

Catalogación de los efectos geológicos y ambientales de los terremotos en España en la Escala ESI-2007 y su aplicación a los estudios paleosismológicos

Catalogue of the geological and environmental effects of earthquakes in Spain in the ESI-2007 Macroseismic Scale and their application to paleoseismology

P.G. Silva¹, M.A. Rodríguez-Pascua², R. Pérez-López³, T. Bardají⁴, J. Lario⁵, P. Alfaro⁶, J.J. Martínez-Díaz⁷, K. Reichert⁸, J. Giménez⁹, J. Giner³, J.M. Azañón¹⁰, J.L. Goy¹ y C. Zazo¹¹

- 1 Dpto. Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca. Hornos Caleros, 50. 05003-Ávila. pgsilva@usal.es
- 2 Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Ríos Rosas, 23, 28003-Madrid. ma.rodriguez@igme.es
- 3 Universidad San Pablo-CEU. Boadilla del Monte. 28668. Madrid. rperez.fcex@ceu.es, jlginer@ceu.es
- 4 Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Alcalá de Henares, 28871-Alcalá de Henares, Madrid. teresa.bardaji@uah.es
- 5 Dpto. Ciencias Analíticas, Universidad Nacional de Educación a distancia (UNED), 28040-Madrid. Javier.lario@ccia.uned.es
- 6 Dpto Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, Apdo. Correos 99, 03080, Alicante. pedro.alfaro@ua.es
- 7 Dpto. Geodinámica, Facultad de CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. 28040-Madrid
- 8 Institut für Neotektonik und Georisiken, RWTH Aachen University, Lochnerstr. 4-20, 52056 Aachen (Alemania)
- 9 Dirección General Recursos Hídricos de Mallorca. Consejería Medio Ambiente Islas Baleares. 07009-Palma de Mallorca
- 10 Dpto. Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Avenida Fuente Nueva, s/n. 18071-Granada
- 11 Dpto. Geología Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC). José Gutiérrez Abascal, 2. 28004-Madrid

Resumen: Este trabajo resume la contribución del grupo de trabajo español sobre efectos geológicos y ambientales de los terremotos en la elaboración de la escala macrosísmica ESI-2007 promovida por la subcomisión de paleosismología de INQUA. En la actualidad se han clasificado 20 eventos sísmicos, 7 instrumentales y 13 históricos. La mayoría se encuentran incluidos en los catálogos sísmicos existentes salvo dos de los que sólo existen evidencias en el registro geológico o arqueológico (Tobarra y Baelo Claudia). Se han catalogado un total de 103 efectos geológicos para los eventos mencionados, de los cuales 32 se han implementado en la base de datos EEE de INQUA. Los datos recogidos en el presente catálogo cubren intensidades desde VI a X de la escala convencional MSK, con magnitudes (Ms) asociadas entre 4,3 y 6,7. En los eventos analizados las intensidades ESI-07 estimadas provisionalmente resultan similares a las MSK y se sitúan entre uno o dos grados por encima de las intensidades EMS correspondientes.

Palabras clave: Terremotos, Efectos Geológicos, Intensidad Sísmica, España.

Abstract: This work summarizes the contribution of the Spanish working group on the Earthquake Environmental Effects (EEE) for their implementation in the ESI-2007 macroseismic Intensity Scale promoted by the INQUA Subcomission on Paleoseismology. At present the Spanish working group has classified a total amount of 20 seismic events, 7 of them instrumental earthquakes and the other 13 historical ones. While two of the historical ones are only evidenced by geological, geomorphological (Tobarra, Albacete) and archaeological data (Baelo Claudia, Cádiz), the rest are well documented in historical sources and existing seismic catalogues. From the bulk 103 site locality effects cataloged a total of 32 EEE files have been completed, which have been already implemented in the EEE INQUA data-base. The Spanish data cover intensity degrees from VI to X of the conventional MSK Scale, with associated magnitudes (Ms) from 4.3 to 6.7. The analysed events result in estimated ESI-07 intensities similar to that of the MSK conventional scale, but one or two degrees higher than those resulting from the EMS scale estimations.

Key words: Earthquakes, Geological Effects, Seismic Intensity, Spain.

