

# Efectos arquitectónicos del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Neoformación y reactivación de efectos en el Patrimonio Cultural

M. A. Rodríguez-Pascua<sup>(1)</sup>, R. Pérez-López<sup>(1)</sup>, F. Martín-González<sup>(2)</sup>, J. L. Giner-Robles<sup>(3)</sup> y P. G. Silva<sup>(4)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

ma.rodriguez@igme.es, r.perez@igme.es

(2) Área de Geología. ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. C/Tulipán, s/n. Móstoles, 28933 Madrid.

fidel.martin@urjc.es

(3) Dpto. Geología. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. Cantoblanco. Tres Cantos. Madrid. España.

jorge.giner@uam.es

(4) Dpto. Geología. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad Salamanca. 05003 Ávila.

pgsilva@usal.es

## RESUMEN

Como consecuencia del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011 se produjeron una serie de deformaciones estructurales en los edificios del Patrimonio Cultural de esta ciudad. Dichos efectos arquitectónicos de terremotos (EAEs) han sido clasificados y tratados con métodos propios del análisis estructural geológico para obtener las direcciones del movimiento del terreno responsables de su génesis. También se han clasificado dos EAEs nuevos que completan la clasificación previa. Esta orientación de movimiento tiene una dirección media NO-SE. Se ha podido observar que EAEs generados durante el terremoto de Lorca de 1674 presentan características muy similares a las de los EAEs de 2011, obteniéndose las mismas orientaciones del movimiento en la horizontal. Algunas de estas estructuras se han movido en ambos terremotos, por lo que se deduce que fueron reactivadas con el terremoto de 2011. Esto podría indicar que fue el mismo segmento de la Falla de Alhama de Murcia (FAM), el Lorca-Totana el responsable de ambos terremotos que mostrarían características similares.

Palabras clave: análisis estructural geológico, deformaciones sísmicas orientadas, efectos arquitectónicos de terremotos (EAEs), reactivación de EAEs, terremoto de Lorca

## ***New and reactivated effects on the architectural heritage of Lorca caused by the May 2011 earthquake***

### ABSTRACT

*The earthquake of 11 May 2011 caused a series of structural deformations which affected the architectural heritage of the city of Lorca. We have classified and studied all these earthquake architectural effects (EAEs) according to the tenets of geological structural analysis to ascertain the direction of the movements responsible. We have furthermore identified two new EAEs which complete the previous classification. Accordingly, we were able to estimate the orientation of the maximum horizontal movement of the ground, which turned out to trend NW-SE on average. It was also clear that the deformations generated by the present earthquake shared very similar characteristics and even the same orientation of the maximum horizontal movement with those of the recorded earthquake of 1674. Most of these structures moved in a similar direction again during the 2011 earthquake, indicating that the Lorca-Totana segment of the Alhama de Murcia fault (FAM) triggered both and that both had similar values of seismic intensity, affected a very similar area and resulted in the same type of building damage and EAE orientation.*

*Key words: earthquake architectural effects (EAEs), Lorca earthquake, oriented seismic deformations, reactivated EAEs, structural geological analysis*

## ABRIDGED ENGLISH VERSION

**Introduction**

The seismic series of Lorca on 11 May 2011 began at 15:05 UTC (local time 17:05) with an earthquake of  $M_w = 4.6$  at 2 km in depth. At 16:47 UTC the main earthquake of  $M_w = 5.2$  took place at a depth of 3 km and 0.41 g of ground peak acceleration (<http://www.ign.es>), which caused serious damage in Lorca. The second earthquake resulted in the death of 9 people and injuries to 324 as well as leaving 20,000 homeless. The epicentre was located at the NE of the city of Lorca, very close to the Alhama de Murcia fault (FAM) (Martínez-Díaz et al., 2011, 2012) (Fig. 1). This trace of the FAM is known as the Lorca-Totana segment fault and was responsible for this earthquake. The earthquake generated different deformations affecting the architectural heritage of the city. In consequence we have collected the data concerning the earthquake architectural effects (EAEs) to the historic buildings using the classification proposed by Rodríguez-Pascua et al. (2011) (Fig. 2). This classification was created for use in archaeological sites and historic buildings to distinguish seismic effects from other causes. The geological tool used for this purpose was the analysis of seismic strain structures. All of these deformational structures have been classified and studied according to the tenets of geological structural analysis to estimate the orientation of the maximum horizontal movement of the ground. The initial hypothesis requires that most of the seismic damage must be oriented in relation to the seismic ground movement, and this allows us to compare oriented seismic data with unoriented non-seismic damage.

**The 2011 Lorca EAEs**

We recorded and compiled 127 EAEs obtained in 64 buildings affected by the earthquake in the historic centre of Lorca, where the streets still follow the same unoriented winding pattern as they did in Islamic times, unlike that of the Roman grid system. This lack of ordered orientation does in fact help our geological structural analysis in that it is not conditioned by the previous orientation of the streets. EAEs are classified on the basis of co-seismic, or primary, effects (Fig. 2), which can be divided into geological effects (i.e. rock falls) and damage to the building fabric (i.e. collapsed walls). This classification contains strain structures that are susceptible to analysis by classical techniques in structural geology. Therefore, it is possible to study both the kinematic and dynamic seismic behaviour of historic buildings. The EAEs work as a control group of seismic strength structures in that they indicate the present and future seismic behaviour of a historic building. The geological EAEs summarized in this work are: rock fall; fractures, folds and pop-ups on regular pavements (Fig. 3) and substratum compacting of artificial detrital infill (Fig. 4). The effects to the building fabric in Lorca were: shock breakout in flagstones (Fig. 3B); folded and tilted walls; penetrative fractures in masonry blocks; conjugated fractures in brick walls (Fig. 5); fallen and oriented columns and impact marks (Fig. 6); rotated and displaced masonry blocks in walls and drums in columns (Fig. 7); displaced masonry blocks (Fig. 8); fallen voussoirs in arches or lintels in windows and doors (Fig. 9); folded steps and kerbs; collapsed walls; collapsed vaults (Fig. 10) and; dipping broken corners. After the geological structural analysis of these strain structures, we arrived at a congruent solution for all the EAEs. The average direction of ground movement generated by the 2011 earthquake was NW-SE. Therefore, the seismic effects in buildings were oriented in this direction and this criterion can be used in archaeological sites to identify ancient earthquakes and distinguish them from non-seismic effects in the ruins. The 2011 Lorca earthquake has corroborated this approach, developed in archaeological sites damaged by earthquakes with no seismological data (Giner-Robles, et al., 2009 and 2011).

**EAEs generated by the 1674 earthquake and reactivated by the 2011 earthquake**

The EAEs produced by the historic earthquake of 1674 are still visible in Lorca, in the Collegiate Church and City Hall, for example. Our work has been focused upon the effects in the Collegiate Church because information concerning the earlier earthquake is available in the municipal historic archives. The 1674 earthquake (N055°E) displaced masonry blocks in the walls of the main nave; the shear direction of this movement was perpendicular to these walls, the same direction as that revealed by the 2011 earthquake data (Fig. 11). One of the most important effects observed in the Collegiate Church are the dipping corners broken by the 1674 earthquake, which were reactivated by the 2011 earthquake (Fig. 12). The orientation of the maximum horizontal movement obtained from the analyses trended NW-SE on average in both earthquakes. This maximum horizontal movement was used to calculate trajectories of movement/strength in the Collegiate Church (Fig. 13). These trajectories showed an overall NW-SE direction, congruent with the average values of N150°E calculated for the EAEs in Lorca city centre (Fig. 14). The rose diagram calculated from the accelerometer located in the City Hall in the city centre showed the same direction of movement (Fig. 14). Therefore, the direction of movement calculated from the EAEs by geological structural analysis was the same as that recorded by the accelerometer located at Lorca city centre.

### Discussion and Conclusions

We have observed that the deformations generated during the 1674 earthquake were very similar in character and even showed the same orientation of maximum horizontal movement (NW-SE) as the 2011 quake and thus most of the earlier deformations had been renewed by the recent seismic event. This may well indicate that the Lorca-Totana segment of the Alhama de Murcia fault (FAM) triggered both earthquakes as the seismic intensity of both was similar, they affected the same area to great degree, and caused a similar type of building damage and EAE direction. The EAE data close a seismic cycle of 337 years in the Lorca-Totana segment fault. This kind of analysis complements the information obtained from palaeo-seismological data, particularly when the earthquakes did not produce surface ruptures ( $M < 6$ ) as in this case. The EAEs and the geological structural analysis of these deformations proves to be a useful tool for studying the behaviour of historic buildings during seismic events and can help in the restoration and prevention of such effects in our cultural heritage. It is more than likely that the next earthquake in the Lorca-Totana segment will lead to similarly oriented damage. If we suppose a theoretical church oriented NE-SW, perpendicular to the main ground direction of movement, and this church is affected by a similar earthquake generated by the same fault the effects will be much the same (Fig. 15). The most significant damage will be produced in the walls running parallel (NW-SE) to the main movement. The EAEs that appear in these walls will be conjugated fractures, fallen voussoirs in arches and so on. (Fig. 15). In the walls running NE-SW the damage will be less than in the NW-SE walls. The EAEs in these walls will be horizontal fractures, and their tilting and complete collapse if they are unconnected to the main body of the building (Fig. 15). This kind of method and the data it affords could be integrated into the national preventive plans to prevent seismic damage to architectural heritage.

