

Datación mediante liquenometría de los desprendimientos rocosos asociados a la sismicidad histórica en Lorca (Murcia, SE de España)

R. Pérez-López⁽¹⁾, F. Martín-González⁽²⁾, J. J. Martínez-Díaz⁽³⁾ y M. A. Rodríguez-Pascua⁽¹⁾

(1) Grupo de Geología de Eventos Extremos. Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas 23. 28003 Madrid.
r.perez@igme.es y ma.rodriguez@igme.es

(2) Área de Geología. ESCET. Universidad Rey Juan Carlos I.
fidel.martin@urjc.es

(3) Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.
Avda. Antonio Novais s/n. 28004 Madrid.
jmdiaz@geo.ucm.es

RESUMEN

El terremoto de Lorca (Murcia, SE de España) del año 2011 (M_w 5,2, profundidad 4 km) provocó una serie de caídas de rocas con un volumen total inferior a los 2000 m³. Estos desprendimientos de origen sísmico se localizan principalmente en la Sierra de las Estancias y en la Sierra de La Tercia, ambos relieves formados por calizas tortonienses con escarpes superiores a 30 metros de altura, así como con diferentes orientaciones. En estos mismos sitios se han encontrado evidencias de antiguas caídas de bloques. En consecuencia, se ha aplicado la técnica de la liquenometría para estimar la edad de bloques antiguos en dos desprendimientos de la Sierra de las Estancias, con el fin de comprobar su posible origen sísmico. Con este fin, se ha utilizado una tasa de crecimiento de 0,24 mm/año para líquenes calcícolas en climas templados. Cabe recordar que Lorca ha experimentado sismicidad histórica de campo cercano, concretamente con dos terremotos en 1674 (EMS VIII) y en 1818 (EMS VI), así como los efectos de campo lejano del terremoto de Lisboa del año 1755 (EMS VI). Los resultados indican que estos desprendimientos rocosos se originaron durante el terremoto de 1674, movilizando un volumen rocoso veinte veces mayor al estimado para el terremoto del año 2011. Según esto, es posible especular que el sismo de 1674 estuviese asociado al mismo segmento que generó el sismo del 2011, el segmento Lorca Totana de la Falla de Alhama de Murcia, y que tuviese una magnitud entre 6,1 y 6,8 en relación a una posible profundidad entre 5 y 15 km, respectivamente.

Palabras clave: desprendimiento de rocas, liquenometría, Lorca, terremoto

Lichenometric age measured on rock-falls related to historic seismicity affecting Lorca and its surroundings (Murcia, SE Spain)

ABSTRACT

During the earthquake at Lorca (Murcia, SE Spain) in 2011 (5.2 Mw, 4km depth) several rock-falls occurred, mobilizing an estimated volume of close to 2,000 m³. All these rock-falls took place within the Estancias and La Tercia mountain ranges, the topography of which is composed of Tortonian calcarenitic sandstones with steep scarps more than 30 m in height. We have conducted a lichenometric study to obtain the age of the ancient rock-falls within the Las Estancias Range. We have assumed an annual growth rate of 0.24 mm for lichen species classified as calcicolous and related to warm climatic conditions. Our aim was to corroborate the hypothesis that seismic events triggered these massive rock-falls. The city of Lorca had experienced two near-field historic earthquakes (1674 EMS VIII and 1818 EMS VI) and one far-field tremor during the great Lisbon earthquake in 1755 (EMS VI). Results obtained here indicate that the earthquakes of 1674 and 2011 were quite similar, except that the 1674 one mobilised a greater quantity and twenty times the volume of blocks mobi-

lised during the 2011 earthquake. Therefore, we conclude that the size of the earthquake of 1674 was possibly between $6.0 < M < 6.8$, assuming similar focal and seismotectonic conditions to those of the instrumentally measured earthquake of 2011.

Key words: earthquake, lichenometry, Lorca, rock-fall

ABRIDGED ENGLISH VERSION

On 11 May 2011 the city of Lorca (SE Spain) experienced a small earthquake (5.2 M_w , IGN, 2011), although 9 people were killed, more than 300 injured, several modern buildings collapsed and damage was caused to approximately 1,000 other constructions. The energy released during the quake was 5.62×10^{12} Jules, triggering various rock-falls across the La Tercia and Las Estancias mountain ranges to the north of the city. The shallow hypocentral depth (4 km approx.) and the alluvial infilling of the site probably played an important role in increasing the damage caused by the seismic event.

The major geological effects observed in association with this earthquake were the rock-falls located on the northern reliefs in the vicinity of the epicentral area (Fig. 1). Different authors have estimated the total volume mobilised during this earthquake to be close to 1,000 m^3 (cf. Pérez-López et al., 2011; Martínez-Peces et al., 2012; Alfaro et al., 2012). A few hours after the earthquake a team of geologists made observations in the field within the affected zone to document the geological effects associated to the earthquake: ground cracking, liquefaction, rock-falls and landslides. The main geological effect documented was rock-falls. Moreover, all these rock-fall areas showed evidence of ancient fallen blocks. Therefore, the aim of this work has been to obtain the ages of the ancient fallen blocks by resorting to lichenometric dating. The occurrence of historic seismicity within the zone, the well documented earthquake effects and the seismic intensity all suggest a potential relationship between the previous rock-falls and these historic earthquakes. Furthermore, it is possible to speculate about the size of the historic earthquake by direct comparison with focal parameters determined for the earthquake of 2011.

Historical seismicity at Lorca

The city of Lorca dates from the Roman period in the Iberian Peninsula (1st century AD). At least three historic earthquakes of an intensity greater than VI (EMS98 scale, Martínez-Solares and Mezcuca, 2002) have shaken the city (Martínez-Guevara, 1984; Muñoz-Clarés et al., 2012), in 1579 (VII EMS), 1674 (VII EMS) and 1818 (VI-VII EMS).

On 11 May 2011 at 18:50 h local time a small earthquake of 5.2 M_w and EMS seismic intensity of VII shook the city of Lorca. Its hypocentral depth was between 2 and 5 km and it showed a focal mechanism solution of reverse faulting with a strike-slip component (oblique fault, IGN, 2011).

Lichenometric method

The lichenometry dating technique involves determining the age of rocks by studying the growth of lichens on their exposed surfaces. The principal premise is that lichen grows at a constant rate and so lichenometry can be used to calculate geomorphic ages for exposed rock surfaces related to rock-falls and landslides, among other geomorphic events. Fink (1917), Benedict (1967), Proctor (1977) and Locke (1979) studied the method and practical use of lichenometry for dating purposes and reached a time interval of 5,000 yrs. The most used and powerful lichen species for dating purposes is *Rhizocarpon geographicum*, a discoidal, crustose lichen with a constant growth rate (Innes, 1985 and 1986). Jomelli et al. (2007) described the growth pattern over time of this lichen species and reported its annual growth rate and various ways of measuring the thallus of the lichen: minimum diameter, maximum diameter etc. With regard to the application of lichenometry to seismic rock-falls, Bull (1996a and 1996b) demonstrated that lichen colonizes rock-falls soon after the event in patterns that indicate different mobilisations depending on previous earthquakes. The first step for applying lichenometry is to obtain the annual growth rate of the lichen species by taking measurements of the thallus diameter on the surface of rocks of known age. In general the best choice is to use tombstones in cemeteries. The growth curve can then be obtained by plotting the lichen diameter against the age of the tomb and then extrapolating the resulting curve to other exposed surfaces.

In this work we used the following lichen species: *Lecanora muralis* (Schreber), *Aspicilia calcarea* (L.), *Aspicilia radiosa* (Hoffm.) and *Caloplaca aurantia* (Hellb.) (Fig. 2), depending upon the type of Tortonian calcarenitic sandstone studied. We assumed an annual growth rate for *A. radiosa* of 0.24 mm/yr (Pérez-López et al., 2010b). Table 1 shows the local calibration of the curve using calcarenitic tombstones in the cemetery at Lorca.

