

# Evaluación integrada de parámetros de resistencia, geofísica y sondeos en terrenos de baja compacidad afectados por procesos kársticos sobreimpuestos

*Integrated evaluation of resistance parameters, geophysics and boreholes in low compacted materials affected by superimposed karstic processes.*

Óscar Pueyo Anchuela<sup>1,2</sup>, Pedro L. López Julián<sup>3</sup>, Andrés Pocoví Juan<sup>2</sup> y Miguel García Lapresta<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Centro UNED. Calatayud. Av. San Juan el Real, 1, 50300 Calatayud, Zaragoza opueyo@calatayud.uned.es

<sup>2</sup> Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA-UNIZAR). Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, 12, CP 50009 (Zaragoza). opueyo@unizar.es; apocovi@unizar.es

<sup>3</sup> Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (EUPLA). Calle Mayor, 5, 50100 La Almunia de Doña Godina, Zaragoza pllopez@unizar.es

<sup>4</sup> Zeta Amaltea. Calle Carlos Marx 4 · 50015 Zaragoza. mgarcia@amaltea.com

## ABSTRACT

A sinkhole collapse on November 10th 2003 affected the Casa Azul from Calatayud, which produced the later building tear down. Many analyses were carried out to identify the affected area, to look for potential solutions and to evaluate the conditioning and triggering collapse factors. Documentation review, years later, can permit to get some considerations about the representativeness, meaning and obtained results in such moment and to infer conclusions about the potential future urban development of the area. These results permit to identify the contribution from paleokarstic activity reducing the materials compactness in the units located between the substratum and the Quaternary, the later affection to such materials of karst processes and the size and extension of the karstic collapse that affected the analyzed area. The high density of different types of research approaches can permit to evaluate the representativeness of the obtained results from different discrete essays and the interest of the feedback evaluation of such data to define survey campaigns for the geological-geotechnical-geophysical characterization in similar contexts where low resistance materials exist and are affected by current karst activity.

**Key-words:** karst, dynamic resistance, collapse, geophysics, Calatayud.

Geogaceta, 68 (2020), 71-74  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

## Introducción

Durante la madrugada del 10 de noviembre de 2003 se produce el desalojo de la Casa Azul de Calatayud ante la aparición de grietas y ruidos en la edificación. Tras el desalojo aparecerá un colapso en la calle Justo Navarro con unas dimensiones en superficie de 6x4 metros en el que aflora el nivel freático. Durante los días posteriores se procederá al rellenado de la cavidad aparecida, la realización de taladros en el sótano de la edificación y obras de recalce tanto en superficie como en profundidad. La cavidad aparecida respondía a la pro-

