

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/255961103>

Movimientos de ladera inducidos por terremotos en España: Una revisión. Seismic induced landslides in Spain: A review

Conference Paper · June 2012

DOI: 10.13140/RG.2.1.2213.0801

CITATION

1

READS

392

19 authors, including:



Pedro Alfaro

University of Alicante

139 PUBLICATIONS 3,359 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



J. M. Azañón

University of Granada

268 PUBLICATIONS 5,495 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Clavero D.

Junta De Andalucía

5 PUBLICATIONS 44 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



S. Figueras

Institut Geologic de Catalunya

58 PUBLICATIONS 389 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Movimientos de ladera inducidos por terremotos en España: Una revisión *Seismic induced landslides in Spain: A review*

Alfaro, P.⁽¹⁾, Azañón, J. M.⁽²⁾, Clavero, D.⁽³⁾, Delgado, J.⁽¹⁾, Figueras, S.⁽⁴⁾, García-Mayordomo, J.⁽⁵⁾, García-Tortosa, F. J.⁽⁶⁾, Garrido, J.⁽⁷⁾, Hernández, L.⁽⁸⁾, Lenti, L.⁽⁹⁾, López, J. A.⁽¹⁰⁾, López Casado, C.⁽³⁾, Macau, A.⁽⁴⁾, Martino, S.⁽¹¹⁾, Mulas, J.⁽⁵⁾, Peláez, J. A.⁽¹²⁾, Rodríguez-Peces, M. J.⁽¹³⁾, Santamarta, J. C.⁽¹⁴⁾, Silva, P. G.⁽¹⁵⁾

⁽¹⁾Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Alicante, Ap. Correos 99, 03080 Alicante, pedro.alfaro@ua.es, jose.delgado@ua.es

⁽²⁾Dpto. Geodinámica, Universidad de Granada, Av. Severo Ochoa s/n, 18071 Granada, jazonon@ugr.es

⁽³⁾Dpto. Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada, Av. Severo Ochoa s/n, 18071 Granada, neosuka@live.com, clcasado@ugr.es

⁽⁴⁾Institut Geològic de Catalunya, Unidad de Técnicas Geofísicas, C/Balmes 209, 08006 Barcelona, sfigueras@igc.cat, amacau@igc.cat

⁽⁵⁾Instituto Geológico y Minero de España, Área de Investigación en Peligrosidad y Riesgos Geológicos, c/Alenza 1, 28003 Madrid, julian.garcia@igme.es, j.mulas@igme.es

⁽⁶⁾Dpto. Geología, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, 23071 Jaén, gtortosa@ujaen.es

⁽⁷⁾Dpto. Ingeniería Civil, Universidad de Granada, Av. Severo Ochoa s/n, 18071, jega@ugr.es

⁽⁸⁾Consejería de Obras Públicas, Transportes y Política Territorial. Gobierno de Canarias, C/Talavera s/n, 38107 Santa Cruz de Tenerife, litoteca@yahoo.es

⁽⁹⁾Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks, 58 Bv. Lefebvre, 75732 Paris (Francia), luca.lenti@ifsttar.fr

⁽¹⁰⁾IES Juan Arcas, Av. Juan Carlos I, 30800 Lorca (Murcia), juanan@hotmail.es

⁽¹¹⁾Dpt. Scienze della Terra, Universidad de Roma – La Sapienza, Pza. Aldo Moro 5, 00185 Roma (Italia), Salvatore.martino@uniroma1.it

⁽¹²⁾Dpto. Física, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas, 23071 Jaén, japelaez@ujaen.es

⁽¹³⁾Dpto. Geodinámica, Facultad Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, c/ José Antonio Novais, 2, 28040 Madrid, martinjr@geo.ucm.es

⁽¹⁴⁾Dpto. Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas, Facultad de Física, Universidad de La Laguna, Av. Astrofísico Francisco Sánchez s/n, 38203 La Laguna (Tenerife), jcsanta@ull.es

⁽¹⁵⁾Dpto. Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, 05003 Ávila, pgsilva@usal.es

SUMMARY

Strong to moderate earthquakes induce landslides. During the last decade, several research groups have collected information about this relevant secondary geological for historical and instrumental events in Spain. This work introduces to an overall review of collected data considering landslide typology, spatial distribution, and relative abundance in relation with the earthquake size (magnitude/intensity). The analyzed cases will provide a preliminary data-base for further studies of seismic hazard and paleoseismology.

1. INTRODUCCIÓN

Las inestabilidades de ladera constituyen un efecto inducido común durante terremotos, causando frecuentes daños en edificaciones y, sobre todo, en infraestructuras viarias (Bird y Bommer, 2004). En casos extremos pueden llegar a causar víctimas, como sucedió durante el terremoto de enero de 2001 en El Salvador. La importancia de este fenómeno sismo-inducido como agente causante de pérdidas para la sociedad, deriva de varios hechos: un terremoto puede desencadenar múltiples inestabilidades de forma casi simultánea y a grandes distancias del epicentro, siendo tanto mayor cuanto mayor es la magnitud del evento. La superficie de territorio que puede verse afectada por este fenómeno se ha observado que es también proporcional a la magnitud del evento (Keefer, 1984; Rodríguez et al., 1999).

La problemática asociada a este fenómeno procede de las anteriores características, así como del hecho de que su ocurrencia no está contemplada en la normativa técnica vigente, ni en planes de ordenación urbana o de emergencias. En aquellos casos en que los estudios técnicos los contemplan, su estudio acostumbra a ser realizado mediante métodos simplificados (método pseudo-estático). Adicionalmente, la memoria colectiva es débil y se olvidan sucesos históricos. Así, zonas gravemente afectadas por movimientos de ladera sismo-inducidos son ocupadas poco tiempo después (casos de Alhama de Granada o de Alcoy en España).

