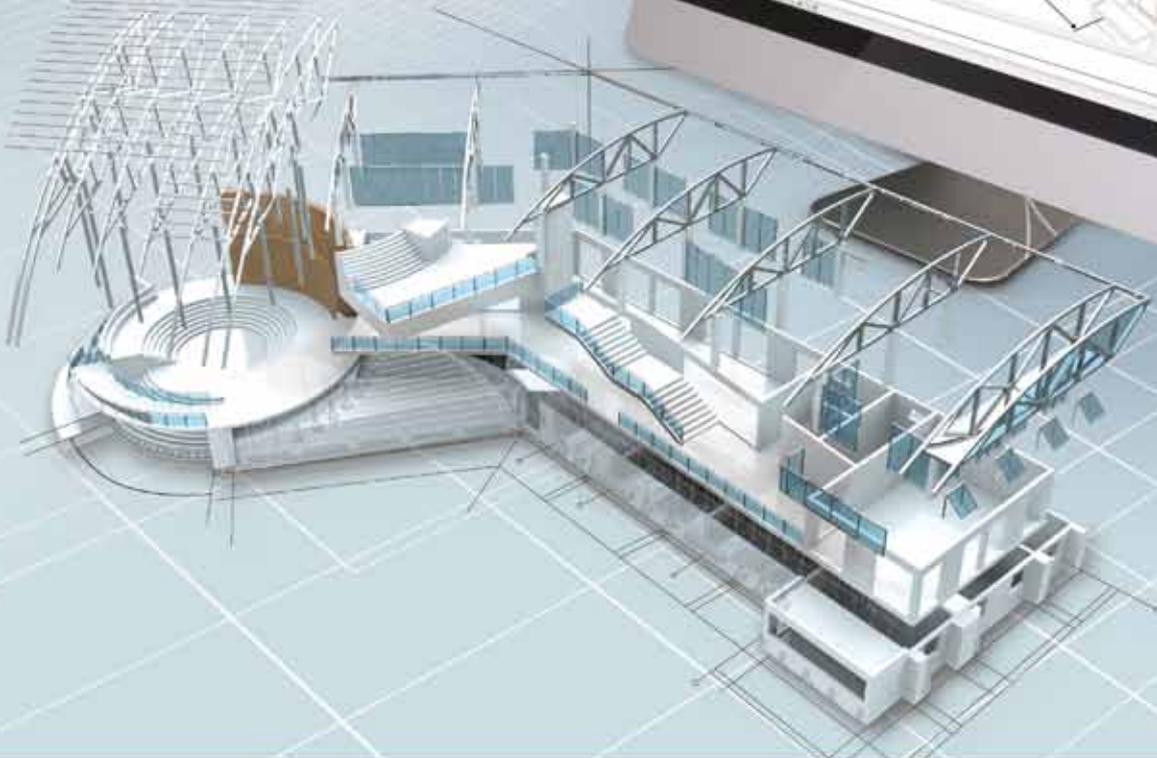
Crossrail C305: el reto de construir  
24 km de túnel en el centro de Londres  
con 4 tuneladoras

por **Alejandro Sanz Garrote, Francisco González,**  
**Juan Ares Santos, Roger Escoda Estelrich** y  
**Enrique Fernández González**



## CAD Rentable para Los Diseñadores de Arquitectura

- | Licencia perpetua de precio razonable
- | Totalmente compatible con DWG
- | APIs compatibles, fácil de migrar
- | Características fáciles de usar
- | 550,000 usuarios mundiales





Es un hecho que la profunda crisis económica de los pasados años viene suponiendo en España una fuerte caída de la actividad para nueva construcción de infraestructuras civiles, que ha incentivado, si no obligado, un aumento extraordinario de la presencia en el mercado exterior de las empresas españolas del sector. Así mismo, es una realidad reconfortante a día de hoy, y esperanzadora para el futuro, que la preparación y experiencia acreditadas por la ingeniería civil española, forjadas brillantemente con sus actuaciones en la etapa anterior a la crisis con una cuota muy relevante de túneles y obras subterráneas, vienen siendo la palanca motriz de su proyección y protagonismo, sin duda muy destacados, en los proyectos internacionales de obra civil más singulares y con mayor inversión, en los que la tecnología disponible en túneles y obras subterráneas tienen, cada vez más, un papel sobresaliente y decisivo.

En este contexto geográfico globalizado para la ingeniería civil española, AETOS (Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas) continúa considerando, como objetivos prioritarios, desarrollar en colaboración con otras entidades nacionales y extranjeras, canales y eventos para formación especializada, difusión del conocimiento y puesta al día e investigación, que además, supongan oportunidades de relación y contraste con otras ingenierías internacionales, especialmente de los países latinoamericanos. De este modo, AETOS espera proporcionar un impulso significativo para mantener en el futuro, y en todo el mundo, la actual posición de privilegio de la técnica española dentro de este campo de actividad.

Este nuevo número monográfico de la Revista de Obras Públicas, ya el octavo, constituye una clara muestra de todo lo anterior, tanto por la altura e innovaciones técnicas en el contenido de sus artículos, como por el ámbito geográfico internacional de los proyectos tratados y de sus autores participantes. Valga como anticipo el siguiente breve resumen de su contenido.

La aportación de C. Oteo expone la interacción del túnel con su acuífero envolvente durante la construcción y explotación, identificando la problemática general que puede darse, e ilustrándola con soluciones a casos reales, incluyendo diversos sistemas constructivos para el túnel y diferentes técnicas para las intervenciones necesarias. P. Ramírez et al, dentro del diseño de los 13 km de túnel y estaciones de la Línea 5 del Metro de Riad, describen los problemas más relevantes de las obras subterráneas, en un macizo calcáreo karstificado, con acuífero superficial muy complejo y ambiente agresivo para el hormigón, llegando a soluciones singulares que compatibilizan los riesgos de las excavaciones y de afección al entorno urbano, con los estrictos condicionantes de plazo. A. Sanz et al. narran el reto de construir 24 km de túnel, en el centro de Londres y tan solo en cuatro años, con cuatro tuneladoras pasando por cavernas, y detallan las innovaciones técnicas y logísticas en los frentes de ataque, diseño y empleo de las EPB, extracción de detritus, suministro de materiales y fabricación de dovelas, que han permitido una optimización del plazo y costes iniciales, logrando un impacto mínimo en el entorno urbano.

C. Herranz et al, muestran lo más relevante del diseño de una caverna en el centro de Los Ángeles para cruce ferroviario; además de un proceso constructivo complejo comprobado con análisis numérico, como aspectos singulares se han desarrollado soluciones para impermeabilizar la estructura frente a gas metano y sulfuro de hidrógeno, así como para resistir la elevada sismicidad de la zona.

