



EL EMBALSE DE MULARROYA (ZARAGOZA): PROBLEMAS GEOLÓGICOS DE UNA OBRA EN AVANZADO ESTADO DE CONSTRUCCIÓN

Geological hazards (seismicity and catastrophic flooding) associated with the Mularroya dam (Grió river, Zaragoza province, Spain)

Antonio Casas^{1*}, Marcos Aurell², Carlos Revuelto³, Pablo Calvin⁴, José Luis Simón¹, Óscar Pueyo¹,
Andrés Pocoví¹ y Marcos Marcén¹

¹ Grupo de Investigación Geotransfer e Instituto de Ciencias Ambientales (IUCA), Universidad de Zaragoza, C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza. *Corresponding author: acasas@unizar.es

² Grupo de Investigación Reconstrucciones Paleoambientales e Instituto de Ciencias Ambientales (IUCA), Universidad de Zaragoza, C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza

³ Geoscan Consultoría SLP, C/Ajedrea, 20, 50720 Zaragoza

⁴ Departamento de Física, Laboratorio de Paleomagnetismo, Universidad de Burgos, Avda. Cantabria s/n, 09006 Burgos

Abstract: In this work we analyze the geological hazard associated with the Mularroya reservoir (whose total volume is more than 100 hm³), located on the Grió river, a tributary of the Jalón river; one of the right-bank main tributaries of the Ebro river. Its construction, about to be finished, is problematic because of (i) the particular geological setting of the reservoir, located on the permeable carbonate units belonging to the Triassic-Jurassic transition (Imón, Cortes de Tajuña and Cuevas Labradas formations), defining a NNW-plunging syncline; (ii) its location on a river whose streamflow per year is 20% of the total reservoir volume, thus needing a gravity fed tunnel from the Jalón river cutting across complex structures of the Paleozoic massifs of the Aragonian Branch of the Iberian Chain; and (iii) geological risks associated with its particular location, close to the río Grió fault system, that includes faults that were active during the Quaternary, and are able to generate earthquakes with magnitudes 6.2-6.8. According to our simulations by means of IBER program, flooding risk associated with a possible geotechnical fault of the Mularroya dam would cause severe damage in villages located downstream (Ricla and Calatorao).

Keywords: geological hazard, flood, dam, seismicity, Ebro Basin, Iberian Chain.

Resumen: El embalse de Mularroya (más de 100 hm³ de capacidad), situado sobre el cauce del río Grió, uno de los afluentes del Jalón (afluente a su vez del Ebro por su margen derecha) es una obra en avanzado estado de construcción. Desde la fase de estudios previos (mediados de los años 90) hasta la actualidad, se han constatado problemas geológicos que ponen en entredicho la oportunidad de la realización de esta obra pública. En este trabajo se revisan y se aportan nuevos datos sobre los problemas más significativos: (i) más de 1/5 de la superficie del vaso del embalse se asienta sobre unidades carbonatadas permeables del acuífero regional de las unidades del tránsito Triásico-Jurásico (formaciones Imón, Cortes de Tajuña y Cuevas Labradas), que forman una estructura sinclinal con inmersión NNO; (ii) su situación sobre un cauce cuya aportación anual es 20% la capacidad del embalse, lo que requiere el trasvase de agua desde el río Jalón por un túnel de desviación que atraviese estructuras complejas del macizo paleozoico que constituye la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica; y (iii) los riesgos geológicos que conlleva, fundamentalmente por su localización sobre el sistema de fallas de río Grió, que incluye varios segmentos activos durante el Cuaternario capaces de generar sismos de magnitud entre 6,2 y 6,8. De acuerdo con la simulación realizada mediante el programa IBER, el riesgo de inundación asociado a un posible fallo geotécnico de la presa afectaría significativamente a poblaciones importantes, como Ricla o Calatorao, situadas aguas abajo de la presa.

Palabras clave: riesgos geológicos, inundación, presa, sismicidad, Cuenca del Ebro, Cordillera Ibérica.



Casas, A., Aurell, M., Revuelto, C., Calvín, P., Simón, J.L., Pueyo, Ó., Pocoví, A., Marcén, M., 2017. El embalse de Mularroya (Zaragoza): problemas geológicos de una obra en avanzado estado de construcción. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30(2): 51-64.

Introducción, antecedentes y problemática

Los embalses constituyen infraestructuras de gran valor estratégico, especialmente en climas áridos o semiáridos, por sus usos como almacenamiento de agua para riego y abastecimiento, regulación de avenidas e incluso atractivo turístico (Martínez Arnaiz, 2000; López-Moreno *et al.*, 2003). Por ello, y a pesar de su impacto social (*e.g.*, Lerer y Scudder, 1999; Tilt *et al.*, 2009; Manouchehri y Mahmoodian, 2010; Casajús-Murillo, 2012), las presas han sido tradicionalmente consideradas como estructuras beneficiosas de cara al desarrollo de las comunidades humanas, especialmente en países en vías de desarrollo (Altinbilek, 2000). Sin embargo, el creciente número de problemas asociados a embalses, tanto desde el punto de vista geotécnico como ambiental, tanto a escala global como en particular en la Cuenca del Ebro, donde se han construido cerca de 100 grandes embalses (Rebollo y Casas Sainz, 2001; Casas-Sainz, 2007, 2013; Casas *et al.*, 2015; Gutiérrez *et al.*, 2010, 2015), hace que cada caso particular deba ser considerado de forma independiente de cara a evaluar los riesgos geológicos asociados a la construcción de presas y el llenado de embalses.

El presente estudio se centra en el embalse de Mularroya, una presa de gran envergadura, cuya construcción comenzó en 2008 y que se encuentra en avanzado estado de construcción. Está destinada a embalsar agua trasvasada desde el río Jalón (el mayor afluente del río Ebro por la margen derecha) en uno de sus afluentes, el río Grío, aguas arriba de la confluencia entre ambos (Fig. 1A, B). A pesar de que la aportación media anual del río Grío en la zona de la cerrada apenas supera los 20 hm³, se prevé que la capacidad de embalse sea de 103 hm³, con cerca de 80 m de altura de lámina de agua sobre el cauce actual y 90 m sobre cimientos. La presa prevista es de materiales sueltos con núcleo impermeable y diseño en planta de arco convexo hacia aguas arriba (Fig. 1C). Para el llenado de la presa se prevé la construcción de un trasvase desde el río Jalón, mediante un túnel de gravedad, con embocadura en el término municipal de Calatayud y desembocando finalmente en la cola del embalse. La longitud total del túnel es de en torno a 13 km y su orientación es aproximadamente E-O, atravesando de forma oblicua la sierra paleozoica de Vicort y la fosa de Morés (Fig. 2A) y con un desnivel total de menos de 8 m entre sus dos extremos, sección de herradura y diámetro de 2,9 m. Se prevé su sellado mediante una pared de 5 cm de hormigón proyectado. La estimación (a mediados de 2016) del coste total de la obra (incluyendo presa y túnel) fue en torno a 118 millones de euros.

En el presente trabajo se analizan algunos de los aspectos técnicos relacionados con la localización y contexto geológico de la presa y embalse de Mularroya, así como los riesgos geológicos (peligrosidad sísmica y riesgo de inundación) asociados a su futuro llenado. En particular, su situación en una zona de sismicidad baja, pero en la que

existen fallas activas con alta sismicidad potencial hace que se deban considerar cuidadosamente las consecuencias que puede tener el llenado del embalse en términos de afección a dichas fallas. Finalmente, se definen las insuficiencias del proyecto, a pesar de su avanzado estado de ejecución, los problemas que previsiblemente aparecerán en relación con la permeabilidad del vaso y la construcción del túnel de trasvase desde el río Jalón, y las posibles consecuencias que tendrían lugar en caso de que se procediese al llenado del embalse y la explotación del mismo.

Metodología

El análisis de riesgos geológicos de la presa y embalse de Mularroya se ha llevado a cabo a partir de una metodología multidisciplinar, que incluye:

1) Cartografía y cortes geológicos. Se ha realizado una cartografía geológica de detalle (utilizando cartografías existentes y datos propios) y cortes geológicos tanto de la zona del vaso del embalse como del túnel de trasvase entre los ríos Jalón y Grío. La geología de base tiene una importancia considerable en esta obra debido a la existencia de unidades muy permeables intercaladas con unidades salinas.

2) Cálculo de la peligrosidad sísmica a partir de los trabajos existentes en la zona. Como se indica en el siguiente apartado, el área de estudio se sitúa en una zona intraplaca que presenta un registro instrumental de la sismicidad escasa, de modo que el cálculo de la peligrosidad sísmica solo puede abordarse desde el punto de vista determinista, y evaluando las fallas capaces y su potencial sísmico (por ejemplo, longitud aflorante de las fallas activas). En el cálculo determinista (Alfaro *et al.*, 1987) se considera el máximo sismo posible para una determinada falla o zona sismotectónica, y que dicho sismo máximo puede producirse en cualquier punto de la falla o zona sin tener en cuenta el registro instrumental sobre la probabilidad de ocurrencia (distribución probabilística temporal). En este sentido cobran especial importancia los sedimentos recientes (entendiendo como tales los que abarcan el Plioceno y el Cuaternario), aunque las posibilidades de datación precisa de los mismos no sean las óptimas.

