

## Prospects for Paleoseismology in Spain

P. SANTANACH and E. MASANA

*Dpt. de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona, Zona Universitària de Pedralbes,  
08028 Barcelona. eula@natura.geo.ub.es*

Paleoseismology is the study of prehistoric earthquakes, especially their location, timing and size. Paleoseismology and Neotectonics should not be confused. Whereas Neotectonics deals with general crustal deformation in recent times (late Cenozoic), Paleoseismology is concerned with sudden deformation of landforms and sediments during earthquakes. Paleoseismologists are only able to study earthquakes that produce recognizable surface deformation, i.e. earthquakes of  $M > 6$ .

Evidence of paleoearthquakes has been classified into two groups: 1) *primary paleoseismic evidence*, which is furnished by tectonic deformation resulting from coseismic slip along a fault plane (including growth of fault-related folds), and 2) *secondary paleoseismic evidence*, which is supplied by features resulting from earthquake shaking. Near fault primary evidence, e.g. fault scarps, faulted strata, and colluvial wedges, is especially important since it allows paleoseismologists to estimate seismic parameters (slip rate, maximum magnitude, recurrence time, elapsed time) of discrete seismogenic faults. Although secondary evidence, e.g. sand dikes, landslides, and soft-sediment deformation cannot be attributed to specific seismogenic faults, it does provide valuable information for estimating the seismic hazard in regions where near fault studies based on primary evidence are not totally feasible.

Paleoseismology allows the prolongation of instrumental and historical seismic catalogs back in time

by adding large prehistoric earthquakes. This is especially important in intraplate regions where faults show slow slip rates giving rise to large earthquakes with long average recurrence times ( $10^3$  to  $10^6$  yr). In these regions, historical catalogs cover only a short period of the recurrence time, and paleoseismic data play an essential role in obtaining realistic seismic hazard estimates, particularly in the case of long return periods. The Iberian Peninsula is such a case.

A number of research teams from different Spanish institutions have investigated the paleoseismicity of the Iberian Peninsula in recent years. This issue of Acta Geologica Hispanica is a collection of papers by these researchers, and presents the prospects and the potential application of Paleoseismology in Spain.

Based on the study of tsunami deposits in the gulf of Cádiz, Luque et al. furnish data on the return period of high magnitude events such as the 1755 Lisbon earthquake. A time span of about 2000 years separates the Lisbon earthquake from the previous tsunamigenic event. Rodríguez Pascua et al. use paleoseismites (loop bedding, disturbed varved lamination, mixed layer and pseudonodules on lacustrine sediments) to characterize the seismicity of the Prebetic Zone in the province of Albacete during the late Miocene. These authors compare the paleoseismic data obtained with the current seismicity and conclude that the Gutenberg-Richter relationship shows similar "b" values obtained from paleoseismological and instrumental data.

The paper on the paleoliquefaction in the Bajo Segura basin by Alfaro et al. constitutes an example of a paleoseismic approach based on secondary evidence. Paleoliquefaction occurred extensively during the 1829 Torrevieja earthquake, one of the most destructive earthquakes in Spain. The analysis of several layers of Holocene seismites together with a number of radiocarbon datings enables the authors to establish a recurrence period of ca. 1000 yr for moderate to high magnitude earthquakes which are capable of producing liquefaction in the Bajo Segura basin.

In considering the intensities felt during the 1851 Palma earthquake (VIII, MSK intensity) and the geomorphological features of the affected area, Silva et al. attribute this earthquake to the Sencelles extensional fault, which shows a recent fault scarp. The authors present a preliminary hypothesis of the recent seismic behavior of this fault by studying the scarp and the cross-section of the fault outcropping in an old quarry.

The Granada basin is one of the most active seismic areas in Spain. The Ventas de Zafarraya fault, which bounds the Granada basin on the South, triggered the last destructive Spanish earthquake, resulting in approx 900 deaths (the Christmas event of 1884). Reicherter concentrates on the ruptures and scarps of this fault. Radiocarbon datings indicate at least three strong events along this fault during the last 9 ka. Alfaro et al. also consider the Granada basin, especially the Padul fault, which bounds the basin on the East. Although this fault did not cause moderate to high magnitude earthquakes during the instrumental and historical period, the authors demonstrate (retrodeformation analysis of a natural outcrop) that the Padul fault produced various deformation events during the Quaternary. Paleoliquefaction in recent detritic sediments interlayered with peat deposits allowed the authors to date paleoearthquakes to ca. 30,000 yr BP.