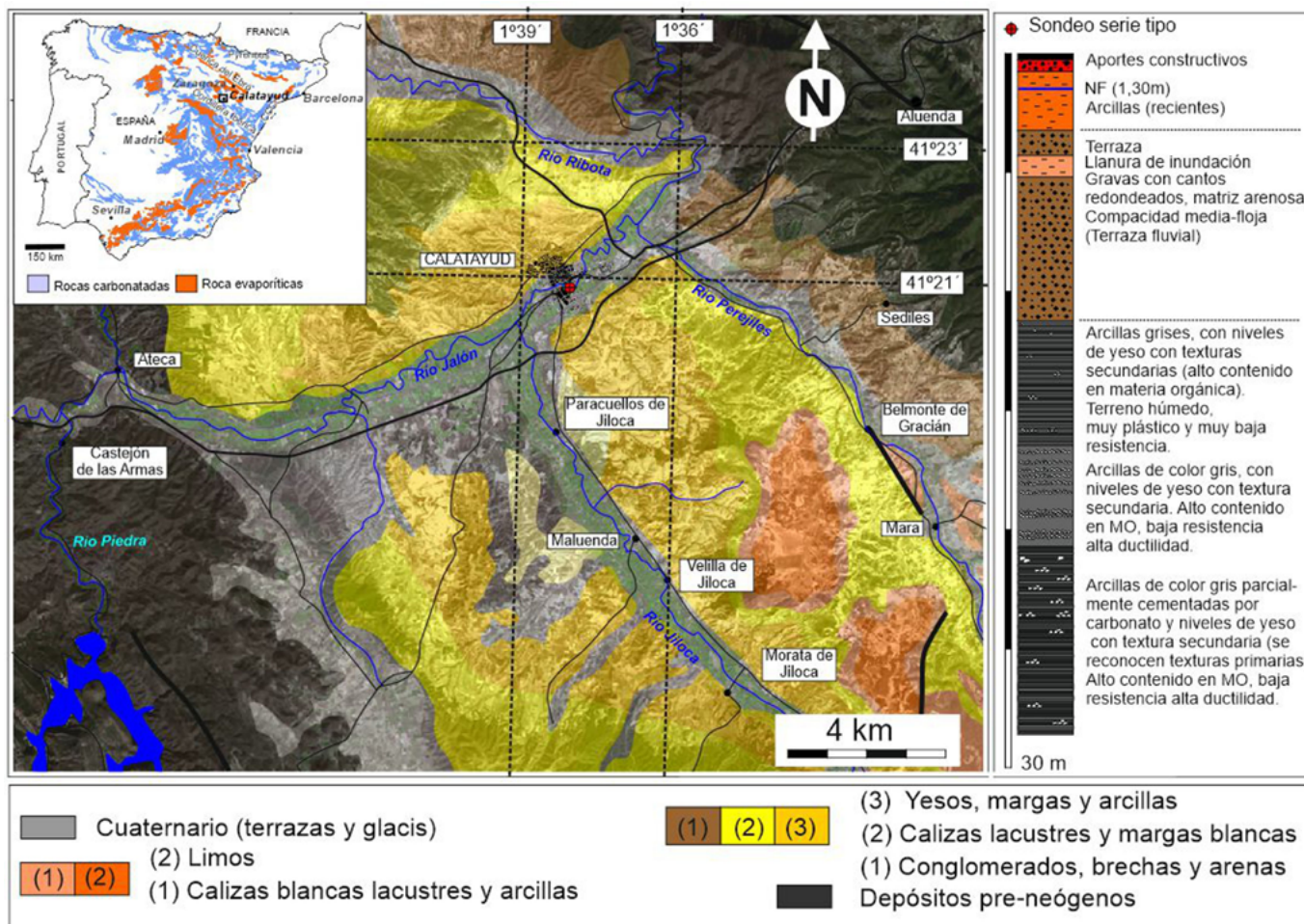
pagación lateral de una cavidad existente bajo la edificación que había alcanzado la calle anexa. Las actuaciones de recalce no conseguirían la estabilización completa y terminó decidiéndose el derribo de la edificación. El caso se judicializaría primero en reclamación al Consorcio de Seguros y posteriormente, en 2014, en responsabilidad a la administración. Con independencia de la tramitación administrativa y judicial, los firmantes de este artículo tuvieron la oportunidad de realizar una evaluación conjunta e integrada de una inusual cantidad de datos geológico-geotécnicos que fueron utilizados para la emisión de un dictamen solicitado por el Juzgado

## RESUMEN

El colapso ocurrido el 10 de noviembre de 2003 y que produjo el posterior derribo de la Casa Azul de Calatayud fue objeto de estudios encaminados a la identificación de la extensión de la cavidad original que lo originó, la búsqueda de soluciones que permitieran la estabilización del edificio, y la evaluación de los factores precondicionantes y detonantes del evento ocurrido. La revisión de dicha documentación, años después, permite realizar algunas consideraciones sobre la representatividad, significado y resultados obtenidos en dicho momento e inferir conclusiones para el desarrollo urbano futuro de la zona. Los resultados permiten identificar la contribución de la actividad paleokárstica en la pérdida de compacidad del material transicional substrato-cuaternario, la afección posterior a los materiales recientes localizados en su vertical y la extensión y origen del evento kárstico posterior que afecta a la serie previa de la zona. La amplia densidad de datos en la zona permite también realizar una evaluación de la representatividad de los resultados obtenidos por aproximaciones discretas y el interés de la retroalimentación entre ellos para definir campañas de caracterización geológico-geotécnica-geofísica en contextos de baja resistencia con procesos asociados de karst actual.