Si bien la ocurrencia de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos en España está documentada desde antiguo, su estudio es relativamente reciente en nuestro país, a diferencia de los estudios de movimientos de ladera inducidos por otras causas (lluvia, erosión, etc.). En el presente trabajo presentamos una revisión de las contribuciones realizadas por los diversos grupos que han estudiado

esta problemática y publicado sus logros, poniendo especial énfasis en el inventario de inestabilidades de ladera que ha resultado a partir de dichas contribuciones.

2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DESARROLLADAS

El estudio de los movimientos de ladera sismo-inducidos se ha efectuado en España desde cuatro aproximaciones básicas: (1) en el marco de estudios de Tectónica Activa, (2) realización de inventarios asociados a eventos concretos, (3) elaboración de mapas previsoires, y (4) análisis de inestabilidades concretas.

En el primer caso, los estudios de Tectónica Activa, no suele ser frecuente que en ellos que se reconozcan o caractericen inestabilidades. Ello es debido a que el tiempo transcurrido desde el episodio de actividad de la falla en cuestión hasta la actualidad es tal que muchas de las inestabilidades reconocibles pueden atribuirse a otras causas, siendo difícil su asignación a un paleoevento concreto. Igualmente, existen dudas acerca de la posible magnitud del evento causante. Tan sólo en el caso de estudios realizados sobre fallas con actividad en épocas históricas recientes se han podido identificar y asociar inestabilidades a terremotos. Tal es el caso de los estudios sobre la falla de Sencelles, Mallorca (Silva et al., 2001). La documentación recopilada durante su estudio permitió localizar varios desprendimientos causados por el denominado terremoto de Palma de 1851 (Io = VII). En esta misma línea de investigación se está procediendo a la catalogación de los efectos geológicos de los terremotos en España mediante la aplicación de la Escala Macrosísmica de efectos Ambientales de los terremotos ESI-2007 (Michetti et al., 2007; Reicherter et al., 2009). El catálogo preliminar incluye 32 movimientos de ladera sísmicamente inducidos: 6

grandes deslizamientos y 23 desprendimientos (Silva et al., 2008). Los datos analizados indican, en casi todos los casos, que las áreas macrosísmicas poseen una extensión alrededor de 80-100 km², pero los efectos geológicos relevantes (de mayores dimensiones) apenas llegan a afectar a áreas de 10 km², incluso aquellos relacionados con intensidades mayores o iguales a VII.

La segunda línea de trabajo desarrollada ha consistido en la realización de inventarios de inestabilidades desencadenadas por eventos históricos o recientes. Diversos documentos históricos mencionan la ocurrencia de inestabilidades de ladera inducidas por ciertos terremotos (Prado, 1863; Fernández Castro et al., 1885; Orueta, 1885; entre otros muchos). Diversos estudios de sismicidad histórica recopilan, a su vez, muchos de estos documentos históricos (IGN, 1980; Vidal, 1986; Martínez Solares, 2001; Olivera et al., 2006; entre otros). Las inestabilidades inducidas por eventos recientes (1999 hasta la actualidad) han sido inventariadas a partir de inspecciones *in situ* del territorio afectado. Así, Mulas (1999) inventarió parte de las inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Mula (2/Feb/1999, Mw 4.7).

Recientemente, Delgado et al. (2011a) han elaborado un catálogo de inestabilidades sismo-inducidas en la Cordillera Bética a partir de documentación histórica, inspección/verificación sobre el terreno de dicha documentación, así como de los inventarios realizados de eventos recientes (1999 a 2005). Los datos recopilados señalan que las inestabilidades de tipo “disrupted” (*sensu* Keefer, 1984) son las más frecuentes. De la misma forma, Alfaro et al. (2012a,b,c) han publicado el inventario de inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Lorca (11/May/2011, Mw 5.1). La principal limitación de estos estudios radica en la falta de material cartográfico post-terremoto, que sirva de apoyo para una rápida inspección regional e identificación de las inestabilidades de mayor tamaño, incluso para áreas remotas.

Una tercera línea de actuación desarrollada ha consistido en la elaboración de mapas previsores de inestabilidades sismo-inducidas. Hasta la fecha la mayoría de estos estudios se han basado en el método del bloque rígido deslizante o Newmark, desarrollado por investigadores del USGS (Jibson, 1993, 2007; Jibson et al., 2000). Este método considera el estado de la ladera, calculando la denominada aceleración crítica (a_c) como la aceleración mínima necesaria para alcanzar un equilibrio estricto en la ladera (Factor de Seguridad = 1), y la acción sísmica (acelerogramas). Permite determinar la probabilidad de rotura por acción sísmica en función del denominado desplazamiento de Newmark (D_N), o desplazamiento acumulado resultante mientras la aceleración del terremoto excede el valor de la aceleración crítica de la ladera.

Delgado et al. (2004a,b, 2006) han elaborado mapas de susceptibilidad en el valle del río Serpis (Alicante) definiendo diversas categorías de susceptibilidad a partir de la probabilidad de que a_c de cada punto sea inferior a 0.1g, valor que estiman debió afectar al entorno de Alcoy durante el terremoto de 1620. Los resultados obtenidos muestran una excelente correlación entre las zonas de susceptibilidad más alta y las inestabilidades desencadenadas por dicho terremoto.

Coral Moncayo (2002) y Figueras et al. (2005) han estudiado laderas en el Principado de Andorra. Para tal fin, consideraron tres acelerogramas cuyo espectro se ajusta al resultante de un estudio de peligrosidad sísmica (periodo de retorno de 475 años, PGA 0.1g) y calcularon a_c para cada formación rocosa y diversos intervalos de pendiente. Sus resultados ponen de manifiesto que sólo aquellas laderas con pendiente superior a 40° pueden sufrir inestabilidad.