Results

We have analysed two areas with rock-falls activated during the 2011 Lorca earthquake, both also showing evidence of ancient rock-falls (Fig. 1): (1) "El Cejo de los Enamorados" and (2) "La Rambla de los 17 Arcos". Zone (1) contains two huge blocks with an estimated volume of 30 m³ (Figs 3 and 4). Table 2 and Figure 4 show the lichenometric ages plus the dates for the historic earthquakes affecting Lorca. We conclude that both blocks were activated during the 1579 earthquake and remobilised during the great earthquake at Lisbon in 1755.

The second zone (R17A) is located one km from the first zone and the total affected area of rock-falls is greater than the previous one (0.02 km²); its maximum block size is one of 350 m³ (Fig. 4). We estimated the age of 20 rock blocks in all and measured in the field a total volume for these blocks of 1,200 m³. During the 2011 earthquake, however, the total volume mobilised in the same area barely reached 100 m³. Figure 6 shows the age distribution for these blocks, the biggest ones (volume ~ 600 m³) having been mobilised during the 1674 earthquake. Bearing in mind the error in the estimation of the annual growth rate (4 yrs) (Pérez-López *et al.*, 2010b) and the ecesis period of 5 yrs. (average time for colonization by the lichen species on a newly exposed rock surface; cf. Fink, 1917), we would suggest that the first rocks-falls affecting this hill (SW side) were activated during the 1674 earthquake. Figure 7 shows the different values for the volumes of rock mobilised in relation to earthquakes affecting Lorca.

Conclusions

As a preliminary result, the lichenometric dating of rock falls located within the Las Estancias range allowed us to distinguish the geological effects of historic earthquakes affecting the mountain range just to the north of Lorca. Thus we conclude:

1. The historic earthquake of 1674 triggered several rock falls located at the "Cejo de los Enamorados" and "Rambla de los 17 Arcos" hills in the sierra to the north of the city of Lorca.
2. Other historic seismic events such as the great Lisbon earthquake in 1755 remobilised several blocks, though smaller in size than those mobilised during the earthquake of 1674. The earthquake of 2011 also triggered rock-falls in similar zones.
3. The total volume of rocks mobilised by the 1674 earthquake at the "Rambla de los 17 Arcos" was 2,000 m³, twenty times greater than the volume mobilised during the 2011 earthquake.

Therefore, we have estimated that the 1674 earthquake ranged in size between $6.0 < M < 6.1$ and $M 6.8$, depending upon whether its hypocenter was 5 km or deeper (from between 12-15 km). Furthermore, this earthquake was triggered by the Lorca-Totana segment of the Alhama de Murcia fault, bearing in mind the location of the rock-falls in relation to the epicentral location of the 2011 earthquake.

Introducción

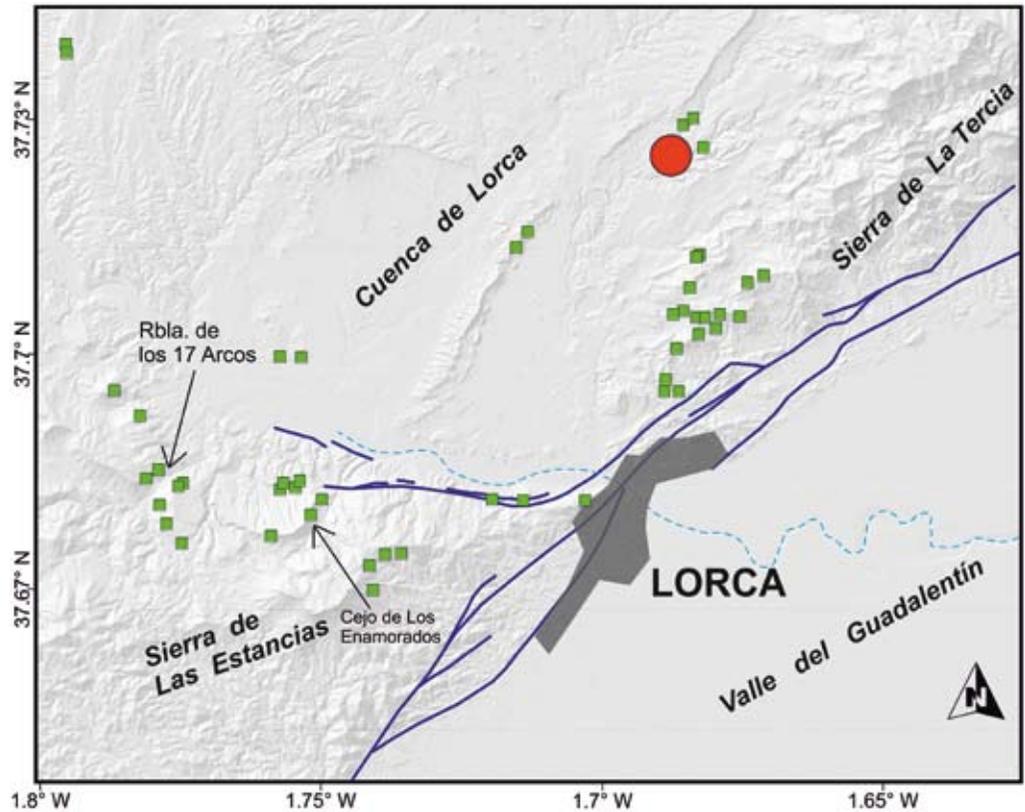
El elevado número de daños y la gran cantidad de efectos geológicos y arqueosísmicos que generó el terremoto de Lorca (11 de mayo de 2011, IGME, 2011), trajo muchas incógnitas a la comunidad científica la cual rápidamente se desplegó para intentar dar respuestas a una sociedad en estado de shock. Desde el punto de vista físico, un terremoto de magnitud M_w 5,2 libera una cantidad de energía de $5,62 \times 10^{12}$ Julios. En este sentido, los efectos y el volumen de rocas movilizadas mediante desprendimientos cosísmicos asociados a los relieves de calizas y calcarenitas terciarias que forman la Sierra de la Tercia y la Sierra de las Estancias, diverge de forma significativa en función de los autores consultados: 1000 m³ (Pérez-López *et al.*, 2011), < 1000 m³ (Rodríguez-Peces *et al.*, 2012), así como del número de desprendimientos rocosos y pequeños deslizamientos a pie de talud, 256 en total en un área de 100 km², con volúmenes individuales variando entre varios dm³ y 1000 m³ (Alfaro *et al.*, 2012). Toda esta controversia de números asociados a un terremoto de

tan baja magnitud, fue el germen de este estudio y que en principio surgió a partir del reconocimiento de campo de los efectos geológicos asociados al terremoto de 2011 horas después del mismo (IGME, 2011; Pérez-López *et al.*, 2011). El objetivo inicial fue estudiar y calcular la escala macrosísmica de efectos geológicos ESI07 (Michetti *et al.*, 2007, Silva *et al.*, 2007), la cual permitiese relacionar dicho evento con la sismicidad histórica en la zona, así como discutir sobre sus parámetros focales principales, profundidad y tamaño, y falla causante del mismo. Sin embargo, durante el reconocimiento de campo se constató la existencia de bloques más antiguos asociados a desprendimientos previos y localizados en las mismas laderas donde se habían dado aquellos asociados al terremoto de Lorca del 2011 (de aquí en adelante *terremoto 2011*).

La Figura 1 señala aquellas zonas donde se ha constatado desprendimientos rocosos con volúmenes significativos (puntos verdes) relacionados con el terremoto del 2011, así como la localización del epicentro (punto rojo), correspondiente con el sismo de magnitud 5.2.

Figura 1. Localización epicentral del terremoto de Lorca del 11 de mayo del año 2011 (punto rojo) y principales zonas con desprendimientos de rocas que movilizaron volúmenes superiores a 1 m³ asociados a dicho terremoto (cuadros verdes).

Figure 1. Geographical location of the epicentre of the 2011 Lorca earthquake (red dot) and rock-fall locations (green dots) for rock blocks of a volume of more than 1 m³.