### Introducción

La serie sísmica de Lorca del 11 de mayo de 2011 comenzó a las 15:05 UTC (hora local 17:05) con un terremoto de Mw 4,6 (2 km de profundidad), A las 16:47 UTC ocurrió el terremoto principal, que alcanzó una magnitud Mw 5,2 (3 km de profundidad) que produjo importantes daños en dicha localidad al alcanzarse aceleraciones pico (PGA) que llegaron a los 0,41g (IGN, 2012). Muchos de estos efectos dañaron de forma considerable el patrimonio cultural de Lorca, así como viviendas y edificios públicos (IPCE, 2012). El terremoto causó 9 víctimas mortales, 324 heridos, más de 20.000 desplazados y daños en el 80% de las construcciones. El epicentro del terremoto se situó al NE de Lorca, muy cerca de traza de la Falla de Alhama de Murcia (FAM) (Martínez-Díaz *et al.*, 2011, 2012). Estos datos apuntan a que el segmento Lorca-Totana de dicha falla fue el responsable de este terremoto, que tiene un mecanismo focal inverso direccional, coherente con la cinemática de la FAM (Martínez-Díaz *et al.*, 2012; Ortuño *et al.*, 2012) (Fig. 1).

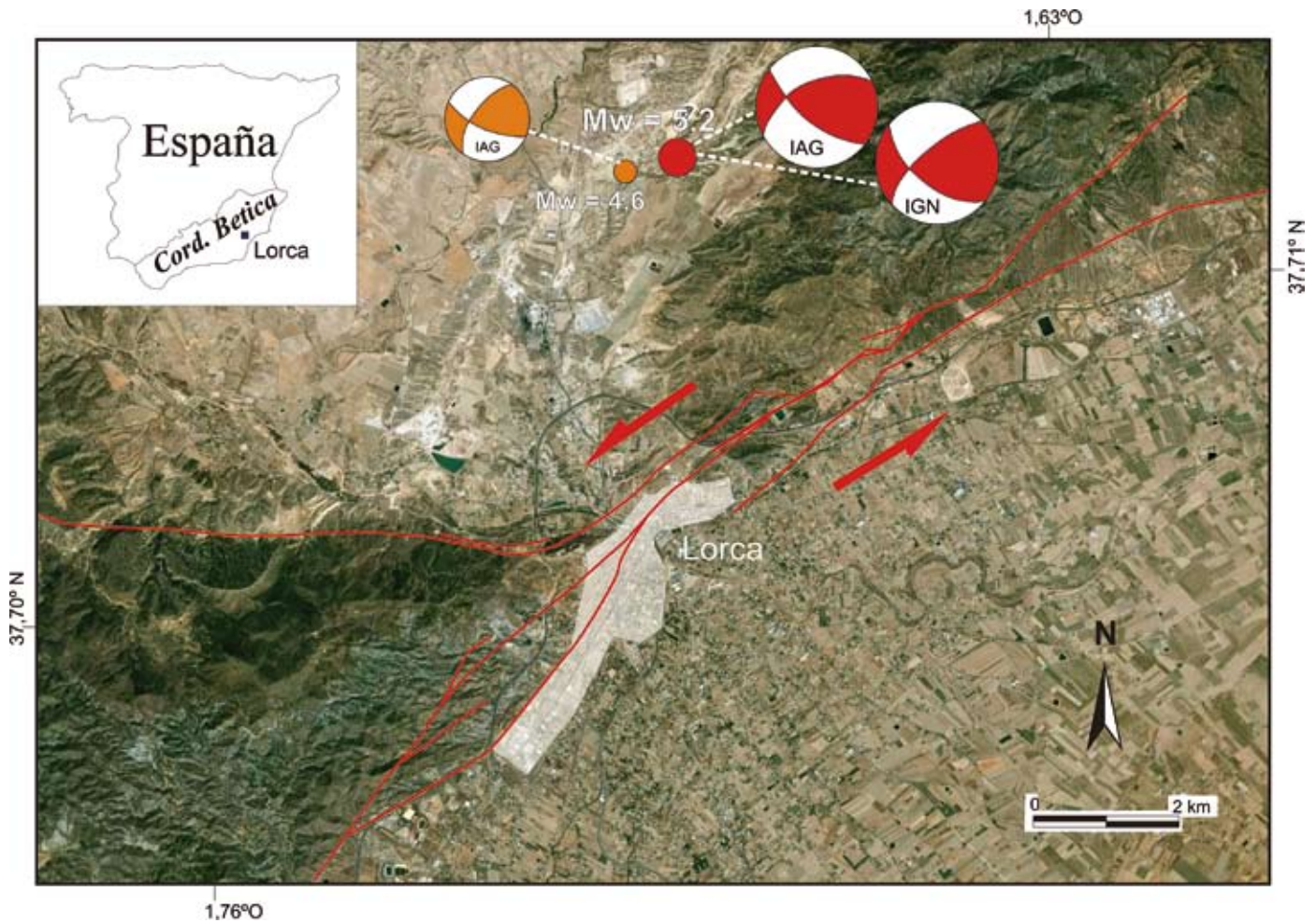
En este trabajo se han recopilado y clasificado los datos correspondientes a los *efectos arquitectónicos de terremotos* (*Earthquake Architectural Effects*) según la clasificación propuesta por Rodríguez-Pascua *et al.* (2011). En la actualidad el término de efectos arquitectónicos vs arqueológicos está sujeto a debate en lo referente a construcciones antiguas. En este trabajo se propone el término "arquitectónico" para efectos producidos por terremotos instrumentales y el de arqueológicos para el resto. Esta distinción se basa en la legislación española, que considera res-

tos arqueológicos aquéllos con más de 70 años de antigüedad, pero como esta legislación varía a nivel internacional, se propone la barrera temporal de la creación del sismógrafo, y por ende de la sismicidad instrumental, para utilizar un término u otro. De este modo se utilizará indistintamente el acrónimo EAE, tanto para los efectos arqueológicos (*Earthquake Archaeological Effects*) como para los arquitectónicos (*Earthquake Architectural Effects*).

En este estudio se han definido dos EAEs nuevos que completarán la clasificación de EAEs propuesta por Rodríguez-Pascua *et al.* (2011). Así mismo, se ha realizado una estimación de las direcciones de movimiento del terreno, calculadas mediante análisis estructural geológico de los EAEs (Giner Robles *et al.*, en este mismo volumen). La mayoría de estos datos fueron tomados durante las primeras 96 horas después del terremoto.

La observación de EAEs asociados a terremotos instrumentales permite aplicar el *principio del actualismo* para poder extrapolar estos datos al pasado arqueológico. Mediante el estudio de los EAEs se pueden inferir terremotos no registrados históricamente y, además, se puede conocer cual será el comportamiento de nuestro patrimonio histórico ante futuros terremotos. Por tanto, los objetivos de este trabajo se centran en: 1) Recopilación y clasificación de EAEs en el Patrimonio Cultural de Lorca tras el terremoto de 2011; 2) estudio de EAEs en la Colegiata de San Patrio, tanto del terremoto de 1674 como del de 2011.

La clasificación de EAEs propuesta por Rodríguez-Pascua *et al.* (2011) se creó para poder clasificar estructuras de deformación sísmica en construcciones



**Figura 1.** Situación geográfica de la ciudad de Lorca (España) y traza superficial de la Falla de Alahama de Murcia (FAM). Los puntos coloreados son la proyección de los dos terremotos más importantes de la serie sísmica de Lorca con los mecanismos focales calculados por diferentes agencias: Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Instituto Andaluz de Geofísica (IAG) (López-Comino *et al.* 2012).

**Figure 1.** Geographic location of Lorca (Spain) and cartographic drawing of the Alhama de Murcia fault (FAM). The coloured dots are the projection of the two major earthquakes of the Lorca seismic series and the focal mechanisms calculated by different agencies: Instituto Geográfico Nacional (IGN) and Instituto Andaluz de Geofísica (IAG) (López-Comino *et al.*, 2012).

antropicas y yacimientos arqueológicos en función de su origen, que permitan discriminar su génesis sísmica frente a otras posibilidades. Para poder llevar a cabo esta diferenciación se tomó como hipótesis de partida la orientación de daños sísmicos, de tal manera que estos no aparecen dispersos, sino que su orientación depende de la dirección de movimiento del terreno durante el terremoto. La direccionalidad de las deformaciones se estudiaron tomando como ejemplo el yacimiento arqueológico de la ciudad romana de Baelo Claudia (Cádiz), obteniéndose claros patrones de deformación orientados (Silva *et al.* 2009; Giner-Robles *et al.*, 2009, 2011), pero faltaban los datos instrumentales o paleosismológicos que permitiesen asignar un área epicentral a este terremoto. El terremoto de Lorca se presenta como una oportunidad para poder validar esta metodología y comprobar si

los EAEs presentan claros patrones de deformación orientados o si por el contrario se muestran como direcciones caóticas.

### EAEs del terremoto de Lorca de 2011

Para este trabajo se han medido 127 EAEs recopilados en 64 edificios dentro del casco histórico de la ciudad de Lorca. Esta parte de la ciudad presenta un trazado irregular de calles según todas las orientaciones posibles, característico de trazados urbanos de época islámica en España. Esto hace que las medidas tomadas en las edificaciones tengan un menor condicionante por la orientación del trazado urbano, mejorando los resultados al disminuir la influencia de anisotropías previas.



La clasificación de EAEs se basa en los efectos producidos durante el terremoto, considerados como efectos cosísmicos o primarios, y en los efectos posteriores al terremoto o postsísmicos. En el caso de Lorca, los EAEs clasificados corresponden a efectos cosísmicos (Fig. 2), entre los que se pueden diferenciar efectos asociados a fenómenos geológicos, como caídas de bloques de roca sobre construcciones, y efectos asociados a la fábrica de los edificios. Entre estos últimos se pueden diferenciar a su vez los EAEs que están relacionados con la deformación permanente del sustrato y los EAEs producidos por la deformación transitoria del sustrato al paso de las ondas sísmicas (Fig. 2).