Rodríguez-Peces (2008, 2010), García-Mayordomo et al. (2009) y Rodríguez-Peces et al. (2008, 2009a,b,c,d, 2011a) han aplicado extensivamente el método de Newmark para el estudio regional de sectores de Sierra Nevada (Granada) y Lorca (Murcia). Como novedad, estos autores consideran la aceleración pico resultante a partir tanto de análisis deterministas como probabilistas, incrementan dicha aceleración para tener en cuenta fenómenos de amplificación (estratigráfica y/o topográfica) y calculan D_N a partir de las expresiones propuestas por Jibson (2007). Los resultados han sido

comparados con inventarios de inestabilidades producidas por terremotos concretos así como por otras causas (lluvia, erosión, etc.), encontrando que la correlación entre ambos tipos de información es limitada, aunque los desplazamientos observados en las cabeceras de grandes deslizamientos sugiere que la sismicidad puede reactivar dichos deslizamientos. Adicionalmente, los valores de D_N resultantes (~2 cm) sugieren que las inestabilidades que con mayor frecuencia se producirán serán desprendimientos y avalanchas rocosas de dimensiones reducidas y afectando a zonas también reducidas. Tan sólo para eventos de magnitud Mw > 6.0 es de esperar una amplia ocurrencia de estos fenómenos y la generación de deslizamientos de mayores dimensiones.

Mavrouli et al. (2009) han estudiado dos emplazamientos en Andorra (Solá de Santa Coloma), calculando el factor de seguridad según la expresión de Hoek y Bray (1981) para roturas planas. Consideraron, además, que el buzamiento de las discontinuidades a favor de las cuales podría producirse el movimiento variaba desde su buzamiento medio \pm desviación típica, que la aceleración sísmica en roca era 0.12g, la cual variaba por amplificación topográfica, y que la presión del agua en las discontinuidades podía variar entre el 0% (sin agua) y el 70%. Los resultados muestran que la zona tiene baja susceptibilidad a desprendimientos sismo-inducidos, y que éstos sólo aumentarían de forma significativa cuando el agua rellene más del 50% de las discontinuidades.

Mulas et al. (2001, 2003) han realizado una zonación sísmica de diversos valles del Pirineo Central. Realizaron una clasificación del territorio a partir de una combinación (matriz) de parámetros específicos de la ladera (litología, pendiente, etc.) y de la acción sísmica (intensidad macrosísmica esperada en 475 años). Más recientemente, Mulas et al. (2010) han realizado un estudio comparativo de diversas técnicas para la elaboración de mapas previsores en las mismas zonas. De la comparativa realizada señalan tres elementos clave: (1) un conocimiento detallado de la acción sísmica, siendo muy interesante disponer de medidas *in situ* mediante acelerómetros, (2) los mapas deben realizarse para cada tipología de inestabilidad, pues los condicionantes (tanto estáticos como dinámicos) varían de una tipología a otra, y (3) considerar la variabilidad de las propiedades geotécnicas de los materiales.

La realización de mapas previsores se ha encontrado, hasta la fecha, con una limitación básica: la ausencia de inventarios completos de inestabilidades inducidas por terremotos concretos, que permitan una calibración de las diversas metodologías disponibles. Hasta la fecha este control se ha efectuado con pocas inestabilidades, lo que hace que ciertas incertidumbres sean inherentes a los resultados y mapas propuestos por cada autor.

Finalmente, la última línea de investigación desarrollada ha consistido en la descripción y/o análisis dinámico de inestabilidades concretas. Así, Sanz (1992, 1997) estudió el deslizamiento de Güevéjar (Granada), recuperando información histórica acerca de su evolución post-terremoto y demostró la importancia que tuvo el agua freática para su repetida reactivación por efecto sísmico (terremotos de 1755 y 1885). Posteriormente, Jiménez Pintor y Azor (2006) realizaron un modelo geológico para esta inestabilidad.

García-Mayordomo (1998, 1999) analizó, aplicando el método de Newmark, la estabilidad en condiciones dinámicas de dos taludes tipo en Alcoy (Alicante), con pendientes y longitudes de 10°/100 m y 20°/50 m, respectivamente, obteniendo que sus aceleraciones críticas eran tan bajas como 0.04g.

Rodríguez-Peces (2008, 2010) y Rodríguez-Peces et al. (2008; 2011b,c,d) han aplicado también el método de Newmark para estudiar tanto pequeños desprendimientos (causados por los terremotos de Bullas, 2002, Mw 5.0, y La Paca, 2005, Mw 4.8) como grandes deslizamientos en la provincia de Granada (Güevéjar y Diezma). Estos estudios son muy interesantes por cuanto emplean el método de Newmark para realizar análisis retrospectivos de estabilidad que permiten estimar los parámetros desencadenantes de la inestabilidad y, además, permiten determinar la combinación “distancia epicentral máxima–magnitud” del evento que los reactive.

Tabla 1 – Terremotos desencadenantes de movimientos de ladera en España (Earthquakes that triggered landslides in Spain).