R. Justa y M. Canals, explican la excavación del túnel bitubo de Olesa, con 185 m<sup>2</sup> de sección y atravesando suelos terciarios cementados; la información geotécnica adicional, con mejor evaluación de las propiedades del terreno y de la importancia del agua freática llevadas al modelo numérico, ha permitido pasar del método “alemán” al convencional “de avance y destroza”, excavando con medios mecánicos potentes. J. A. Sáenz de Santa María et al, detallan la restauración del impacto hidrogeológico superficial, generado por el túnel bitubo de Pajares para el AVE, que ha comprendido actuaciones de sellado de dolinas, encauzamiento con canal y restauración ambiental, reduciendo las infiltraciones en el túnel. F. Sánchez trata el colapso, afectando a la ladera cercana, del túnel carretero de Xicotepec, en la costa de Veracruz, al atravesar arcillas blandas en el contacto de basaltos sobre el basamento calcáreo, y después de lluvias intensas; la solución se comprobó con análisis numérico, y consistió en inyecciones en el tubo colapsado, con refuerzo de la sección incluyendo contrabóveda.

**Pedro R. Sola Casado.**  
**Secretario general de AETOS**

# SUMARIO

La revista decana de la  
prensa española no diaria

**Director**

Antonio Papell

**Redactoras Jefe**

Paula Muñoz  
Diana Prieto

**Fotografía**

Juan Carlos Gárgoles

**Publicidad**

MM Mass Media  
Hermosilla 64 6ºB  
T. 91 431 08 39

**Imprime**

Gráficas 82

**Depósito legal**

M-156-1958

**ISSN**

0034-8619

**ISSN electrónico**

1695-4408

**ROP en internet**

<http://ropdigital.ciccp.es>

**Suscripciones**

[http://ropdigital.ciccp.es/  
suscripcion.php](http://ropdigital.ciccp.es/suscripcion.php)  
[suscripcionesrop@ciccp.es](mailto:suscripcionesrop@ciccp.es)  
T. 91 308 19 88

**Edita**

Colegio de Ingenieros de  
Caminos, Canales y Puertos  
Calle Almagro 42  
28010 - Madrid

## PRESENTACIÓN

---

## TÚNELES

---

- 6 El agua y los túneles**  
Carlos Oteo Mazo
- 
- 18 Condicionantes y singularidades en el diseño de la línea 5 del metro de Riad**  
Pedro Ramírez Rodríguez, Alberto Gómez-Elvira López y Xavier Torelló Ciriano
- 
- 36 Crossrail 305: el reto de construir 24 km de túnel en el centro de Londres con 4 tuneladoras**  
Alejandro Sanz Garrote, Francisco González, Juan Ares Santos, Roger Escoda Estelrich y Enrique Fernández González
- 
- 54 Diseño de caverna en el centro de Los Ángeles**  
Carlos Herranz, Zsolt Horvath, Justin Lianides y Derek Penrice



---

**68** **Los suelos cementados y su comportamiento en el túnel de Olesa de Montserrat (Barcelona)**  
Rolando Justa Cámara y Marc Canals i Borràs

---

**82** **Restauración del impacto hidrogeológico superficial generado por los túneles de Pajares en el arroyo de Alcedo (León, noroeste de España)**  
José A. Sáenz de Santa María Benedet, Pablo Valenzuela Mendizábal, María José Domínguez-Cuesta, Carlos López Fernández y Mónica Meléndez-Asensio

---

**92** **El colapso del túnel Xicotepéc I**  
Fermín Sánchez Reyes

**Consejo de Administración**

**Presidente**

Miguel Aguiló Alonso

**Vocales**

Juan A. Santamera Sánchez  
José Polimón López  
José Javier Díez Roncero  
Juan Guillamón Álvarez  
Luis Berga Casafont  
Roque Gistau Gistau  
Benjamín Suárez Arroyo  
José Antonio Revilla Cortezón  
Francisco Martín Carrasco  
Ramiro Aurín Lopera

**Comité Editorial**

Pepa Cassinello Plaza  
Vicente Esteban Chapapriá  
Jesús Gómez Hermoso  
Conchita Lucas Serrano  
Antonio Serrano Rodríguez

**Foto de portada**

Montaje de tuneladoras.  
Crossrail C305 - Tramo Y



## El agua y los túneles



### Carlos Oteo Mazo

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Catedrático de Ingeniería del Terreno

#### Resumen

Se presentan, de forma abreviada, los problemas de interacción del agua y los túneles, tanto durante su excavación como durante su explotación, pasando revista a los problemas generales que pueden existir, principalmente, durante la construcción.

Se presentan varios ejemplos en ese sentido. Pero también se abordan los casos de afección, a medio y largo plazo, al medio ambiente y viceversa.

#### Palabras clave

Túneles, agua, interacción agua-excavaciones, afección medio ambiente

#### Abstract

*The article outlines the problems of water interaction and tunnels, both during excavation and operation and considers the general problems that may arise, particularly during construction.*

*A series of examples are provided and consideration is given to those cases with medium and long term effects on the environment and the reciprocal effects of the same.*

#### Keywords

*Tunnels, Water, water-excavation interaction, environmental effects*

### 1. Introducción

El tema del agua y los túneles (o de los túneles con el agua) es de los más antiguos que el ‘tunelero’ se ha encontrado, tanto al atravesar montañas (con cargas hidráulicas supuestamente elevadas) como al realizar el paso de ríos en ámbito urbanos, pasando por el eterno sueño de unir continentes o continentes e islas bajo el mar.

El agua presiona y arrastra el terreno, al producirse una excavación próxima, ya que se induce un gradiente favorable a la salida del agua. Con ello puede producirse el problema doble de que el agua acude y puede anegar al excavación y, además, arrastra terreno de poca cohesión, haciendo inestable la excavación y, en el peor de los casos, llenando la zona excavada. Así ocurrió en el túnel de Talave, al llegar la TBM a una zona de areniscas del Albense, saturadas (y con carga hidráulica elevada), terreno permeable y poco cementado, con lo que una importante longitud del túnel realizado quedó lleno de agua y terreno, con el consecuente “hueco” por delante de la excavación.

Por su importancia, este tema ha sido seleccionado por el Comité Técnico de Aetos (recientemente constituido) como el prioritario para la nueva etapa a desarrollar por los Grupos de Trabajo de dicha Asociación, a fin de constituir una Guía de Aetos respecto al problema en cuestión, para ‘guiar’ a tuneleros de poca experiencia y mostrar los sistemas de estudios, posibilidades técnicas, procedimientos de mejora del terreno disponibles en la actualidad, etc.

