



ARQUEOSISMOLOGÍA APLICADA: IDENTIFICACIÓN DE EFECTOS ARQUEOLÓGICOS DEL TERREMOTO DE LISBOA (1755) EN LAS ÁREAS CIRCUNDANTES A LA PLANTA PILOTO DE INYECCIÓN DE CO₂ EN HONTOMÍN (BURGOS, ESPAÑA)

Applied Archaeoseismology: identification of earthquake archaeological effects of the 1755 Lisbon earthquake in the surrounding areas of the pilot plant for CO₂ injection at Hontomín (Burgos, Spain)

M.A., Rodríguez-Pascua¹, J.F., Mediato¹, R., Pérez-López¹, R., Martínez Orio¹

(1) Instituto Geológico y Minero de España. C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003 – SPAIN. ma.rodriguez@igme.es; jf.mediato@igme.es; r.perez@igme.es; ro.martinez@igme.es

Resumen: la planta piloto de inyección de CO₂ de Hontomín (Burgos) es la única planta de inyección en tierra en Europa. Para el desarrollo de este tipo de plantas de inyección son necesarios los estudios de los posibles efectos de terremotos que puedan afectarles. La falta de estudios de neotectónica en esta zona de la meseta norte de España hace necesario obtener datos sobre terremotos antiguos en esta zona. Los efectos de campo lejano del terremoto de Lisboa en Burgos pueden contribuir al conocimiento del comportamiento sísmico del terreno en caso de la ocurrencia de eventos similares. Hemos seleccionado principalmente construcciones románicas para obtener la dirección media de movimiento del sustrato generada por el terremoto de Lisboa en esta zona. Los resultados preliminares indican una dirección media de movimiento NE-SO. Las trayectorias de deformación obtenidas son refractadas por las fallas principales de la zona, variando su orientación para disponerse perpendiculares a estas.

Palabras clave: Arqueosismología, Efectos Arqueosismológicos de Terremotos (EAEs), terremoto de Lisboa, almacenamiento de CO₂.

Abstract: the pilot plant for CO₂ injection at Hontomín (Burgos) is the only injection plant onshore in Europe. In the development of this type of injection plants it is necessary to study the effect of possible earthquakes that may affect it. The lack of neotectonic studies in this area of central Spain make necessary obtain data of ancient earthquakes that affected this territory. The far field effect of the Lisbon earthquake in Burgos can contribute to the knowledge on the ground behaviour in case of events of similar characteristics. We select the mainly Romanesque buildings to obtain the mean ground movement direction generated by the Lisbon earthquake in this area. The preliminary results show a mean direction of ground movement NE-SW. The strain trajectories are reflected by the main faults of the zone, varying its orientation to be oriented perpendicular to the main faults.

Key words: Archaeoseismology, Earthquake Archaeological Effects (EAEs), Lisbon earthquake, CO₂ storage.

INTRODUCCIÓN:

Según la actualización del mapa de peligrosidad sísmica de España (IGN, 2012) la zona donde se asienta la planta piloto de inyección de CO₂ de Hontomín (Burgos), tendría una aceleración sísmica estimada de 0.06 g para un periodo de retorno de 475 años. Para el caso de instalaciones de este tipo, es necesario tener un mayor conocimiento del fenómeno sísmico en el entorno, así como de la posible afección por terremotos de campo lejano. Esto hace que la arqueosismología sea una herramienta que nos permita conocer cuál es el comportamiento sísmico del terreno ante este tipo de eventos, máxime cuando la peligrosidad sísmica no predice la ocurrencia de grandes terremotos que superen estos periodos de retorno (Stein *et al.*, 2012). Por este motivo hemos seleccionado el terremoto de Lisboa (1755) por su afección a toda la Península Ibérica (Fig. 1) y Norte de África (además de detectarse efectos en toda Europa, Silva *et al.*, 2017). Para tener datos homogéneos se ha utilizado el rico patrimonio románico de la provincia de Burgos para estudiar los EAEs producidos por este

terremoto en estas construcciones. Además se han seleccionado construcciones de épocas anteriores y posteriores al románico pero siempre previas a 1755, que serán analizadas en futuras prospecciones.