Teniendo en cuenta la moderada actividad sísmica de la zona (Martínez-Díaz, 2001), el objetivo del presente trabajo consiste en obtener la fecha de los desprendimientos previos, así como su posible relación con la sismicidad histórica desde época islámica, donde se sitúan al menos tres terremotos de intensidad sísmica (EMS 98) superior a VI (Martínez-Solares y Mezcuá, 2002). Para ello, hemos aplicado la liquenometría, técnica de datación numérica que consiste en estudiar el crecimiento anual (medida sidérea) de líquenes *crustosos* sobre superficies horizontales y poco inclinadas (ángulo <math><20^\circ</math>). Mediante la calibración de una curva de crecimiento para una especie de líquen concreta, es posible estimar la edad de exposición de dicha superficie rocosa. Partiendo de la curva de crecimiento para líquenes asociados a climas templados y rocas carbonatadas de Pérez-López *et al.* (2010a y 2010b), hemos calibrado de forma local mediante el uso en cementerios y restos arqueológicos en el entorno de Lorca. El resultado obtenido en este trabajo muestra una relación entre el terremoto del año 1674 y el terremoto del 2011, y además muestra desprendimientos relacionados con el gran terremoto de Lisboa de 1755 (EMS VI a 800 km del epicentro, aproximadamente) (Martínez-Solares, 2001).

Sismicidad histórica en Lorca

Lorca es una ciudad antigua dentro de la provincia de Murcia, cuyo origen se remonta a la época romana de la Península Ibérica (siglo I AD, aproximadamente) siendo atravesada por la vía Augusta que llegaba a los Pirineos y cuyo nombre era *Eliocroca*. Posteriormente durante la época islámica, la ciudad pasó a denominarse Lurga, desarrollándose la agricultura y las obras hidráulicas en relación con la huerta murciana. Es en el año 1244 cuando Lorca se rinde a las huestes de Alfonso X, pasando a ser uno de los municipios más extensos de España, que incluía las localidades de Águilas, Mazarrón y Puerto Lumbreras, entre otros. Esta continua ocupación humana en un entorno de actividad sísmica moderada es la principal causa del conocimiento actual que tenemos de los terremotos históricos que afectaron al municipio lorquino. En concreto se conocen efectos sobre la urbe lorquina de los terremotos de los años 1579, 1674 y 1818 (Muñoz-Clarés *et al.*, 2012), así como el terremoto reciente de 2011 con datos ya instrumentales (IGME, 2011).

En cuanto al tamaño de los terremotos, la región de Murcia ha sufrido varios terremotos históricos y algunos instrumentales de intensidad superior a VI (EMS98), según se desprende del catálogo de Mar-

tínez-Solares y Mezcuca (2002). Más concretamente en las cercanías de Lorca el catálogo citado anteriormente identifica tres terremotos históricos (Martínez-Guevara, 1984, Muñoz-Clarés *et al.*, 2012). Un cuarto terremoto sería el acontecido en el 2011, en época instrumental moderna (post-1987), el cual lo incluimos en este apartado debido a la gran cantidad de desprendimientos rocosos que sucedieron, coetáneos con la sacudida de 7 segundos (IGME, 2011, Pérez-López *et al.*, 2011, Rodríguez-Peces *et al.*, 2012, Alfaro *et al.*, 2012).

1. *Terremoto de 1579*. El 30 de enero de dicho año se sintió un terremoto de intensidad VII (EMS98), según atestiguan varios documentos del archivo municipal de Lorca.
2. *Terremoto de 1674*. El 28 de agosto de dicho año se sintió un terremoto muy destructivo con intensidad VIII (EMS98), que generó numerosos muertos y destrucción de edificios, afectando a gran parte de los edificios patrimoniales (Rodríguez-Pascua *et al.*, 2012). Lo interesante es que este terremoto es muy similar al sufrido en el 2011, a pesar de tener una intensidad mayor. Ambos fueron terremotos compuestos, con graves daños en edificios patrimoniales como la colegiata de San Patricio y provocando caída de bloques de las sierras cercanas.
3. *Terremoto de 1818*. Este terremoto del 20 de diciembre presenta una menor intensidad sísmica, entre VI y VII (EMS98), afectando bastante menos que los anteriores a las edificaciones y a la población en general.
4. *Terremoto 2011*. Ocurrido el 11 de Mayo del 2011 a las 18:50 hora local, magnitud M_w 5,2, Intensidad EMS98 VII puntual, profundidad entre 5 y 2 km, mecanismo focal de desgarre con componente inversa (IGN, 2011). Además, el IGN detectó más de 100 réplicas asociadas al evento principal y un precursor de magnitud M_w 4,5 que se produjo tres horas antes.

Análisis de liquenometría

La liquenometría es una técnica que permite fechar superficies rocosas mediante el estudio del crecimiento de las diferentes especies de líquenes sobre ellas. Por tanto, permite datar eventos geomorfológicos asociados a desprendimientos rocosos y deslizamientos. Dentro de los métodos de datación se clasifica como química-orgánica, puesto que es la tasa de crecimiento de un ser vivo sobre una superficie expuesta. Sobre los primeros trabajos en liquenometría destacamos los de Fink (1917), Benedict (1967), Proctor (1977), Loc-

ke (1979), los cuales establecen las bases metodológicas para la medición de curvas de crecimiento de líquenes en relación a la edad de exposición de los depósitos morrénicos en zonas de clima glacial-periglacial. En consecuencia, la aplicación más inmediata de dicha metodología se tradujo en el estudio de la distribución espacial de los depósitos glaciares y sus edades de exposición en relación al retroceso glacial, los cuales se correlacionaron rápidamente con estudios climáticos en ambientes alpinos. Por otro lado, el bajo coste y poca complejidad tecnológica que acompaña dicha metodología, hizo que se extendiera rápidamente su uso de forma generalizada para depósitos glaciares. En España estos trabajos pioneros corresponden a los de Chueca (1991) entre otros, por citar un ejemplo de liquenometría aplicada al estudio del flujo glacial.

Sin embargo, diferentes problemas que han surgido posteriormente, asociados a las diferentes especies de líquenes utilizadas, hace que la liquenometría sea una técnica más complicada de lo que parece a priori, sobre todo si se pretende alcanzar niveles de precisión elevados (1% en 100 años de intervalo). El trabajo de Jomelli *et al.* (2007) detalla la obtención de la curva de crecimiento para *Rhizocarpon geographicum* en función del "tipo" de medida del talo que se tome. Por ejemplo, el diámetro circunscrito máximo, el diámetro mínimo, el diámetro medio o bien una distribución completa de diámetros sobre la superficie a datar.

Los trabajos de Innes (1985 y 1986), aparecen como una referencia necesaria y que se deben de tener en cuenta antes de acometer una datación liquenométrica sobre cualquier superficie rocosa. En ellos, se describen a conciencia la geometría de crecimiento de los líquenes como individuos aislados (talo), las bases metodológicas en la obtención de datos de campo y aplicado a diferentes especies de líquenes, así como la estimación de los errores asociados.

En general, las especies de líquenes más utilizados corresponden a aquellos clasificados como "crustosos" y cuya geometría es de tipo discoidal. Varias especies obedecen dicha geometría, tal y como se describirá más adelante. Los líquenes crustosos se caracterizan por ser individuos aislados que se alimentan de rocas y que aparecen como discos muy regulares, de relieve plano y de difícil extracción, y que presentan un crecimiento constante durante su etapa de vida, pudiendo llegar incluso a los 10.000 años de edad (Brinner *et al.*, 2009). En cuanto al tipo de crecimiento que presenta un líquen durante su vida, los expertos no se han puesto de acuerdo sobre el patrón que desarrollan, así como el papel de la especie seleccionada y los principales parámetros climáticos impli-

cados (Benedict, 2008). En este trabajo, hemos asumido el crecimiento lineal para las especies de líquenes reconocidas, según los trabajos de Pérez-López *et al.* (2010a y 2010b).