Debido a ello, el autor de estas líneas se ha atrevido a redactar estas páginas, a modo de introducción para ese Grupo de Trabajo, sin que el contenido de este trabajo pueda considerarse más que un prólogo amplio al cometido que ha de desarrollar dicho Grupo de Trabajo.

### 2. La situación en el perfil geológico

Una manera simple (y a veces equívoca) es situar el ‘nivel freático’ en los cortes geológicos longitudinales del terreno en el que se va a diseñar y construir el túnel. Aparece así una línea (generalmente, dibujada en azul), muchas veces continua y que se sitúa próxima a la superficie del terreno.

## Restauración del impacto hidrogeológico superficial generado por los túneles de Pajares en el arroyo de Alcedo (León, noroeste de España)



**José Antonio Sáenz de Santa María Benedet**

Licenciado en Ciencias Geológicas.  
Propietario de Gehma Geología y Geotecnia



**Pablo Valenzuela Mendizábal**

Licenciado en Geología.  
Investigador, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo



**María José Domínguez-Cuesta**

Doctora en Geología.  
Profesora Titular, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo



**Carlos López Fernández**

Doctor en Geología.  
Profesor Titular, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo



**Mónica Meléndez-Asensio**

Licenciada en Geología.  
Instituto Geológico y Minero de España

### Resumen

La perforación de los Túneles de Pajares, con 24,6 km de longitud y 700 m de profundidad media, a través de la Cordillera Cantábrica (NO España) ha causado un importante impacto hidrogeológico superficial en el Valle de Alcedo consistente en: (i) el desarrollo de 25 dolinas de colapso entre 2007 y 2014 en materiales aluviales cuaternarios depositados sobre unas calizas y (ii) la total infiltración del caudal superficial del arroyo de Alcedo a través de 7 sumideros. Estudios previos identificaron el origen kárstico del problema y estimaron el volumen medio de infiltración en unos 0,4 hm<sup>3</sup>/año (10 l/s aprox.). Con posterioridad, se han realizado nuevas investigaciones geotécnicas e hidrogeológicas para caracterizar en detalle la zona de estudio: (i) levantamiento topográfico, (ii) perforación de sondeos y zanjeo, (iii) prospección geofísica, (iv) aforos regulares del caudal superficial y (v) análisis del periodo de retorno del arroyo. La solución adoptada para atajar la infiltración superficial ha sido el sellado de las dolinas de colapso, la construcción de un canal de hormigón sobre el área afectada por procesos kársticos y su restauración ambiental. La ejecución de estos trabajos ha implicado la reducción en un 7,2 % del volumen total drenado por los Túneles de Pajares, desde 350 l/s hasta 325 l/s.

### Palabras clave

Túneles de Pajares, dolinas de colapso, infiltración, canal, restauración ambiental

### Abstract

*The perforation of the Pajares Tunnels, with 24.6 km long and 700 m average depth, through the Cantabrian Range (NW Spain) caused a very important surficial hydrogeological impact on the Alcedo Valley consisting on: (i) the development of 25 sinkholes from 2007 to 2014 in Quaternary alluvial materials covering calcareous rocks, and (ii) the whole infiltration of the surficial flow of the Alcedo stream trough 7 active ponors. Previous studies identified the karstic origin of the problem and estimated the mean water volume of infiltration in 0.4 hm<sup>3</sup>/year (approx. 10 l s<sup>-1</sup>). New geotechnical and hydrogeological studies were planned to characterize in depth the study area: (i) topographic survey, (ii) borehole drilling and trench digging, (iii) geophysical prospecting, (iv) regular gauging of the surficial flow, and (v) analysis of the water flow return period. The chosen solution for stopping surficial infiltration was the sealing of the sinkholes and ponors, the construction of a concrete channel over the area affected by karst processes and its environmental restoration. After the completion of these actions, the infiltration from the Alcedo Stream to the tunnels was eliminated. The completion of these works involved a 7.2% reduction of total water volume drained by the Pajares Tunnels, from average 350 l s<sup>-1</sup> to 325 l s<sup>-1</sup>.*

### Keywords

*Pajares Tunnels, sinkholes, infiltration, channel, environmental restoration*

## 1. Introducción

La ejecución de proyectos de obra subterránea en áreas kársticas conlleva generalmente una extensa y variada problemática. La alteración del régimen hidrogeológico natural constituye uno de los impactos más frecuentes, dando lugar a variaciones del nivel piezométrico, secado de manantiales y arroyos, inundaciones o desarrollo de procesos de subsidencia y colapso (dolinas de colapso o *sinkholes*) en las formaciones superficiales que recubren el substrato karstificado (Gutiérrez et al., 2014). Todo ello causa daños medioambientales severos y frecuentes conflictos con la población local (Chiocchini y Castaldi, 2011).

Varios autores han analizado el origen y evolución de este tipo de impactos superficiales, en su mayoría relacionados con la perforación de túneles (Guerrero et al., 2008; Song et al., 2012; Vincenzi et al., 2014), aunque también se han documentado casos debidos a actividades mineras (De Bruyn and Bell, 2001; Lolcama et al., 2002) e industriales (Gutiérrez-Santoalla et al., 2005). Son menos frecuentes los trabajos que describen las medidas de mitigación tomadas ante este tipo de fenómenos (Walthman, 2008, Song et al., 2012; Brian et al., 2013), cuya ejecución suele estar condicionada por la disponibilidad presupuestaria, el impacto social y ambiental, así como la afección a poblaciones, infraestructuras u otros intereses económicos.

Las particulares características de cada caso hacen que la investigación previa sea de vital importancia a la hora de determinar las acciones de rehabilitación pertinentes. La realización de aforos, piezometrías, cartografías geológica y geomorfológica, sondeos y la aplicación de métodos geofísicos (Gutiérrez et al., 2014) se utilizan habitualmente para el desarrollo de modelos tridimensionales de las condiciones subterráneas sobre las que se debe actuar. Entre los métodos de rehabilitación más frecuentes destacan la canalización o impermeabilización de arroyos superficiales (Walthman, 2008) y el tratamiento de dolinas de colapso mediante inyecciones de lechada de cemento, relleno con hormigón ciclópeo, métodos de compactación del terreno e impermeabilización mediante arcillas y geosintéticos (Klein-hans y Van Rooy, 2016).