**Palabras clave:** karst, resistencia dinámica, colapso, geofísica, Calatayud.

Fecha de recepción: 31/01/2020  
Fecha de revisión: 23/04/2020  
Fecha de aceptación: 29/05/2020



**Fig. 1.- Mapa geológico del entorno de la ciudad de Calatayud con la serie tipo-geotécnica obtenida de uno de los sondeos analizados en este trabajo. Mapa general modificado de Ayala Carcedo et al. (1986), mapa geológico basado en Del Olmo et al. (1983) y Aragonés Valls et al. (1981). Ver figura en color en la web.**

*Fig. 1.- Geological map from the surrounding area of the city of Calatayud with the obtained geotechnical series from one of the analyzed boreholes in this work. General map modified from Ayala Carcedo et al. (1986), geological map after Del Olmo et al. (1983) and Aragonés Valls et al. (1981). See color figure in the web.*

### Contexto Geológico

La ciudad de Calatayud se encuentra en el sector central de la cuenca neógena de Calatayud, fosa de orientación paralela a la estructura de la Cordillera Ibérica, y que fue rellenada por depósitos aluviales y lacustres con un espesor de hasta 1200 metros de edad Mioceno-Plioceno (Sanz Rubio, 1999). Estos depósitos se distribuyen con rápidos cambios de facies desde los depósitos detríticos groseros en los bordes de la cuenca y dibujando anillos concéntricos de depósitos fluviales y evaporíticos hacia la zona central de la cuenca (Sanz Rubio, 1999). Las fases evaporíticas principales en el sector central de la cuenca se relacionan con depósitos de yeso, anhidrita, glauberita y halita. Estas unidades aparecen alternantes con niveles arcillosos y carbonatados. El análisis de dicha serie muestra la presencia de periodos de karstificación sinsedimentaria y actual. Estos depósitos rodean la ciudad de Calatayud y se encuentran en su subsuelo cubiertos

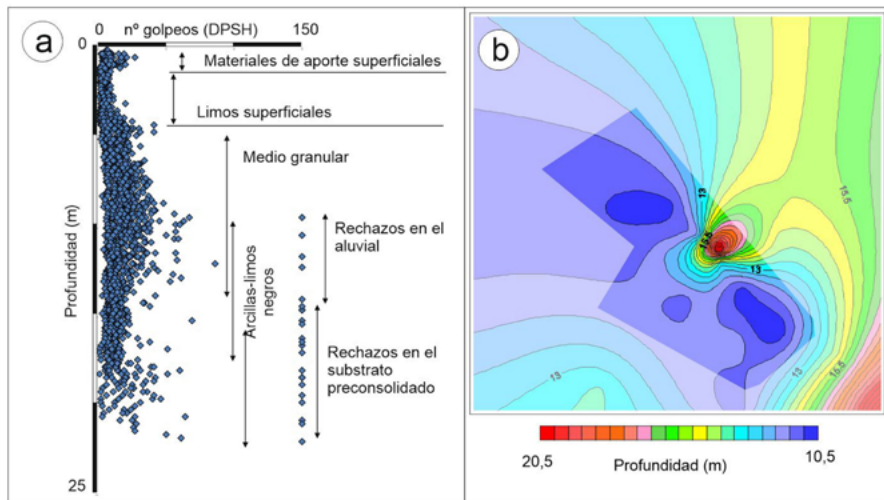
por depósitos aluviales (asociados principalmente a los cauces fluviales actuales) y a depósitos de abanicos recientes relacionados con los escarpes topográficos próximos, especialmente los localizados inmediatamente al N de la localidad (Fig. 1).

La alta densidad de ensayos se realizó tanto para la caracterización del colapso aparecido, la determinación de la extensión de la cavidad en el subsuelo como para la búsqueda de soluciones para estabilizar la edificación. Este análisis se realizó a través de: sondeos con recuperación continua, a destroza con testificación, taladros, ensayos de penetración dinámica y distintas técnicas de prospección geofísica (ver Fig. 2 como ejemplo).

A continuación se describe, de techo a muro, la serie geológico-geotécnica tipo identificada en los ensayos realizados fuera de la zona afectada por el colapso y similar a la serie vertical tipo del subsuelo de Calatayud (Fig. 1). En la parte más alta aparece una unidad de aportes constructivos y rellenos (habitual en ciudades como

Calatayud, con una prolongada historia de ocupación humana). Esta unidad descansa sobre depósitos fluviales, especialmente asociados a los niveles de terraza y de llanura de inundación, que pueden alcanzar espesores de entre 7 y 9 m. Estos depósitos descansan sobre una serie arcillosa-margosa con distinta contribución de evaporitas, laminada, con alto contenido en materia orgánica y, en general, con resistencia baja o muy baja. Esta unidad por correlación lateral y cota topográfica debería corresponder con la unidad inferior de Calvo et al. (1993), cuyo límite superior estuvo afectado por procesos de karstificación subaérea y que permite valorar la existencia de procesos de karstificación durante el Neógeno. No se identifica un gradiente claro de alteración, aunque hacia muro la serie va mostrando mayor contenido en evaporitas y una mayor conservación de la laminación y estratificación. Con independencia del origen de esta unidad, la resistencia de la misma en los ensayos de penetración dinámica es baja o muy baja.