Los líquenes aparecen en cualquier tipo de roca (silíceas, carbonatadas, ígneas, volcánicas, metamórficas, etc.) y en cualquier tipo de clima (incluyendo los más extremófilos como los árticos y antárticos), alimentándose exclusivamente de nutrientes extraídos de la propia roca. De todas las especies de líquenes crustosos conocidos, el *Rhizocarpon geográficum* (L) es la especie más utilizada por diversos motivos. En primer lugar es un líquen que aparece en cualquier parte del mundo, asociado a rocas siliciclásticas en ambientes alpinos, de crecimiento muy lento (0.3-0.01 mm por año) (e.g. Carrara y Andrews, 1973; Gob *et al.*, 2003), formando el talo un círculo bastante simétrico y sin excentricidad, así como presentando un crecimiento continuo y uniforme, dentro de los parámetros climáticos de la zona. Todas estas propiedades hacen del *Rhizocarpon ss.* Un candidato ideal para su aplicación en liquenometría (Innes, 1985; Jomelli *et al.*, 2007).

Sin embargo, las litologías que se estudian en este trabajo corresponden a rocas detríticas de grano carbonatado, concretamente calcarenitas tortonienses (Martínez-Díaz *et al.*, 2001), así como diversas rocas carbonatadas de similar edad que tapizan la Sierra de las Estancias en el entorno de Lorca (Fig. 1). Es por ello que en la determinación de la edad liquenométrica, se han utilizado especies de líquenes de tipo calcícola, crustosos y asociados a climas templados. Los trabajos de McCarthy y Smith (1996), obtienen varios valores en la tasa de crecimiento para las especies *Xanthorias sp.* y *Aspicillas sp.*, ambas de marcada afinidad básica en cuanto a la superficie rocosa a colonizar, aunque localizados en climas periglaciares de las *Rocky Mountains* en Canadá. Ambos autores ponen de manifiesto la necesidad de calibrar de forma regional la curva de crecimiento de dichos líquenes, al estar afectados por factores locales, por ejemplo por el tipo concreto de litología, por las horas de luminosidad, cantidad de agua caída por unidad de tiempo, orientación de la roca en relación a la exposición solar, etc.

En cuanto a la aplicación de la liquenometría en el estudio y las dataciones en desprendimientos de rocas de origen sísmico, y asociadas a grandes sismos (magnitud superior a M6), se describen varias técnicas y resultados de forma detallada en los trabajos de Bull (1996a y 1996b). Dichos trabajos demuestran que posteriormente a la caída masiva de rocas en relación a terremotos fuertes, se produce la colonización de los bloques movilizados por diversas espe-

cies de líquenes y que, estudiados convenientemente, podrían dar información sobre eventos pasados. La metodología consiste en poner fecha a los bloques para estudiar el volumen máximo movilizado y comprobar si coincide con un evento concreto en el tiempo. En este trabajo utilizamos dicha metodología para intentar asociar los desprendimientos rocosos que aparecen en la Sierra de las Estancias y que pudiesen estar asociados a sismos históricos en la zona, tanto los descritos anteriormente como alguno más antiguo.

Metodología

Para obtener una edad líquen asociada a un evento geomorfológico cualquiera, en general se procede mediante dos pasos:

1. se calibra la tasa de crecimiento anual de una especie concreta de líquen, midiendo diámetros talinos sobre superficies rocosas de edad conocida. En nuestro caso hemos optado por el diámetro máximo medido "exclusivamente" en talos completos o en individuos con más de tres cuartas partes de circunferencia completa. En talos elípticos hemos optado por medir el diámetro máximo (ver Innes, 1986). Para conocer previamente la edad de una superficie expuesta, se utilizan cementerios y en concreto sus sepulturas como fuente de datos, obteniéndose la denominada curva numérica (Pérez-López *et al.*, 2010b). Esta curva se construye midiendo líquenes en superficies horizontales sobre sepulturas de misma litología y con la edad grabada. Además, también pueden utilizarse otros métodos como dendrocronología y radiocarbono para datar rocas tipo y luego extrapolar diámetros de individuos (talos) liquénicos con edades absolutas (McCarthy y Smith, 1996; Bull, 1996a). En este trabajo hemos utilizado la tasa de crecimiento propuesta por Pérez-López *et al.* (2010b) para la especie de líquen crustoso y calcícola *Aspicilia radiosa* (Hoffm.), de 0,24 mm/año (Fig. 2.1). Esta elección obedece a la cercanía con la zona donde trabajaron los autores anteriores (<50 km), misma climatología, mismas unidades litológicas (calcarenitas del Mioceno tardío) y en general, mismas condiciones para el crecimiento de líquenes sobre superficies rocosas expuestas.
2. Calibración de la curva de crecimiento utilizada de forma local mediante datos obtenidos en el cementerio de Lorca y en estructuras arquitectónicas antiguas como la Rambla de los 17 Arcos,



Figura 2. Diferentes especies de líquenes calcícolas y crustosos medidos sobre bloques en los desprendimientos de La Rambla de los 17 Arcos. 1. *Aspiciella radiosa*, 2. *Aspiciella calcarea*, 3. *Caloplaca aurantia* y 4. *Lecanora muralis*.

Figure 2. Calcicolous and crustose lichen species recognised in this work in the Rambla de los 17 Arcos (R17A): 1. *Aspiciella radiosa*, 2. *Aspiciella calcarea*, 3. *Caloplaca aurantia* and 4. *Lecanora muralis*.

acueducto construido mediante bloques de caliza tortoniense en el año 1791 (Pelegrín-Garrido, 2006). La tabla 1 resume las tasas de crecimiento obtenidas para otras especies calcícolas y que se han reconocido en los bloques estudiados en los diferentes desprendimientos rocosos, a partir de los datos en el cementerio de la localidad de Lorca. Se observa una elevada similitud en los datos obtenidos en el cementerio de Lorca y en la Rambla de los 17 arcos para *A. radiosa*, completándose además para *A. calcarea*, *C. aurantia* y *L. muralis* (Fig. 2.2; 2.3; 2.4). Toda esta asociación de líquenes presenta valores similares de crecimiento anual para un individuo único sin coalescencia y presentando un talo completo por lo menos superior al 50%.

También se han reconocido las siguientes especies de líquenes en los bloques medidos y que no se han calibrado al no disponer de datos en cementerios ni en monumentos históricos en el entorno. Además, algunos de ellos no son crustosos, ni discoidales. Sin embargo, es interesante citarlas como ejemplo de diversidad ecológica en las superficies de roca medidas. Entre las especies reconocidas destacamos: *Diploschistes ocellatus*, *Verrucaria parmigera*, *Xanthoria parietina*, *Xanthoria nigrescens*, *Lecanora dispersa*, *Diplotonma epipolium*, *Caloplaca holocarpa*, *Candelariella aurella* y *Placocarpus shaereri*.

Especie de liquen	Diámetro mm	Fecha años	CA	CA*
<i>Aspiciella radiosa</i> (Hoffm.)	20.49	1907	0.19	0.24
	21.87	1913	0.22	
	5.1	1996	0.31	
<i>Aspiciella calcarea</i> (Hoffm.)	51.81	1791	0.23	0.235
	39.41			
<i>Caloplaca aurantia</i> (Pers.)	40.78	1915	0.42	0.37
	14.03	1969	0.32	
<i>Lecanora muralis</i> (Schreb.)	18.7			0.24

Tabla 1. Tasas de crecimiento determinadas sobre especies de líquenes crustosos y calcícolas en el cementerio de Lorca y en el acueducto de la Rambla de los 17 Arcos (Murcia, SE de España). CA = Crecimiento anual. CA* = Crecimiento anual medio. El valor de CA* es el utilizado para determinar las edades de los diferentes bloques medidos en los desprendimientos rocosos. *Lecanora muralis* se estimó mediante correlación cruzada con *Aspiciella calcarea* y *Caloplaca aurantia*.