### *Los Túneles de Pajares*

Los denominados Túneles de base de Pajares constituyen la principal infraestructura de la nueva Línea ferroviaria de Alta Velocidad León-Asturias. Perforados entre 2005 y 2009, sus dos tubos paralelos de 24,6 km de longitud, conectados

entre sí y con el exterior por un sistema de galerías auxiliares, atraviesan la Cordillera Cantábrica a una profundidad media de 700 m (Míguez Bailo, 2005). La perforación a través de una zona estructural y litológicamente compleja (Alonso y Rubio, 2009), en la que se han identificado 20 sistemas acuíferos (Garrido Ruiz et al., 2009), ha dado lugar a una amplia problemática hidrogeológica con implicaciones medioambientales y sociales. Entre las afecciones generadas destacan: (i) los problemas de abastecimiento de agua en varias poblaciones debido al secado de manantiales, (ii) la pérdida de caudal en varios arroyos, y (iii) el efecto drenante de los túneles sobre los acuíferos perforados, dando lugar a un trasvase entre ambas vertientes de la Cordillera Cantábrica (Álvarez Díez et al., 2009). Además, la infiltración de agua en los túneles podría suponer un problema para las condiciones de seguridad requeridas en una línea ferroviaria de alta velocidad.

Una de las zonas más visiblemente afectadas ha sido el Valle de Alcedo, una pequeña cuenca fluvial de alto valor natural situada dentro de la Reserva de la Biosfera “Alto Bernesga”, en el norte de la provincia de León. La perforación de los túneles a 450 m de profundidad bajo esta zona en marzo de 2007 fue el detonante de una importante alteración del régimen hidrogeológico. Entre 2007 y 2014 se documentó en superficie la aparición y evolución de 25 dolinas de colapso, así como la infiltración de la totalidad del flujo superficial de la cuenca alta del arroyo de Alcedo a través de 7 sumideros aparecidos en su cauce (Valenzuela et al., 2015) (Fig. 1). En 2008 se ejecutó un proyecto de sellado de las dolinas de colapso existentes en ese momento, así como una canalización provisional del arroyo mediante una losa de hormigón con el fin de reducir la entrada de caudal a las obras del túnel y mitigar el necesario bombeo. Acabada la excavación, en octubre de 2010, se produjo una avenida que dio lugar a la aparición de nuevas dolinas de colapso y a la socavación y fractura de la canalización en diversos puntos, con el consecuente agravamiento del problema.

Todas las dolinas de colapso se desarrollaron en materiales cuaternarios no consolidados de origen aluvial y coluvial depositados sobre un sustrato karstificado formado por calizas de la Fm. Láncara (Cámbrico Inferior-Medio). El abatimiento del nivel piezométrico generado por la perforación de los túneles afectó tanto al acuífero kárstico como a los materiales superficiales, dando lugar a la actuación de procesos de subfusión que desencadenaron los fenómenos de colapso en los depósitos cuaternarios. La continua infiltración de la totalidad del caudal superficial, estimado

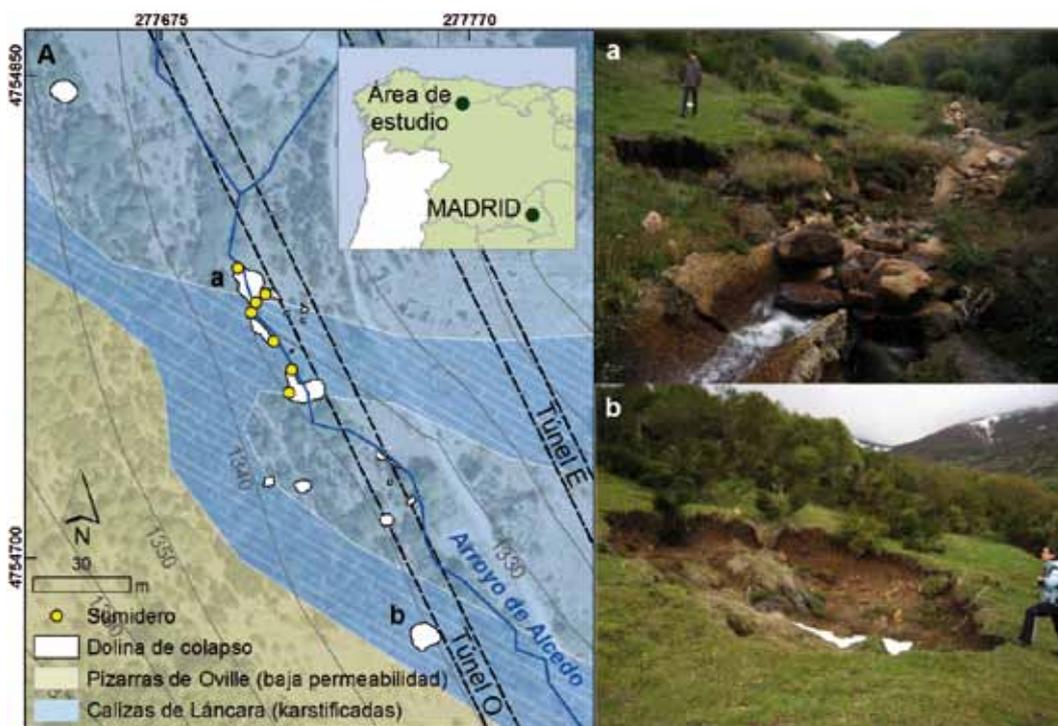


Fig. 1. Situación del valle de Alcedo. A. Localización de las dolinas de colapso y sumideros aparecidos en el valle de Alcedo; a y b. Detalles de las dolinas de colapso representadas en el mapa geológico sobre la proyección del tubo oeste de los túneles

en 0,4 hm<sup>3</sup>/año (10 l/s aprox.), hacia los túneles no solo potenció los procesos de colapso, sino que supuso el aislamiento del curso alto del arroyo con respecto al resto de la red hidrográfica, con el consecuente impacto ecológico (Valenzuela et al., 2015).

A pesar de no tratarse del único caso de este tipo documentado en el área de influencia de los Túneles de Pajares, el elevado impacto geotécnico, hidrogeológico, ecológico y visual de las afecciones generadas en el Valle de Alcedo impulsó al Ministerio de Fomento del Gobierno de España y al ADIF (Administrador de Infraestructura Ferroviaria) a elegir el área descrita para llevar a cabo la primera actuación dirigida a reducir la infiltración de caudal y realizar una restauración ambiental de la zona afectada por las dolinas de colapso y del flujo superficial.