**Fig. 2.- Datos disponibles previos para la evaluación de la zona de estudio que incluyen los sondeos, ensayos de penetración dinámica, datos de subsidencia instrumental posteriores al colapso (periodo 12/11/2003 a 04/02/2004), y localización de perfiles de georradar incluidos en la figura 4. Ver figura en color en la web.**

*Fig.2.- Available data for the evaluation of the study area including boreholes, penetration tests, instrumental subsidence after the collapse (period between 11/12/2003 to 02/04/2004), and the location of gpr profiles included in figure 4. See color figure in the web.*

## Evaluación de resultados

La serie obtenida muestra distintas unidades que pueden presentar cambios de resistencia asociados al origen, textura y estructura de los niveles. Una forma de evaluación integrada de los resultados obtenidos se recoge en la figura 3, donde se representan de forma conjunta los resultados obtenidos de los ensayos de

penetración dinámica DPSH realizados en la zona. La serie muestra (Fig. 3a) una unidad de aporte constructivo con golpes medios, una unidad de limos de baja resistencia, un medio granular asociado a la terraza fluvial con valores que pueden alcanzar el rechazo a la penetración, y un descenso posterior de la resistencia al entrar dentro de la unidad de arcillas-limos negros con yesos. La evaluación de dichos

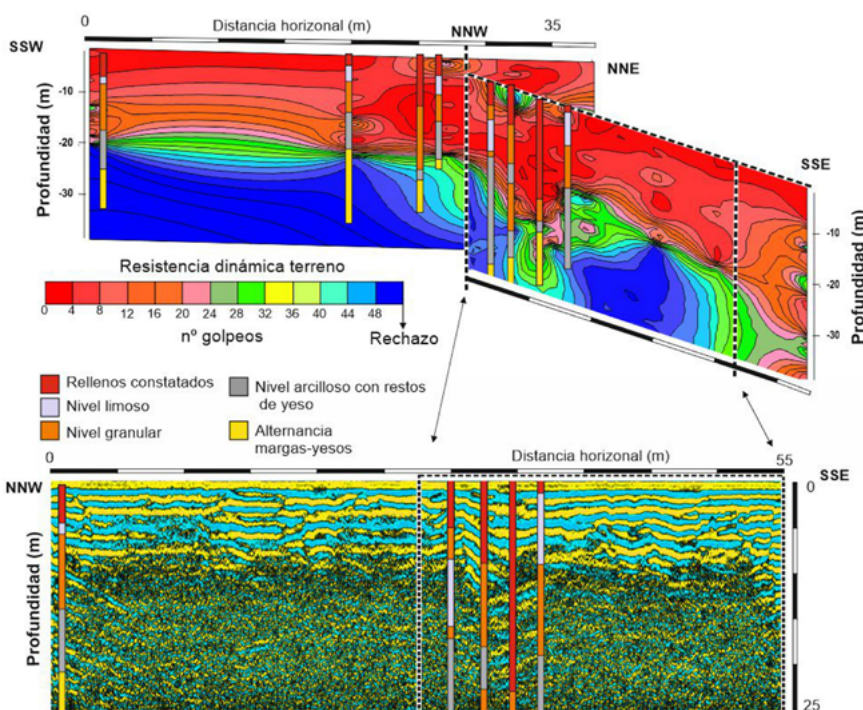
datos muestra la presencia de rechazos a la penetración que pueden aparecer en la unidad de rellenos superior, dentro de la unidad de terraza fluvial o dentro de la unidad preconsolidada inferior asociada al substrato neógeno de Calatayud.

Se incluye en la figura 3b una representación de la cota de la base del nivel granular de terraza. Este modelo muestra una disposición topográfica homogénea con una interrupción neta en el entorno del colapso ocurrido en 2003. Esto supone que la karstificación de la unidad inferior no ha afectado de forma significativa al espesor o estructura de la unidad granular y permite definir la base de dicha unidad como horizonte de referencia de sedimentación durante el Cuaternario.

Una aproximación para el análisis de la variación de la resistencia de las unidades existentes puede realizarse a través de la construcción de modelos de correlación lateral de resistencias dinámicas de los materiales (en este caso a partir de los datos de SPT de los distintos sondeos existentes en la zona). A partir de dichos modelos, se realizaron cortes de resistencia coincidentes con algunos de los perfiles de georradar realizados en la zona para poder realizar un análisis comparado entre ambas fuentes de información (Fig. 4).