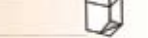
De los 27 efectos cosísmicos propuestos por la clasificación de Rodríguez-Pascua *et al.* (2011) se han podido observar un total de 18 tipos distintos de EAEs. Se han identificado dos nuevos EAEs, uno corresponde a compactaciones de rellenos antrópicos y el otro a extrusiones de claves de arco, que completan la clasi-

ficación propuesta por Rodríguez-Pascua *et al.* (2011). A continuación realiza una síntesis de estos EAEs, utilizando los ejemplos más claros en el patrimonio histórico de Lorca.

Esta clasificación de EAEs contiene estructuras susceptibles de poder ser analizadas mediante técnicas de análisis estructural geológico. De este modo, se puede estudiar la cinemática y dinámica de la construcción frente al movimiento sísmico. Por tanto, estos EAEs sirven como "testigos" del movimiento del edificio e indican cual ha sido y será el comportamiento de la construcción ante un terremoto.

### Efectos geológicos

**Caída de Bloques:** este fenómeno se ha observado principalmente asociado a las laderas del Castillo de Lorca en el que los bloques llegaron a afectar a las casas que se asientan al pie de esta ladera. Se pudieron

<b>EFFECTOS ARQUITECTÓNICOS DE TERREMOTOS (EAE)</b>	<b>I. EFFECTOS COSÍSMICOS PRIMARIOS (EFFECTOS DIRECTOS)</b>	<b>EFFECTOS GEOLÓGICOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caída de bloques</li> <li>- Fracturas y pliegues en enlosados regulares</li> <li>- Compactación de sustratos y rellenos antrópicos</li> </ul>	  
		<b>EFFECTOS EN LA FÁBRICA DE LOS EDIFICIOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impactos entre el enlosado</li> <li>- Muros basculados</li> <li>- Muros Plegados</li> </ul>	  
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fracturas penetrativas en bloques de sillería</li> <li>- Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo</li> <li>- Columnas caídas y orientadas</li> <li>- Giros en bloques de sillería y columnas</li> <li>- Bloques de sillares desplazados</li> <li>- Claves de arco desplazadas</li> <li>- Escalones y líneas de bordillo plegadas</li> <li>- Muros colapsados</li> <li>- Bóvedas colapsadas</li> <li>- Marcas de Impacto</li> <li>- Esquinas fracturadas</li> </ul>	          	

**Figura 2.** Tabla de clasificación de Efectos Arquitectónicos de Terremotos (Earthquake Architectonical Effects, EAEs) inventariados en construcciones del patrimonio cultural de la Ciudad de Lorca. Modificado de Rodríguez-Pascua *et al.* (2011). Los asteriscos marcan los EAEs nuevos definidos por primera vez en el terremoto de Lorca de 2011.

**Figure 2.** Earthquake architectural effects (EAEs); a classification chart of the architectural heritage damaged by the Lorca earthquake (after Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011). Asterisks indicate the new EAEs first generated during the Lorca earthquake of 2011.

documentar tanto el impacto directo de los bloques sobre las construcciones como impactos sobre el pavimento, que llegó a generar cráteres de impacto y grietas asociadas.

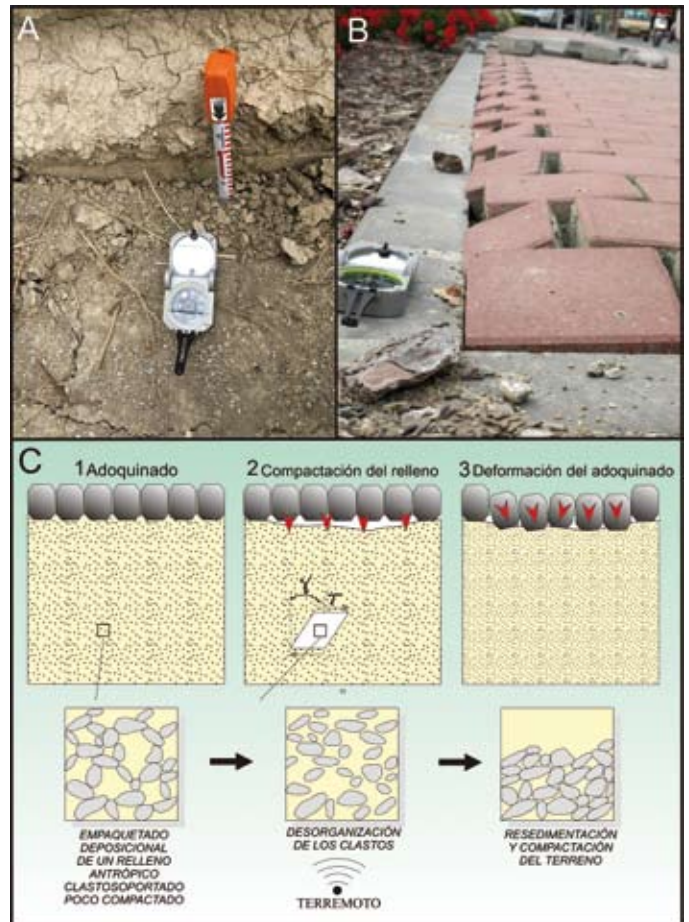
**Fracturas y pliegues en enlosados regulares:** estos EAEs se han podido constatar en diferentes localizaciones de la ciudad de Lorca, siendo un buen ejemplo los encontrados en los pavimentos del entorno de las calles de la Tercera Edad (Fig. 3A) y del Convento de las Clarisas. En la figura 3A se puede observar un pliegue de dirección N050°E indicando un acortamiento del enlosado de dirección N140°E. Estos pliegues están condicionados por la anisotropía previa que supone el trazado regular de las baldosas, por lo que es necesaria la medida estadística de estas estructuras para obtener un valor medio de su orientación.

**Compactación de sustratos y rellenos antrópicos:** las compactaciones de rellenos antrópicos se producen por la reorganización de la fábrica clástica de estos rellenos poco compactados y sin presencia de agua (Fig. 4). Este fenómeno genera fracturación en superficies de arenas compactadas y pliegues en pavimentos adoquinados. En algunos casos se han llegado a medir hasta 18 cm de hundimiento. En ambos casos las orientaciones de estas estructuras están condicionadas por las orientaciones de las construcciones antrópicas, por lo que no pueden ser utilizadas para el cálculo de las direcciones preferentes de movimiento del terreno.



**Figura 3.** A) Pliegues en enlosados regulares indicando una dirección de acortamiento N140°E; B) marca de impacto en el enlosado con una dirección de acortamiento N 175°E. Las flechas rojas indican las direcciones de acortamiento.

**Figure 3.** A) Fold in pavement flagstones deformed by N140°E shortening. B) Shock breakouts in flagstones caused by N175°E shortening. The shortening directions are indicated by red arrows.



**Figura 4.** Compactación sísmica de rellenos detríticos antrópicos en ausencia de agua: A) hundimiento de 16 cm en rellenos en su confluencia con la Calle de Juan Carlos I; B) plegamiento de adoquinados asociados compactaciones en el Convento de las Clarisas y C) esquema sintético de la génesis de compactaciones de rellenos detríticos antrópicos en ausencia de agua.

**Figure 4.** Seismic compaction of anthropic infillings in dry conditions: A) subsidence of 16 cm in artificial infillings in Santa Clara Street at its junction with Juan Carlos I Street; B) fold in paving stones related to seismic compaction in the Las Clarisas monastery; C) sketch of the origin of seismic compaction in dry conditions.

### Efectos en la fábrica de los edificios

A continuación se describen tres EAEs asociados a deformaciones generadas por deformación permanente del sustrato.

**Impactos entre el enlosado:** este efecto corresponde a marcas de impacto al chocar las baldosas entre sí. En la figura 3 B se puede observar un impacto entre baldosas marcando una dirección de impacto según los N175°E. Los impactos entre baldosas son un buen indicador cinemático, a pesar de la anisotropía que representan los límites regulares de las baldosas, ya que pueden aparecer tanto en los bordes de la baldosa como en las esquinas, disminuyendo el condi-



cionante previo que supone la anisotropía del trazado regular del enlosado.

*Muros basculados y plegados*: un ejemplo representativo de este EAE se encuentra en los restos del antiguo Puente del Oro, donde existe un claro basculamiento y basculamiento del eje del pliegue de un paño de muro hacia los N220°E. El eje del pliegue tiende a la vertical, con un ángulo máximo con respecto a la horizontal de 85°. Esto provoca la apertura de una grieta en la junta con el muro oblicuo, llegando a tener 12 cm de apertura en la parte más alta.

El siguiente grupo de EAEs corresponden a efectos asociados la deformación transitoria del sustrato que afecta a la fábrica de las construcciones.

*Fracturas penetrativas en bloques de sillería*: esta estructura no marca direcciones de desplazamiento por si sola, pero se puede utilizar en combinación con muros basculados y plegados y desplazamientos en bloques de sillería, indicando en este caso las direcciones de apertura. Esta estructura se ha localizado en todas las construcciones de sillería importantes en Lorca, como es el caso de la Colegiata de San Patricio y de las iglesias de Santiago, del Paso Azul, del Paso Blanco, del Carmen, etc. También se ha observado en edificios recientes como en la portada de sillería del hoy derruido Instituto de Bachillerato Ramón Arcas Meca, del que se ha conservado dicha portada.

*Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo*: Este es uno de los marcadores cinemáticos más fiables, indicando la dirección de los esfuerzos de cizalla alternantes que forman estas fracturas. Es uno de los EAEs que más abundan y se han localizado tanto en edificios históricos como recientes. El caso más representativo es el del Convento de las Clarisas, seriamente dañado por el terremoto y parcialmente demolido en la actualidad. En la figura 5A se puede observar el desarrollo de estas fracturas en el muro de la fachada del edificio de habitación del convento, cuya dirección es N150°E, siendo esta la dirección principal de movimiento del terreno en este edificio. En la figura 5B, se pueden ver estas mismas fracturas en una de las caras de uno de los edificios del huerto del convento con fracturas horizontales en el muro perpendicular. Las fracturas conjugadas de este muro tienen la misma dirección que la citada anteriormente. El movimiento alternante en esta dirección hace que los muros perpendiculares a ésta no se deformen desarrollando fracturas conjugadas, sino fracturas horizontales que suelen generarse en los límites entre plantas, asociadas a la anisotropía previa que suponen los planos horizontales de los solados. En la figura 5C se representa un esquema interpretativo de los movimientos de cizalla orientados a los que tiene que ser sometido un edificio para



**Figura 5.** Fracturas en los muros del Convento de las Clarisas: A) fracturas conjugadas en un muro de orientación N150°E; B) fracturas conjugadas en muros N150°E y paralelas a la horizontal en muros perpendiculares, y C) esquema sintético de la génesis de fracturas conjugadas debido a los esfuerzos de cizalla cíclicos generados por el paso de ondas sísmicas superficiales.

**Figure 5.** Fractured walls in the Las Clarisas monastery: A) conjugated fractures in a wall oriented N150°E; B) horizontal fractures in walls oriented N060°E and conjugated fractures in perpendicular walls; C) sketch of conjugated fractures generated by seismic surface cyclic shear stress.

formar estas fracturas. Los muros que son paralelos al movimiento desarrollan las fracturas conjugadas, mientras que en los que son perpendiculares se generan fracturas horizontales.

**Columnas caídas y orientadas y marcas de impacto:** a no ser que las columnas tengan limitaciones de caída, los grados de libertad frente al movimiento de estas son máximos, por lo que las columnas son excelentes indicadores de dirección y sentido de movimiento del terreno. En la figura 6 se observan un conjunto de columnas caídas hacia los N330°E. En este caso presentan una limitación previa al movimiento que es la balaustrada que la sustenta en la parte superior, pero que marcan el sentido de caída medio hacia el NO. Las columnas de paños de la balaustrada perpendiculares o a 45° de esta dirección sufrieron pliegues, pero no llegaron a sufrir colapsos, siendo compatibles con la dirección de movimiento del sustrato NO-SE. Otros marcadores que nos indican dirección y sentido son estatuas, pináculos y elementos decorativos situados en las cornisas de los edificios. El mejor ejemplo lo encontramos en los pináculos que rodean la torre del campanario de la Colegiata de San Patricio, que fueron proyectados hacia los N340°E produciendo rotura de las cubiertas y marcas de impacto en el interior del edificio (De la Hoz, 2012).

**Giros en bloques de sillería y columnas:** los giros en los tambores de columnas, monolitos, estatuas, etc, son consecuencia de movimientos en la vertical que generan el salto de las piezas y una recolocación en la caída. Por este motivo, no se pueden utilizar como marcadores de movimientos en la horizontal, pero son unos excelentes testigos de actividad sísmica pasada, puesto que estos movimientos solo se

pueden generar por esta causa. Se han observado en multitud de elementos del patrimonio cultural siendo muy característicos los encontrados en los pináculos de la Colegiata de San Patricio (Fig. 7A) y en la Iglesia de San Mateo (Fig. 7B), mostrando sentidos de giro opuestos, en sentido diestro y siniestro respectivamente. En ambos casos se puede calcular la dirección de movimiento del sustrato al poderse observar "*dipping broken corners*" o esquinas fracturadas, que nos marcan la dirección de oscilación del pináculo antes del giro. En ambos casos la dirección de oscilación fue NO-SE (quedan marcados con flechas rojas en la figura 7).

**Bloques de sillería desplazados:** este EAE es un buen marcador cinemático, sobre todo cuando los bloques de sillería se encuentran en las esquinas de las construcciones, donde sus grados de libertad para el movimiento aumentan. Estos desplazamientos pueden llegar a marcarnos el vector de desplazamiento (dirección, sentido y magnitud), como es el ejemplo de la Torre del Espolón del Castillo de Lorca (Fig. 8A). En la estancia superior de la torre se puede observar el vector de desplazamiento que generó la fractura principal que afectó a esta construcción en su esquina NO. Este desplazamiento es claro en la basa de la columna que hay embutida en la esquina NO de la sala superior donde se puede medir un desplazamiento de 16 cm hacia los N235°E (Fig. 8A). A 4 km al SO del casco histórico de Lorca (tomando como centro la Colegiata de San Patricio) se encuentra el Cementerio de San Clemente, donde hubo importantes daños en la arquitectura funeraria del mismo, observándose desplazamientos de bloques de sillería que marcan una dirección de movimiento según los N125°E (Fig. 8B), con desplazamientos máximos de 5 cm. También se documentaron caídas de pináculos y elementos decorativos hacia los N300°E con marcas de impacto en el enlosado y en las barandillas que limitan algunos de estos panteones.

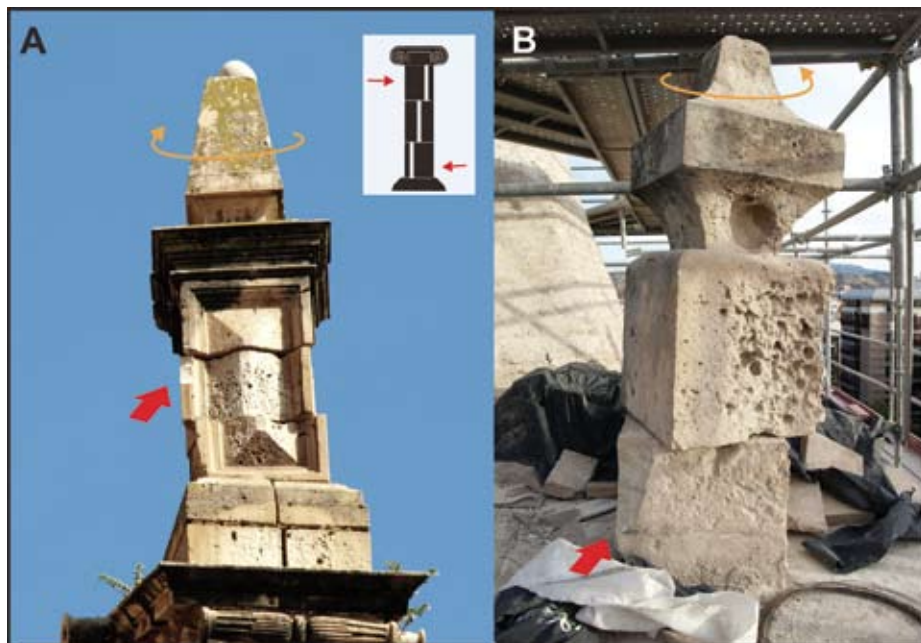
**Claves de arco desplazadas:** uno de los EAE más frecuentes asociados a terremotos son las caídas de las claves de los arcos. Se producen porque los esfuerzos que sustentan los arcos recaen en las paredes laterales y al moverse estas, de forma alterante en la misma dirección que el arco, descargan los esfuerzos de las dovelas haciendo que las claves caigan por el peso que sustentan dichos arcos. Sin embargo, hasta el momento no se ha documentado el caso contrario, la extrusión hacia arriba de estas claves como consecuencia de un terremoto. Este nuevo EAE complementa la clasificación propuesta por Rodríguez-Pascua *et al.* (2011). Uno de los casos más importantes lo constituyen las claves de los arcos del campanario de la Iglesia del Paso Azul, en



**Figura 6.** Caída orientada de columnas en la balaustrada del jardín del antiguo Cuartel de Infantería de Lorca. Dirección y sentido de caída hacia los N330°E, la flecha roja indica la dirección y sentido del movimiento del sustrato para poder producir esta caída.

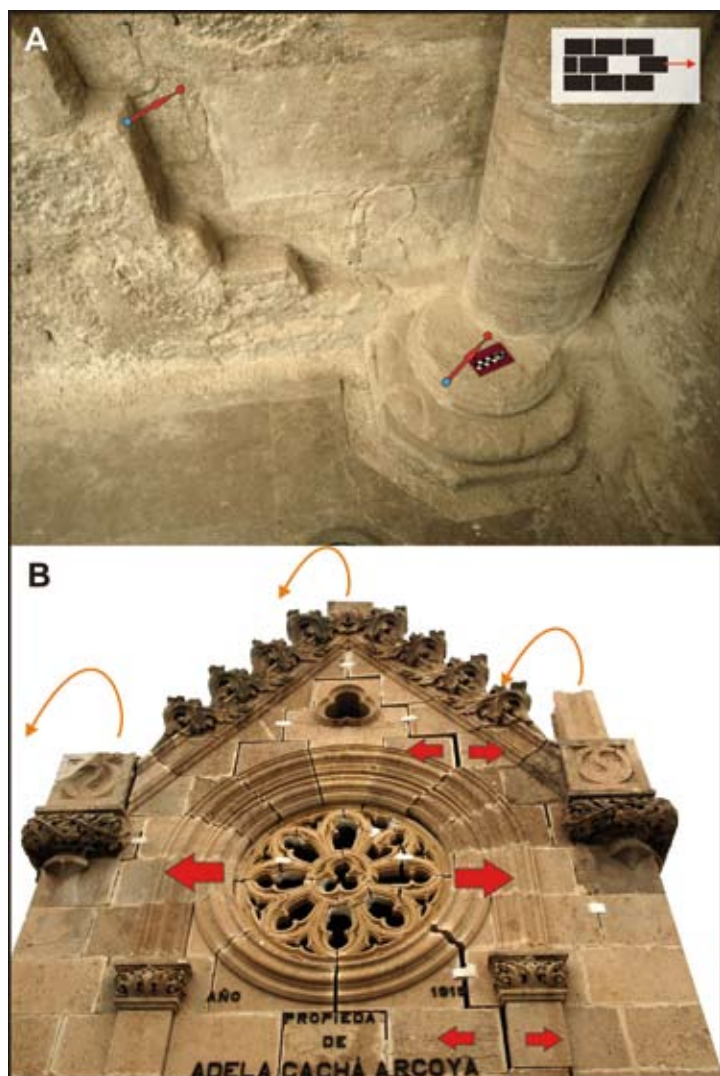
**Figure 6.** Oriented fallen columns belonging to the veranda of the erstwhile Infantry Headquarters in Lorca. The direction and sense of fall was N330°E. The red arrow indicates the direction and sense of the substratum movement responsible for the collapse.