The Alhama de Murcia fault is one of the most active faults in southeastern Spain. Two papers discuss this

fault, which is responsible for several historical events. Martínez-Díaz and Hernández-Enrile use travertine deposits cut by this oblique-slip fault to constrain its seismic behavior. On the basis of the geometrical relations between the travertine deposits and the fault, and uranium series datings, they conclude that the fault has moved with a slip rate of 0.08 mm/yr. Martínez-Díaz et al. present the preliminary results obtained in two trenches dug across the Alhama de Murcia fault in the vicinity of Lorca. At least three coseismic events occurred after 125 ka BP. The minimum vertical slip rate along the fault is 0.06 mm/yr and the average recurrence time probably does not exceed 40,000 yr. Further absolute dating is ongoing to constrain these estimates.

Finally, Masana et al. undertake a paleoseismological analysis of the El Camp fault scarp, which is located in the southern part of the El Camp fault (NE Spain), a seismically silent structure according to historical and instrumental data. This fault scarp cuts Quaternary alluvial fans. The results are based on the analysis of seven trenches and numerous datings using different techniques (paleomagnetism, thermoluminescence, uranium series, radiocarbon, pollen analysis). During the last 125 ka, the fault has moved with a slip rate of 0.02 mm/yr, and at least three well constrained surface-rupturing earthquakes have occurred. The recurrence time of large earthquakes during this period was estimated to be around 30 ka. and the elapsed time since the last large event ca. 3000 yr. Using the fault length and the vertical displacement per event, the largest estimated earthquake had a magnitude of  $M_W$  6.7.

The results presented in this issue of *Acta Geologica Hispanica* show how Paleoseismology can make a notable contribution to the knowledge of the seismicity of Spain, a region characterized by slow-slip faults. Neotectonics facilitates the detection of active faults, and Paleoseismology enables us to establish their seismic parameters. Every effort should be made to develop paleoseismological studies of active faults in order to improve our understanding of hazard estimates in Spain.

## Perspectivas de la paleosismología en España

La paleosismología es el estudio de los terremotos prehistóricos, especialmente su localización, su edad y sus dimensiones. No deben confundirse paleosismología y neotectónica. Mientras la neotectónica trata de manera general de la deformación cortical en tiempos recientes (Cenozoico), la paleosismología se ocupa de las deformaciones súbitas de las formas del relieve y de los sedimentos, que se producen durante los terremotos. Los paleosismólogos sólo son capaces de estudiar aquellos terremotos que producen deformaciones reconocibles en superficie, es decir, terremotos de  $M > 6$ .

Las pruebas de paleoterremotos se han clasificado en dos grupos: 1) *las pruebas paleosísmicas primarias*, suministradas por las deformaciones que ocurren como consecuencia del deslizamiento cosísmico a lo largo del plano de falla (se incluye el crecimiento de los pliegues relacionados con las fallas), y 2) *las pruebas paleosísmicas secundarias*, proporcionadas por las estructuras formadas como consecuencia de las sacudidas sísmicas. Las pruebas primarias próximas a las fallas, esto es, escarpes de falla, estratos fallados y cuñas coluviales, son especialmente importantes puesto que permiten estimar parámetros sísmicos de fallas individuales (tasa de deslizamiento, magnitud máxima, tiempo de recurrencia, tiempo transcurrido desde el último evento). Aunque las pruebas secundarias, como por ejemplo diques de arena, deslizamientos de masa, deformación de sedimentos no consolidados, no puedan ser atribuidas a fallas sísmogénicas específicas, proporcionan una valiosa información para estimar la peligrosidad sísmica en regiones donde los estudios basados en pruebas primarias no son totalmente factibles.

La paleosismología permite prolongar hacia el pasado los catálogos sísmicos, instrumentales e históricos, añadiendo los grandes sismos prehistóricos. Esto es especialmente importante en las regiones del interior de las placas donde las fallas presentan tasas de deslizamiento lentas que dan lugar a grandes terremotos con tiempos de recurrencia largos ( $10^3$  a  $10^6$  años). En estas regiones los catálogos históricos cubren sólo un corto período del tiempo de recurrencia, con lo que los datos paleosísmicos desempeñan un papel esencial en la obtención de estimaciones realistas de la peligrosidad sísmica, en particular en los casos en que deben considerarse períodos de retorno largos. Este es el caso de la Península Ibérica.

Durante los últimos años, varios equipos de investigadores de distintas instituciones españolas han venido estudiando la paleosismicidad de la península Ibérica. Este número de Acta Geologica Hispanica recoge trabajos de estos investigadores y muestra las perspectivas y la aplicación potencial de la paleosismología en España.

A partir del estudio de los depósitos de tsunami del golfo de Cádiz, Luque et al. aportan datos sobre el período de recurrencia de eventos de magnitud parecida a la del terremoto de Lisboa de 1755. Unos 2000 años separan el terremoto de Lisboa del evento tsunamigénico anterior al mismo. Rodríguez Pascua et al. usan paleosismitas (*loop bedding*, alteración de la estructura planar de varvas, niveles de mezcla y pseudonódulos en sedimentos lacustres) para caracterizar la sismicidad de la Zona Prebética de la provincia de Albacete durante el Mioceno. Estos autores comparan los datos paleosísmicos obtenidos con la sismicidad actual y concluyen que la relación de Gutenberg-Richter muestra valores de “b” similares en ambos casos.