## 2. Caracterización del problema

### 2.1. Metodología

Las campañas de estudios geológicos e hidrogeológicos realizados durante la fase de proyecto y ejecución de los túneles, así como el estudio de Valenzuela et al. (2015), han identificado el origen kárstico de los procesos de colapso e

infiltración descritos anteriormente. Con el objetivo de conocer en detalle las condiciones del área de actuación, se planificó una nueva campaña de prospección con especial énfasis en la determinación del espesor del recubrimiento superficial y la presencia y distribución de cavidades y conductos kársticos en el mismo. Así, se llevó a cabo un levantamiento topográfico de detalle, se perforaron sondeos y se ejecutaron perfiles de tomografía eléctrica. Por otra parte, para medir con exactitud la pérdida de caudal se llevó a cabo una campaña de aforos diferenciales y un estudio hidrológico e hidráulico que ha permitido realizar una predicción del comportamiento del arroyo de Alcedo para varios periodos de retorno.

### Levantamiento topográfico

La utilización de una estación topográfica robotizada Leica TCRA 1203 R 100 con prisma de 360° circular y de un GPS Leica RX 1200 de doble frecuencia con corrección diferencial permitió realizar un levantamiento topográfico de detalle, con curvas de nivel equidistantes 1 m y puntos topográficos que definen los rasgos del terreno de menor escala, como las dolinas de colapso. Dichos trabajos se realizaron sobre un área de 6,5 ha, a lo largo de 500 m del cauce del arroyo de Alcedo.

### Perforación de sondeos

Se perforaron dos sondeos con recuperación de testigo en dos puntos situados a lo largo del cauce del arroyo de Alcedo con un doble objetivo: (i) la caracterización del substrato calcáreo afectado por procesos kársticos y (ii) la determinación del espesor y características de los materiales cuaternarios de origen mixto que recubren el macizo rocoso.

### Perfiles de tomografía eléctrica

La utilización de un equipo Syscal Switch Pro 72 permitió la realización de 8 perfiles de tomografía eléctrica en el área de estudio: 5 de ellos paralelos al cauce del arroyo de Alcedo y otros 3 perpendiculares al mismo. Los perfiles se diseñaron con una longitud de entre 132,5 y 177,5 m y una separación entre electrodos de 2,5 m, alcanzando profundidades de medida variables entre 26 m y 35 m. En todos los casos se emplearon configuraciones de medida dipolo-dipolo y Schlumberger-Wenner. El procesado de los datos se llevó a cabo con el software Electre Pro.

### Campaña de aforos diferenciales

Desde octubre de 2014 hasta diciembre de 2015 se llevó a

cabo un control del caudal del arroyo en 3 estaciones de aforo: dos situadas aguas arriba, localizadas en los dos arroyos que convergen en la zona afectada por las dolinas de colapso y los sumideros, y otra, aguas abajo de dicha zona. En los puntos de medida se instalaron módulos de acequia prefabricada de hormigón de 5 m de largo y con una sección uniforme que permite el paso de un caudal máximo de 100 l/s. Dichas acequias fueron instaladas con una pendiente estable del 2 ‰, con el fin de generar un flujo de tipo laminar.

### Estudio hidrológico e hidráulico

Los caudales de avenida del arroyo de Alcedo para unos periodos de retorno de 2, 2.5, 5, 50, 100 y 500 años se han calculado mediante la aplicación Caumax, desarrollado por el Cedex para la Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Además, con el fin de calcular la anchura de la lámina de agua para el paso de las avenidas de distintos periodos de retorno se ha generado un modelo hidráulico del tramo objeto de estudio mediante el software HEC-RAS 4.0, desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU.

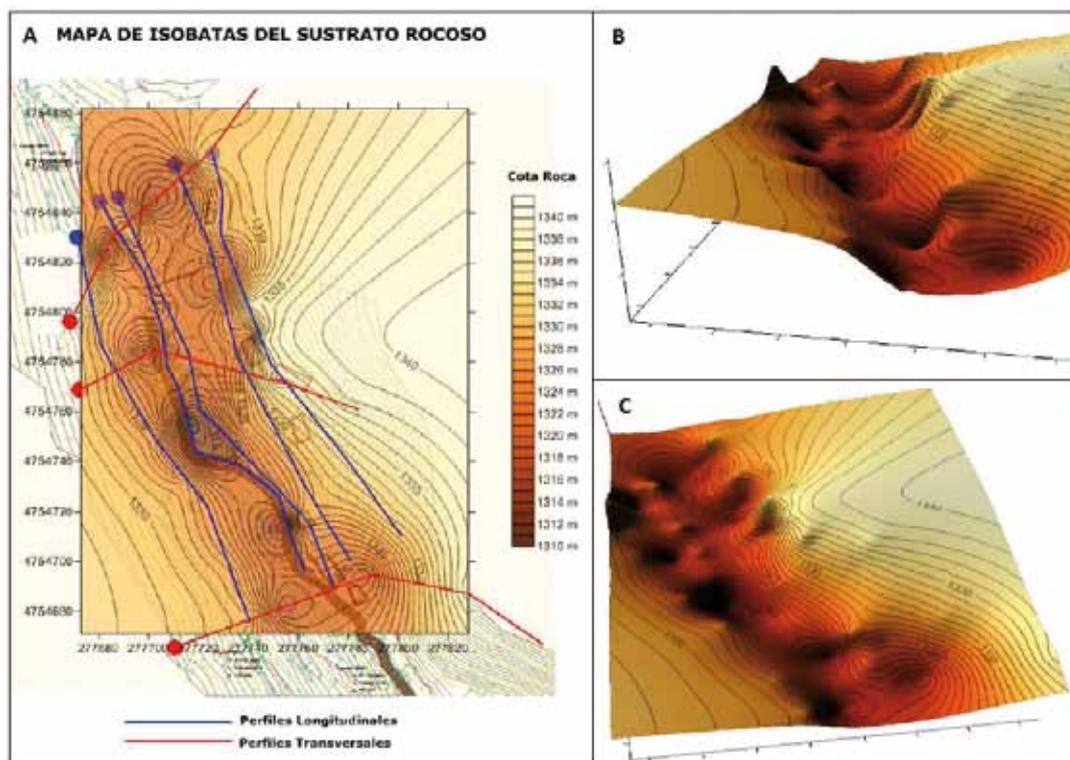


Fig. 2. A. Disposición de los perfiles realizados durante la campaña de prospección geofísica. B y C. Modelo 3D de la superficie del sustrato rocoso