3) Modelización del riesgo de inundación. Para la modelización del riesgo de inundación, que constituye uno de los ejes centrales del presente trabajo, se ha utilizado el programa IBER. Este programa de cálculo de las avenidas se basa en una serie de simplificaciones necesarias para el cálculo de las mismas, y a pesar de ello, permite una aproximación a caudales máximos bastante razonable. El módulo hidrodinámico utilizado resuelve mediante el *método de volúmenes finitos*, las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como *2D Shallow Water Equations (2D-SWE)* o *ecuaciones de St. Venant bidimensionales* (Bladé *et al.*, 2014). Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y

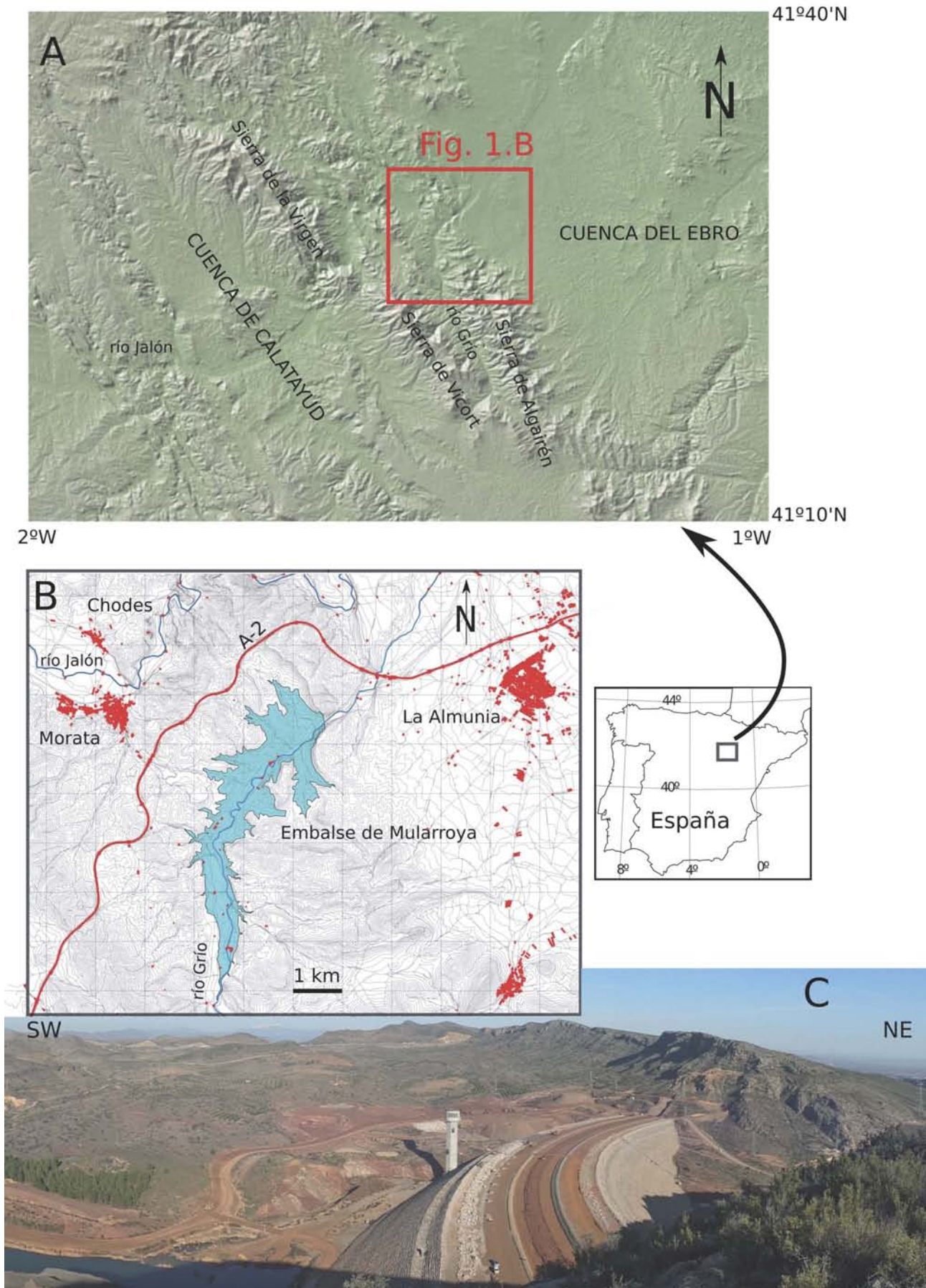


Fig. 1.- A. Modelo digital del terreno (obtenido de GeomapApp) que muestra el relieve de la zona norte de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. B. Esquema que muestra la situación del embalse de Mularroya en el marco de la red de los ríos Jalón y Grió. C. Fotografía de la presa de Mularroya en febrero de 2017.

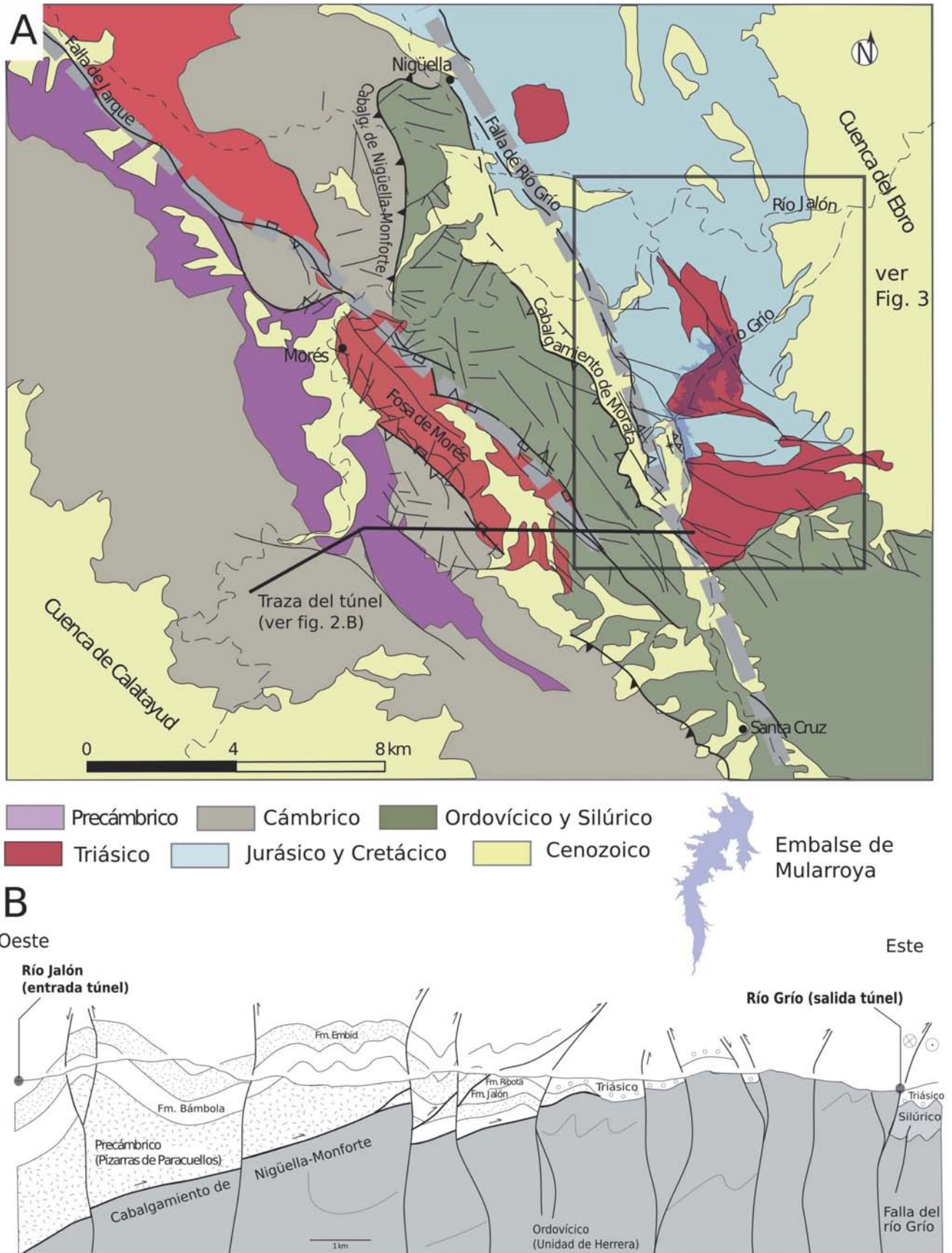


Fig. 2.- A. Mapa geológico del entorno de los ríos Jalón y Grío que indica las principales unidades y fallas. Se muestra también la extensión y trazado de la falla del río Grío, la principal fuente sísmogénica afectada por el embalse de Mularroya (modificado de GEOVEO, IGME, y Casas *et al.*, 2016). Se ha superpuesto un mapa de fracturación (fallas con desplazamiento) en el entorno del túnel y embalse de Mularroya, realizado a partir de ortofotografías y mapas geológicos. B. Corte geológico a lo largo de la traza del túnel proyectado para el trasvase de agua del río Jalón al embalse de Mularroya.

una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Asimismo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales o a cuñas salinas. En estos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible repercusión en los resultados del modelo. En la actualidad, los modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales son los más utilizados en estudios de dinámica fluvial y litoral, evaluación de zonas inundables, y cálculo de transporte de sedimentos y contaminantes.

Contexto geológico y estructura tectónica del vaso del embalse de Mularroya y su túnel de trasvase

El embalse de Mularroya se localiza en un enclave particular, como es el borde norte de la Rama Aragonesa (en concreto en el sector septentrional de esta rama) de la Cordillera Ibérica, la alineación de materiales paleozoicos que recorre el sector central de la cadena desde el Moncayo hasta el Maestrazgo. Este dominio presenta estructuras de cierta complejidad, resultado de su evolución a lo largo de diferentes etapas tectónicas: compresión varisca, fracturación tardivarisca, extensión y mineralizaciones durante el Triásico, extensión y sedimentación durante el Jurásico y, finalmente, compresión en el Cenozoico y algunos movimientos recientes (Pocoví *et al.*, 1990; Campos *et al.*, 1996; Cortés-Gracia y Casas-Sainz, 1996; Gutiérrez *et al.*, 2012; Calvín-Ballester y Casas, 2014; Marcén, 2014; Marcén *et al.*, 2015; Marcén Albero y Román Berdiel, 2015). Este conjunto de estructuras definen la geología y geomorfología de este sector de la Cordillera Ibérica y su susceptibilidad a procesos relacionados con la peligrosidad sísmica de la zona y los potenciales riesgos sobre las infraestructuras.