Núm.	Nombre	Fecha	Prof. (km)	Magnitud (Mw/Ms/otra)	I _{MSK}	Distancia epicentral máxima (km)			Area (km ²)
						Disrupted	Coherent	Flow	
1	Ribagorça	02/03/1373	-	6.5 / /	VIII-IX	-	74.5	-	-
2	Camprodon	02/02/1428	-	6.5 / /	IX	-	9.1	-	-
3	Carmona	05/04/1504	-	6.9 / /	VIII-IX	-	17.6	-	-
4	Vera	09/11/1518	-	6.1 / /	VIII-IX	1.4	-	-	-
5	Alcoy	02/12/1620	-	5.5 / /	VII-VIII	0.3	1.3	-	3.6
6	NW Málaga	09/10/1680	-	6.8 / /	VIII-IX	-	23.2	-	-
7	Estubeny	23/03/1748	-	6.2 / /	IX	11.3	-	-	-
8	SW Cabo San Vicente	01/11/1755	-	8.7 / /	XI-XII	769	577	-	-
9	Dalías	25/08/1804	-	6.4 / /	VIII-IX	32.5	26	-	857
10	Torreveja	21/03/1829	-	6.6 / /	IX-X	38.7	-	-	-
11	Palma	15/05/1851	-	5.2 / /	VII	23	-	-	-
12	Huercal Overa	10/06/1863	-	4.2 / /	VI-VII	8.5	-	-	66
13	Arenas del Rey	25/12/1884	-	6.5 / /	IX-X	35.8	45.4	39.4	3170
14	Onteniente	07/01/1945	-	4.8 / 4.8 /	VII	15.4	-	-	-
15	NW Purchil	19/04/1956	5	5.0 / 5.0 /	VIII	4.8	-	-	-
16	SW Galera	09/06/1964	5	4.8 / 4.8 /	VIII	8.4	2.3	-	34
17	W Lentegí	24/06/1984	5	5.0 / 5.0 /	V	10.4	13.6	-	104
18	SW Montefrío	24/10/1991	5	/ / 2.6	-	7.9	-	-	-
19	N Mula	02/02/1999	1.1	4.7 / 4.7 /	VI	19.8	8.8	-	185
20	SW Bullas	06/08/2002	1.2	5.0 / 4.8 /	V	4.2	-	-	3.5
21	Ripollés	21/09/2004	3	/ / 4.0	V-VI	5	-	-	-
22	NW Aledo	29/01/2005	10.9	4.8 / 4.7 /	VI	16.3	-	-	18
23	Lorca	11/05/2011	4	5.1 / /	VII	9.6	4.3	-	104
24	SE Pulpí	29/08/2011	3	/ / 2.7	III	13.9	-	-	-
25	SW El Pinar	08/10/2011	12	4.0 / / 4.4	V	4.5	-	-	-
26	NW Frontera	11/11/2011	21	/ / 4.6	IV-V	7	-	-	-

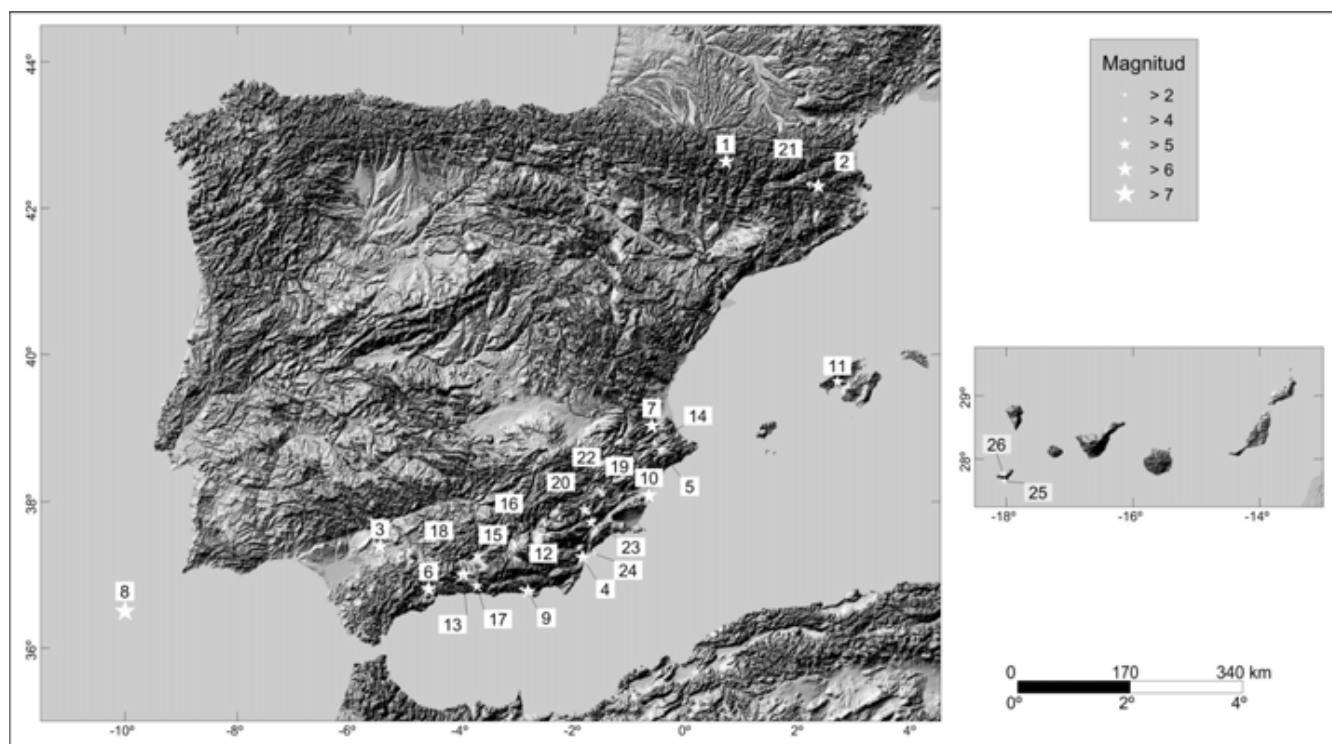


Figura 1 – Localización epicentral de los eventos reconocidos como desencadenantes de movimientos de ladera. El número hace referencia a la primera columna de la Tabla 1 (Epicentral location of events recognized as having triggered landslides. Number refers to data in the first column of Table 1).

Esteve (2011) ha estudiado el comportamiento dinámico actual del deslizamiento de El Molinar (Alcoy, Alicante). Para tal fin empleó métodos numéricos y un sismograma compatible con las características del evento que se supone lo activó (1620, Mw 5.5). Los resultados indican que actualmente la respuesta dentro de la masa variaría por efecto de unos rellenos existentes en su cabecera, que amplificarían la respuesta en bajas frecuencias (< 3 Hz) en cabecera y a más altas frecuencias en el resto del cuerpo.