## 2.2. Resultados

En los perfiles de tomografía eléctrica es posible identificar tres unidades diferentes. En la parte superior de los mismos se observa una unidad caracterizada por variaciones importantes de resistividad (200-5.000 ohm/m) y un espesor también variable, no apareciendo al sur de la zona de trabajo y alcanzando 10 m de potencia al norte de la misma. Esta unidad se ha interpretado como la formación superficial de origen aluvial y coluvial presente en el valle, afectada por procesos de lavado y presencia de cavidades no saturadas, lo que explicaría los elevados valores de resistividad en algunos puntos. Por debajo, se ha identificado una segunda unidad caracterizada por valores de baja resistividad (5-100 ohm/m), interpretada como un conjunto de materiales saturados en agua pertenecientes a la base de la formación superficial y al techo alterado del sustrato rocoso calcáreo. Por último, en la parte inferior de los perfiles se observa una unidad caracterizada por valores muy elevados de resistividad (300-40.000 ohm/m), que se interpreta como el sustrato rocoso formado por las calizas de la Fm. Láncara. Los sectores caracterizados por los valores más altos de resistividad se han interpretado como cavidades kársticas no saturadas. El techo del sustrato rocoso, representado en un mapa de isobatas (fig. 2), se encuentra a una profundidad que oscila entre los 2 y los 14 m y muestra una gran irregularidad, interpretada como expresión de las estructuras kársticas existentes en su superficie.

Los resultados obtenidos en los sondeos han confirmado la interpretación realizada a partir de los perfiles de tomografía eléctrica, mostrando indicios de la existencia de cavidades kársticas y espesores de materiales superficiales similares. En uno de los sondeos se observó un espesor de materiales no consolidados de 14 m sobre las calizas de la Fm. Láncara.

Los datos de aforo diferencial registrados al inicio del periodo de mediciones confirmaron una pérdida de caudal aproximada del 20 %, entre 4,11 y 6,86 l/s. Tanto los caudales medidos en los aforos como los caudales de avenida ordinarios y extraordinarios se utilizaron a la hora de dimensionar las medidas de solución adoptadas.

## 3. Diseño y ejecución de la solución proyectada

La solución adoptada consistió en la construcción de un canal de hormigón armado sobre la zona afectada por los procesos kársticos, con el fin de evitar la infiltración del flujo natural del arroyo de Alcedo hacia los túneles y restaurar su caudal ecológico. El proceso de ejecución de la obra constó de las siguientes fases:

### 3.1. Desvío del caudal del arroyo

Previamente al inicio de las obras, el caudal del arroyo de Alcedo fue desviado mediante una ataguía aguas arriba de la zona afectada por las dolinas de colapso y encauzado a través de una tubería de 200 m de longitud enterrada bajo el camino que discurre paralelo al arroyo. Dicha tubería conducía el caudal del arroyo aguas abajo de la zona afectada, justo antes de la estación de aforo, permitiendo el desarrollo de los trabajos.

### 3.2. Retirada de la cobertera superficial y excavación del canal

Una vez desbrozada la abundante vegetación existente en la zona de trabajo, se procedió a retirar y almacenar la cobertera arcillosa y húmica (los primeros 30 cm del suelo) de forma independiente al resto de materiales excavados con el fin de permitir su posterior reutilización. Para el acopio de dichos materiales se dispuso un área de 3.000 m<sup>2</sup> situada aguas abajo de la zona de actuación. Posteriormente, se procedió a la excavación del canal con una longitud de 220 m y una sección de 25 m<sup>2</sup>. Dicha sección es de tipo trapezoidal, estando diseñada de acuerdo a la avenida calculada para el periodo de retorno de 100 años, según criterio de la Confederación Hidrográfica del Duero. En el sector norte de la excavación, el gran espesor de materiales superficiales impidió alcanzar el sustrato rocoso, que sí fue alcanzado en el sector meridional. También se procedió a excavar las dolinas de colapso existentes a unos 5 m por encima del arroyo, en la ladera oeste del valle, confiriendo a los huecos una forma troncocónica invertida de unos 5 m de profundidad.

Las excavaciones y movimientos de tierra se llevaron a cabo utilizando medios convencionales: dos retroexcavadoras acompañadas de dos camiones de obra, que pudieron ser utilizados una vez acondicionado el camino de acceso que corre paralelo al arroyo de Alcedo en toda la zona de la actuación. Los 5.000 m<sup>3</sup> de escombros generados se componían de material arcilloso y arenoso con grandes bloques métricos, de litología heterogénea. Este material se almacenó provisionalmente en la zona de acopio citada anteriormente. Los grandes bloques fueron separados del conjunto para su utilización posterior. Así mismo, los restos del canal de hormigón armado provisional construido en 2008 fueron convertidos in situ en árido de tamaño grava gruesa, previa separación de los aceros del armado. Estas gravas sirvieron para mejorar el piso de los accesos principales de la obra.



**Fig. 3. Diversos aspectos de la obra. A. Relleno de los conductos kársticos; B. Excavación del canal y disposición del armado de la viga de fondo; C. Construcción de los diferentes paños de la canalización; D. Relleno del canal**

### 3.3. Sellado de los conductos kársticos

El sellado de los conductos kársticos, detectados tanto en la ladera oeste como en el fondo de la excavación, se logró mediante la ejecución de un relleno con hormigón ciclópeo, al que se incorporaron los bloques de tamaño medio (hasta 50 cm de diámetro) extraídos de la propia excavación (fig. 3A). Tras la ejecución de estos ‘tapones’ de hormigón, el resto de huecos excavados se rellenaron hasta la cota de la ladera o de la excavación del canal con escombros acopiados.

### 3.4. Estabilización de los materiales coluviales deslizados de la ladera derecha

Estudios previos habían constatado la existencia de procesos de inestabilidad de los materiales coluviales existentes en la ladera oeste del valle debido a la acción erosiva del arroyo de Alcedo sobre su base. Dichos procesos de inestabilidad se reactivaron e incrementaron durante la excavación de la caja del canal. Con el doble objetivo de proteger

al personal que intervenía en los trabajos de excavación, situados a unos 10 m bajo la cota topográfica, y estabilizar la ladera en un tramo de 60 m, se construyó un pedraplén de 8 m de altura sobre el que, posteriormente, se ejecutaría la aleta derecha del canal hormigonado. El pedraplén está constituido por bloques de piedra (de diámetro superior a 1,5 m) extraídos de la zona de acopio. En el fondo del zanjón de apoyo de este pedraplén se colocó una capa de hormigón en masa de 50 cm de espesor, con el objetivo de sujetar los bloques basales.