El mencionado sector nororiental de la Rama Aragonesa está limitado al sur por la cuenca cenozoica de Calatayud, de orientación NO-SE, e incluye las Sierras de Algairén, Vicort y La Virgen (Fig. 1A), con altitudes máximas en torno a los 1400 m s.n.m. Se encuentra limitado al norte por la Cuenca del Ebro, con una transición gradual marcada por la presencia de una estructura principal fosilizada por los materiales neógenos (cabalgamiento Nor-ibérico) o bien un conjunto de estructuras que afectan a la cobertera de materiales mesozoicos despegados por encima del Triásico Superior (Cortés Gracia y Casas Sainz, 1996). Las orientaciones de estas estructuras se desvían de la orientación general del núcleo paleozoico de la Rama Aragonesa, con variaciones notables, desde E-O y N-S a NE-SO. Las principales estructuras son (Fig. 2):

1) Los cabalgamientos variscos, inicialmente de escaso buzamiento pero plegados con posterioridad por pliegues de dirección NO-SE con foliación bien desarrollada (Calvín-Ballester y Casas, 2014). El más importante es el denominado tradicionalmente cabalgamiento de Datos y recientemente cabalgamiento de Nigüella-Monforte (Casas

et al., 2016), que atraviesa longitudinalmente todo este sector de la Rama Aragonesa, con dirección NO-SE, con algunos tramos en posición horizontal, y no presenta indicios de reactivación durante el Mesozoico y el Cenozoico.

2) Las fallas tardivariscas, también de dirección NO-SE o ligeramente oblicuas (NNO-SSE) a la dirección principal de la Rama Aragonesa. Fueron formadas durante el Pérmico, con posterioridad a la Orogenia Varisca, pero reactivadas de forma recurrente durante toda la historia mesozoica y cenozoica del Surco Ibérico (Álvaro *et al.*, 1979). En las cuencas de los ríos Jalón y Grío, la más importante de estas fallas es la denominada falla del río Grío (Fig. 2), que presenta evidencias de actividad tardivarisca, mineralizaciones pérmicas y triásicas (Cardellach *et al.*, 1988; Pocoví *et al.*, 1990), fundamentalmente de baritina, y evidencias de deformación transpresiva durante el Cenozoico. La importancia de las fallas tardivariscas está en relación con su gran desarrollo vertical, llegando a atravesar toda la corteza, ya que han servido como vías preferentes para la inyección de magma de origen astenosférico hacia la superficie durante el Triásico (Lago *et al.*, 1986; Bastida *et al.*, 1989), y su continuidad longitudinal, ya que pueden seguirse a lo largo de varias decenas de kilómetros. Su importancia desde el punto de vista sísmico radica en que estas grandes discontinuidades corticales se han reactivado de forma intermitente y constituyen las principales fuentes sismogénicas.

3) Fallas normales, cuya orientación y disposición está condicionada también por la fracturación tardivarisca, pero que afectan a materiales mesozoicos (fundamentalmente triásicos y jurásicos). Las más importantes en este sector son el conjunto de fallas que limitan la denominada fosa de Morés, rellena de materiales del Triásico Inferior (facies *Buntsandstein*), y presentan fuertes buzamientos (Fig. 2). Además, hay un conjunto de fallas con orientaciones más variadas, también relacionadas con las estructuras tardivariscas, que afectan y han condicionado la sedimentación de los depósitos evaporíticos y calcáreos triásicos y jurásicos (fallas de río Grío y Mularroya, fundamentalmente, Fig. 3; Campos *et al.*, 1996; Aurell *et al.*, 2009). También es importante resaltar que algunas de las fallas que afectan hoy en día únicamente a los materiales paleozoicos pudieron tener actividad durante el ciclo alpino, aunque el nivel de erosión actual se encuentra por debajo de la superficie de discordancia del Triásico. Este tipo de fallas son especialmente importantes de cara a la construcción del túnel de trasvase, según se discute en los apartados siguientes.

4) Pliegues y fallas inversas de origen compresivo, neoformadas o resultado de la reactivación de antiguas fracturas durante la compresión cenozoica. Su movimiento está asociado al depósito de materiales detríticos paleógenos (caso de los conglomerados de la cubeta de Morata; Fig. 3) o neógenos (materiales detríticos y calizas lacustres de Nigüella; Santos Bueno, 2015). Puesto que algunas fallas de este tipo afectan a materiales recientes, su importancia es crucial de cara a determinar la peligrosidad sísmica en la región.

El río Grío en su último tramo discurre de forma paralela a la falla homónima (Figs. 2B y 3), a lo largo de un valle de varias decenas de kilómetros de longitud de dirección NO-SE. Su origen se ha atribuido en parte a la erosión diferencial

y en parte a los movimientos tectónicos recientes (Gutiérrez *et al.*, 2012; Gutiérrez Santolalla *et al.*, 2013; Marcén *et al.*, 2015; Marcén Albero y Román Berdiel, 2015). En su tramo final, este valle atraviesa la zona de fallas localizada en las series triásicas y jurásicas del borde norte de la Cadena Ibérica, próxima al contacto con la Cuenca del Ebro.

La permeabilidad del vaso del embalse

La cerrada del embalse de Mularroya se sitúa sobre materiales del Triásico Inferior (facies *Buntsandstein*), y su vaso lo hace sobre un conjunto de materiales del Triásico y Jurásico (Fig. 3). De particular interés son las unidades carbonatadas del tránsito Triásico-Jurásico, caracterizadas por su alta permeabilidad y por su complejidad desde el punto de vista estructural. En un informe técnico previo a la construcción del embalse, se realizó una detallada cartografía que incluía la zona del vaso del embalse, que puso de manifiesto potenciales problemas de permeabilidad en el vaso. Estos problemas potenciales se reconocen en el estudio sobre filtraciones que acompaña al proyecto redactado para la construcción del embalse (puede consultarse un resumen en Lafuente Dios, 2007).

El conjunto litológico formado por las dolomías y calizas del final del Triásico e inicios del Jurásico (formaciones Imón: 10 m de potencia media, Cortes de Tajuña: hasta 200 m de espesor en esta zona, y Cuevas Labradas: 150 m de espesor medio) constituyen el acuífero de mayor relevancia dentro de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (San Román, 1994). Ello es debido a la elevada porosidad y permeabilidad de estas unidades, y al hecho de que se encuentran limitadas por unidades lutíticas y margosas impermeables a base y techo (facies *Keuper* y unidades predominantemente margosas del Pliensbachiense y Toarciense, respectivamente).

La cartografía geológica del entorno de la zona del embalse de Mularroya (Fig. 3) pone de manifiesto problemas potenciales de permeabilidad en un amplio sector de la zona meridional de su vaso. En particular, en todo el tramo de dirección N-S, existe una amplia zona del lecho del río Grío, de casi 2 km de extensión (equivalente a más de 1/5 de la superficie del vaso inundable por el embalse), dominada por las calizas, brechas y dolomías del tránsito Triásico-Jurásico (formaciones Imón, y sobre todo Cortes de Tajuña y Cuevas Labradas). Estas unidades forman los flancos de una estructura sinclinal de gran radio e inmersión hacia el NNO, y por tanto es de esperar que se produzcan importantes pérdidas por infiltración en esta zona del vaso del embalse siguiendo la inmersión de dicha estructura. Un aspecto indicativo acerca del potencial de estas filtraciones se encuentra en el agua que circula superficialmente por el cauce del río Grío durante las estaciones con precipitación: el caudal superficial del río disminuye drásticamente o llega incluso a desaparecer al atravesar esta amplia zona de depósitos aluviales, que cubren la estructura sinclinal mencionada, dominada por la unidades permeables del tránsito Triásico-Jurásico.

La peligrosidad sísmica

El embalse de Mularroya presenta en su nivel máximo de llenado una altura de lámina de agua de 83 m sobre el

fondo del cauce. Esta circunstancia, unida a la permeabilidad y existencia de sistemas de fallas en los materiales del vaso (Fig. 3), y la cercanía a una de las fallas con actividad reciente más importantes de la Cordillera Ibérica central, la falla del río Grío (Gutiérrez *et al.*, 2009), hace que esta presa genere un importante gradiente hidráulico y que presente altas probabilidades de provocar sismicidad inducida (*triggered seismicity* o 'sismicidad anticipada' tal como se denomina en algunos trabajos). Este tipo de sismicidad tiene lugar debido a la activación de una falla, sometida previamente a tensiones tectónicas, como consecuencia del aumento de la presión de fluidos en su superficie. Entre otras posibles causas (inyecciones de fluidos, minería, *fracking*...), el fenómeno está ligado al llenado de grandes presas (con lámina de agua de más de 15 m de altura) y está condicionado por la existencia de fallas activas y permeabilidad de los materiales del vaso. Se han dado casos de sismicidad inducida incluso en zonas donde, antes de la construcción de un embalse, no se había reconocido la existencia de fallas activas.