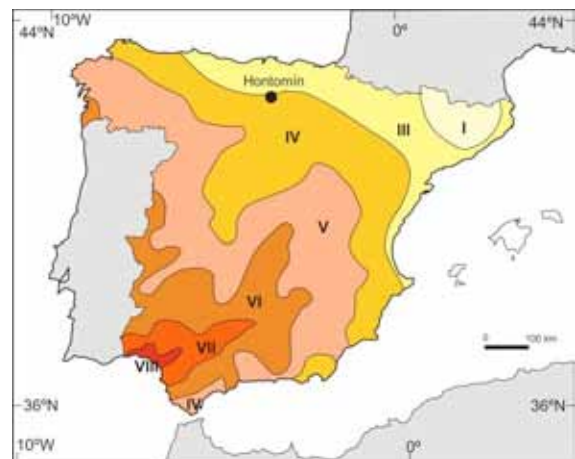


Figura 1: Situación de Hontomín sobre el mapa de isosistas del terremoto de Lisboa de 1755 (modificada de Martínez Solares, 2001).

Figure 1. Location of Hontomín over the isoseismal map of the 1755 Lisbon earthquake (after Martínez Solares, 2001).

EL TERREMOTO DE LISBOA EN BURGOS:

El terremoto de Lisboa del 1 de noviembre de 1755 ha sido el mayor terremoto que ha afectado a España en particular y Europa en general en tiempos históricos (Martínez Solares, 2001). Este terremoto no solo afectó a la población en un sentido físico, sino que cambió la forma de pensar con respecto al origen de los terremotos y provocó que se cimentasen las bases de la sismología moderna. El epicentro del terremoto aún es objeto de debate científico (Gutscher, 2005), aunque la posición aproximada parece claro que está al SW del Cabo de San Vicente, independientemente de la falla exacta que lo generó. La intensidad máxima de este terremoto es X (EMS-1998) (Martínez Solares y Mezcuca, 2002) localizándose en el sur de Portugal y entorno de Lisboa, pero con efectos importantes en el resto de la Península Ibérica. Algunos de estos efectos aún son visibles en nuestro patrimonio histórico, como iglesias y grandes catedrales. En el caso de la provincia de Burgos no hay mucha información al respecto, tan solo hay descripciones de efectos (Martínez Solares, 2001) en tres poblaciones en un anillo comprendido entre los 25 y 35 km alrededor de Hontomín: Burgos (25 km al S), Briviesca (25 km al E) y Frías (34 km al NE). En Burgos, por ejemplo, describen extrusiones de bloques de sillería: “Sólo en la Parroquia de San Lesmes se desgajó, y cayó, una piedra de sillería, de peso de un quintal...”. Hontomín se situaría aproximadamente en la isosista divisoria entre intensidad IV y III para este terremoto de Lisboa (Martínez Solares, 2001) (Fig. 1).

METODOLOGÍA:

Se ha realizado una toma de datos de las estructuras de deformación en el patrimonio, para posteriormente realizar una clasificación de los efectos utilizando la metodología propuesta por Rodríguez-Pascua *et al.*, (2011) para la clasificación de Efectos Arqueológicos de Terremotos (*Earthquake Archaeological Effects*, EAEs). La zona de estudio comprende dos áreas circulares con un radio de 10 (que contiene la estructura de almacenamiento) y 20 km (como zona de seguridad) respectivamente alrededor de la planta piloto de inyección de CO₂ de Hontomín (Fig. 2). El área de 10 km se ha analizado en detalle, mientras que la segunda ha servido para mejorar las condiciones de contorno del estudio y poder contextualizarlo en la geología regional de la zona. Una vez clasificados los EAEs es necesario realizar un análisis de los mismos con objeto de ver si son compatibles con una misma dirección de movimiento medio del sustrato. Para calcular las direcciones de movimiento del sustrato se han utilizado métodos de geología estructural clásica, con objeto de orientar los daños y las deformaciones producidas en el edificio (Giner *et al.*, 2011 y 2012). Esta metodología fue aplicada con éxito durante el terremoto de Lorca de 2011 (Giner *et al.*, 2012; Rodríguez-Pascua *et al.*, 2012), donde se obtuvieron trayectorias de deformación tanto a escala de toda la localidad como a escala de algunas de sus construcciones más emblemáticas como la Colegiata de San Patricio.