El artículo de Alfaro et al. sobre paleolicuefacción en el Bajo Segura constituye un ejemplo de método paleosismológico basado en pruebas secundarias. Durante el terremoto de Torrevieja (1829), uno de los terremotos más destructivos ocurridos en España, se produjeron fenómenos de paleolicuefacción de manera muy generalizada. El análisis de varios niveles de sismitas holocenas y abundantes dataciones mediante radiocarbono han permitido establecer un período de recurrencia de unos 1000 años para terremotos de moderada a gran magnitud, capaces de producir licuefacción en la cuenca del Bajo Segura.

Considerando las intensidades sentidas durante el terremoto de Palma de 1851 (intensidad MSK, VIII) y las características geomorfológicas del área afectada, Silva et al. atribuyen este terremoto a la falla extensional de Sencelles que muestra un escarpe de falla reciente. Los autores presentan una hipótesis preliminar sobre el comportamiento sísmico de esta falla a partir del estudio del escarpe y de una sección de la falla que aflora en una cantera antigua.

La cuenca de Granada es una de las áreas sísmicas de España con mayor actividad. La falla de Las Ventas de Zafarraya, que limita la cuenca de Granada por el sur, produjo el último terremoto destructivo acaecido en España (el terremoto de Navidad de 1884), que causó un-

os 900 muertos. Reicherter se centra en las rupturas y escarpes de esta falla. Las dataciones con radiocarbono realizadas indican, como mínimo, tres eventos fuertes a lo largo de esta falla durante los últimos 9 ka. Alfaro et al. también consideran la cuenca de Granada, en particular la falla de Padul, que limita la cuenca por el este. Aunque esta falla no ha desencadenado terremotos de moderada a gran magnitud durante los periodos instrumental e histórico, los autores demuestran (análisis de retrodeformación en un afloramiento natural) que la falla de Padul ha producido varios eventos de deformación durante el Cuaternario. La paleolicuefacción de sedimentos detríticos recientes intercalados con depósitos de turbas ha permitido datar terremotos de unos 30.000 años BP.

La falla de Alhama de Murcia es una de las fallas más activas del sudeste español. Dos artículos tratan sobre esta falla, que es la responsable de varios eventos históricos. Martínez-Díaz y Hernández-Enrile usan los depósitos travertínicos afectados por esta falla oblicua para acotar su comportamiento sísmico. A partir de las relaciones geométricas entre los depósitos de travertinos y la falla, y las dataciones mediante el método de las series del uranio, concluyen que esta falla se ha movido con una tasa de deslizamiento de 0,08 mm/a. Martínez-Díaz et al. presentan los resultados preliminares obtenidos mediante el análisis de dos trincheras excavadas a través de la falla de Alhama de Murcia en las cercanías de Lorca. Como mínimo han ocurrido tres eventos cosísmicos después de 125 ka BP. La tasa de deslizamiento vertical mínima a lo largo de esta falla es de 0,06 mm/a y el tiempo de recurrencia medio es inferior a 40.000 años. Están en curso

nuevas dataciones con la finalidad de acotar mejor estas estimaciones.

Finalmente, Masana et al. realizan el análisis paleosismológico de un escarpe de falla situado en la parte meridional de la falla de El Camp (NE de España), una estructura sísmicamente silenciosa de acuerdo con los datos históricos e instrumentales. Esta falla corta abanicos aluviales cuaternarios. Los autores basan los resultados en el análisis de siete trincheras y numerosas dataciones mediante distintas técnicas (paleomagnetismo, termoluminiscencia, series del uranio, radiocarbono, análisis polínico). Durante los últimos 125 ka, esta falla se ha movido con una tasa de deslizamiento de 0,02 mm/a y como mínimo ha producido tres terremotos que han roto la superficie. El tiempo de recurrencia de los grandes terremotos durante este periodo se ha estimado en aproximadamente 30 ka y el tiempo transcurrido desde el último gran evento en unos 3000 años. Teniendo en cuenta la longitud de la falla y el desplazamiento vertical por evento, la magnitud del terremoto máximo esperable se ha estimado en  $M_w$  6,7.

Los resultados que se presentan en este número de *Acta Geologica Hispanica* muestran la notable contribución que la paleosismología puede realizar al conocimiento de la sismicidad de España, una región caracterizada por fallas lentas. La neotectónica facilita la detección de fallas activas y la paleosismología nos permite establecer sus parámetros sísmicos. Por lo tanto, para mejorar las estimaciones de peligrosidad sísmica en España habrá que dedicar importantes esfuerzos al desarrollo de estudios paleosismológicos de las fallas activas.