Los ejemplos de sismicidad inducida provocados por el llenado y explotación de embalses son numerosos en todo el mundo (embalse de Charvak en Uzbekistán: Plotnikova *et al.*, 1986; embalse de Nurek en Tadyikistán: Scholz, 2002; embalses de Sriramsagar, Osmansagar, Bhatsa, Thien y Koyna en India: Rastogi *et al.*, 1986a, b; Patil *et al.*, 1986; Bhattacharya *et al.*, 1986; Simpson, 1986; Simpson *et al.*, 1988; embalse de Kotmale en Sri Lanka: Fernando y Kulasinghe, 1986; embalse de Oroville en California, U.S.A.: Rajendran y Gupta, 1986; embalse de Monticello en Carolina, U.S.A.: Talwani, 1997; embalse de Zhelin en China: Yuanzhang *et al.*, 1986; embalses de Takase, Nagawado, Ogohci, Kuzuryu, Iwaya, Kawamata, Tsuruta, Ikaría y Makio en Japón: Okamoto *et al.*, 1986; Ohtake, 1986). El caso reciente más conocido en España es el del embalse de Itoiz, que causó una crisis sísmica sin precedentes recientes en la Cuenca de Pamplona durante el año 2004 (Casas Sainz, 2005; Ruiz *et al.*, 2006; Durá-Gómez *et al.*, 2010; García-Mayordomo e Insua-Arévalo, 2011).

La relación entre llenado de embalses y sismicidad es muy variable, ya que hay casos en los que la aparición de sismos ha seguido en pocos días al llenado, mientras que en otros casos el desfase en la generación de sismos ha sido de varios años (Simpson, 1986; Scholz, 2002). Las magnitudes máximas de los sismos producidos también varían de forma importante de unos embalses a otros, con un máximo de 6,3 en la escala Richter para la presa de Koyna, pasando por magnitudes máximas (M) de 5,3, 5,8 y 5,7 para las presas de Aswan, Kariba y Oroville, respectivamente, y de 4,1 y 4,6 para las presas de Manic-3 y Monticello. Esta variabilidad de magnitudes de terremotos asociados a la actividad responde principalmente al contexto en el que se enclavan, siendo esta magnitud dependiente de la potencialidad sísmica de las estructuras reactivadas.

El sector de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica cuenta con una sismicidad intermedia y estrechamente ligada a grandes fallas, como lo demuestra las alineaciones localizadas a lo largo de las grandes fracturas que cortan el

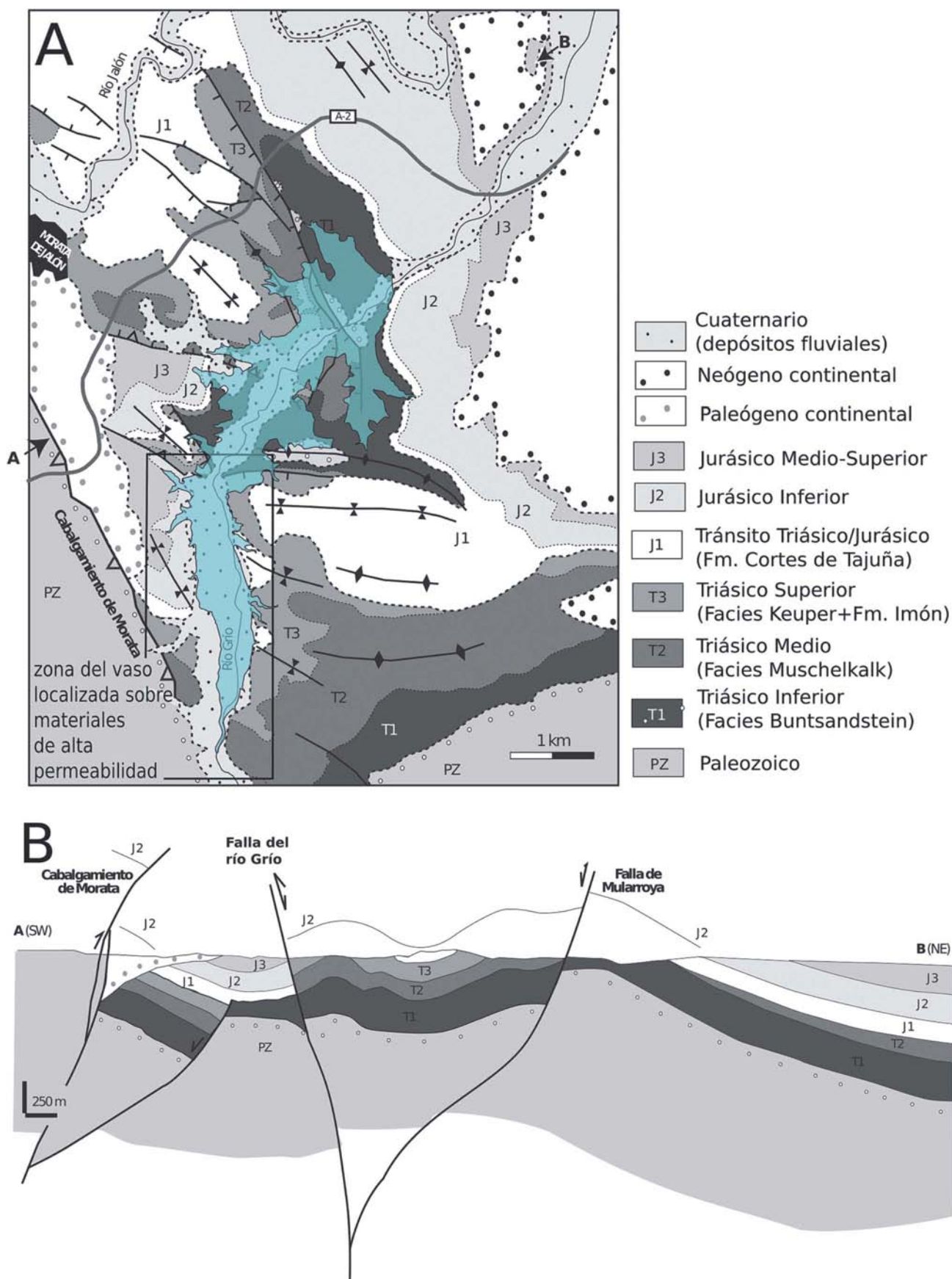


Fig. 3.- Esquema cartográfico (A) y corte geológico (B) del entorno del embalse de Mularroya, mostrando las numerosas fallas relacionadas con la falla del río Grío y los materiales situados en el vaso del embalse (modificado de Aurell *et al.*, 2009). En particular, la zona ocupada por la mitad sur del vaso se emplaza sobre unidades carbonatadas muy permeables (Unidad J1, Fm. Cortes de Tajuña), que forman los flancos de una estructura sinclinal con inmersión hacia el NNO.

sector norte de dicha rama (situado al norte de la Cuenca de Calatayud) (Fig. 4). Como se ha comentado, la falla del río Grío es una de las fallas más importantes del sector central de la Cordillera Ibérica (Fig. 2), con actividad intermitente a lo largo de los últimos 300 millones de años. Su actividad reciente queda también evidenciada por deformaciones asociadas a fallas secundarias del sistema, que pueden detectarse por la existencia de rocas de falla o por estructuras en los depósitos cuaternarios situados en los alrededores del embalse (Fig. 5). Su potencial sismogénico ha sido estudiado en trabajos recientes (Gutiérrez *et al.*, 2012; Gutiérrez Santolalla *et al.*, 2013), que le atribuyen capacidad de generar terremotos de M entre 6,2 y 6,8. Estas cifras están en coherencia con lo que ocurre en otras fallas de la Cordillera Ibérica, como es el caso de la falla de Munébrega (Gutiérrez *et al.*, 2009), con una capacidad potencial de producir terremotos de $M = 6,8-7,1$, y la falla de Concud ($M = 6,4-6,8$, con actividad recurrente constatada durante todo el Pleistoceno superior y un periodo de recurrencia de unos 7000-8000 años; Lafuente *et al.*, 2011, 2014; Simón *et al.*, 2016). Estas cifras son especialmente significativas si se considera además el tipo de falla y de ruptura que pueden inferirse a partir de los indicadores de actividad reciente (Gutiérrez *et al.*, 2012; Gutiérrez Santolalla *et al.*, 2013), ya que su movimiento (y por tanto la ruptura y localización hipocentral) se produciría muy cerca de la superficie. Teniendo en cuenta este factor, y las conversiones efectuadas por Alfaro *et al.* (1987) para la Cordillera Ibérica, estaríamos en torno a sismos de intensidad máxima mayor de X

(sobre un máximo de XII en la escala M.S.K.: Medvédev-Sponheuer-Kárník). De acuerdo con las equivalencias entre intensidad y aceleración (Trifunac y Brady, 1975; Linkimer, 2008, entre otros) la falla citada tendría capacidad de generar aceleraciones en el entorno de la presa de prácticamente 1g (es decir la aceleración de la gravedad; el valor de aceleración pico del suelo es el parámetro que se utiliza para el diseño de estructuras y para el cálculo de estabilidad de deslizamientos, ya que multiplicado por la masa que puede desplazarse permite obtener la fuerza horizontal que puede afectar a las estructuras), con consecuencias catastróficas para la estabilidad de la misma. Es cierto que utilizar estos valores como parámetros de diseño de la presa, aplicando por tanto un criterio determinista, puede resultar excesivamente conservador. Sin embargo, cabría tomar como referencia el cálculo propuesto por Simón *et al.* (2014) con criterio probabilista para un área con un potencial sísmico similar, como es la de Teruel. En ese área, teniendo en cuenta los parámetros sismogénicos de la falla de Concud y el registro sísmico histórico e instrumental, se ha estimado para un periodo de recurrencia de 500 años, una $M = 5,4$ y una aceleración de pico mínima de 0,105 g.