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica previa para localizar construcciones patrimoniales que

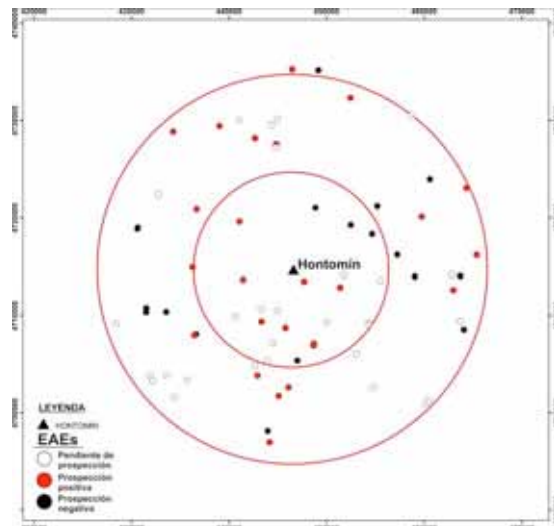


Figura 2: Radios para el estudio arqueosismológico alrededor de la planta piloto de inyección de CO₂ en Hontomín (Burgos) (10 y 20 km). Puntos blancos: con potencial de EAEs; Puntos negros: prospección negativa; Puntos rojos: prospección positiva.

Figure 2. Radial zones (10 and 20 km) around the pilot plant for CO₂ injection for the archaeoseismological study (Hontomín, Burgos). Prospection for EAEs: White dots (potential sites for EAEs); black dots (negative prospection); red dots (positive prospection).

podiesen albergar efectos del terremoto de Lisboa. Para lo cual se han agrupado en: prerrománicas, románicas (FSMR, 2002, Valle Barreda, 2009) y postrománicas previas a 1755. Este agrupamiento tiene como objeto homogeneizar al máximo los tipos constructivos a estudiar para que los resultados sean comparables entre poblaciones y construcciones. En dicha prospección se han localizado un total de 80 localidades con patrimonio pre-1755 con posibilidad de contener efectos de dicho terremoto, 21 de las cuales se encuentran dentro de un radio de 10 km entorno a Hontomín y 59 en un radio de 20 km (algunas localidades tienen varias construcciones pre-1755). En la primera campaña de campo realizada se han prospectado un total de 35 localidades en ambos radios, habiendo 23 resultados positivos y 12 negativos. En cuanto a elementos patrimoniales estudiados, se han localizado 27 construcciones con EAEs y 12 negativas o sin efectos visibles actualmente (Fig. 2). Algunos de estos resultados “negativos” son provisionales, ya que muchos de ellos se deben a la restauración de edificaciones que han podido borrar los EAEs que contenían. Por este motivo, se van a consultar los informes de restauración de las mismas por si en estos hubiese documentos gráficos o escritos donde se puedan identificar EAEs restaurados.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES:

En las 27 construcciones donde se han podido observar efectos del terremoto de Lisboa se han recopilado un total de 152 datos de EAEs. Y los EAEs medidos se clasifican en:

- Claves caídas de arco (Fig. 3): 51 datos.
- Fracturas penetrativas (Fig. 4): 46 datos.
- Esquinas fracturadas (*dipping broken corners*) (Fig. 5): 29 datos.

- Desplazamientos de bloques de sillería (Fig. 6): 16 datos.
- Basculamiento de muros: 6 datos.
- Contrafuertes girados: 3 datos.
- Muros plegados: 1 dato.



Figura 3: Clave caída en la torre del campanario de la iglesia románica de Ubierna (Burgos).



Figura 4: Esquinas fracturadas (*dipping broken corners*) en un contrafuerte del ábside de la iglesia románica de Quintana-Urria (Burgos).

Figure 4. *Dipping broken corner in a buttress in the apse of the Romanesque Quintana-Urria Church (Burgos).*



Figura 5: Fractura penetrativa en el muro oeste de la iglesia de Quintanilla-Sobresierra (Burgos).