Table 1. Growth rate for calcicolous lichens on tombstones in the Lorca cemetery and the mediaeval aqueduct at Rambla de los 17 Arcos (Murcia, SE Spain). CA= annual growth. CA* = average annual growth. We used the CA* value for determining the lichenometric ages on different blocks. Annual growth rate for *Lecanora muralis* was calculated by crossing values with *Aspiciella calcarea* and *Caloplaca aurantia*.

Resultados

Se han seleccionado dos zonas para el estudio de los líquenes (El Cejo de los Enamorados y la Rambla de los 17 Arcos), en las cuales se produjo una caída masiva de bloques de calcarenita durante el terremoto de 2011 (Fig. 1). En ambas laderas se observan además caídas antiguas y masivas de bloques, de dimensiones y de extensión igual o superior a la generada por el terremoto de Lorca del año 2011. Es sobre estos bloques antiguos donde se ha procedido a realizar una medida sistemática de diámetros de talos de líquenes de las siguientes especies: *Lecanora muralis*, *Aspicilia calcarea*, *Aspicilia radiosa* y *Caloplaca aurantia* (Fig.2).

En el estudio del afloramiento del Cejo de los Enamorados (Fig. 1), se han analizado los dos bloques desprendidos de mayor tamaño (de unos 30 m³ cada uno, aprox.), y que se movilizaron con anterioridad al terremoto de Lorca de 2011. Estos bloques aparecen cubiertos por líquenes y están asociados a desprendimientos rocosos similares a los ocurridos durante el terremoto

de 2011 (Fig. 3). No se han medido la multitud de bloques menores debido a que podrían haber sido movidos con posterioridad por acción antrópica (bloques de 0.5 m³ de volumen). En primer lugar se ha identificado la cicatriz del bloque, con el fin de asegurar que no se mide una superficie rocosa expuesta anteriormente al desprendimiento. Por otro lado, solo se midieron líquenes sobre superficies sub-horizontales (inclinación inferior a 15°), para evitar el efecto "vertiente". Este efecto provoca que dependiendo de la orientación de la superficie y las horas de insolación, el talo pueda crecer con diferentes tasas de crecimiento anual.

La tabla 2 y la figura 4 muestran la distribución de edades liquenométricas para los dos bloques, junto con las fechas de los principales terremotos históricos en Lorca. Se observa que el bloque 1 presenta un líquen en 1623AD, mientras que las otras edades se acercan a 1770. Teniendo en cuenta el terremoto de 1755 que generó intensidad VI (EMS98) en la zona (Martínez-Solares y Mezcuca, 2002), igual que el de 1579, asumiendo como buena la edad más antigua, esa roca podía haber caído con el terremoto de 1579,



Figura 3. Detalle del bloque de mayor tamaño (volumen ~ 32 m³), correspondiente al desprendimiento Cejo de los Enamorados.
Figure 3. Detail of the biggest block located within the Cejo de los Enamorados (volume ~ 32 m³).

Bloque	Especie	Diámetro (mm)	cr. (mm/año)	edad BP2011	error	año AD
1	<i>Aspicilia radiosa</i>	94	0.2425	388	10	1623
1	<i>Aspicilia radiosa</i>	59	0.2425	243	10	1768
1	<i>Aspicilia radiosa</i>	56	0.2425	231	10	1780
1	<i>Aspicilia radiosa</i>	55	0.2425	227	10	1784
1	<i>Aspicilia radiosa</i>	35	0.2425	144	10	1867
1	<i>Aspicilia radiosa</i>	29	0.2425	120	10	1891
2	<i>Aspicilia radiosa</i>	80	0.2425	330	10	1681
2	<i>Aspicilia radiosa</i>	36	0.2425	148	10	1863
2	<i>Aspicilia radiosa</i>	79	0.2425	326	10	1685
2	<i>Aspicilia radiosa</i>	23	0.2425	95	10	1916

Tabla 2. Valores obtenidos de edades liquenométricas para los dos bloques considerados del Cejo de los Enamorados, junto con el error asociado, especie de líquen, edad BP-2011 y edad calendárica. En gris se indica el S.XVII. (Modificado de Pérez-López *et al.*, 2012).

Table 2. Lichenometric ages obtained on the rock blocks located within the Cejo de los Enamorados, error estimation, lichen species, the BP age and the calendar age. The XVIII century is highlighted in grey (after Pérez-López *et al.*, 2012).

o el de 1674 (si es una coalescencia entre dos individuos), y pudo ser removilizada en el terremoto de 1755. Sin embargo el bloque 2, muestra una edad coherente con el terremoto de 1674, sin apreciarse líquenes asociados a otros terremotos históricos, incluido el de Lisboa.

En cuanto a los desprendimientos rocosos de la Rambla de los 17 Arcos, se localizan a casi un kilómetro hacia el oeste de los anteriores (Fig. 1), y constituyen inestabilidades de ladera de más entidad (0.02 km², 2 ha aproximadamente), con bloques que alcanzan los 350 m³ (Fig. 5) y cuya ladera se orienta SO. Lo interesante de este desprendimiento es que se reactivó con nuevos desprendimientos durante el terremoto

de 2011 y además presenta una amplia variedad de bloques movilizados. Esto convierte este afloramiento en excepcional, midiéndose un total de 20 bloques

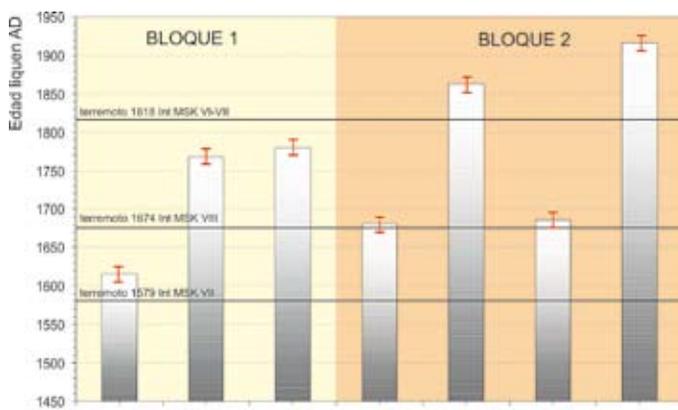


Figura 4. Edades liquenométricas en la superficie horizontal del bloque 1 y del bloque 2 (Cejo de los Enamorados). En rojo se indica el error en la estimación de la edad.

Figure 4. Lichenometric ages for the exposed surfaces of blocks 1 and 2 (Cejo de los Enamorados). The red bar indicates the error in estimation of its age. See text for further explanation.

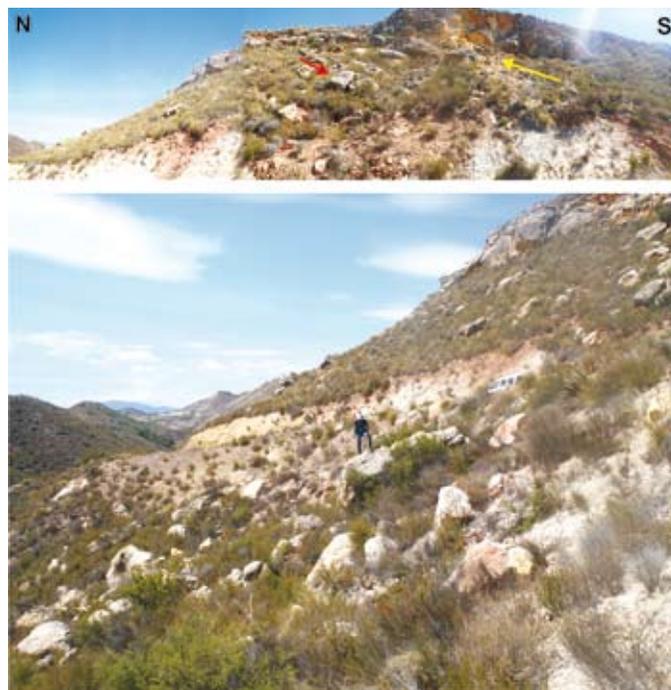


Figura 5. Imagen en detalle de los desprendimientos rocosos de la Rambla de los 17 Arcos. Arriba. La flecha amarilla indica los bloques desprendidos durante el terremoto del 11 de mayo del año 2011. La flecha roja señala bloques desprendidos con anterioridad. Es sobre éstos donde se aplica la liquenometría. Inferior. Detalle general de los bloques desprendidos.