En el momento actual la evidencia científica sobre el potencial sismogénico de las fallas es elocuente, como lo demuestran también las deformaciones en los depósitos cuaternarios asociados a fallas secundarias recientemente puestas en evidencia en los taludes de las obras (Fig. 5). Estos nuevos datos deberían requerir que antes de la ejecución de la obra y la realización de las pruebas de lle-

nado, debería llevarse a cabo la caracterización del estado de esfuerzos, la determinación de las fallas capaces, el cálculo de los movimientos cosísmicos y el establecimiento de métodos de cálculo deterministas y estadístico-probabilísticos, así como la monitorización microsísmica. La conectividad entre las distintas unidades hidrogeológicas y la intensa fracturación de los macizos rocosos hacen más que probable la alteración del régimen de esfuerzos sobre las fallas sismogénicas principales y la consiguiente generación de sismicidad inducida, con posibles repercusiones catastróficas para el caso de una presa de materiales sueltos, y en el que además el factor de forma (presa con forma convexa en planta hacia aguas arriba) es favorable para la generación de deslizamientos sobre el cuerpo de la presa.

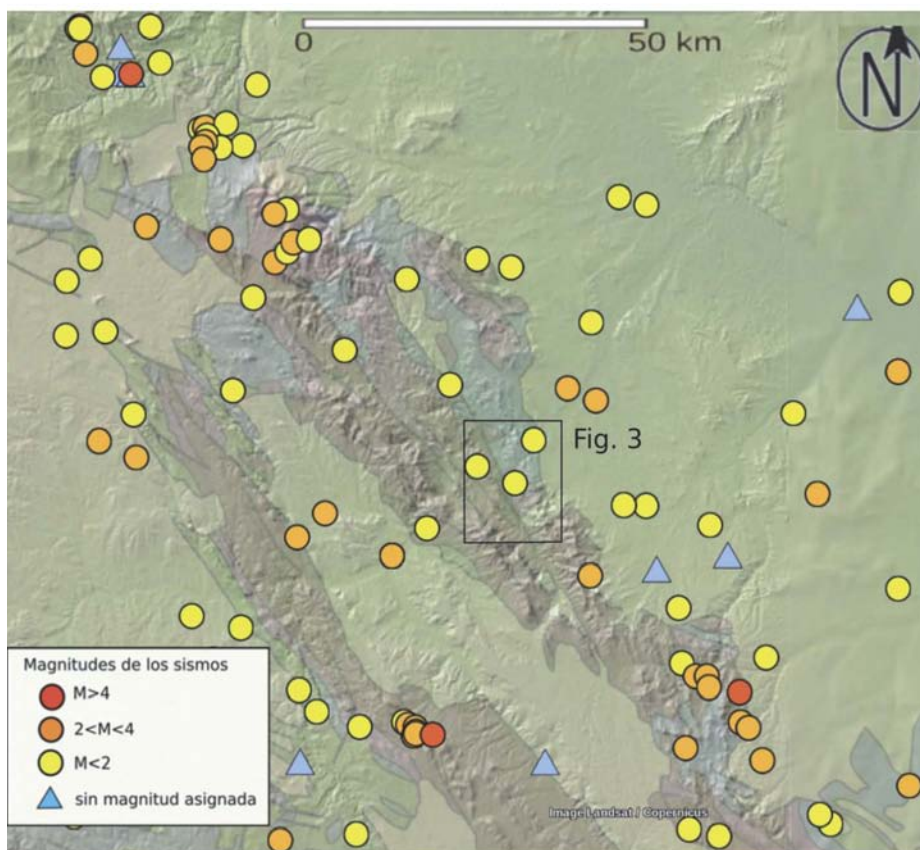


Fig. 4.- Localización de epicentros desde el siglo XIX en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Base geológica modificada de García Lasanta (2016).

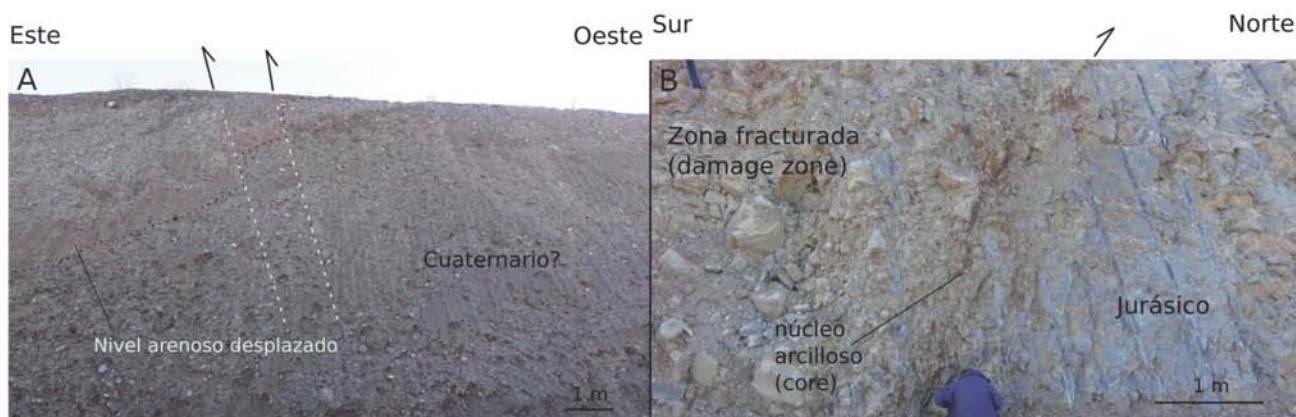


Fig. 5.- Fotografías de afloramiento que muestran deformaciones asociadas al sistema de fallas de río Grío. A. Fallas en depósitos recientes (no datados, ver discusión en el texto). Obsérvese la orientación de los cantos a lo largo del plano de falla. B. Falla del río Grío afectando a materiales jurásicos y con probable movimiento reciente (afloramiento situado 100 m al norte del representado en la Figura 5A).

Las consecuencias de un sismo de estas características no se limitan a las poblaciones situadas aguas abajo del embalse. Hay que tener en cuenta la evaluación de la cinemática de la estructura que considere la longitud de la falla de río Grío, su extensión desde las faldas del Moncayo hasta la Sierra de Cucalón (Casas *et al.*, 2016), y el hecho de que los principales núcleos de población (Morata, Chodes, Tobed, Codos, Santa Cruz de Grío, Nigüella, Arándiga o Mesones) se sitúan a lo largo de su traza, por coincidir con las vegas de los ríos, o a escasa distancia de ellos (caso de Ricla, La Almunia, Calatorao o Cariñena). En tal situación, las posibilidades de sufrir grandes afecciones en toda la comarca serían muy altas si se produjese un terremoto cercano al máximo potencial de esa falla, de acuerdo con las estimaciones de Gutiérrez *et al.* (2012) y Gutiérrez Santolalla *et al.* (2013). A modo comparativo, es preciso tener en cuenta que un sismo de $M = 6,2-6,8$ y muy superficial sería considerablemente más catastrófico que el ocurrido en 2011 en la población de Lorca (Vissers *et al.*, 2011; López-Comino *et al.*, 2012; Martínez-Díaz *et al.*, 2012), y en una zona con escasas medidas preventivas, a diferencia de lo que ocurre en el Sur de España. La aplicación del principio de prevención y cautela en este contexto implica evaluar la viabilidad de la infraestructura y las medidas encaminadas a mitigar y minimizar las afecciones.

Problemas técnicos asociados al túnel de trasvase

Tal como se ha mencionado anteriormente, está previsto que el llenado del embalse se realice mediante un trasvase desde el río Jalón, a través de un túnel que conectará este último con la cola del vaso (Fig. 2). El túnel arranca de una cota máxima de 487 m s.n.m., presenta una pendiente de 0,06% y atraviesa de forma oblicua contactos importantes que han sufrido procesos tectónicos, como es el caso del contacto Precámbrico/Cámbrico (Álvaro *et al.*, 2008), fallas de distinto tipo, incluyendo probablemente cabalgamientos de traza subhorizontal y fallas subverticales, y unidades rocosas de comportamiento reológico muy diferente, desde cuarcitas sedimentarias hasta pizarras, dolomías, yesos y areniscas (Fig. 2). Importancia especial revisten las rocas de falla asociadas tanto a cabalgamientos

de bajo ángulo como a planos de falla subverticales, donde pueden surgir problemas constructivos.

Ya se pusieron de manifiesto, tanto en los informes técnicos previos a la construcción del embalse, como en el referido al túnel de trasvase, los posibles problemas técnicos relacionados con la fracturación y el comportamiento reológico de los materiales atravesados. Estos problemas geotécnicos se comprobaron también en la construcción del túnel de alta velocidad, que atraviesa los mismos macizos rocosos. Dado el escaso revestimiento previsto para el sistema de impermeabilización del túnel (5 cm) y la permeabilidad por fractura de las unidades que tiene que atravesar, es previsible un sobrecoste de la obra para evitar fugas y filtraciones. A los contrastes reológicos y de conductividad térmica y de los materiales atravesados se añadirán también los problemas que probablemente aparecerán durante y después de la construcción del túnel y durante el tiempo de explotación. Así pues, además de los problemas mencionados de permeabilidad del vaso y de sismicidad, el túnel de trasvase es otro punto crítico que puede poner en cuestión el llenado del embalse o suponer inversiones no previstas, incluso después de su construcción. De acuerdo con los datos y consideraciones expuestas, resulta razonable suponer que un estudio de costes incluyendo presupuestos realistas para la ejecución del túnel habría llevado, con toda probabilidad, a desestimar la construcción del embalse.