INTRODUCCIÓN

Recientes revisiones de los efectos ambientales y geológicos producidos por los terremotos (Environmental Earthquake Effects: EEE) en las diferentes escalas de intensidades sísmicas, así como su catalogación y clasificación podrán permitir relacionar los catálogos de terremotos históricos e instrumentales con la creciente cantidad de datos provenientes de los estudios paleosismológicos (Michetti *et al.*, 2004). De hecho la Subcomisión de Paleosismología de INQUA ha desarrollado y presentado oficialmente una nueva

escala de intensidades macrosísmica basada únicamente en los efectos ambientales de los terremotos (ESI-2007, Guerrieri y Vittori, 2007). Esta nueva escala pretende clasificar los efectos de los terremotos sobre el terreno con una doble intención: (a) poder ligar los registros históricos con los paleosismológicos, y (b) poder incluir los datos procedentes de los estudios paleosísmicos en estudios de peligrosidad sísmica. La escala ESI-2007 se actualizará y comprobará periódicamente a partir de los datos procedentes de terremotos instrumentales. En definitiva se intenta ampliar el periodo de observaciones sísmicas unos cuantos miles, a decenas de miles, de

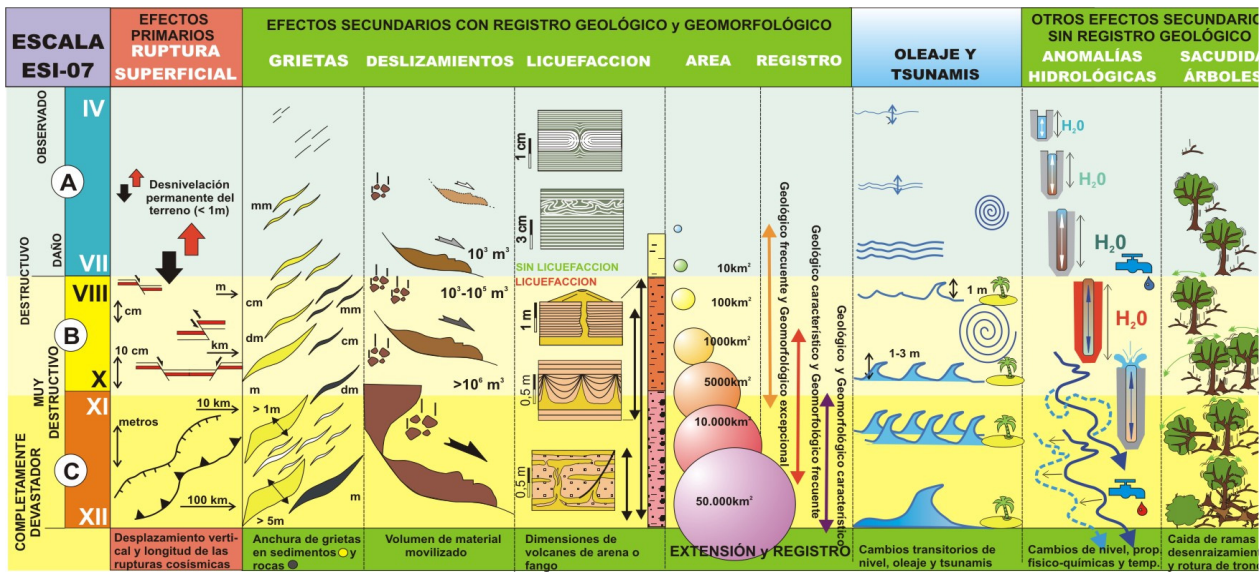


FIGURA 1. Esquema gráfico de los diferentes efectos geológicos y ambientales cosísmicos considerados en la Escala Macrosísmica ESI-2007. Se indica el tipo de registro geológico y/o geomorfológico más habitual en cada uno de los grupos (A, B y C) de categorías de intensidades.

años atrás (Holoceno y Pleistoceno Superior final). Este hecho es indispensable para poder analizar científicamente un proceso geológico (El Ciclo Sísmico) que sobrepasa las escalas temporales que recogen los catálogos sísmicos convencionales. En el caso de España, éste se extiende como mucho hasta el año 800 A.C. (2800 años BP), aunque los datos no son medianamente fiables hasta los siglos XIV o XV (Martínez Solares y Mezcua, 2002), lo que supone unos 700 – 600 años de registro macrosísmico útil.