**Figura 7.** Giros en las piezas que forman los pináculos de: A) la Colegiata de San Patricio (dextrógiro) y B) la Iglesia de San Mateo (levógiro). Las flechas rojas indican las direcciones de movimiento que generaron las esquinas rotas de ambos pináculos indicando una dirección de movimiento N-S y N165°E respectivamente, durante la oscilación previa al giro.

**Figure 7.** Rotated and displaced drums in pinnacles: A) San Patricio collegiate church (dextral) and B) San Mateo church (sinistral). Red arrows indicate the directions of ground movement that generated the dipping broken corners of both pinnacles. The directions of ground movement were NS and N165°E respectively.



**Figura 8.** Desplazamientos de bloques de sillería: A) sala superior de la Torre del Espolón (Castillo de Lorca) indicando el vector de desplazamiento, de 16 cm hacia los N235°E. B) Panteón del Cementerio de San Clemente, la dirección de movimiento marcada por las flechas rojas es N125°E, con caídas de pináculos hacia el NO.

**Figure 8.** Displaced masonry blocks: A) the red arrow indicates the vector of ground displacement (16 cm N325°E) in the upper room of the Espolon tower (Lorca Castle). B) Damaged funerary architecture in the San Clemente cemetery; the direction of the red arrows is N125°E. The fall direction of the pinnacles is NW.

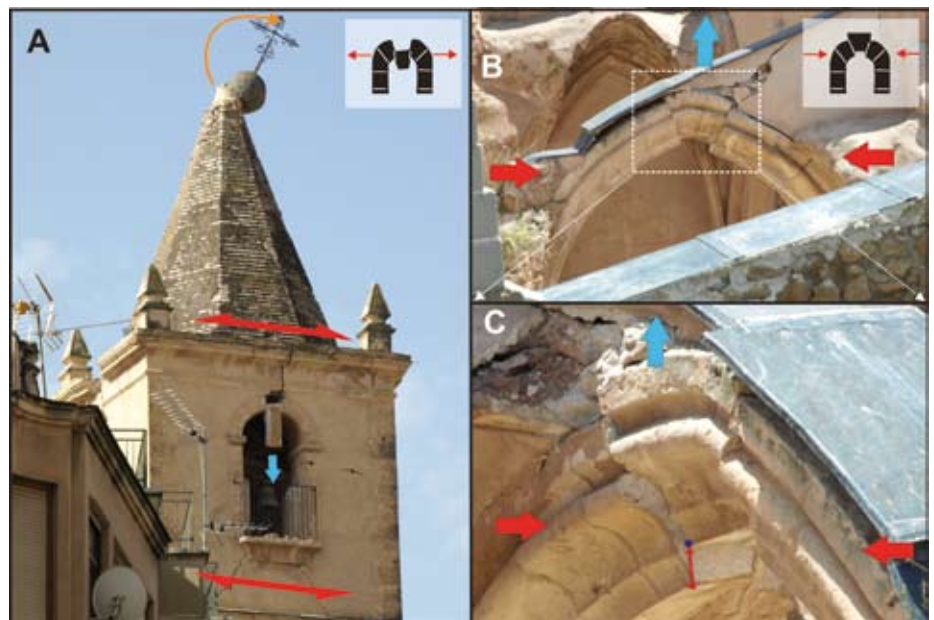
la que se produjeron la caída de claves y mayores deformaciones en los arcos situados en los muros N160°E que en los perpendiculares. Siguiendo esta dirección también cayó el orbe que culmina la torre, siendo la caída hacia los N340°E (Fig. 9A). Se ha podido documentar un caso especial en la ruina consolidada de la Iglesia de Santa María (Fig. 9B y C). En este caso, los esfuerzos de cizalla cíclicos producidos en superficie, paralelos a la dirección de los arcos (N155°E), genera una compresión de los laterales del arco sobre la clave, que, al no tener carga de la techumbre, asciende por compresión. En este caso las direcciones medias de movimiento del terreno son coherentes con la dirección media NO-SE.

*Escalones y líneas de bordillo plegadas:* este no ha sido un fenómeno muy abundante en el caso de Lorca, estando asociado fundamentalmente a compactación de sustratos antrópicos, más que debido a compresiones producidas por el movimiento en la horizontal del sustrato. Se observaron bordillos plegados y fracturados asociados a compactaciones en la acera de la fachada del Convento de las Clarisas y en el entorno de las calles paralelas a la rambla del Guadalentín.

*Muros colapsados:* Este ha sido uno de los fenómenos más abundantes en este terremoto, habiendo colapsado fundamentalmente muros cuya dirección era perpendicular a una dirección NO-SE. En los casos en el que los muros no están condicionados por estar unidos a estructuras laterales, es decir, que aumentan sus grados de libertad al movimiento. En los casos en los que los muros no están unidos a estructuras laterales que reducen su libertad de mo-

vimiento, se pudieron observar colapsos con dirección y sentido, marcando caídas, fundamentalmente hacia el NO.

*Bóvedas colapsadas:* las bóvedas son estructuras muy vulnerables a los terremotos, no solo por la carga que pueden llegar a sustentar, sino porque al ser estructuras de base circular pueden verse afectadas por movimientos en cualquier dirección, ofreciendo la misma resistencia en cualquiera de los casos. Son marcadores de terremoto, pero no se pueden utilizar como indicadores cinemáticos, ya que los colapsos no indicarían direccionalidad alguna. Uno de los ejemplos más importantes ha sido el colapso de la cúpula de la Iglesia de Santiago, en el que una mala intervención de restauración anterior, con la implantación de láminas de hormigón de 20 cm en las techumbres de las naves laterales, hizo que éstas golpearan contra la cúpula y la hicieran colapsar. Este impacto hizo que se produjese un giro en el tambor de la cúpula, cayendo primero la techumbre (apareciendo las tejas en el fondo) y los estucos que recubrían el interior en la parte superior de los escombros (De la Hoz, 2012). Estos hormigonados también se utilizaron en las Iglesias del Paso Blanco y de la Virgen de las Huertas, pero en estos casos recubriendo las cúpulas. La superficie de contacto entre la parte hormigonada y la no restaurada generó una fractura horizontal en dichas cúpulas, cerca sus bases. En el caso de la Iglesia del Paso Blanco se produjo un desplazamiento de 14 cm del casquete superior de la cúpula hacia los N330°E (Fig. 10). La fractura y desplazamiento de la cúpula se produce al permanecer estática al movimiento la parte de



**Figura 9.** Claves de arco desplazadas en: A) Campanario de la Iglesia del Paso Azul, el arco tiene una dirección N095°E, nótese la caída del orbe hacia el oeste; B) y C) Extrusiones hacia arriba de claves de arco por esfuerzos de cizalla cíclicos en ausencia de carga vertical asociada a la techumbre (dirección del arco: N155°E). Ruinas consolidadas de la Iglesia de Santa María.

**Figure 9.** Displaced key stones at: A) the bell tower of the Paso Azul church; the direction of the arch is N095°E; note the fall of the final sphere of the tower to the west. B) and C) pop up of the key stones generated by cyclic shear stress without vertical load of the roof; the direction of the arch is N155°E. Consolidated ruins of the Santa María church.





**Figura 10.** Fractura horizontal de la cúpula de la Iglesia del Paso Azul, en el límite de la cubierta de hormigón añadida en restauraciones recientes. A) La flecha blanca indica la dirección de movimiento de la cúpula hacia los N330°E. B) Detalle del vector desplazamiento de la cúpula de 14 cm hacia los N330°E.

**Figure 10.** Horizontal fracture of the dome of the Paso Azul church, on the edge of the concrete deck added in recent restorations. A) The white arrow indicates the N330°E direction of movement of the dome. B) Close-up view of the displacement vector (14 cm in magnitude N330°E) in the dome.

la cúpula hormigonada, mientras la base sufrió un desplazamiento con el movimiento horizontal de la nave, generando una fractura en el límite de la zona hormigonada, permaneciendo la cúpula intacta desde este límite hacia arriba.

**Esquinas fracturadas:** estos EAEs se dan en bloques de sillería que oscilan con los movimientos de cizalla horizontales. Estas oscilaciones producen el choque entre bloques fracturándose en las zonas más débiles, las esquinas. Por tanto, los polos de los planos de fracturación, indicarán la dirección de movimiento del terreno. Se han podido observar algunos ejemplos destacados de estos EAEs en los pináculos de la Colegiata de San Patricio y en la Iglesia de San Mateo (ver figura 7), así como en el interior de la Iglesia de Santiago y en las demás construcciones con bloques de sillería. Las orientaciones medias de movimiento del terreno que se han obtenido son NO-SE.