Figure 5. *Penetrative fracture in masonry blocks in the west Wall of the Quintanilla-Sobresierra Church (Burgos).*

Estas deformaciones tendrían intensidades EMS98 superiores a VI. El desfase con respecto al mapa de la figura 1 se debe a que el patrimonio se ve excluido en los cálculos de intensidades para la EMS98. La orientación media obtenida para el total de los datos

es N012°E (Fig. 7). Se han elaborado las trayectorias medias de movimiento de sustrato para los datos distribuidos en las distintas poblaciones (Fig. 6) siguiendo una media NE-SW compatible con la posición del epicentro del terremoto de Lisboa (al SW del Cabo de San Vicente). Es interesante destacar que estas trayectorias varían su orientación al atravesar las principales fallas de la zona, como la fallas de Ubierna (Tavani *et al.*, 2011), Hontomín y Rumaceo, produciendo una refracción en las trayectorias que tienden a disponerse perpendiculares a estas fallas de entidad cortical (Fig. 7). Esta refracción podría deberse a que esta zona es el límite entre los depósitos detríticos de la Cuenca del Duero y los carbonatos de la Cordillera Cantábrica. También cabe destacar que la mayor concentración de puntos prospectados con resultado negativo (6 localidades) se encuentra en el cuadrante NE del radio de 10 km, muy posiblemente debido a el comportamiento del sustrato en esta zona, formado por margas y calizas lacustres vallesienses.



Figura 6: - Desplazamientos de bloques de sillería en uno de los contrafuertes del muro norte de la iglesia románica de Nidágula (Burgos).

Figure 6. *Displaced masonry blocks in a buttress of the north wall of the Romanesque Nidágula Church (Burgos).*

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto europeo ENOS: "ENabling Onshore CO2 Storage in Europe" en la convocatoria Horizonte 2020 (Project ID: 653718). Y con los proyectos EGE0 (IGME; Ref: 2612), CGL2015-67169-P (USAL), y es una actividad integrada en el grupo de trabajo QTECT-AEQUA.

Referencias bibliográficas

- FSMR, (2002). *La enciclopedia del Románico en Castilla y León. Burgos*. Ed. Fundación Santa María la Real. Aguilar de Campoo. 4 Tomos.
- Giner-Robles, J.L., Silva Barroso, P.G., Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., Bardají Azcárate, T., Garduño-Monroy, V.H., y Lario Gómez, J. (2011). *Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos. Aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI*. Serie Investigación. Fundación MAPFRE, 96 pp.
- Giner-Robles, J.L., Pérez-López, R., Silva, P.G., Rodríguez-Pascua, M.A., Martín-González, F. y Cabañas, L. (2012). *Análisis estructural de danos*