CALIDAD DE LA INFORMACIÓN (Q_g)	EFFECTOS DOCUMENTADOS	EVENTOS ANALIZADOS
(I) INSTRUMENTALES (1950 AD -Actualidad) VI-VII MSK	5 completados 11 en progreso	Albuñuelas, 1956 Mula, 1999 La Paca, 2005
EVENTOS CALIDAD A (1800 – 1950 AD) IX-X MSK	20 completados 12 en progreso	Torrevieja, 1829 Arenas Rey, 1884 Dafías, 1824
EVENTOS CALIDAD B (1800 - Actualidad). Datos aislados pero bien documentados-VIII MSK	4 completados 8 en progreso	P. Mallorca, 1851 Huércal, 1864
EVENTOS CALIDAD C (1300 – 1800 AD)	0 completados 25 en progreso	Tavernes, 1396 Carmona, 1504
EVENTOS CALIDAD D (< 1100 AD)	1 completado 5 en progreso	Baelo C., 395 Tobarra, 1100
TOTAL (Datos): 103	32	71

TABLA I. Resumen de los datos analizados para diferentes eventos sísmicos en España en función de la calidad de la información utilizada (Índice Q_g). En los eventos analizados solo se muestran aquellos de los que se poseen más datos.

Por otra parte el análisis de los efectos ambientales de los terremotos, posee especial importancia ya que las nuevas escalas de intensidades promovidas por la Unión Europea (European Macroseismic Scales, EMS) no codifican los efectos ambientales de los terremotos para la evaluación de intensidades, hecho que puede

conllevar a diferentes situaciones de subvaloración o sobrevaloración de la peligrosidad sísmica de una zona determinada. La presente contribución resume el trabajo realizado por los investigadores españoles en la recopilación de datos de terremotos históricos e instrumentales implementados en la nueva Escala de Intensidades ESI-2007 de INQUA. Los datos paleosísmicos y sísmicos recopilados en este trabajo se centran fundamentalmente en tres zonas: (1) La Cordillera Bética Oriental; (2) las Islas Baleares; (3) El sector central de la Cordillera Bética alrededor de la Cuenca de Granada y del sector central del Estrecho de Gibraltar. En estas zonas se han realizado y estudiado varias trincheras de falla y, además, se han publicado multitud de trabajos sobre efectos geológicos de los terremotos en diferentes tipos de ambientes geomorfológicos y escalas temporales que abarcan desde el Neógeno superior a la actualidad. Esta información constituye una importante y creciente base de datos que ha de catalogarse adecuadamente e incorporarse necesariamente a los análisis de peligrosidad sísmica en España.

LA ESCALA ESI-2007: ENVIRONMENTAL SEISMIC INTENSITY.

Los datos sobre los que se ha construido la ESI-2007 indican que los efectos geológicos de los terremotos comienzan siendo patentes a partir de intensidad VI-VII, pero tan solo son relevantes a partir de intensidad IX y solo imprimen cambios permanentes en el relieve a partir de intensidad X. La ESI-2007 clasifica los terremotos en tres grandes grupos de intensidades: A) IV-VII (efectos observables); B) VIII-X (efectos permanentes y diagnósticos), y C) XI-XII (efectos característicos) en grado creciente según los efectos geológicos y ambientales que se producen en ellos. Los efectos cosísmicos que se consideran se pueden dividir en primarios y secundarios. Los primarios atienden evidentemente a las rupturas superficiales de falla (en



FIGURA 2. Eventos sísmicos analizados en España: 1 (Baelo Claudia, 260-395 AD); 2 (Tobarra, 1100 AD); 3 (Tavernes, 1396 AD); 4 (Queralbs, 1428 AD); 5 (Atarfe, 1431 AD); 6 (Carmona, 1504 AD); 7 (Vera, 1518 AD); 8 (Alhama de Almería, 1522 AD); 9 (Málaga, 1680 AD); 10 (Estubeny, 1748 AD); 11 (Dalías-Berja, 1804 AD); 12 (Torrevieja, 1829); 13 (Palma de Mallorca, 1851); 14 (Huércal-Overa, 1863); 15 (Arenas del Rey, 1884). Los eventos instrumentales corresponden a los de Lorca (1977), Adra (1993-1994), Mula (1999), Bullas (2002) y La Paca (2005)