Más recientemente, Mateos et al. (2012) han estudiado un deslizamiento profundo en la costa de la Sierra Tramuntana (Mallorca). Analizando posibles causas desencadenantes, determinan factible su origen sísmico.

Para un correcto desarrollo, estos estudios requieren mucha información (geológica, geotécnica, sísmica), que pocas veces está disponible. Ello justifica que aún sean poco frecuentes.

3. CATÁLOGO DE EVENTOS Y DE INESTABILIDADES SISMOINDUCIDAS

Partiendo del catálogo publicado por Delgado et al. (2011a), el mismo ha sido actualizado añadiendo la información adicional recogida en los diversos trabajos anteriormente mencionados. Con ello se ha elaborado el catálogo más actualizado hasta la fecha de los eventos causantes de inestabilidades de ladera (Tabla 1, Figura 1), las tipologías de inestabilidades (Figura 2), las distancias epicentrales máximas observadas de ocurrencia (según tipología y tamaño del evento desencadenante; Figuras 3 y 4), y el área máxima de territorio afectado por inestabilidades (Figura 5).

La información recopilada ha permitido identificar también diversos eventos que desencadenaron inestabilidades, pero dicha información es insuficiente para una correcta localización de dichas inestabilidades (Tabla 2). Sería interesante un estudio conjunto entre historiadores, sismólogos y geólogos para buscar más información al respecto, que permita completar el catálogo disponible.

Tabla 2 – Terremotos desencadenantes de inestabilidades de ladera no localizadas

Fecha	Evento	Imáx
22/Sep/1522	W Alhama Almería	VIII-IX
03/Oct/1713	Lorca	IV-V
20/Dic/1818	Lorca	VI-VII

El análisis de los datos permite extraer información muy útil acerca del estado de dicho catálogo y de las propias inestabilidades. Como hay pocos datos de tipología “flow/lateral spreading” (*sensu* Keefer, 1984), a continuación sólo se analiza la información del resto de tipologías (“disrupted” y “coherent”).

El primer aspecto a destacar es que la gran mayoría de las inestabilidades sismoinducidas son de la tipología denominada “disrupted” (*sensu* Keefer, 1984). La figura 2 presenta la frecuencia relativa de cada una de ellas. Las inestabilidades de tipo “disrupted” suelen corresponder a desprendimientos en suelos/roca y pequeños deslizamientos que se desorganizan al progresar el movimiento de la masa. Es por ello que pueden desencadenarse incluso para pequeñas excitaciones ($M \sim 2.6$, Tabla 1) en laderas que se encontraban en equilibrio estricto. Son muy frecuentes para eventos de magnitud moderada a baja ($M_w < 5.5$), siendo casi la única tipología desencadenada. En cambio, la proporción de las otras tipologías aumenta significativamente para eventos de magnitud $M_w > 5.5$. Ello es debido a que el movimiento del suelo durante estos eventos tiene una duración y amplitud suficiente, así como un contenido apropiado de bajas frecuencias, que es capaz de excitar las grandes masas de estos tipos de inestabilidad y ponerlas en movimiento.

Atendiendo a la distribución espacial de las inestabilidades respecto del epicentro y, en concreto, a las distancias epicentrales máximas en función de la magnitud del evento, se comprueba que varios de ellos han desencadenado inestabilidades a grandes distancias del epicentro (Figura 3), mayores que las curvas límite propuestas por Keefer (1984) para cada tipología, constituyendo “outliers” (*sensu* Delgado et al., 2011b). Estas grandes distancias

podrían atribuirse a errores en la localización del epicentro y, en consecuencia, a las distancias epicentrales resultantes. Sin embargo, en la Figura 3 se observa que la mayor parte de estos outliers se deben a eventos recientes (1999-actualidad), cuando la Red Sísmica Nacional ya tenía una gran densidad de estaciones y el error medio de localización es del orden de 5km (o inferior).

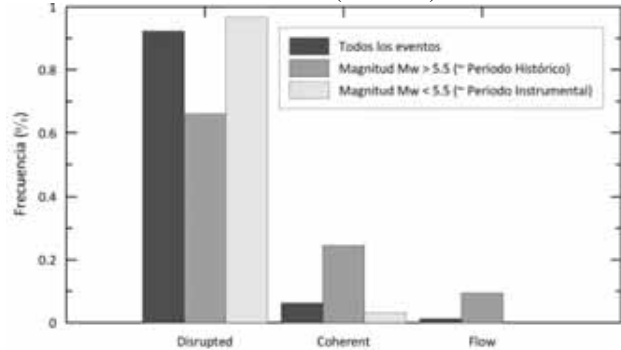


Figura 2 – Frecuencia relativa por tipología de las inestabilidades de ladera desencadenadas por terremotos (Relative frequency of seismic-induced landslide typology).