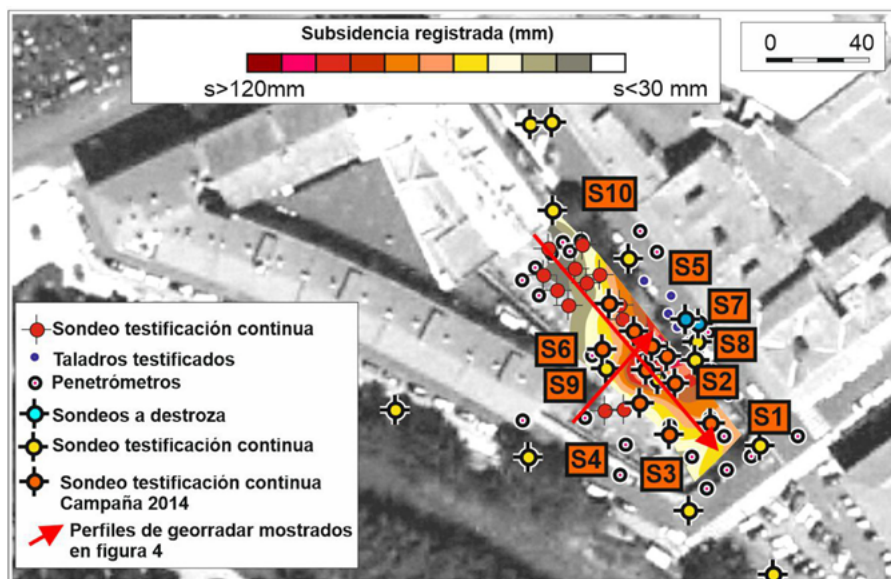
Los modelos de correlación muestran, como ocurría en el modelo de la figura 3b, una disposición de unidades subhorizontal y con cambios menores de la resistencia a lo largo de la zona. Al aproximarse a la zona del colapso de 2003, se identifica una ligera pérdida de resistencia que define una geometría de cambios laterales subverticales y una profundización repentina de los materiales de menor resistencia dibujando la geometría del colapso en la vertical de la edificación (inicio del perfil de orientación NNO-SSE de la figura 4).

El análisis comparado de los sondeos obtenidos, de los datos de resistencia y de uno de los perfiles de georradar (100 MHz) permite identificar la presencia de una estructura general horizontal, con pequeños cambios de la pendiente y una profundización repentina de la zona de menor resistencia identificada y que sigue a grandes rasgos los cambios del espesor del medio reflectivo en los perfiles de georradar. En este sentido, se identifica una distribución similar de resistencia de los materiales granulares superiores a lo largo de la zona, con valores en general bajos pero con correlación geométrica con el colapso existente, y un descenso de



**Fig. 3.- a) Representación conjunta de datos procedentes de los ensayos DPSH (prueba de penetración dinámica superpesada) y b) modelo de correlación de cota de la base de la unidad granular (terracea fluvial). Ver figura en color en la web.**

*Fig.3.- a) Joint representation from the DPSH essays (Dynamic Probing Super Heavy) and b) correlation model of granular terrace bottom level. See color figure in the web.*



**Fig. 4.- Correlación de resistencias dinámicas obtenidas en los sondeos realizados (SPT; ensayo de penetración estándar). Se incluyen superpuestos algunos de los sondeos localizados en la línea del perfil. Se incluye perfil de georradar (100 MHz) paralelo al modelo de resistencia previo (ver localización relativa en la figura). Ver figura en color en la web.**

*Fig.4.- Correlation model of dynamic resistance of SPT (standard penetration test). Some of the borehole logs coincident with the profile are also included. A GPR profile (100 MHz) parallel to the resistance model is also included (see relative location in the figure). See color figure in the web.*

resistencia en el entorno más proximal del colapso interpretable como asociado a la descompactación por migración de dicho material. El techo de la unidad del substrato (o la base de la unidad granular de terraza) muestra una distribución subhorizontal, con rechazo a la penetración o valores medios-altos en la mayor parte de la zona de estudio pero con un intervalo superior de baja resistencia y que presenta una profundización y pérdida de compacidad en el entorno del colapso. El sondeo realizado en la campaña de 2014 sobre el propio colapso permitió identificar la presencia de medios granulares hasta profundidades superiores a los 17 metros, y donde además, dichos materiales presentaban las características de aquellos depósitos vertidos durante las labores de rellenado de la zona. Un cálculo volumétrico de la geometría de la zona de profundización descrita a partir de la integración tridimensional de los datos de georradar y de ensayos ofrece un volumen mínimo de 269 m<sup>3</sup>, lo cual es similar a lo descrito como identificado durante el rellenado de la cavidad desde la calle anexa al edificio en 2003, con valores entre 150 y 350 m<sup>3</sup>.