#### **EAEs del terremoto de 1674 reactivados en el 2011**

Los dos terremotos más importantes sufridos por Lorca con anterioridad al de 2011 son los de 1674 y 1818. Según los datos históricos (Martínez Guevara, 1984) el de 1674 fue mucho más importante que del s. XIX. Martínez Solares y Mezcuca (2002) les otorgan una intensidad de VIII y VI-VII respectivamente. El terremoto de 1674 produjo importantes daños en

la Colegiata de San Patricio. En las Actas capitulares de Lorca se puede leer: "*Grande terremoto que destruyó totalmente mucha parte de las casas desta ciudad y demas mui destruidas sin aber reserbado Iglesias torres y otros edificios fuertes*". Algunos de estos daños aun son visibles en distintos edificios públicos de Lorca, como es el Ayuntamiento o la propia Colegiata.

Este trabajo se centra en los daños de la Colegiata por su importancia y buena documentación. Los muros de la nave principal, de dirección N055°E, presentan desplazamientos de los bloques de sillería con una dirección de cizalla perpendicular a éstos. Este EAE es observable tanto para los efectos del terremoto de 1674 (Fig. 11A) como para los del 2011 (Fig. 11B).

En los contrafuertes de la nave central (perpendiculares a los muros principales) con arcos de aligeramiento, se produjeron caídas de claves de arco en los dos terremotos, que indicarían una dirección media de movimiento del terreno NO-SE en los dos casos. En algunos contrafuertes se pueden observar las reparaciones realizadas después del terremoto de 1674 (Fig. 11C), tanto en el propio muro del contrafuerte como en las claves de los arcos de aligeramiento. Estas reparaciones volvieron a ser afectadas por el terremoto de 2011, desplazándose de nuevo las claves y dañando los morteros de reparación posteriores a 1674 produciéndose un desplazamiento que se acumula a la anterior caída de la clave. Los desplazamientos de los bloques de sillería generan fracturas abiertas que





**Figura 11.** EAes reactivados con el terremoto de 2011. Desplazamientos en la horizontal de bloques de sillería del muro SE (dirección del muro: N055°E) de la Colegiata de San Patricio generados por: A) el terremoto de 1674 y B) por el de 2011. C) Deformaciones sísmicas en uno de los contrafuertes de la nave central de la Colegiata de San Patricio (dirección del contrafuerte: N145°E). La línea de puntos marca una reparación con elementos anómalos tras el terremoto de 1674. Se pueden observar grietas afectando a estas reparaciones y la reactivación de la caída de la clave del arco por el terremoto de 2011.

**Figure 11.** EAes reactivated by the 2011 earthquake. Horizontal displacements of masonry blocks in the SE wall (direction of the wall: N055°E) of the San Patricio collegiate church generated by: A) the 1674 earthquake and B) the 2011 earthquake. C) Seismic deformations in the buttresses of the main nave of the collegiate church (direction of the buttresses: N055°E). The dotted line marks a repair with abnormal constructive elements after the earthquake of 1674. Cracks can be seen to affect these repairs and the reactivation of the fallen voussoirs in the arch by the earthquake of 2011.

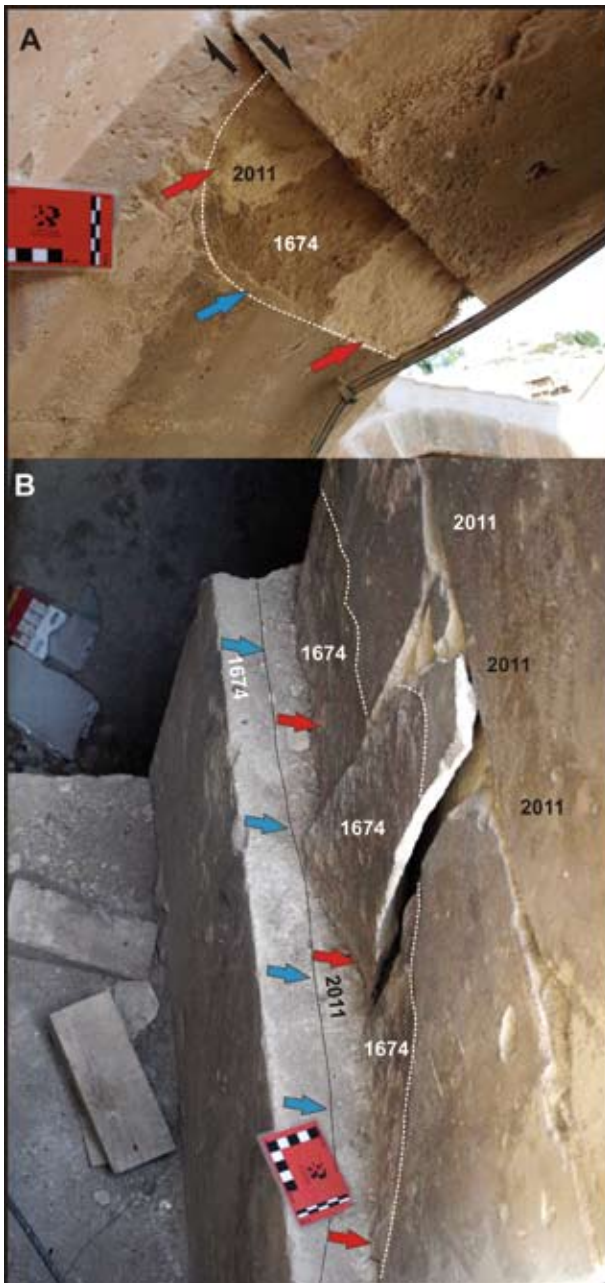
afectan a las reparaciones con elementos anómalos realizadas en 1674 (Fig. 11C).

Los bloques de sillería que forman los arbotantes del ábside de San Patricio muestran esquinas fracturadas por el desplazamiento y la oscilación de los bloques entre sí. Estos planos de fractura tienen una pátina carbonatada que atestiguan que no se generaron con el terremoto de 2011. Sin embargo, sí es posible ver como estas pátinas se han fracturado con el terremoto de 2011, mostrando una superficie de corte fresca (Fig. 12A). Esto indica la reactivación de esas fracturas antiguas (producidas por el terremoto de 1674) con los movimientos generados por el último terremoto de 2011. En uno de los arcos de aligeramiento de los contrafuertes de dirección N140°E (perpendiculares a la nave principal) se han podido medir desplazamientos de 3 cm asociados al terremoto de 1674 según la dirección del contrafuerte y de 5 cm para el de 2011 (Fig. 12B).

### Direcciones preferentes de movimiento del terreno durante el terremoto

Para el cálculo de las direcciones medias de movimiento del terreno se han utilizado aquellos EAes que presentan el mayor número de grados de libertad para su formación. De este modo, estos resultados quedan condicionados lo menos posible por anisotropías previas, como la orientación de muros. Algunos de estos ejemplos lo constituyen las caídas orientadas de pináculos, columnas o chimeneas. Los EAes más comunes medidos son: fracturas penetrativas en aspa, fracturas horizontales, muros basculados y colapsados, claves caídas de arcos, rotura de esquinas, desplazamientos en bloques de sillería, impactos y pliegues en enlosados y caídas orientadas de esquinas.

Un buen ejemplo donde se pueden encontrar un gran número de EAes en una misma construcción es la Colegiata de San Patricio, que se ha utilizado como



**Figura 12.** EAEs reactivados en la Colegiata de San Patricio: A) Ruptura de esquina en uno de los arbotantes del ábside de la Colegiata de San Patricio. La línea de puntos marca el límite de la zona de fractura de la cuña de roca que falta, con el corte carbonatado asociado al terremoto de 1674 y los cortes frescos tras la reactivación con el terremoto de 2011. B) Esquina fracturada por el terremoto de 1674 (3 cm de desplazamiento) y reactivada por el de 2011 (5 cm de desplazamiento), la dirección del arco de aligeramiento del contrafuerte es N140°E.

**Figure 12.** Reactivated EAEs in the collegiate church of San Patricio: A) broken corner in one of the buttresses of the apse; the dotted line marks the boundary of the fracture zone of the missing wedge of rock; the fracture covered with carbonate is associated with the earthquake of 1674 and fresh fissures have been generated by the earthquake of 2011. B) Corner broken by the earthquake of 1674 (3 cm displacement) and reactivated by the 2011 earthquake (5 cm displacement); the direction of the arch of the buttress is N140°E.

ejemplo para el cálculo de trayectorias de movimiento/deformación en una construcción (Fig. 13). En este caso se puede observar como los datos extraídos de esta construcción tienen una orientación media NO-SE y son coherentes con los valores medios calculados para todo el casco antiguo de Lorca representados en la figura 14. En esta figura también se representan las orientaciones de los EAEs del terremoto de 1674 y que han sido reactivados por el terremoto de 2011, siendo estas orientaciones compatibles con las trayectorias de deformación calculadas para los efectos del 2011. Después de realizar el análisis estructural geológico de dichas estructuras, con un total de 127 EAEs, se obtiene una dirección media de movimiento del terreno según los N150°E, con una pequeña proporción de datos que dan una orientación perpendicular (Fig. 14). Esta información es coherente con datos tomados fuera del casco histórico en edificaciones del s. XX afectadas por el terremoto, así como los datos tomados fuera de la ciudad en los cementerios de San Clemente y San Cristóbal (situado a 4 km del casco antiguo de Lorca). La rosa de direcciones del movimiento de una partícula durante el terremoto, extraído del acelerómetro situado por el IGN en el sótano de la antigua cárcel de Lorca, se observa el mismo patrón de movimiento que el calculado mediante EAEs (Fig. 14).