### 3.5. Construcción del canal

El canal de hormigón mantiene la misma sección trapezoidal de la excavación, salvo en su tramo inferior, donde su diseño tuvo que ser modificado debido a la existencia de elementos de valor arquitectónico y etnológico (ruinas de cabañas y molinos) en la margen izquierda del arroyo. Por esta razón, la aleta izquierda de la canalización se adaptó como un muro

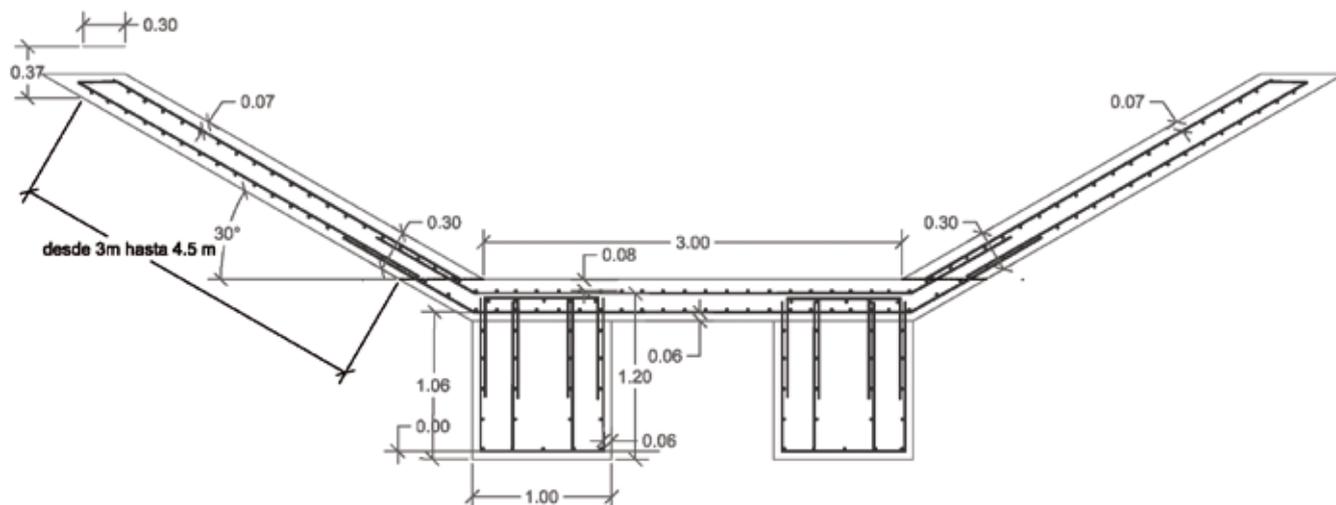


Fig. 4. Sección transversal tipo de la estructura del canal. Durante la fase de obra, las dos vigas de fondo proyectadas originalmente fueron sustituidas por una única viga de anchura equivalente

vertical a lo largo de un tramo de 60 m. Toda la estructura hormigonada se ejecutó sobre geomembranas colocadas en las paredes del terreno natural de la sección excavada.

El canal se ejecutó mediante la construcción de tramos de 7,5 m de longitud que fueron dispuestos sobre una viga de fondo de hormigón armado. Con una inclinación de 45°, dicha viga recorre longitudinalmente toda la estructura, y sus juntas de dilatación no coinciden con las del canal. Su función es el atado de todos los tramos que componen el canal y la creación de una amplia base que permita distribuir los esfuerzos ejercidos por la estructura sobre los materiales superficiales en todas aquellas zonas donde la excavación no alcanzó el substrato rocoso (figs. 3B, 3C y 4).

En cada tramo se hormigonaron sucesivamente la losa basal y las aletas de la sección. La losa de base, de 30 cm de espesor, se diseñó con un atado a la viga de fondo. A su vez, las aletas laterales del canal van atadas a la losa basal. El conjunto se convierte así en una única estructura, capaz de resistir procesos de socavación generados por la posible aparición de nuevas dolinas de colapso. En los encuentros entre tramos se colocaron juntas de plástico de tipo 'water stop', con el objeto de evitar la infiltración de agua a través de los mismos.

### 3.6. Enterramiento del canal

Una vez construido el canal se procedió a su revestimiento mediante geomembranas. Seguidamente, la estructura fue

enterrada, utilizando para ello los materiales aluviales extraídos, desprovisto de grandes bloques. El relleno alcanzó un espesor de 1 m en el fondo del canal y de 30 cm en la coronación de las aletas, de acuerdo con las prescripciones acordadas con los servicios de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León (figs. 3D y 5). En conjunto, la totalidad de material que recubre el canal de hormigón supone un volumen de 600 m<sup>3</sup>. Una vez ejecutado el enterramiento, se procedió a realizar un 'peinado' de las laderas para homogeneizar la superficie topográfica del conjunto, manteniendo el ángulo aproximado de 16° de la ladera natural anterior a la intervención. Por último, en la zona baja del canal se excavó un 'cauce de aguas bajas' de 1 m de ancho por unos 50 cm de profundidad (fig. 5).

### 3.7. Reconstrucción de las transiciones

Uno de los puntos más delicados de la obra fue el tratamiento de las transiciones entre el canal y el terreno natural, aguas arriba y aguas abajo de la zona sobre la que se realizó la actuación. Para la ejecución de las mismas, con el fin de evitar las filtraciones de agua en estos puntos hacia el macizo rocoso, se realizó una excavación de 2 m por debajo de la cota inferior del canal. En ella se procedió a la colocación de bloques calizos de tamaño métrico y morfología tabular, seleccionados entre el material inicialmente excavado y que fueron consolidados con hormigón en masa entre las juntas. Se realizaron tres niveles de estos materiales que garantizan una estanqueidad completa del fondo del





**Fig. 6.** Apariencia del área del arroyo de Alcedo antes y después de los trabajos ejecutados. **A.** Situación previa, con la presencia de dolinas de colapso (octubre 2013); **B.** Situación al finalizar los trabajos (octubre 2015); **C.** Apariencia actual, donde se aprecia el inicio del proceso de revegetación (abril 2016)

aguas bajas. Por último, a intervalos de 20 m dentro del cauce de aguas bajas se dispusieron piedras que permiten crear pequeñas cascadas, frenando la velocidad del agua y dando al conjunto el aspecto de un arroyo natural de montaña.

### 3.9. Recuperación ambiental y de las infraestructuras

La última fase de la ejecución del proyecto consistió en la recuperación de las infraestructuras afectadas durante el desarrollo de las obras, en concreto la pista de acceso al valle y un manantial situado aguas abajo de la zona afectada por los trabajos. Por último, se llevó a cabo una revegetación tanto en las márgenes del arroyo de Alcedo como en las zonas auxiliares de obra (zona de acopio y parque de maquinaria), con el fin de lograr la recuperación ambiental e integración paisajística de toda el área. Dicha revegetación ha consistido en la plantación de especies autóctonas arbustivas (*Salix sp.*, *Crataegus monogyna*, *Cytisus sp.*), de especies helófitas (*Scirpus sp.*, *Juncus sp.* y *Carex sp.*), así como siembra de pradera.