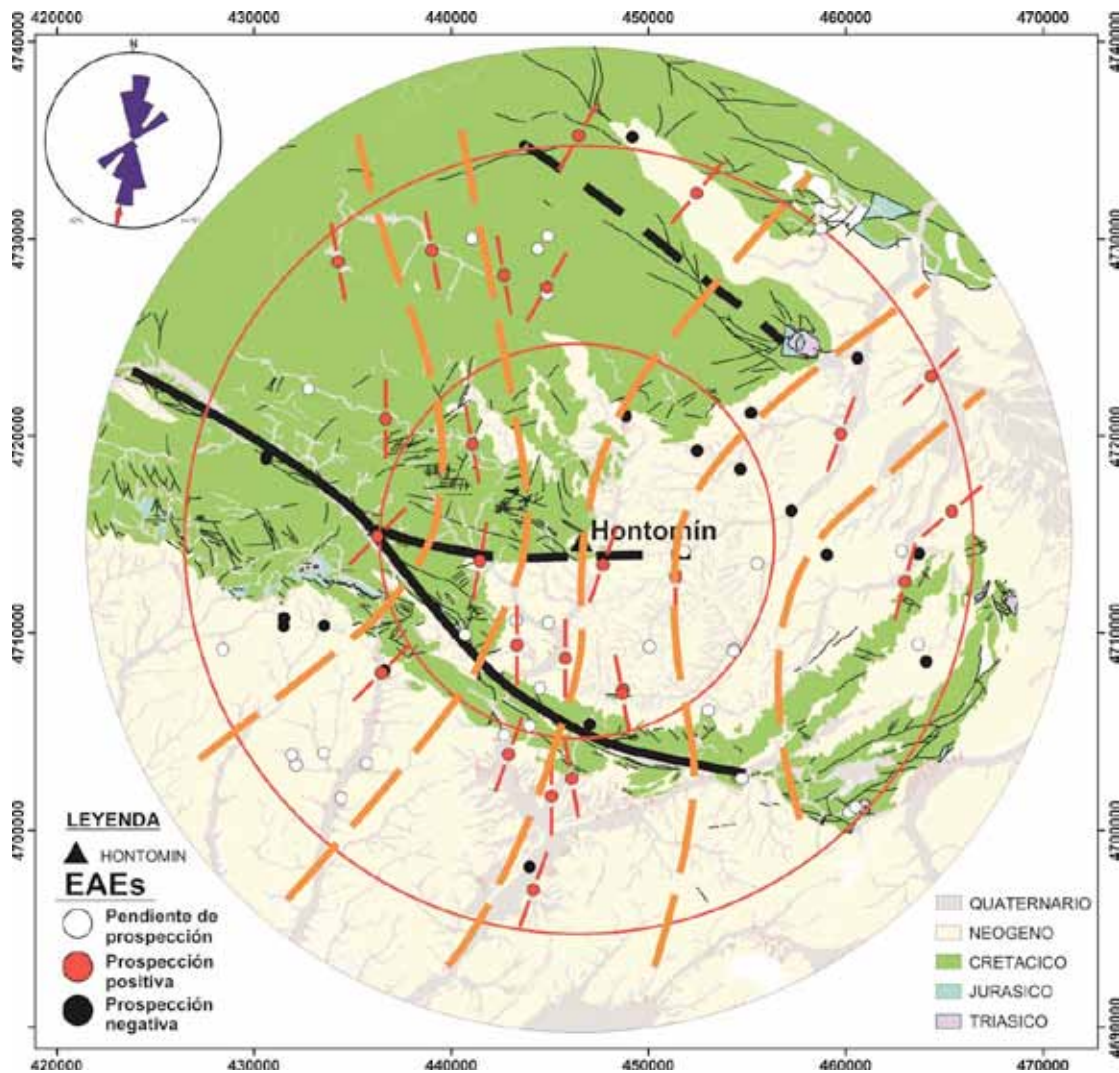


Figura 7: Distribución espacial de las estaciones de medida de datos de EAEs en el entorno al almacenamiento de Hontomin en relación con la geología (radios de 10 y 20 km). Se han representado las orientaciones de dirección media de movimiento del sustrato en cada punto de medida (líneas rojas) y las trayectorias medias (líneas discontinuas naranjas y rosa de direcciones) asociadas al terremoto de Lisboa.

Figure 7. Spatial distribution of measuring markers of EAEs in Hontomin surroundings (radius of 10 and 20 km). It is represented the orientation of mean ground movement (red lines) and the mean trajectories (dashed orange lines and rose diagram) associated to the Lisbon earthquake.

orientados en el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Aplicaciones en Arqueosismología. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (4), 503-513.

- Gutscher, M.A. (2005). What Caused the Great Lisbon Earthquake?. *Science*, 305: 1247-1248.
- Martínez-Solares, J.M. (2001). *Los efectos en España del terremoto de Lisboa*. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento. 756 pp.
- Martínez-Solares, J.M. y Mezcua, J. (2002). *Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a.C.-1900)*. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento. 253 pp.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Garduño-Monroy, V.H., and Reicherter, K., (2011). A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology. *Quaternary International*, 242: 20-30.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Martín-González, F., Giner-Robles, J.L. y Silva, P.G. (2012). Efectos arquitectónicos del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Neoformación y reactivación de efectos en su Patrimonio Cultural. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (4): 487-502.
- Silva, P.G., Elez, J., Giner-Robles, J.L., Gómez-Diego, P.V., Rodríguez-Pascua, M.A., Roquero, E., Martínez-Graña, A., Bardají, T. (2017). The AD 1755 Lisbon Earthquake-Tsunami: Modelling the seismic source from the analysis of environmental and building macroseismic data. In: *Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology*. Ed. Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited. Wellington (New Zealand). 348-351.
- Stein, S., Geller, R.J. & Liu, M. (2012). Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it. *Tectonophysics*, 562-563, 1-25.
- Tavani, S., Quintà and Granada, P. (2011). Cenozoic right-lateral wrench tectonics in the Western Pyrenees (Spain): The Ubierna Fault System. *Tectonophysics*, 509, 238-253.
- Valle Barreda, C. 2009. *Burgos, todo el románico*. Ed. Fundación Santa María la Real. Aguilar de Campoo. 592 pp.