Riesgo de inundación

Las afecciones potenciales que podrían producirse debido a la generación de un sismo de las características definidas por Gutiérrez *et al.* (2012) para la falla del río Grío deben ser consideradas por la proximidad del epicentro sísmico a poblaciones y a la propia cerrada del embalse de Mularroya. Teniendo en cuenta que el tipo de construcción es de materiales sueltos con núcleo impermeable, y la particular geometría de la misma para una presa de estas características (arco abierto en planta hacia aguas arriba), la inestabilidad más probable es la que incorpora la generación de deslizamientos inducidos por la aceleración sísmica en el paramento de aguas arriba. Un deslizamiento en este paramento favorecería la erosión rápida del mismo y la generación de daños en el núcleo impermeable.

Teniendo en cuenta las experiencias de fallos en este tipo de presas (*e.g.*, Seed y Duncan, 1981; Foster *et al.*, 2000; Saxena y Sharma, 2004), y considerando una situación de embalse lleno, la erosión y vaciado del mismo tendría una duración de pocas horas, liberando el volumen completo al cauce del río. Dadas las condiciones del cauce aguas abajo de la presa, y la proximidad de algunas poblaciones al cauce actual del río, el vaciado catastrófico del embalse de Mularroya tendría consecuencias importantes para algunas de las poblaciones de la llanura del campo de Valdejalón. Hay que tener en cuenta que además estas consecuencias podrían verse agravadas por la colmatación parcial del embalse debido a la ya de por sí gran cantidad de aportes sólidos del río Grío (13 hm³ en 50 años, según el proyecto), los cuales normalmente se ven incrementados en el caso de movimientos sísmicos. Para evaluar las consecuencias que pudieran generarse, se ha realizado la simulación de la inundación realizada por el método de volúmenes finitos mediante el programa IBER (Corestein *et al.*, 2010), considerando el vaciado total del embalse a cota máxima. Esta evaluación mostraría cómo las poblaciones más afectadas serían Ricla y Calatorao (Fig. 6), siendo esperables daños de menor consideración en las poblaciones aguas abajo de esta última. La simulación muestra cómo el caudal del río Grío llegaría a ocupar la llanura de inundación del río Jalón remontando también éste último.

De acuerdo con la simulación destacan tres puntos críticos: el puente de la carretera A2 y las localidades de Ricla y Calatorao. En el puente de la carretera A2 sobre el río Grío se producirían importantes calados (Fig. 7A) y velocidades superiores a los 20 m/s en sus estribos. Puesto que estas son condiciones para las cuáles no están diseñadas

estas infraestructuras, es previsible que pudieran generar la socavación de los estribos de apoyo del puente y su colapso. Para la localidad de Ricla, se esperan calados de hasta 7,3 m en la plaza de toros y su entorno (zona más afectada), mientras que en la margen izquierda del río Jalón los calados máximos estarían en torno a los 2,75 m en las zonas más bajas (Fig. 7B). La velocidad del flujo estaría comprendida entre 2 y 4 m/s aproximadamente en el entorno de la plaza de toros y entre 0,5 y 2,5 m/s en la margen derecha del río Jalón. El tiempo de llegada de la máxima inundación estaría en torno a 15 minutos. En cuanto a Calatorao, sufriría una afección mayor que la de Ricla, produciéndose la inundación de buena parte del casco urbano (Fig. 7C). En las zonas más bajas de la localidad el agua alcanzaría los 6 m de calado con velocidades de hasta 2 m/s, y tiempo de llegada de la máxima amplitud de onda en 42 minutos.

Por último, si comprobamos dentro de las zonas inundadas aquellas en las que pueden producirse graves daños sobre las personas y los bienes de acuerdo con el RD9/2008 y RD638/2016, aquellas zonas en las que el calado es superior a 1 m, la velocidad es superior a 1 m/s, o bien el producto de ambos es superior a 0,5 m²/s (Fig. 8), comprobamos que la superficie inundada es muy similar tanto en la localidad de Ricla como en la de Calatorao, lo cual pone de manifiesto la peligrosidad de la avenida en las citadas localidades.

Conclusiones

El embalse de Mularroya se localiza en un punto crítico de la Cordillera Ibérica, donde confluye una de sus principales fallas sísmogénicas (la falla de río Grío) y multitud de fallas satélites que afectan a rocas de composiciones y permeabilidades muy variadas. En esta situación, y vistas las condiciones hidrogeológicas del vaso del embalse, el cambio de las condiciones de régimen de esfuerzos por el llenado de la presa podría detonar el movimiento de las estructuras de su entorno con actividad reciente. Si se evalúa el sismo máximo posible correspondiente a la falla del río Grío (en función de los condicionantes geológicos), que tendría una magnitud entre 6,2 y 6,8 (Gutiérrez *et al.*, 2012) y un foco muy superficial, podría producir condiciones para la generación de vibraciones de alta amplitud y longitud de onda, fuerte intensidad y afecciones a las poblaciones situadas en los ejes del río Grío y del río Isuela, y pro-

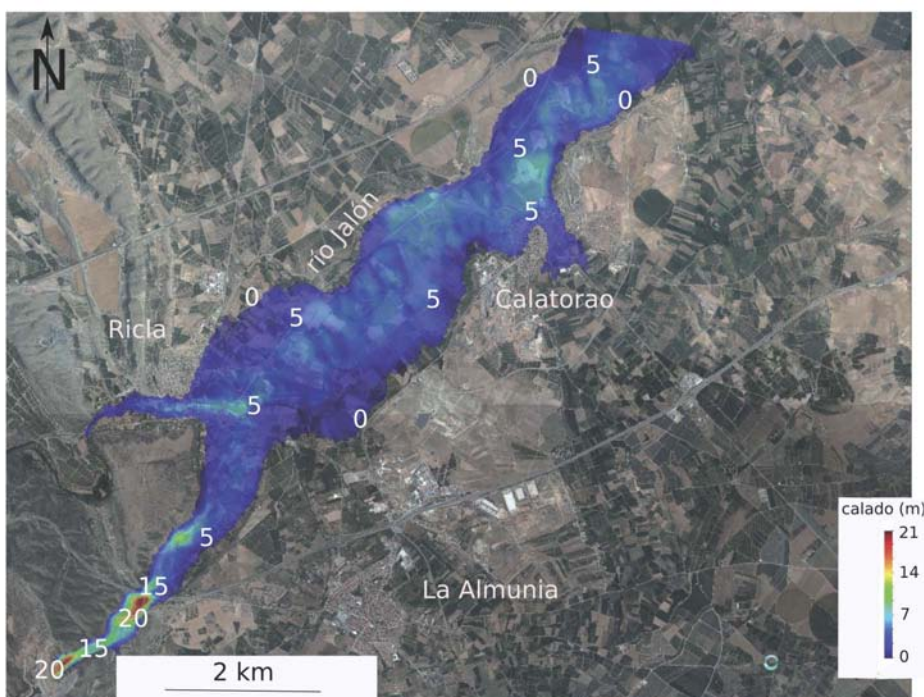


Fig. 6.- Calado máximo obtenido aguas abajo de la presa en la simulación de inundación por rotura de la misma (programa IBER). Destaca el calado en el puente de la A2 (casi 25 m) motivado por el estrechamiento del cauce.

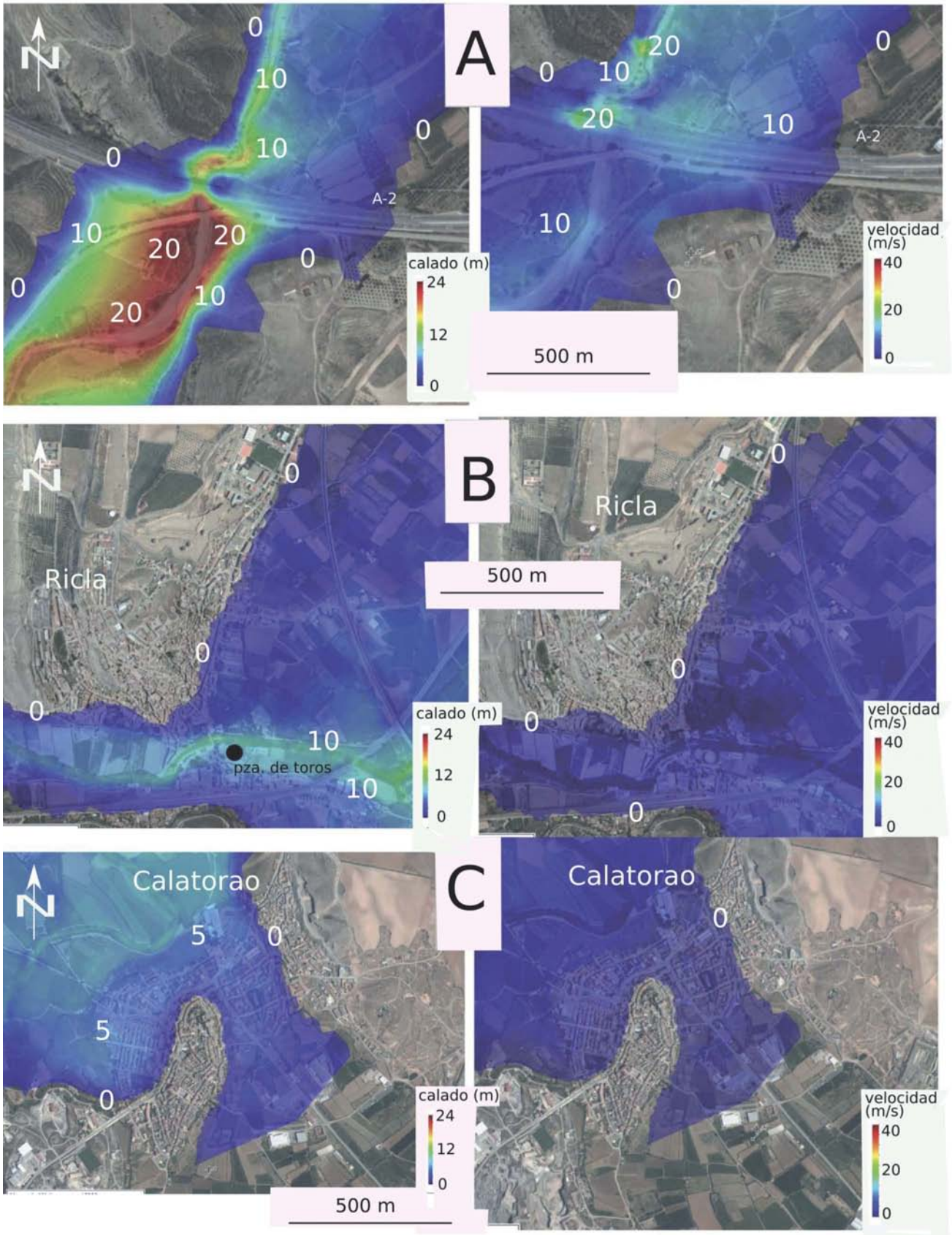


Fig. 7.- Calados (izquierda) y velocidades máximas (derecha) en la carretera A2 (A), Ricla (B) y Calatorao (C) obtenidos a partir del programa IBER.