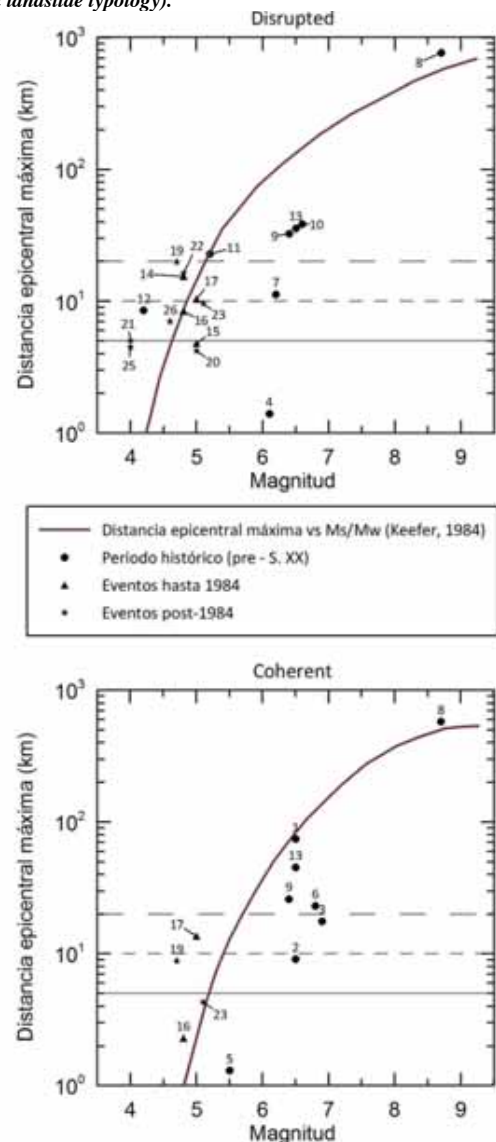


Figura 3 – Distancias epicentrales máximas observadas de inestabilidades en función de la magnitud del terremoto (Maximum epicentral distances observed for landslides as a function of earthquake magnitude).

Un segundo aspecto significativo de la Figura 3 es que para magnitudes moderadas a altas ($M_w > 6.0$), las distancias epicentrales máximas observadas para inestabilidades de tipo “coherent” son en ocasiones mayores que las observadas para la tipología “disrupted”, lo cual es contradictorio (se requiere más energía para poner en movimiento una gran masa -deslizamiento coherente- que un bloque suelto de suelo o roca). Incluso hay eventos para los cuales sólo hay información sobre inestabilidades de tipo “coherent”, incluso a grandes distancias (Tabla 1). Este hecho pone de relieve que el catálogo recopilado es incompleto, faltando información sobre desprendimientos para estos eventos (históricos en todos los casos), pero también se deduce que dichas inestabilidades debieron causar un impacto notable (por sus dimensiones, por los daños causados) para que quedaran registradas en las crónicas de la época.

La Figura 4 presenta información equivalente pero empleando la intensidad epicentral como medida del tamaño del evento. Como la vigente escala EMS no contempla los efectos sobre el terreno para definir sus grados, se han empleado las evaluaciones realizadas en la antigua escala MSK, que sí los consideraba. Se comprueba que las inestabilidades de tipo “disrupted” son comunes para terremotos de intensidad $I_0 \geq V$; en cambio las inestabilidades de tipo “coherent” sólo son frecuentes para eventos de intensidad VI-VII.

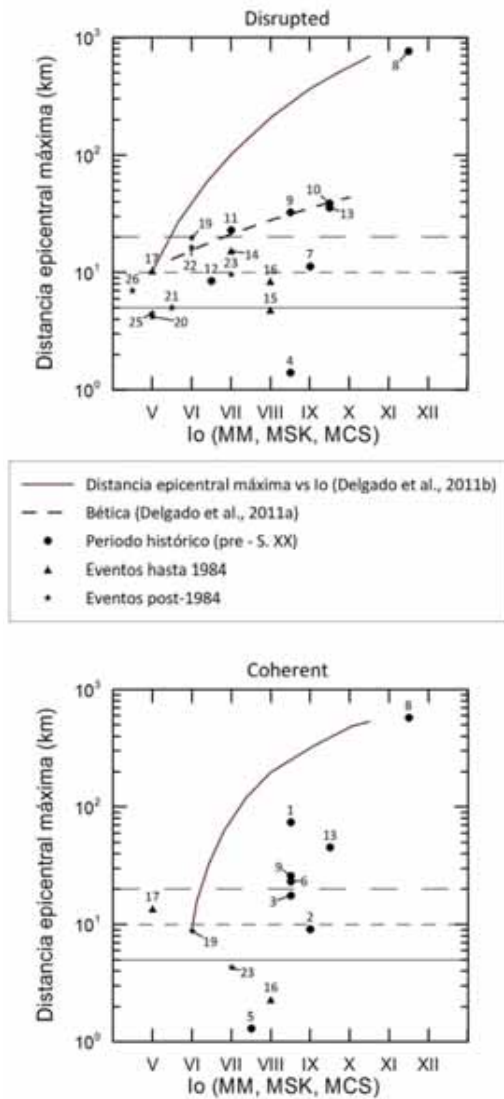


Figura 4 – Distancias epicentrales máximas observadas de inestabilidades en función de la intensidad epicentral del terremoto (Maximum epicentral distances observed for landslides as a function of earthquake intensity).

Finalmente, atendiendo a la superficie de territorio afectada por inestabilidades (Figura 5), son muy pocos los datos disponibles todavía. Mientras los eventos de mayor magnitud/intensidad se caracterizan por áreas claramente inferiores a los máximos observados/propuestos por diversos autores (Figura 5), para magnitudes bajas ($M_w < 5.0$) estas áreas son elevadas, próximas (o incluso superiores) a los valores máximos observados a nivel mundial. Es también llamativo que pese a las grandes distancias epicentrales observadas (Figuras 3 y 4), el área afectada es proporcionalmente baja, quedando para la mayoría de los eventos por debajo de las curvas de área máxima propuesta por diversos autores (Keefer, 1984; Rodríguez et al., 1999; Delgado et al., 2011b). Ello es debido a que varios de los eventos que desencadenaron inestabilidades a grandes distancias (outliers) tenían su epicentro fuera de las zonas afectadas por inestabilidades, lo que incrementa las distancias, pero no las áreas (Delgado et al., 2011a).