sus diferentes órdenes) y son características de tipo lineal que pueden extenderse hasta decenas (grupo B) y centenas de kilómetros (grupo C). Los efectos cosísmicos secundarios son los más numerosos y pueden separarse en dos grandes subgrupos, con y sin registros geológicos y/o geomorfológicos, es decir permanentes o transitorios. Dentro de los permanentes se consideran por orden de importancia, deslizamientos, liquefacción y agrietamientos del terreno. El área máxima en la cual han podido observarse los dos primeros se utiliza como diagnóstica para proceder a la asignación de la Intensidad máxima macrosísmica del paleoevento y/o sismo histórico. Dentro de los efectos secundarios no permanentes se consideran, anomalías hidrológicas (cambios de nivel de pozos y caudal de las fuentes, aparición y desaparición de manantiales, cambios de propiedades físico-químicas, enturbiamiento y variación de la temperatura del agua, etc...), oleaje, cambios de flujo y/o de curso de los ríos, vibración de árboles, generación de nubes de polvo, y salto de rocas. Los efectos de los tsunamis están en proceso de catalogación para su inclusión dentro de la nueva escala de intensidades; no obstante su clasificación es bastante más problemática y su registro bastante más difícil de cuantificar adecuadamente.

Cada uno de los grupos de intensidades establecido posee un diferente grado de registro geológico y geomorfológico. Así el grupo A posee tan solo un registro geológico excepcional de los efectos primarios y de los efectos secundarios a partir de paleosismitas originadas por procesos de deformación

sinsedimentarios. El grupo B posee un registro geológico frecuente y geomorfológico excepcional y/o difícil de reconocer. El grupo C posee un registro geológico y geomorfológico característico que en muchas ocasiones da lugar a verdaderos "paisajes sísmicos". Por último, hay que señalar que la ESI-2007 no se ha planteado como una escala macrosísmica que sustituya a las ya existentes, sino que se complemente con ellas en el caso de que se registren alguno de los efectos geológicos o ambientales mencionados anteriormente, sean bien los únicos o no en producirse durante un terremoto determinado en una zona específica.

EFECTOS GEOLÓGICOS DE LOS TERREMOTOS EN ESPAÑA: REGISTRO y CATALOGACIÓN.

Los terremotos históricos de mayor tamaño registrados en la Península Ibérica poseen intensidades de X MSK o IX-X EMS, lo que contrasta con la relativamente moderada magnitud estimada para tales eventos, que normalmente se encuentra entre 6,5 y 6,9 tanto mediante relaciones empíricas convencionales (Martínez Solares y Mezcua, 2002), como diferentes modelizaciones sísmicas procedentes de datos paleosísmicos. Similares niveles de magnitud se están obteniendo recientemente a partir de los datos sismológicos procedentes de fallas activas cuaternarias en las Cadenas Costeras Catalanas y Cordillera Bética. Esta aparente discordancia de datos de magnitudes e intensidades se debe fundamentalmente a que gran

cantidad de los efectos geológicos producidos durante los terremotos históricos en España se encuentran relacionados con efectos cosísmicos secundarios, aparte de los efectos de sitio. Estos poseen un grado de preservación local (deslizamientos rotacionales y escarpes de falla, Arenas del Rey, 1884: X MSK), o prácticamente nulo (licuefacción, Torreveja, 1829: X MSK), pero indudablemente han afectado a su catalogación en las diferentes escalas macrosísmicas.

Los datos recopilados indican que los efectos geológicos tienen un efecto relevante transitorio en áreas entre 500-350 km² (Isosistas \geq IX MSK), pero los efectos más espectaculares se concentran habitualmente en áreas inferiores a los 250 km², que se reducen a unos 50 km² cuando la intensidad del evento ha sido \leq VIII MSK.

TIPO DE EFECTO GEOLÓGICO ANALIZADO	ESTUDIADOS	EN ESTUDIO
RUPTURAS SUPERFICIALES	2	3
AGRIETAMIENTOS y FISURAS	1	18
GRANDES DESLIZAMIENTOS	3	3
CAÍDA DE ROCAS	1	22
LICUEFACCIÓN y SUBSIDENCIA	12	9
CAMBIOS EN MANANTIALES y POZOS	10	17
CAMBIOS DEL NIVEL DEL MAR y TSUNAMIS	1	3
OTROS	2	6

TABLA II. Resumen de los diferentes tipos de efectos geológicos de los terremotos analizados y catalogados para diferentes eventos sísmicos en España.