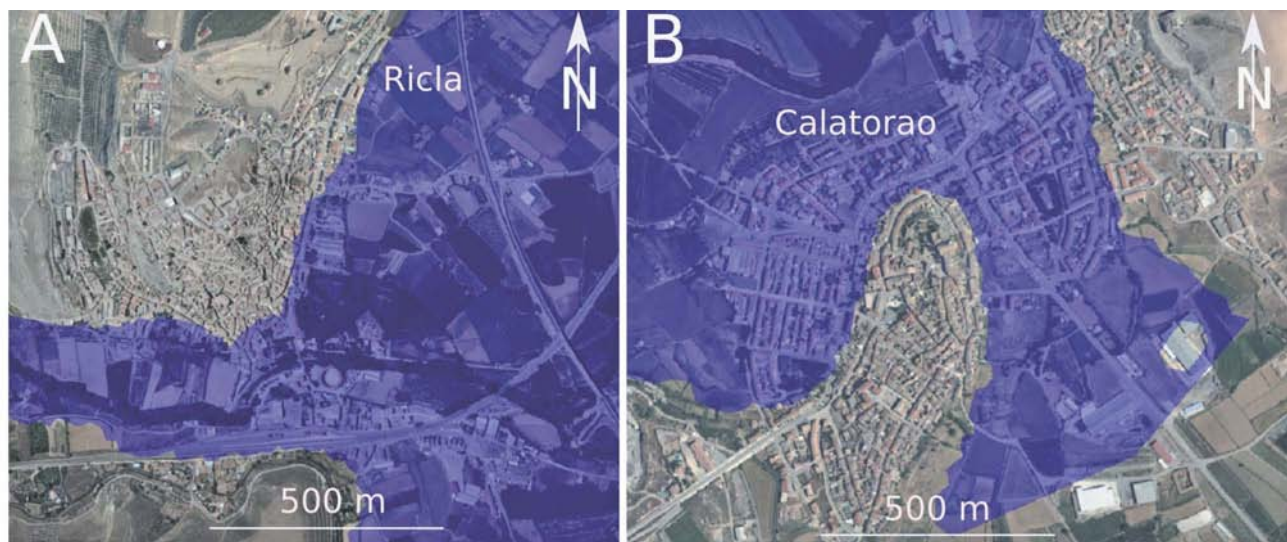


Fig. 8.- Zona de daños graves para las personas y bienes (RD9/2008) en las localidades de Ricla (A) y Calatorao (B) obtenido a partir de la simulación mediante el programa IBER.

bablemente a otros núcleos localizados ya en la depresión del Ebro (La Almunia, Calatorao...). Por otro lado, la propia presa podría sufrir condiciones dinámicas para las cuales no está diseñada, por lo que podría producirse su vaciado catastrófico, con consecuencias importantes para algunas poblaciones situadas en el valle del río Jalón.

Finalmente, los problemas potenciales de filtración de una amplia zona al sur del vaso del embalse, combinado con las características litológicas, estructurales e hidrogeológicas de las unidades que debe atravesar el túnel de travesarse desde el río Jalón (sin el cual no es posible el llenado del embalse de Mularroya), pueden hacer esta obra un objetivo inviable que adolece de estudios técnicos serios y rigurosos, y de una evaluación de las relaciones coste-beneficio para que la infraestructura pueda satisfacer los objetivos de su construcción, al menos en los términos proyectados y de acuerdo con las prescripciones técnicas planteadas en este momento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Angel Cortés, un revisor anónimo y a la editora principal (Beatriz Bádenas) las correcciones que han contribuido a mejorar el presente artículo. Asimismo, agradecemos a la Fundación Nueva Cultura del Agua (FNCA) y a la Asociación Jalón Vivo las facilidades para la realización del presente trabajo.

Referencias

- Alfaro, J.A., Casas, A.M., Simón, J.L., 1987. Ensayo de zonación sismotectónica en la Cordillera Ibérica, Depresión del Ebro y borde Sur Pirenaico. *Estudios Geológicos*, 43(5-6): 445-457.
- Altinbilek, D., 2002. The role of dams in development. *International Journal of Water Resources Development*, 18(1): 9-24.
- Álvaro, J.J., Bauluz, B., Gil Imaz, A., Simón, J.L., 2008. Multi-disciplinary constraints on the Cadomian compression and early Cambrian extension in the Iberian Chains, NE Spain. *Tectonophysics*, 461(1): 215-227.
- Álvaro, M., Capote, R., Vegas, R., 1979. Un modelo de evolución geotectónica para la Cadena Celtibérica. *Acta Geológica Hispánica*, 14(1): 172-177.
- Aurell, M., Bádenas, B., Casas, A.M., Salas, R., 2009. Peritidal carbonate–evaporite sedimentation coeval to normal fault segmentation during the Triassic–Jurassic transition, Iberian Chain. En: *Sedimentary Processes, Environments and Basins: A Tribute to Peter Friend* (G. Nichols, E. Williams, C. Paola, Eds.). *Special Publication of the International Association of Sedimentologists*, 38: 219-239.
- Bastida, J., Besteiro, J., Reventos, M.M., Lago, M., Pocoví, A., 1989. Los basaltos alcalinos subvolcánicos espilitizados de Arándiga (provincia de Zaragoza): estudio mineralógico y geoquímico. *Acta Geológica Hispánica*, 24(2): 115-130.
- Bhattacharya, S.N., Parcas, C., Srivastava, H.N., 1986. Microearthquake observations around Thien Dam in northwest Himalayas. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44: 169-178.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A., 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1): 1-10.
- Calvín-Ballester, P., Casas, A.M., 2014. Folded Variscan thrusts in the Herrera Unit of the Iberian Range (NE Spain). *Geological Society of London, Special Publication*, 394(1): 39-52.
- Campos, S., Aurell, M., Casas, A.M., 1996. Origen de las brechas de la base del Jurásico en Morata de Jalón (Zaragoza). *Geogaceta*, 20(4): 887-890.
- Cardellach, E., Besteiro-Ráfales, J., Osácar-Soriano, C., Pocoví, A., 1988. Aspectos geológicos y metalogenéticos del área de Herrera de los Navarros (Cadena Ibérica Oriental. Zaragoza-Teruel). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 11: 84-87.
- Casajús-Murillo, L., 2012. Conflictos del agua en Aragón Yesa y Matarraña, dos casos emblemáticos en la resolución de conflictos. *Ambiente y Desarrollo*, 16(31): 9-24.
- Casas Sainz, A.M., 2005. Sismicidad inducida por el embalse de Itoiz. Informe inédito, 41 p.
- Casas-Sainz, A.M., 2007. Riesgos geológicos en los embalses de Yesa e Itoiz. In: *Jornadas Técnicas sobre estabilidad en embalses, Zaragoza* (Confederación Hidrográfica del Ebro, Ed.), 477-481.