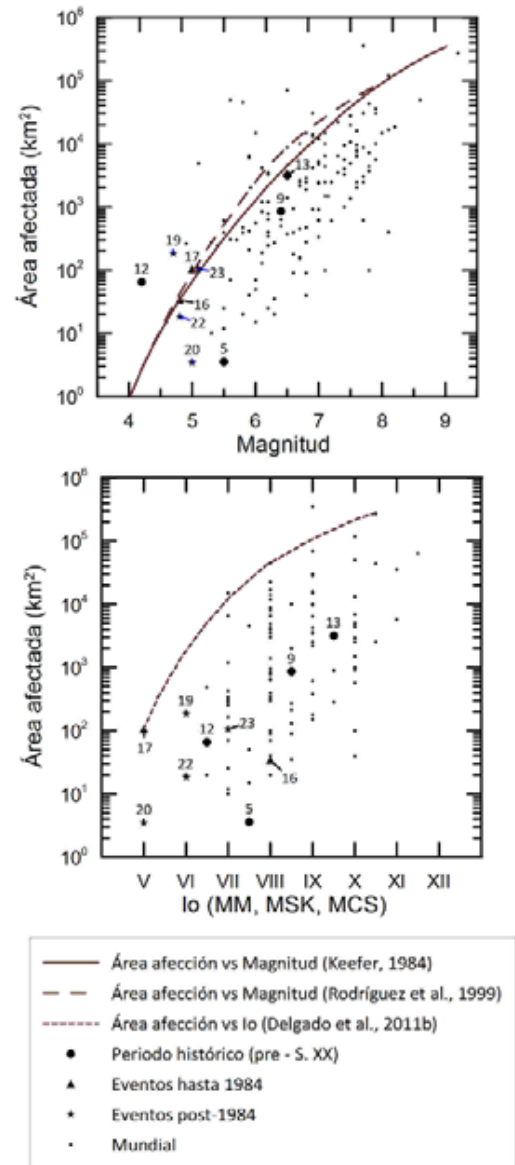


Figura 5 – Superficie afectada por inestabilidades de ladera inducidas por terremotos en función de la magnitud/intensidad epicentral del evento (Surface affected by landsliding induced by earthquakes as a function of event magnitude/intensity).

4. CONCLUSIONES – LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

El estudio sistemático de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos es una línea de trabajo relativamente reciente en España. Si bien hay documentación muy antigua sobre la ocurrencia de este fenómeno, los primeros trabajos donde se aborda el estudio de dichas inestabilidades desde una óptica de la ingeniería sísmica datan de los años 90 del siglo XX. Actualmente son cuatro las líneas de investigación básicas que están siendo desarrolladas por los diversos grupos que estudian este fenómeno: (1) Tectónica Activa, (2) inventarios de inestabilidades asociados a eventos concretos, (3) elaboración de mapas previsores, y (4) estudio de estabilidad en condiciones dinámicas de laderas piloto. Entre los análisis de Tectónica Activa cabe resaltar la catalogación de este tipo de efectos geológicos mediante la aplicación de la escala ESI-2007 (Silva et al., 2008), la cual se implementará en el catálogo On-line que está desarrollando el Grupo de Paleosismología y Tectónica Activa de INQUA.

Los datos resultantes de estas cuatro líneas han permitido elaborar un primer intento de catálogo de eventos desencadenantes de inestabilidades y una base de datos de inestabilidades sismoinducidas. Esta base de datos es, obviamente, un punto de partida e inevitablemente es incompleta. Sería muy interesante un estudio conjunto entre historiadores, sismólogos y geólogos para buscar más información al respecto, que permita completar el catálogo disponible. Esta falta de completitud hace que las conclusiones siguientes sólo deban considerarse como una primera aproximación a la realidad del problema.

Los datos actualmente disponibles demuestran que las inestabilidades de tipo “disrupted” son las más frecuentemente inducidas por los terremotos, especialmente cuando su magnitud es inferior a Mw 5.5, constituyendo prácticamente el único tipo desencadenado, mientras que la tipología “coherent” es sólo abundante (pero siempre menos que la tipología “disrupted”) para eventos de magnitud superior al anterior umbral. Como rasgo significativo, son frecuentes los ejemplos de inestabilidades inducidas a distancias grandes, mayores incluso que las resultantes de las curvas propuestas por Keefer (1984). Algo similar sucede cuando se considera la intensidad como método de expresar el tamaño/severidad de la sacudida.

El área afectada por inestabilidades se caracteriza por ser relativamente pequeña para los pocos eventos de magnitud moderada a alta disponibles. En cambio, este parámetro está próximo a los valores máximos observados a nivel mundial para eventos de magnitud baja (Mw < 5.0).

Estos datos permiten definir varias líneas de actuación en el estudio futuro de este fenómeno. La primera, básica, sería poder mejorar la calidad del catálogo y base de datos disponibles por la incorporación de nuevos datos, tanto de terremotos históricos como de eventos futuros.

Por la relevancia observada en eventos históricos, otra línea importante a desarrollar sería estudiar el comportamiento dinámico de grandes inestabilidades pre-existentes, así como determinar criterios objetivos, cuantitativos, que permitan determinar cuándo pueden reactivarse bajo una acción sísmica. Algo similar sería conveniente establecer para inestabilidades de nueva generación.

Finalmente, los inventarios de inestabilidades sismoinducidas, tanto de terremotos históricos como futuros, deben ser la base para un ejercicio de auto-evaluación de las diversas metodologías empleadas para la realización de mapas previsores de este fenómeno. Su verificación permitiría un uso apropiado por parte de las autoridades públicas para definir zonas en riesgo, y proponer usos más apropiados del suelo.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CGL2011-30153-C02-02 y por el grupo de investigación VIGROB-184 (Universidad de Alicante).