## Discusión

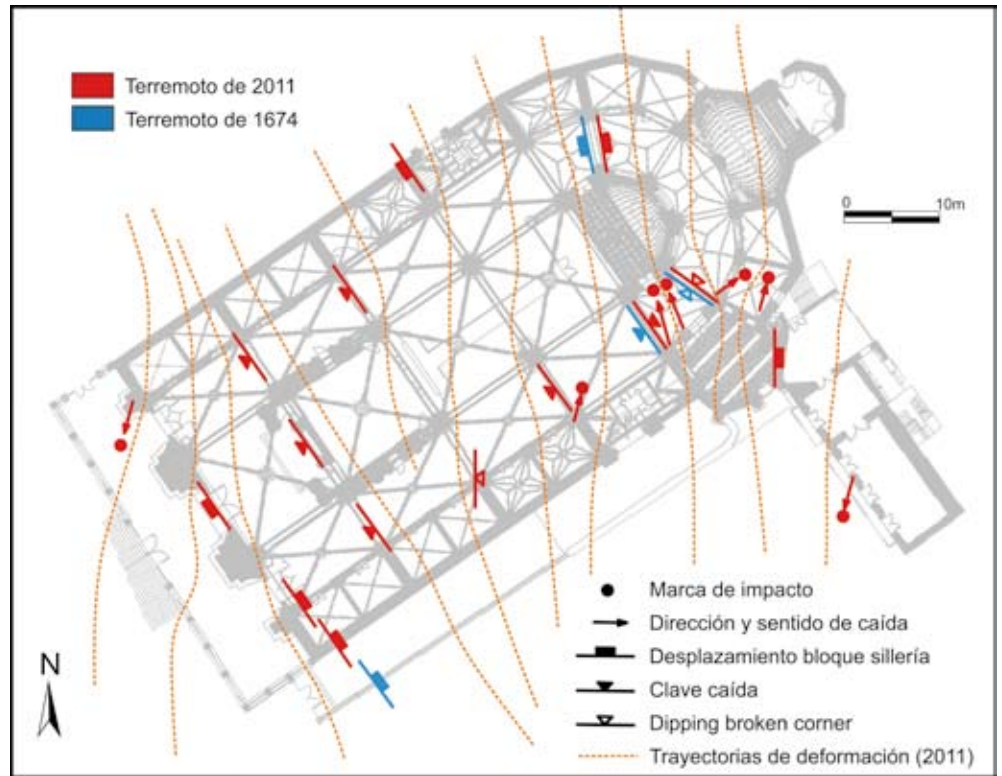
Los resultados de las orientaciones de movimiento en la horizontal obtenidas del análisis estructural geológico de los EAEs, generados por el terremoto de 2011 y observados en edificios del patrimonio cultural de Lorca, presentan una orientación media NO-SE y son coherentes con los acelerogramas registrados (Giner Robles, *et al.*, en este mismo volumen). La rápida intervención para la obtención de datos fue crucial, ya que las labores de desescombro y restauración han borrado en la actualidad muchos de estos efectos. Estas direcciones de acortamiento son compatibles con las obtenidas de los EAEs generados por el terremoto de 1674. Por tanto, ambos terremotos presentan características similares en cuanto a la directividad de las deformaciones generadas. Esto podría suponer que en ambos casos fue el mismo segmento de falla el responsable de dichas deformaciones. Este hecho se ve respaldado por los resultados preliminares de las dataciones por liquenometría de caídas de bloques en las inmediaciones de Lorca (Pérez-López *et al.*, en este mismo volumen). Estos desprendimientos se reprodujeron durante el terremoto de 1674 en la Sierra de la Tercia (al NO de Lorca).

El movimiento principal del sustrato ha sido perpendicular a la Falla de Alhama de Murcia, siendo co-



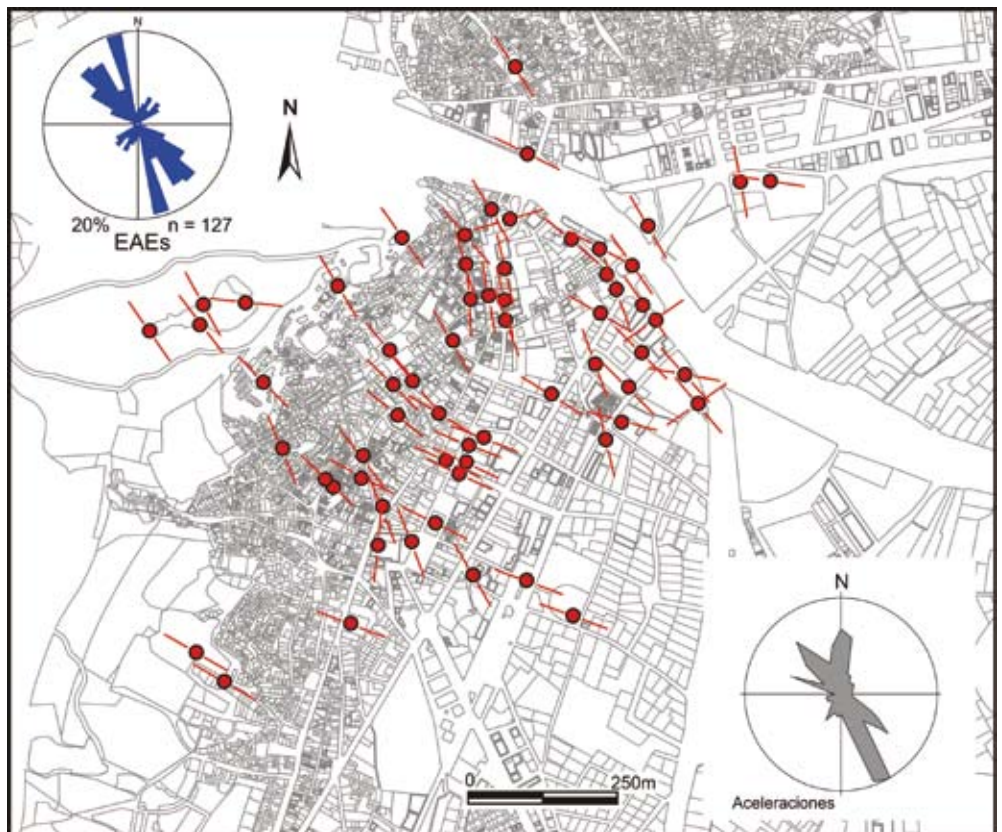
**Figura 13.** Plano de la Colegiata de San Patricio con la proyección de los EAEs generados por el terremoto de 1674 reactivados por el terremoto de 2011 y los neoformados por este último, con las trayectorias de deformación calculadas mediante las orientaciones de los EAEs.

**Figure 13.** Map of the collegiate church of San Patricio with the projection of the EAEs generated by the earthquake of 1674 and reactivated by the earthquake of 2011. The newly formed EAEs generated by the earthquake of 2011 are also represented together with the trajectories of deformation calculated using the guidelines of the EAEs.

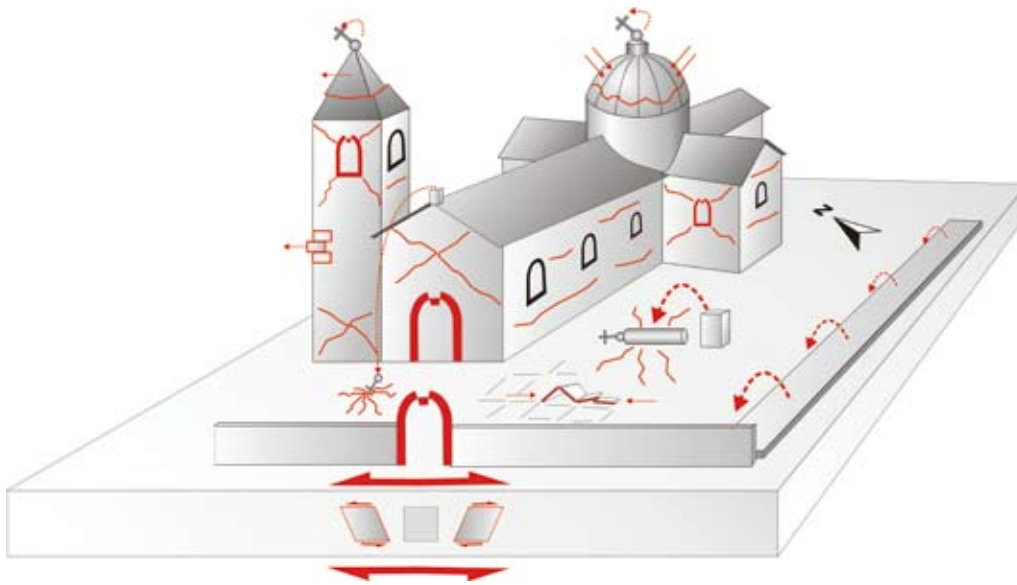


**Figura 14.** Plano del casco histórico de Lorca donde se han situado los 64 edificios con EAEs (puntos rojos) utilizados para los cálculos de direcciones de movimiento del sustrato. Las líneas en rojo marcan las direcciones medias de movimiento para cada edificio. La rosa de direcciones muestra los valores totales para las direcciones de movimiento calculadas para los EAEs (esquina superior izquierda) y los sentidos de movimiento de una partícula extraída del acelerograma situado en Lorca por el IGN (modificada de Alfaro *et al.*, 2012).