- Casas Sainz, A.M., 2013. La Geología es noticia_A 50 años de la catástrofe de Vajont: Riesgos de deslizamiento en el embalse de Yesa. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21(1): 101-105
- Casas Sainz, A.M., Muniesa, P., Pocoví Juan, A., Pueyo Anchuela, Ó., 2015. Las presas de Enciso y Terroba: dos fracasos, dos desastres, dos riesgos. *El Ecologista*, 87: 45-47.
- Casas, A., Marcén, M., Calvín, P., Gil, A., Román, T., Pocoví, A., 2016. Deformación varisca, tardi-varisca y alpina en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica: propuesta para diferenciación y denominación de estructuras. *Geo-Temas*, 16: 495-498.
- Corestein, G., Bladé, E., Cea, L., Lara, A., Escolano, E., Coll, A., 2010. Iber, a river dynamics simulation tool. *GiD 2010 - 5th Conference on Advances and Applications of GiD*, 47-50.
- Cortés-Gracia, A.L., Casas-Sainz, A.M., 1996. Deformación alpina de zócalo y cobertera en el borde norte de la Cordillera Ibérica (Cubeta de Azuara-Sierra de Herrera). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 9(1-2): 51-66.
- Cortés, A.L., Liesa, C.L., Soria, A.R., Meléndez, A., 1999. Role of extensional structures on the location of folds and thrusts during tectonic inversion (northern Iberian Chain, Spain). *Geodinamica Acta*, 12(2): 113-132.
- Durá-Gómez, I., Talwani, P., 2010. Reservoir-induced seismicity associated with the Itoiz Reservoir, Spain: a case study. *Geophysical Journal International*, 181(1): 343-356.
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5): 1000-1024.
- García Lasanta, C., 2016. Magnetic fabric analyses and paleomagnetism applied to study the Mesozoic evolution of the Iberian Range. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 299 p.
- García-Mayordomo, J., Insua-Arévalo, J.M., 2011. Seismic hazard assessment for the Itoiz dam site (Western Pyrenees, Spain). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7): 1051-1063.
- Gutiérrez, F., Lucha, P., Galve, J.P., 2010. Reconstructing the geochronological evolution of large landslides by means of the trenching technique in the Yesa Reservoir (Spanish Pyrenees). *Geomorphology*, 124(3): 124-136.
- Gutiérrez, F., Masana, E., González, Á., Lucha, P., Guerrero, J., McCalpin, J.P., 2009. Late Quaternary paleoseismic evidence on the Munébraga half-graben fault (Iberian Range, Spain). *International Journal of Earth Sciences*, 98(7): 1691-1703.
- Gutiérrez, F., Gracia, F.J., Gutiérrez, M., Lucha, P., Guerrero, J., Carbonel, D., Galve, J.P., 2012. A review on Quaternary tectonic and nontectonic faults in the central sector of the Iberian Chain, NE Spain/Fallas cuaternarias tectónicas y gravitacionales en el sector central de la Cordillera Ibérica, NE de España. *Journal of Iberian Geology*, 38(1), 145-160.
- Gutiérrez, F., Mozafari, M., Carbonel, D., Gómez, R., Ræisi, E., 2015. Leakage problems in dams built on evaporites. The case of La Loteta Dam (NE Spain), a reservoir in a large karstic depression generated by interstratal salt dissolution. *Engineering Geology*, 185: 139-154.
- Gutiérrez Santolalla, F., Lucha López, P., Bordehore, L.J., 2013. La depresión de Río Grío (Cordillera Ibérica, NE España). Graben geotectónico vs. valle fluvial. *Cuaternario y Geomorfología*, 27(3-4): 63-71.
- Lafuente, P., Arlegui, L.E., Liesa, C.L., Pueyo, Ó., Simón, J.L., 2014. Spatial and temporal variation of palaeoseismic activity at an intraplate, historically quiescent structure: The Conclud fault (Iberian Chain, Spain). *Tectonophysics*, 632: 167-187.
- Lafuente P., Arlegui L.E., Liesa C.L., Simón J.L., 2011. Paleoseismological analysis of an intraplate extensional structure: the Conclud fault (Iberian Chain, Spain). *International Journal of Earth Sciences*, 100: 1713-1732.
- Lafuente Dios, R., 2007. Informe de viabilidad. Proyecto de presa de Mularroya, azud de derivación y construcción de trasvase (ZG/La Almunia de Doña Godina y Otros). Informe inédito, Confederación Hidrográfica del Ebro, 42 p. http://www.mampama.gov.es/es/agua/planes-y-estrategias/informes-de-viabilidad-de-obras-hidraulicas/Mularroya_Rev2_tcm7-27213.pdf
- Lago, M., Pocoví, A., Bastida, J., Arranz, E., Vaquer, R., Dumitrescu, R., Gil-Imaz, A., 1996. Características de los magmatismos alcalino y subalcalino, pre-Hettangiense, del borde SE de la Cordillera Ibérica. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 20: 159-182.
- Lerer, L.B., Scudder, T., 1999. Health impacts of large dams. *Environmental Impact Assessment Review*, 19(2): 113-123.
- Linkimer, L., 2008. Relationship between peak ground acceleration and modified Mercalli intensity in Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 38: 81-94.
- López-Comino, J.Á., Mancilla, F.D.L., Morales, J., Stich, D., 2012. Rupture directivity of the 2011, Mw 5.2 Lorca earthquake (Spain). *Geophysical Research Letters*, 39, L03301, doi:10.1029/2011GL050498.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S., García-Ruiz, J.M., 2002. Influence of the Yesa reservoir on floods of the Aragón River, central Spanish Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(4): 753-762.
- Manouchehri, G.R., Mahmoodian, S.A., 2002. Environmental impacts of dams constructed in Iran. *International Journal of Water Resources Development*, 18(1): 179-182.
- Marcén, M., 2014. Geometría y cinemática de la falla de Río Grío. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Zaragoza, 56 p. <https://zaguan.unizar.es/record/16299>.
- Marcén Albero, M., Román Berdiel, T., 2015. Geometría y cinemática de la zona de falla de Río Grío: evidencias de transpresión alpina en la Cadena Ibérica. *Geogaceta*, 58: 79-82.
- Marcén, M., Román-Berdiel, T., Casas, A., Calvín-Ballester, P., Oliva-Urcia, B., García-Lasanta, C., 2015. Kinematics of long lived faults in intraplate settings: case study of the Río Grío Fault (Iberian Range). EGU General Assembly 2015, *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-5165.
- Martínez Arnaiz, M., 2000. El embalse del Ebro y su potencial turístico: la apuesta por un nuevo modelo de desarrollo rural. *Boletín de la Institución Fernán González*, 220: 199-222.
- Martínez-Díaz, J.J., Bejar-Pizarro, M., Álvarez-Gómez, J.A., de Lis Mancilla, F., Stich, D., Herrera, G., Morales, J., 2012. Tectonic and seismic implications of an intersegment rupture: The damaging May 11th 2011 Mw 5.2 Lorca, Spain, earthquake. *Tectonophysics*, 546: 28-37.
- Ohtake, M., 1986. Seismicity change associated with the impounding of major artificial reservoirs in Japan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44: 87-98.
- Okamoto, S., Mizukoshi, T., Miyata, Y., 1986. On the observations of microearthquake activity before and after impounding at the Takase Dam. A special report. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44: 115-133.
- Patil, D.N., Bhosale, V.N., Guha, S.K., Powqar, K.B., 1986. Reservoir induced seismicity in the vicinity of Lake Bhatsa, Maharashtra, India. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44: 73-81.
- Plotnitovka, L.M., Karnachova, O.V., Kaminsky, I.I., 1986. Statistical analysis and mathematical models of the induced seis-

- micity in the region of the large Charvak reservoir. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44: 160-168.
- Pocoví Juan, A., Osácar Soriano, M.C., Lago San José, M., 1990. Análisis estructural de las mineralizaciones de baritina de la Unidad de Herrera (Cordillera Ibérica Oriental). *Geogaceta*, 8: 25-28.
- Rajendran, K., Gupta, H., 1986. Was the earthquake sequence of August 1975 in the vicinity of Lake Oroville, California, reservoir induced? *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44: 142-148.
- Rastogi, B.K., Rao, B.R., Rao, C.V.R.K., 1986a. Microearthquake investigations near Sriramsagar reservoir, Andhra Pradesh State, India. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44: 149-159.
- Rastogi, B.K., Rao, C.V.R.K., Chadha, R.K., Gupta, H.K., 1986b. Microearthquakes near Osmansagar reservoir, Hyderabad, India. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 44: 134-141.
- Rebollo, A., Casas Sainz, A.M., 2001. Deslizamientos de ladera y riegos geológicos en el entorno del embalse de Itoiz (cuenca del Irtai, Navarra). *Munibe Ciencias Naturales, Natur zientziak*, 51: 19-34.
- Ruiz, M., Gaspà, O., Gallart, J., Díaz, J., Pulgar, J.A., García-Sansegundo, J., González-Cortina, J.M., 2006. Aftershocks series monitoring of the September 18, 2004 M= 4.6 earthquake at the western Pyrenees: A case of reservoir-triggered seismicity?. *Tectonophysics*, 424(3): 223-243.
- San Román, J., 1994. Estudio hidrogeológico del interfluvio Queiles-Jalón (Zaragoza). Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 231 p.
- Santos Bueno, N., 2015. Estratigrafía y tectónica del Terciario en el sector Nigüella-Mesones de Isuela (Zaragoza). Trabajo Fin de Grado, Universidad de Zaragoza, 39 p. <https://zaguan.unizar.es/record/32313?ln=es#>.
- Saxena, K.R., Sharma, V.M., 2004. *Dams: Incidents and accidents*. CRC Press, 242 p.
- Scholz, C., 2002. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* (2nd edition), Cambridge, 471 pp.
- Seed, H.B., Duncan, J.M., 1981. The Teton dam failure—a retrospective review. *Soil mechanics and foundation engineering, 10th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Proceedings, 15-19.
- Simón, J.L., Arlegui, L.E., Ezquerro, L., Lafuente, P., Liesa, C.L., 2014. Aproximación a la peligrosidad sísmica en la ciudad de Teruel asociada a la falla de Concud (NE España). *Geogaceta*, 56: 7-10.
- Simón, J.L., Arlegui, L.E., Ezquerro, L., Lafuente, P., Liesa, C.L., Luzón, A., 2016. Enhanced paleoseismic succession at the Concud fault (Iberian Chain, Spain): new insights for seismic hazard assessment. *Natural Hazards*, 80: 1967-1993.
- Simpson, D.W., 1986. Triggered earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 21-42.
- Tilt, B., Braun, Y., He, D., 2009. Social impacts of large dam projects: A comparison of international case studies and implications for best practice. *Journal of Environmental Management*, 90, S249-S257.
- Trifunac, M. Brady, A.G., 1975. Correlations of peak acceleration and intensity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65: 139-162.
- Vissers, R.L.M., Meijninger, B.M.L., 2011. The 11 May 2011 earthquake at Lorca (SE Spain) viewed in a structural-tectonic context. *Solid Earth*, 2(2): 199-204.

MANUSCRITO RECIBIDO EL 16-2-2017

RECIBIDA LA REVISIÓN EL 28-8-2017

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 29-8-2017