Figure 5. Panoramic photo of the rock-falls in the Rambla de los 17 Arcos (R17A). The yellow arrow indicates blocks activated during the 2011 Lorca earthquake whilst the red arrow indicates ancient blocks.

con un volumen de material movilizado de 1200 m³, estimándose el volumen total movilizado cerca de 2000 m³ contando los bloques que no se han medido líquenes. Se estima que el material movilizado durante el terremoto de 2011 en esta zona no sobrepasó los 100 m³, siendo el total movilizado inferior a 1000 m³ (Rodríguez-Peces *et al.*, 2012). La orientación de estas caídas de bloques es hacia el suroeste. La figura 6 muestra la distribución de bloques y su edad de colonización por líquenes para dos especies en concreto, *A. radiosa* y *A. calcarea*. El histograma de la parte superior muestra como los ocho bloques mayores (~ 600 m³) se movilizaron durante el terremoto de 1674. Atendiendo al error de 4 años obtenido en la medida (Pérez-López *et al.*, 2010b) y al periodo de ecesis de unos 5 años (Fink, 1917), podemos afirmar que el inicio de dichos desprendimientos se relaciona directamente con dicho evento.

También hay evidencias de movilizaciones posteriores durante el terremoto de Lisboa de 1755, siendo este efecto más acusado al cambiar de especie, tal y como muestra el histograma para *A. calcarea* (Fig. 6 inferior). El volumen total movilizado durante el terremoto de 1755 en este desprendimiento es de 200 m³, según se desprende del cubicaje llevado a cabo durante la medida de líquenes "in situ". Hay que tener en cuenta que este efecto lejano se ve favorecido por el hecho de que ya existían bloques caídos más sencillos de movilizar siendo los bloques asociados directamente a dicho evento con un volumen inferior a 10 m³.

Discusión: estimación del tamaño del sismo de 1674

El estudio del desprendimiento rocoso de la Rambla de los 17 Arcos permite asignar un volumen moviliza-

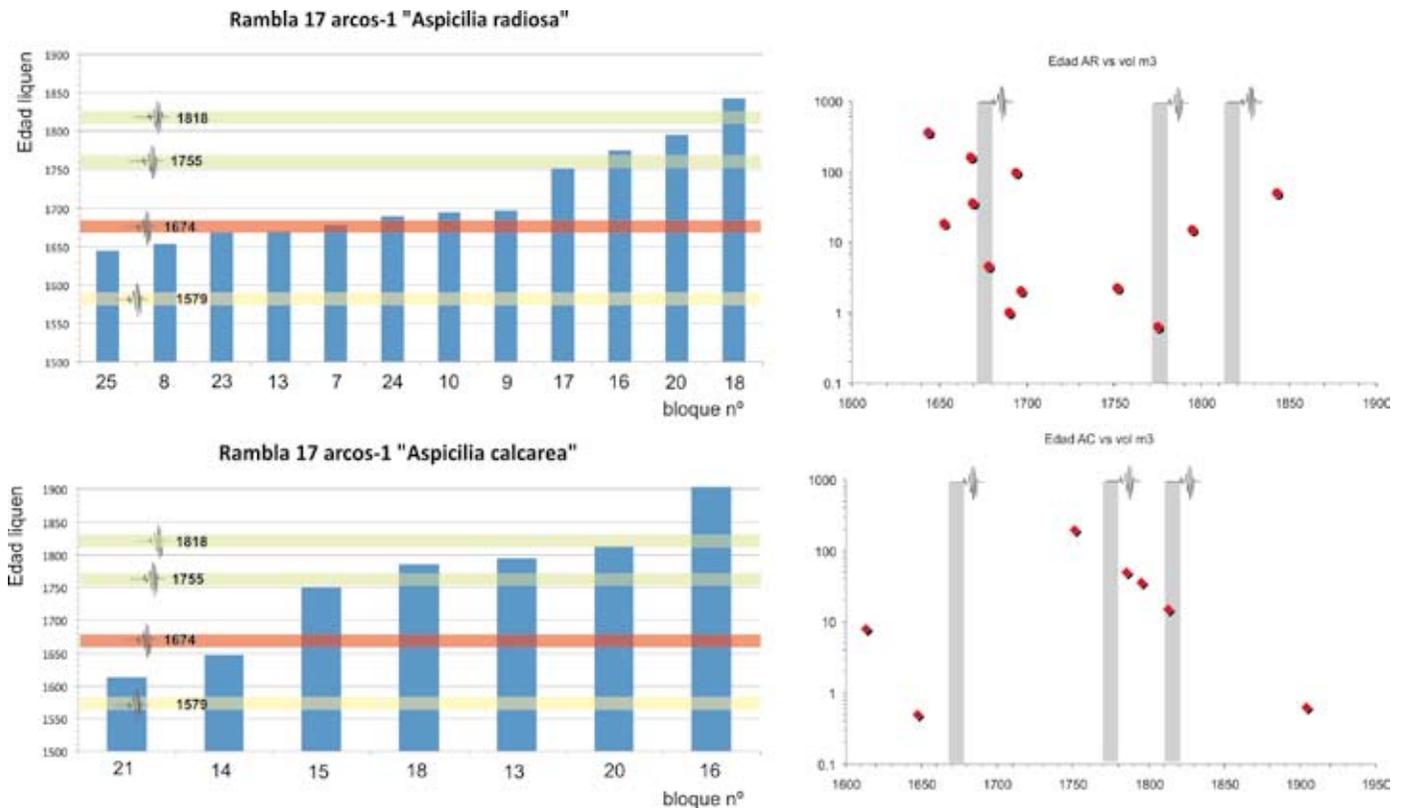


Figura 6. Izquierda. Edades liquenométricas de los bloques medidos en la Rambla de los 17 Arcos. Se observa que las edades se correlacionan con el terremoto de 1674, así como reactivaciones en 1775 y en 1818. Derecha. Relación entre el volumen de bloque movilizado en relación con el terremoto que lo desencadenó. Se observa que el terremoto de 1674, además de ser el responsable de estos desprendimientos, movilizó más de 1000 m³, siendo inferior a un orden de magnitud para 1755 y 1818. El material movilizado en el terremoto de 2011 en estos desprendimientos apenas llega a 75 m³. Los volúmenes rocosos indicados se cubicaron en campo en aquellos bloques que presentaban líquenes. Las horquillas rojas indican el error de medida (4 años) mas el periodo de ecesis (5 años), en total ±10 años.

Figure 6. Left: Lichenometric ages of several blocks in the Rambla de los 17 Arcos. Most of the blocks were mobilised around 1674, the date of the biggest earthquake ever recorded at Lorca. There is also evidence for the remobilisation of several blocks in 1755 (the great earthquake at Lisbon) and 1818. Right: Relationship between the volume of the block and the age of mobilisation. The 1674 earthquake mobilised the greatest number of rocks (1,000 m³) and the 1755 and 1818 earthquakes lesser quantities. During the 2011 earthquake only 75 m³ were mobilised. These volumes were obtained by direct measurement in the field. The red bar indicates the error associated with the lichenometric ages (4 yrs), plus the ecesis period (5 yrs), giving a total uncertainty value of 10 yrs.

do en cada sismo, tanto los de campo cercano de Lorca del año 1674 y 2011, como el de campo lejano de Lisboa del año 1755. La figura 7 muestra la distribución porcentual en volumen (m^3) movilizado asociado a cada sismo, siendo el de 1674 unas veinte veces mayor que el de 2011. Dicho volumen se estimó midiendo la geometría de cada bloque con un *distanciómetro* láser modelo LEICA A8.