## Conclusiones

La presencia de materiales de baja compacidad por debajo de unidades más rígidas y la presencia de karstificación previa a la sedimentación, en este caso

de los niveles granulares fluviales, puede producir la presencia de unidades de muy baja resistencia a la carga que pueden confundirse con evidencias de subsidencia relacionada con procesos kársticos actuales. El caso analizado muestra la presencia de una unidad con alto contenido en materia orgánica y presencia de evaporitas, que puede interpretarse como una unidad afectada por procesos kársticos pero sin propagación directa a la unidad superior (terracea fluvial), sobre la que se impone un proceso de colapso kárstico que genera una afección localizada, debido a la propagación de una cavidad (procedente de una profundidad superior a los 17 metros) y la descompactación del material próximo a ella.

Esto supone que sin la participación de procesos de subsidencia actual se pueden producir procesos de asentamiento y consolidación de dichas unidades ante la carga de edificaciones, y que puede explicar el origen de muchas de las patologías que afectan al casco urbano de la ciudad de Calatayud sin requerir un proceso de disolución activo actual en la zona.

Por otro lado, el análisis integrado de resistencia dinámica de materiales, perfiles geofísicos y de sondeos en la zona, permite refinar la aplicabilidad de estas metodologías integradas. Este análisis integrado puede permitir reducir el número de ensayos a desarrollar o que los que se realicen se hagan de forma contextualizada en función de

la integración de resultados y conocimiento geológico local de la zona de estudio.

## Agradecimientos

Esta investigación formó parte del Procedimiento Ordinario 285/12-J del Juzgado Contencioso Administrativo de Zaragoza y forma parte de los objetivos del Grupo de Investigación Geotransfer de la Universidad de Zaragoza-Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA). Los autores quieren agradecer los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos y el editor Manuel Díaz Azpiroz.

## Referencias

- Aragonés Valls, E., Hernández Samaniego, M., Aguilar Tomás, M.J., Ramírez del Pozo, J., García Alcalde, G.L., Arbizu Senosiain, M., Aguirre, E. y Hoyos, M. (1981). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja n° 409 (Calatayud) y memoria*. IGME, Madrid, 45 p.
- Ayala Carcedo, F.J., Rodríguez Ortiz, J.M., del Val Melús, J., Durán Balsero, J.J., Prieto Alcolea, C. y Rubio Amo, J. (1986). *Mapa del karst en España. Escala 1:1 000 000*. IGME. Madrid.
- Calvo, J.P., Daams, R., Morales, J., López-Martínez, N., Agustí, J., Anadón, P., Armenteros, I., Cabrera, L., Civis, J., Corrochano, A., Díaz-Molina, M., Elizaga, E., Hoyos, M., Martín-Suárez, E., Martínez, E., Moisset, E., Muñoz, A., Pérez García, A., Pérez González, A., Portero, J.M., Robles, F., Santisteban, C., Torres, T., Van der Meulen, A.J., Vera, J.A. y Mein, P. (1993). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 6 (3-4), 29-40.
- Del Olmo, P., Hernández, A., Aragonés, E., Gutiérrez, M., Puigdefàbregas, C., Giner, J., Aguilar, M.K., Leal, M.C., Gutiérrez, J.C., Gil, M., Adrover, R., Portero, J.M. y Gabaldón, V. (1983). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja n° 437 (Ateca) y memoria*. IGME, Madrid, 70 p.
- Gutiérrez, F. y Cooper, A.H. (2002). *Natural Hazards* 25, 259-288.
- Pueyo, Ó. y Pocoví, A. (2014). *Informe sobre la estructura del subsuelo del solar de la Casa Azul de Calatayud*. Informe inédito (procedimiento ordinario 285/12-J). 162 p.
- Sanz Rubio, E. (1999). *Análisis de los sistemas deposicionales carbonáticos y evaporíticos del Neógeno de la Cuenca de Calatayud (provincia de Zaragoza)*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 579 p.