**Figure 14.** Map of Lorca city centre, showing the sites of 64 buildings with EAEs (red dots) used to calculate the direction of the substrate movement. Red lines mark the general direction of movement for each building. The rose of directions shows the total values for the directions of motion calculated for the EAEs (upper left) and the directions of motion of a theoretical particle removed from the accelerogram located in Lorca by IGN (modified from Alfaro *et al.*, 2012).







**Figura 15.** Construcción idealizada con los Efectos Arquitectónicos de Terremotos (EAEs) teóricos que generaría un movimiento del sustrato en dirección NO-SE.

**Figure 15.** Model of a building affected by a theoretical substrate movement in a NW-SE direction and the consequent earthquake architectural effects (EAEs).

roborado tanto por los EAEs medidos como por los informes arquitectónicos elaborados por las empresas que han estabilizado y restaurado el patrimonio afectado (De la Hoz, 2012; Granados González *et al.*, 2011). Este movimiento ha tenido la misma componente de desplazamiento que el producido por el terremoto de 1674, por lo que es posible que fuese el mismo segmento de falla (el Lorca-Totana) el responsable de dicho terremoto. Por este motivo, es lógico pensar que el patrimonio Cultural de Lorca volverá a comportarse de una manera muy similar ante la deformación sísmica si este segmento vuelve a generar un terremoto. Este último punto se muestra como una herramienta válida para poner en valor el patrimonio arquitectónico ante posibles intervenciones de restauración. Por desgracia esto último se puso de manifiesto con el terremoto de Lorca, donde el patrimonio con restauraciones inadecuadas fue el que más sufrió. Un ejemplo de esto es la colapsada Iglesia de Santiago (De la Hoz, 2012). Así mismo, el conocer las orientaciones de los daños también se puede utilizar para aumentar la eficiencia en la estabilización de edificios dañados sísmicamente (De la Hoz, 2012). Si suponemos un edificio ficticio en el que la nave principal sea paralela a la falla de Alhama de Murcia y situado en Lorca, como es el caso de la Colegiata de San Patricio, este edificio tendrá sus daños más importantes en los muros que sean paralelos al movimiento del sustrato (NO-SE) con daños menores en los muros perpendiculares (Fig.15). En estos muros de dirección NO-SE aparecerán fracturas conjugadas, caídas de claves de arco, desplazamiento de bloques de sillaría, etc. Los orbes y pináculos caerán hacia el NO produciendo impactos en las techumbres. Las columnas con mayores grados

de libertad caerán en la misma dirección y sentido, produciéndose colapsos de muros en la misma dirección y pliegues en los enlosados con ejes NE-SO (perpendiculares a la dirección de movimiento del sustrato). Estos EAEs, que se han repetido en los terremotos de 1674 y 2011, volverán a producirse en terremotos futuros, siguiendo patrones de deformación muy similares a los anteriores, por lo que se pueden utilizar en los Planes de Conservación Preventiva para tener en cuenta en futuras actuaciones de restauración o en medidas protectoras a desarrollar contra terremotos.

## Conclusiones

Las características de las deformaciones producidas por los terremotos de Lorca de 1674 y 2011 presentan las mismas directividades y efectos arquitectónicos de terremotos, teniendo una dirección media de movimiento del terreno según los N150°E. Esta coincidencia puede interpretarse como la evidencia de que el terremoto de 1674 fue producido por el mismo segmento de falla que el del 2011, el segmento de Lorca-Totana, que por tanto tendría una recurrencia de 337 años. Debido a las bajas magnitudes de ambos terremotos, no se han producido rupturas superficiales de falla, por lo que estos resultados no se han podido contrastar con técnicas clásicas de palosismología (*Trenching*). Sin embargo, se ha podido inferir un ciclo sísmico del segmento de falla gracias a los datos arqueosismológicos y arquitectónicos. Por este motivo, la arqueosismología se muestra como una buena herramienta complementaria que da información de primer orden sobre diferentes movimientos de un segmento de falla. En

los siguientes terremotos que pueda generar este segmento de la FAM, las características de la deformación que puedan producirse en los edificios de Lorca serán similares a las aquí estudiadas. Por tanto, los EAEs que se han documentado en este trabajo se pueden utilizar como dato de referencia en las futuras intervenciones de restauración de estos inmuebles y en los Planes de Conservación Preventiva del Estado.

## Agradecimientos

A las Doctoras Teresa Bardají y María Ortuño por la mejora de este trabajo mediante sus revisiones y sugerencias. Este trabajo se ha financiado con los proyectos del Plan Nacional RESCATELO (CGL2011-14925-E) y FASEGEO (CGL2009-09726). También nos gustaría agradecer los datos y facilidades aportadas por el Instituto del Patrimonio Cultural de España, Ayto. de Lorca, Lavila Arquitectos, Grupo Entorno, Ferrrovial, Acciona y Archivo Municipal de Lorca.

## Referencias

- Alfaro, P., Delgado, J., García-Tortosa, F.J., Lenti, L., López, J.A., López-Casado, C. and Martino, S. 2012. Widespread landslides induced by the Mw 5.1 earthquake of 11 May 2011 in Lorca, SE Spain. *Engineering Geology*, 137-138, 40-52.
- De la Hoz, J.D. 2012. Terremoto en Lorca: consecuencias y actuaciones sobre el patrimonio religioso. *Patrimonio Cultural de España*, 6: 107-122.
- Giner-Robles, J.L., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G., Bardají, T., Grützner, C. and Reicherter, K. 2009. *Structural Analysis of Earthquake Archaeological Effects (EAE): Baelo Claudia Examples (Cádiz, South Spain)*. Instituto Geológico y Minero de España. 130 pp.
- 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., Rodríguez Pascua, M.A., Martín González, F., Silva, P.G. y Cabañas, L. 2012. Direccionalidad de los daños del Terremoto de Lorca de mayo de 2011: Aplicaciones a estudios arqueosismológicos. *Geo-Temas*, 13, 1-4.
- Giner Robles, J.L., Pérez-López, R., Silva, P.G., Rodríguez Pascua, M.A., Martín González, F. y Cabañas, L. 2012. Análisis estructural de daños orientados en el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Aplicaciones en arqueosismología. *Boletín Geológico y Minero*, en este mismo volumen.
- Granados González, J., Hernández Sánchez, E., López Aguilera, V., y Rico, A. 2011. *Informe de la supervisión de la obra de urgencia en el cementerio de San Clemente de Lorca*. Grupo Entorno y Vegetación S.A. Informe inédito. 70 pp.
- IGN, 2012. Instituto Geográfico Nacional. <http://www.ign.es>, mayo 2011.
- IPCE, 2012. Instituto del Patrimonio Cultural de España. Patrimonio en Riesgo: seísmos y bienes culturales. *Patrimonio Cultural de España*, 6: 265pp.
- López-Comino, J.A., Mancilla, F. Morales, J. and Stich, D. 2012. Rupture directivity of the 2011, Mw 5.2 Lorca earthquake (Spain). *Geophysical Research Letters*, 39, L03301, doi:10.1029/2011GL050498.
- Martínez Guevara, J. B. 1984. *Temblores de tierra del núcleo sísmico de Lorca-Totana (Murcia)*. Estudio de sismicidad histórica. I.G.N. Original nº 51.
- Martínez-Díaz, J.J., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., García Mayordomo, J., Giner Robles, J.L., Martín-González, F., Rodríguez Peces, M., Álvarez Gómez, J.A., e Insua Arévalo, J.M. 2011. *Informe Geológico Preliminar del Terremoto de Lorca del 11 de mayo del año 2011, 5.1 Mw*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. 35 pp.
- Martínez-Díaz, J.J., Bejar-Pizarro, M., Álvarez-Gómez, J.A., Mancilla, F.L., Stich, D., Herrera, G. and Morales, J. 2012. Tectonic and seismic implications of an intersegment rupture. The damaging May 11th 2011 Mw 5.2 Lorca, Spain, earthquake. *Tectonophysics*. In press. doi: 10.1016/j.tecto.2012.04.010
- Martínez-Solares, J.M. y Mezcua, J. 2002. *Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a.C.-1900)*. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento. 756 pp.
- Ortuño, M., Masana, E., García-Meléndez, E., Martínez-Díaz, J.J., Stêpančiková, P., Cunha, P.P., Sohbaty, R., Canora, C., Buylaert, J.P. and Murray, A.S. 2012. An exceptionally long paleoseismic record of a slow-moving fault: The Alhama de Murcia fault (Eastern Betic shear zone, Spain). *Geological Society of America Bulletin*, (en prensa). doi:10.1130/B30558.1
- Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., Martínez-Díaz, J.J. y Martín-González, F. 2012. Recurrencia sísmica del segmento Lorca-Totana de la FAM mediante liquenometría aplicada en caídas de bloques al NE de Lorca: los terremotos de 1579 AD, 1674AD y 2011. *Geo-Temas*, 13:1-4.
- Pérez-López, R., Martín-González, F., Martínez-Díaz, J.J. y Rodríguez-Pascua, M.A. 2012. Datación mediante liquenometría de la caída de bloques y desprendimientos rocosos asociados a la sismicidad histórica en Lorca (Murcia, SE de España). *Boletín Geológico y Minero*, en este mismo volumen.
- 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.
- Silva, P.G., Reicherter, K., Grützner, Ch., Bardají, T., Lario, J., Goy, J.L., Zazo, C. and Becker-Heidmann, P. 2009. Surface and subsurface palaeoseismic records at the ancient Roman city of Baelo Claudia and the Bolonia Bay area, Cádiz (south Spain). *Geological Society of London, Special Publication*, 316: 93-121.

Recibido: junio 2012

Revisado: agosto 2012

Aceptado: septiembre 2012

Publicado: octubre 2012