El terremoto de 2011 se ha estimado en una magnitud M_w entre 5,1-5,2 (IGN, 2011), lo que equivaldría a una energía entre $3,981072 \times 10^{12}$ y $5,623413 \times 10^{12}$ Julios, según la ecuación (siendo M la magnitud) (Choy y Boatwright, 1995):

$$\log E = 1,5 * M + 4,8 \quad [\text{ecuación 1}]$$

Asumiendo que el terremoto de 1674 pueda tener una localización y parámetros focales similares a aquellos parámetros del terremoto 2011 (localización epicentral, profundidad y mismo segmento activado de la Falla de Alhama de Murcia, FAM), la energía necesaria para movilizar un volumen veinte veces superior estaría entre $(7,96214 - 11,246826) \times 10^{13}$ Julios, lo que equivale a afirmar que este terremoto histórico tendría una magnitud $6,0 < M < 6,17$. Por supuesto esta especulación es asumiendo un comportamiento lineal entre la energía liberada y el volumen de material desprendido frente a una misma distancia epicentral. Este valor es coherente con la magnitud máxima estimada para el segmento de Lorca-Totana por Martínez-Díaz *et al.* (2001), el cual estima una longitud total de ruptura con capacidad de disparar un terremoto máximo de M 6,8.

Por el contrario, asumiendo para el sismo del 1674 una magnitud similar a la del terremoto del año 2011 ($5,1 < M_w < 5,2$), es posible desplazar el epicentro histórico unos 20 km (atendiendo a la proporcionalidad en el volumen movilizado), hacia el SO (Figs. 1 y 7). De esta forma el epicentro quedaría localizado en la zona del segmento de Totana - Alhama de Murcia al NE, o más allá de Puerto Lumbreras hacia el SO. Esta opción no parece muy lógica en función de las descripciones históricas del sismo de 1674 (e.g. Martínez-Guevara, 1984; Muñoz-Clarés *et al.*, 2012), así como de la anisotropía en los daños asociados en el patrimonio y que se reactivaron durante el sismo del año 2011 (IGME, 2011, Rodríguez-Pascua *et al.*, 2012).

Por otro lado, asumiendo un espesor sismogénico de la FAM de entre 12 y 15 km como profundidad máxima hipocentral (García-Mayordomo 2005), y atendiendo a la proporcionalidad de volumen movilizado en relación al evento del 2011, la energía liberada podría incrementarse hasta 1×10^{15} Julios, lo que equivaldría a una magnitud de M 6,8, en consonancia de nuevo con lo publicado por Martínez-Díaz *et al.* (2001).

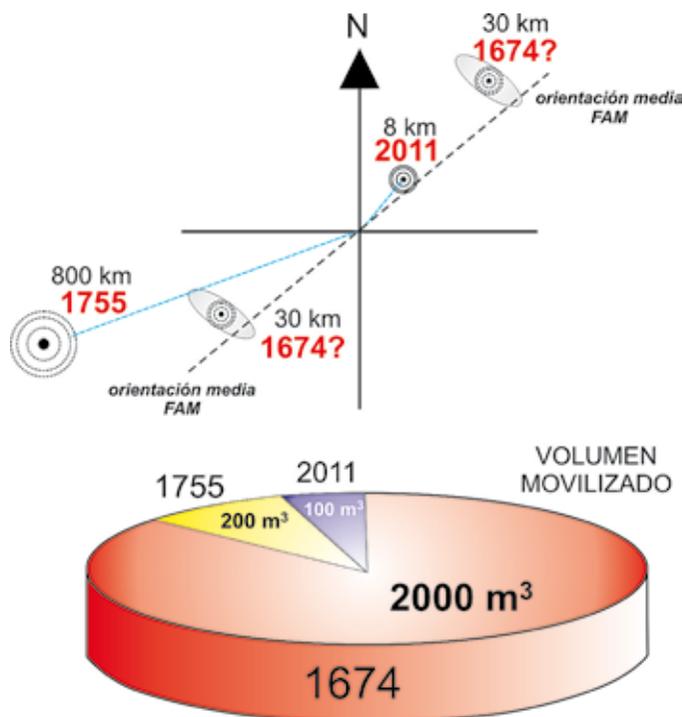


Figura 7. Volumen total movilizado en los desprendimientos de la Rambla de los 17 Arcos (ver Fig.1 para localización) en función de la edad de los bloques movilizados y los principales sismos asociados: Lorca 1674 (EMS VIII), Lisboa 1755 (MSK VI) y Lorca 2011 (EMS VII). Arriba se indica la orientación del desprendimiento rocoso y la localización epicentral. Las elipses corresponden a un hipotético error de localización epicentral, asumiendo que el terremoto de 1674 fuese debido al segmento Lorca-Totana de la FAM.

Figure 7. Total volume mobilised during the different historic earthquakes at Lorca: Lorca (EMS VIII), Lisbon 1755 (MSK VI) and Lorca 2011 (EMS VII). In the upper part we have plotted the orientation of the rock falls and the location of the epicentre, both the epicentre of the 2011 earthquake and the conjectured epicentre of the 1674 earthquake. The ellipse corresponds to a hypothetical error of spatial location, assuming that this earthquake was triggered by the Lorca -Totana segment of the Alhama de Murcia fault.

Conclusiones

El terremoto de Lorca del año 2011 y de magnitud M_w 5.2 produjo caídas de rocas en los relieves tortonien-ses de la Sierra de las Estancias (SO de Lorca), donde se observan caídas anteriores con volúmenes de rocas mayores. Mediante la aplicación de la liquenometría como técnica numérica para estimar la edad de los desprendimientos es posible concluir:

1. El terremoto histórico del año 1674 es el iniciador de los desprendimientos rocosos en las laderas del Cejo de los Enamorados y de la Rambla de los 17 Arcos.
2. Estas mismas laderas han experimentado nuevos desprendimientos por efecto lejano del gran terremoto de Lisboa del año 1755 y por el terremoto de Lorca del año 2011.

3. El volumen total movilizado por el sismo histórico de 1674 en la Rambla de los 17 Arcos es de 2000 m³, veinte veces mayor que el volumen movilizado durante el sismo del año 2011 en este mismo punto.

Atendiendo a estas conclusiones, es posible establecer una hipótesis sobre el tamaño asociado al sismo del año 1674 partiendo de los parámetros focales del sismo del año 2011 (M_w 5,2, profundidad 4 km, localización epicentral asociada al segmento Lorca-Totana de la FAM). En este caso estimamos una magnitud $6,0 < M < 6,1$ para un sismo cuya profundidad hipocentral sea menor a 5 km, o de M 6,8 para un sismo localizado entre 12 y 15 km de profundidad.

Finalmente señalar que estas conclusiones constituyen unos resultados preliminares del estudio mediante liquenometría de algunos desprendimientos rocosos en la Sierra de las Estancias, al SO de Lorca, encontrando muchos más desprendimientos antiguos tanto en la misma sierra como en la Sierra de la Tercia (NE de Lorca) y que también fueron reactivados durante el terremoto del año 2011. La comparativa total entre los volúmenes afectados pondrá de manifiesto la similitud entre los sismos de los años 1674 y 2011, así como la proporción de la energía liberada entre ambos. En cualquier caso, todo apunta a que el sismo del año 1674 fue mayor, tal y como se refleja en la intensidad EMS estimada por el IGN (1674, EMS VIII vs 2011, EMS VII).

Agradecimientos

Quisiéramos agradecer las revisiones constructivas por parte de la Dra. Virginia Ruiz Villanueva y del Profesor Martín Rodríguez Peces y que tanto han contribuido a mejorar este trabajo. Además, este trabajo se ha financiado con los proyectos del Plan Nacional RESCATELO (CGL2011-14925-E), y TECTACT GR35/10-A-910368, siendo además una contribución del QTECT- Grupo de Tectónica Activa y Paleosismicidad de AEQUA.

Referencias

Alfaro P., J. Delgado, F.J. García-Tortosa, L. Lenti, J.A. López, C. López-Casado, S. Martino. 2012. Widespread landslides induced by the Mw 5.1 earthquake of 11 May 2011 in Lorca, SE Spain. *Engineering Geology*, 137-138, 40–52.