Por otro lado, los eventos instrumentales (> 1950 AD) de mayor tamaño registrados en la Península poseen magnitudes entre 4,8 y 5,0 mb e intensidades máximas de VI-VII MSK. En casi todos los casos las áreas macrosísmicas poseen una extensión alrededor de los 80-100 km², pero los efectos geológicos relevantes apenas llegan a afectar a áreas de 10 km². En casi todos los casos estos efectos geológicos están relacionados con pequeños deslizamientos locales (en áreas inestables), desplazamientos de bloques y caída de rocas (Bullas, 2002 y La Paca, 2005), grietas de anchura milimétrica y extensión decamétrica sobre terrenos cuaternarios poco compactados, y fundamentalmente cambios hidrológicos (químicos y variación de niveles o caudales) en fuentes y pozos. A pesar de su nulo potencial de preservación y su ocurrencia local estos efectos introducen cambios en su catalogación según distintas escalas de VI-VII MSK, VI-V EMS o VI ESI. Indudablemente la intensidad no es un parámetro directamente ligado al tamaño real de la fuente sísmica que la genera, sino más bien está relacionada con la respuesta del terreno a la sacudida sísmica, dependiendo así de la geología y topografía de cada zona en concreto, como sugieren las escalas MSK y ESI.

Así pues lo que sabemos de los grandes terremotos históricos en España, es que en su mayor parte, los

efectos secundarios tales como deslizamientos (Carmona, 1504; Vera, 1518; Güévejar, 1755 y 1884) y licuefacción extensiva (Torreveja, 1829) catapultaron a estos terremotos a la intensidad X MSK. No obstante, el obviar los efectos geológicos de estos terremotos para la evaluación de la peligrosidad sísmica de estas zonas, no parece lo más adecuado ya que precisamente fueron los efectos secundarios los que amplificaron ó magnificaron los daños que se encuentran tras su catalogación.

Un resumen del estado actual del catálogo se presenta en la Tabla I. En ella se muestra el nuevo índice implementado (*Qg*) referente a la calidad de los datos geológicos a partir de los cuales se ha procedido a la evaluación de las intensidades ESI-2007. La Tabla II muestra el tipo de efecto geológico o ambiental estudiados y “en estudio” hasta la fecha.

Hasta la fecha se han catalogado un total de 20 terremotos, 5 instrumentales y 15 históricos, dos de ellos solamente evidenciados por datos geológicos y geomorfológicos (Tobarra, Albacete) y arqueológicos (*Baelo Claudia*, Bolonia, Cádiz). El catálogo previo recoge un total de 103 observaciones en diferentes localidades con efectos geológicos de diferente índole. De todas ellas se ha procedido a la catalogación de 32 observaciones que han sido documentadas bien sobre el terreno o bien atendiendo a descripciones realizadas en informes científicos de la época y/o en trabajos de investigación científicos recientes. De cada una de ellas se ha realizado una ficha detallada, cuyos datos han sido implementados en la base de datos EEE de la Escala ESI-2007 de INQUA. En la actualidad, se encuentran en proceso de revisión y catalogación nuevos terremotos como los de Lorquí- Ceutí (1911), Jacarilla (1952), y la serie sísmica de Adra (1993-1994).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CGL2005-04655/BTE (USAL), CGL2005-01336/BTE (CSIC), y CGL2006-05001/BTE (IGME). Es una contribución de la Subcomisión de Paleosismicidad y Tectónica activa de INQUA

REFERENCIAS

- Martínez Solares, J.M. y Mezcua, J. (2002): Catálogo Sísmico de la Península Ibérica. *Monografías IGN*, 18. IGN, Madrid, 253 p.
- Michetti, A. M., Guerrieri, L. y Vittori, E. Eds. (2004): *The INQUA Scale: An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment*. Memorie Descrittive Della Carta Geologica D'Italia, 67. APAT, SystemCart Srl, Roma, Italia.
- Guerrieri, L. y Vittori, E. Eds. (2007): *Intensity Scale ESI-2007*. Memorie Descrittive Della Carta Geologica D'Italia, 74. APAT, SystemCart Srl, Roma, Italia.