Una vez acabadas las obras de relleno y restauración, los materiales sobrantes se dispusieron en el hueco de una antigua cantera de calizas existente en la zona. Con esta actuación se restauró la superficie topográfica de dicha explotación minera, evitando además el traslado de material a un vertedero controlado situado a gran distancia de la zona de intervención.

### 4. Discusión y conclusiones

La ejecución de los trabajos concluyó en otoño de 2015, restaurándose el flujo del arroyo de Alcedo a través del canal a partir del mes octubre del mismo año. Los primeros aforos realizados tras la restauración del flujo registraron una pérdida de caudal del 10 %; dicha circunstancia se ha interpretado como resultado de la saturación de los 600 m<sup>3</sup> de materiales aluviales de relleno del nuevo canal de hormigón, que se comportan como un acuífero poroso artificial. Desde principios de noviembre de 2015 no se han registrado nuevas pérdidas de caudal. Por su parte, los aforos del cau-

dal total drenado por los túneles, realizados en el emboquille norte de los mismos, han registrado una disminución estable del mismo (350 l/s a 325 l/s) desde junio de 2014, fecha correspondiente al momento en el que el caudal del arroyo se desvía por la tubería del camino como paso previo a la ejecución de los trabajos.

Los resultados anteriormente citados permiten concluir que los trabajos de canalización y restauración ambiental llevados a cabo en el Valle de Alcedo han restablecido con éxito el flujo superficial del arroyo afectado, permitiendo de nuevo su conexión con el resto de la red hidrográfica, además de reducir significativamente el caudal infiltrado en los Túneles

de Pajares. Además, los trabajos de recuperación ambiental desarrollados han minimizado el impacto de las obras en un área de especial valor ecológico (fig. 6).

### Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a D. Antonio Gutiérrez Blanco (director general de ADIF entre 2013 y 2014), quien autorizó la utilización académica de los datos obtenidos en la obra de impermeabilización descrita. Así mismo, expresan su agradecimiento a D. José María Jiménez, director de las obras de la Variante de Pajares (ADIF) y a las empresas Acciona Infraestructuras, Tragsa y Tragsatec. **ROP**

### Referencias

- Alonso, J.L., Rubio, A., 2009. La estructura geológica de la sección del Túnel de Pajares. En: Pando, L., López Fernández, C., De la Rubia Mir, L. (Eds.), Jornadas técnicas de la Variante de Pajares. Comunicaciones presentadas. Universidad de Oviedo, Oviedo, 29-39.
- Álvarez Díez, J., Vinding Fallesen, J., Garrido Ruiz, M.S., Lombardero Barceló, M., Marcos Bermejo, F., Monge Cristóbal, J.C., Serrano Martín, L., 2009. Hidrogeología de los Túneles de Pajares. En: Míguez Bailo, R. (Ed.), Túneles de Pajares. ADIF, 167-208.
- Chiocchini, U., Castaldi, F., 2011. *The impact of groundwater on the excavation of tunnels in two different hydrogeological settings in central Italy*. Hydrogeology Journal, 19, 651-669.
- De Bruyn, I.A., Bell, F.G., 2001. *The occurrence of sinkholes and subsidence depressions in the Far West Rand and Gauteng Province, South Africa and their engineering implications*. Environmental and Engineering Geoscience, VII (3), 281-295.
- Garrido Ruiz, M.S., Serrano Martín, L., Míguez Bailo, R., Lombardero Barceló, M., Fernández-Serrano Sánchez, M., Álvarez Díez, J., 2009. El Estudio Hidrogeológico de los Túneles de Pajares. In: Pando, L., López Fernández, C., De la Rubia Mir, L. (Eds.), Jornadas técnicas de la Variante de Pajares. Comunicaciones presentadas. Universidad de Oviedo, Oviedo, 77-86.
- Guerrero, J., Gutiérrez, F., Bonachea, J., Lucha, P., 2008. *A sinkhole susceptibility zonation based on paleokarst analysis along a stretch of the Madrid-Barcelona high-speed railway built over gypsum- and salt-bearing evaporites (NE Spain)*. Engineering Geology, 102 (1-2), 62-73.
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., Jourde, H., 2014. *A review on natural and human induced geohazards and impacts in karst*. Earth-Science Reviews, 138, 61-88.
- Gutiérrez-Santolalla, F., Gutiérrez-Elorza, M., Marín, C., Desir, G., Maldonado, C., 2005. *Spatial distribution, morphometry and activity of La Puebla de Alfindén sinkhole field in the Ebro River valley (NE Spain), applied aspects for hazard zonation*. Environmental Geology, 48, 360-369.
- Hunt, B.B., Smith, B.A., Adams, M.T., Hiers, S.E., Brown, N., 2013. *Cover-collapse sinkhole development in the cretaceous Edwards limestone, central Texas*. En: Land, L., Doctor, D.H., y Stephenson, J.B. (Eds.), National Cave and Karst Research Institute [NCKRI] Symposium. *Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst; proceedings of the Thirteenth multidisciplinary conference*, 2, 89-102.
- Kleinhans, I., Van Rooy, J.L., 2016. *Guidelines for sinkhole and subsidence rehabilitation based on generic geological models of a dolomite environment on the East Rand, South Africa*. Journal of African Earth Sciences, 117, 86-101.
- Lolcama, J.L., Cohen, H.A., Tonkin, M.J., 2002. *Deep karst conduits, flooding and sinkholes: lessons for the aggregate industry*. Engineering Geology, 65, 151-157.
- Míguez Bailo, R., 2005. *The Pajares Tunnels*. Revista de Obras Públicas, 3460, 7-32.
- Song, K.I., Cho, G.C., Chang, S.B., 2012. *Identification, remediation and analysis of karst sinkholes in the longest railroad tunnel in South Korea*. Engineering Geology, 135-136, 92-105.
- Valenzuela, P., Domínguez-Cuesta, M.J., Meléndez-Asensio, M., Jiménez-Sánchez, M., Saenz de Santa María, J.A., 2015. *Active sinkholes: A geomorphological impact of the Pajares Tunnels (Cantabrian Range, NW Spain)*. Engineering Geology, 196, 158-170.
- Vincenzi, V., Gargini, A., Goldscheider, N., Piccinini, L., 2014. *Differential hydrogeological effects of draining tunnels through the Northern Apennines, Italy*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47 (3), 947-965.
- Waltham, T., 2008. *Sinkhole hazard case histories in karst terrains*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 41, 291-300.