Benedict, J.B. 1967. Recent glacial history of an alpine area in the Colorado Front Range, U.S.A. I. Establishing a lichen-growth curve. *Journal of Glaciology*, 6(48), 817-832.

Benedict, J.B. 2008. Experiments on Lichen Growth, III. The Shape of the Age-Size Curve. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40(1), 15–26.

Briner, J.P., P.T. Davis, G.H. Miller. 2009. Latest Pleistocene and Holocene glaciation of Baffin Island, Arctic Canada: key patterns and chronologies. *Quaternary Science Reviews*, 28(21-22), 2075-2087.

Bull, W.B. 1996a. Dating San Andreas Fault earthquakes with lichenometry. *Geology*, 24, 111-114.

Bull, W.B. 1996b. Prehistorical earthquakes on the Alpine fault, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 101, 6037–6050.

Carrara, P. E., and Andrews, J. T. 1973. Problems and application of lichenometry to geomorphic studies, San Juan Mountains, Colorado. *Arctic and Alpine Research*, 5, 373-384.

Choy, G. L. and Boatwright, J. L. 1995. Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress. *Journal of Geophysical Research* 100(B9), 18205–28, DOI: 10.1029/95JB01969.

Chueca, J. 1991. Pautas de flujo en un glaciar rocoso activo (Skjoldalur, Islandia): aplicación de técnicas liquenométricas. *Cuadernos I. Geográfica*, 17(1-2), 47-67.

Fink, B. 1917. The rate of growth and ecesis in lichens. *Mycologia*, 9, 138–158.

García-Mayordomo, J. 2005. *Caracterización y Análisis de la Peligrosidad Sísmica en el Sureste de España*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 373 p.

Gob, F., F. Petit, J.-P. Bravard, A. Ozer, A. Gob. 2003. Lichenometric application to historical and sub-recent dynamics and sediment transport of a Corsican stream (Figarella River-France). *Quaternary Science Reviews*, 22, 2111-2124.

IGME, 2011. 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., 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.

IGN, Varios autores. 2011. *Informe del sismo de Lorca del 11 de mayo de 2011. Instituto Geográfico Nacional, IGN*. Ministerio de Fomento, Madrid. 129pp.

Innes, J. L. 1985. Lichenometry. *Progress in Physical Geography*, 9, 187-254.

Innes, J.L. 1986. Dating Exposed Rock Surfaces in the Arctic by Lichenometry: The Problem of Thallus Circularity and Its Effect on Measurement Errors. *Arctic*, 39(3), 253-259.

Jomelli, V. Grancher, D. Naveau, P. Cooley, D. and Brunstein, D. 2007. Assessment study of lichenometric methods for dating surfaces. *Geomorphology*, 86, 131-143.

Locke, W.W., 111, Andrews, J.T., and Webber, P.J. 1979. *A manual for lichenometry*. British Geomorphological Research Group Technical Bulletin, 26. London. 45 pp.

Martínez-Díaz, J.J., Masana, E., Hernández-Enrile, J.L., Santanach, P. 2001. Evidence for coseismic events of recurrent prehistoric deformation along the Alhama de Murcia fault, southeastern Spain. *Geologica Acta*, 36, 315–327.

Martínez-Guevara, J. B. 1984. *Temblores de tierra del núcleo sísmico de Lorca-Totana (Murcia)*. Estudio de sismicidad histórica IGN, nº 51, Madrid.

- Martínez-Solares, J.M. 2001. *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre del año 1755)*. Transcripciones de Fernando Rodríguez de la Torre. Instituto Geográfico Nacional. Madrid. 756 pp.
- Martínez-Solares, J.M. y Mezcua, J. 2002. *Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a. C.-1900)*. Instituto Geográfico Nacional. Monografías nº 18. Madrid. 256pp.
- McCarthy, D.P. and Smith, D.J. 1995. Growth Curves for Calcium-tolerant Lichens in the Canadian Rocky Mountains. *Arctic and Alpine Research*, 27(3), 290-297.
- Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audemard F., Azuma T., Clague J., Comerci V., Gurpinar A., Mc Calpin J., Mohammadioun B., Morner N.A., Ota Y. and Roghazin E. 2007. Intensity Scale ESI 2007. En: *Guerrieri L. & Vittori E. (Eds.): Memorie Descrittive Carta Geologica d'Italia.*, 74, Servizio Geologico d'Italia – Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, Roma, 53 pp.
- Muñoz-Clarés, M., M. Fernández-Carrascosa, M. O. Alcolea-López, M. C. Arcas-Navarro, N. Arcas-Ruiz, P. Caro del Vas, M. T. Cruz-López, M. García. 2012. Sismicidad histórica y documentación municipal: el caso de Lorca. *Boletín Geológico y Minero*. Este mismo volumen. 32 pp.
- Pelegrín-Garrido, M.C. 2006. Obras hidráulicas históricas de Lorca. *Alberca*, 4, 165-171.
- Pérez-López, R., M.A. Rodríguez-Pascua, P.G. Silva, J.L. Bischoff, L.A. Owen, J.L. Giner-Robles, and Díez-Herrero, A. 2010a. Lichenometry dating of rock collapse related to the great Lisbon Earthquake (1755) at the SE part of Spain. *Geophysical Research Abstracts*, 12, 2p.
- Pérez-López, Raúl, Rodríguez-Pascua, Miguel A., Silva, Pablo G., Giner-Robles, Jorge L., Bischoff, James L. y Owen, Lewis A. 2010b. Determinación de la curva de crecimiento para "Aspicilia radiosa" aplicada en dataciones liquenométricas en caídas de bloques. *Avances de la Geomorfología en España 2008-2010*, XI Reunión Nacional de Geomorfología, libro de resúmenes. Solsona.
- Pérez-López R., J.L. Giner-Robles, M.A. Rodríguez-Pascua, F. Martín-González, J. García Mayordomo, J.A. Álvarez-Gómez, M. Rodríguez-Peces, J.M. Insua-Álvarez, J. J. Martínez-Díaz and Silva, P.G. 2011. Testing Archaeoseismological techniques with instrumental seismic data caused by the Mw 5.1 Lorca Earthquake (11-5-2011, SE of Spain). En: *2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering*. Comunicaciones, 1: 10-14. Corinth, Greece.
- Pérez-López, R., J.J. Martínez-Díaz, M.A. Rodríguez-Pascua y F. Martín-González. 2012. Análisis de sismicidad histórica en Lorca mediante liquenometría aplicada a caídas de bloques: los terremotos de 1579 AD, 1674AD y 2011. *Geotemas*, vol. 13 pp. 470.
- Proctor, M. C. F. 1977. The growth curve of the crustose lichen *Buellia canescens* (Dicks.) de Not. *New Phytologist*, 79, 659-663.
- Rodríguez-Pascua M.A., R. Pérez-López, J.L. Giner-Robles, F. Martín-González y P.G. Silva. 2012. Efectos Arqueológicos del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011 en su Patrimonio Cultural. Nuevas estructuras de deformación y reactivación de estructuras anteriores pertenecientes al terremoto de 1674. En: *VIII Congreso Geológico de España*. *Geotemas*, vol. 13 pp. 465.
- Rodríguez-Peces M. J., J. García-Mayordomo, J. J. Martínez-Díaz y M. Tsige. 2012. Inestabilidades de ladera provocadas por el terremoto de Lorca de 2011 (Mw 5,1): Comparación y revisión de estudios de peligrosidad de movimientos de ladera por efecto sísmico en Murcia. *Boletín Geológico y Minero*. Este mismo volumen.
- Silva, P.G., Bardají, T., Lario, J., et al. 2007. Efectos Geológicos en Terremotos Históricos e Instrumentales en España y las Escalas de Intensidades. En: *Contribuciones al Estudio del Periodo Cuaternario*, (J. Lario y P.G. Silva, eds.) pp.173-174. Ávila.

Recibido: julio 2012

Revisado: agosto 2012

Aceptado: septiembre 2012

Publicado: octubre 2012