6. REFERENCIAS

- Alfaro, P., J. Delgado, F.J. García-Tortosa, L. Lenti, A. López, C. López-Casado and S. Martino (2012a). Widespread landslides induced by the Mw 5.1 Lorca, SE Spain, earthquake of 11 May 2011. *Engineering Geology*, 137-138, 40-52, Doi: 10.1016/j.enggeo.2012.04.002.
- Alfaro, P., J. Delgado, F.J. García-Tortosa, L. Lenti, A. López, C. López-Casado and S. Martino (2012b). *Landslides induced by the May 11 (2011), Lorca (SE Spain), earthquake (Mw 5.1)*. Proc. ESC-ISL, Banf, Canada, Junio 2012, 5 p.
- Alfaro, P., J. Delgado, F.J. García-Tortosa, L. Lenti, A. López, C. López-Casado and S. Martino (2012c). *Movimientos de ladera inducidos por el terremoto de Lorca*. Proc. VII Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, San Sebastián, junio 2012.
- Bird, J.F. and J.J. Bommer (2004). Earthquake losses due to ground failure. *Engineering Geology*, 75, 147-279.
- Coral Mocayo, H (2002). *Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra*. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Delgado, J., J.A. Peláez, R. Tomás, C. López Casado, A. Estévez, C. Doménech y A. Cuenca (2004a). Incertidumbres en la determinación de la susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en Alcoy (Alicante). En: C. Conesa García, Y. Álvarez Rigel y J.B. Martínez-Guevara (Eds.): *Medio ambiente, recursos y riesgos naturales. Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección*. Murcia. Vol. II, 165-175.
- Delgado, J., J.A. Peláez, R. Tomás, A. Estévez, C. López Casado, C. Doménech, A. Cuenca y J. Henares (2004b). Susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en Alcoy (Alicante) y sectores adyacentes. *Geotemas*, 6, 285-288.
- Delgado, J., J.A. Peláez, R. Tomás, A. Estévez, C. López Casado, C. Doménech y A. Cuenca (2006). Evaluación de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos. Aplicación a la cuenca de drenaje del río Serpis (provincia de Alicante). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19 (3-4), 197-218.
- Delgado, J., J.A. Peláez, R. Tomás, F.J. García-Tortosa, P. Alfaro and C. López-Casado (2011a). Seismically-induced landslides in the Betic Cordillera (S Spain). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 1203–1211.
- Delgado, J., J. Garrido, C. López-Casado, S. Martino and J.A. Peláez (2011b). On far field occurrence of seismically induced landslides. *Engineering Geology*, 123, 204-213.
- Esteve, C. (2011). Análisis dinámico del deslizamiento de El Molinar (Alcoy). Proyecto Fin de Carrera. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alicante, Alicante.
- Fernández Castro, M., J.P. Lasala, D. Cortázar y J. Gonzalo y Tarín (1885). *Terremoto de Andalucía: Informe de la Comisión nombrada para su estudio dando cuenta del estado de los trabajos en 7 de marzo de 1885*. Imp. M. Tello, Madrid.
- Figueras, S., A. Macau, X. Goula y M. González (2005). Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra. *VI Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables*, Vol. 3, 12 p., Valencia.
- García-Mayordomo, J. (1998). *Riesgo Sísmico en la Cuenca de Alcoy (Alicante). Aproximación a una Zonificación Sísmica*. Tesis del Máster, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- García-Mayordomo, J. (1999). Zonificación Sísmica de la Cuenca de Alcoy mediante un Sistema de Información Geográfico. *1er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Murcia, 12-16 de Abril de 1999, Memorias, Tomo Ib, 443-450.
- García-Mayordomo, J., M.J. Rodríguez Peces, J.M. Azañón and J.M. Insua Arévalo (2009). Advances and trends on earthquake-triggered landslide research in Spain. *1st INQUA-IGCP-567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology*, Baelo Claudia, Spain (2009).
- IGN, Instituto Geográfico Nacional (1980). *El terremoto de Andalucía del 25 de diciembre de 1884*. Publicaciones IGN, Madrid.
- Hoek, E.T. and J.W. Bray (1981). *Rock slope engineering*. Institute of Mining and Metallurgy, London.
- Jibson, R.W. (1993). Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis. *Transportation Research Record*, 1411, 9–17.
- Jibson, R.W. (2007). Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, 91, 209–218.
- Jibson, R.W., E.L. Harp and J.A. Michael (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58, 271–289.
- Jiménez Pintor, J. y A. Azor (2006). El Deslizamiento de Güevéjar (provincia de Granada): un caso de inestabilidad de laderas inducida por sismos. *Geogaceta*, 40, 287-290.
- Keefer, D.K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 406–421.
- Martínez Solares, J.M. (2001). *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755)*. Monografía 19, Ministerio de Fomento, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- Mateos, R.M., M.J. Rodríguez-Peces, J.M. Azañón, J. Rodríguez-Fernández, F.J. Roldán, I. García-Moreno, Gelabert, B. y J. García-Mayordomo (2012). El deslizamiento de Bálitx (Mallorca) y su posible origen sísmico. Procesos activos de expansión lateral desde el Pleistoceno Superior. *Boletín Geológico y Minero*, en prensa.
- Mavrouli, O., J. Corominas y J. Wartman (2009). Evaluación del peligro de desprendimientos rocosos inducidos por terremotos: El Solà de Santa Coloma, Andorra. En: E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (eds.): *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, 25 años. Tomo II, 675-686.
- Michetti, A.M., E. Esposito et al. (2007). Environmental Seismic Intensity Scale 2007 – ESI 2007. In: Vittori, E. and L. Guerrieri (eds): *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, LXXIV*. Servizio Geologico d'Italia, Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, SystemCart Srl, Roma, Italy, 7–54.
- Mulas, J. (1999). *Inventario de inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Mula de febrero de 1999*. IGME, Madrid. 2 Mapas. Inédito.

- Mulas, J., D. Ponce de León, M. Martínez y J.M. Pardo (2001). Diseño de una metodología para la zonificación de la inestabilidad de laderas naturales producidas por terremotos. Aplicación a una zona del Pirineo Central (Huesca). *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Vol. III, 1241-1252.
- Mulas, J., D. Ponce de León y E. Reoyo (2003). Microzonación sísmica de movimientos de ladera en una zona del Pirineo Central. *2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Málaga, 13-26.
- Mulas, J., D. Ponce de León, J.M. Pardo Sanjurjo, L. Bardasano, A. Prieto Martín, C.L. Carnicero y G. Herrera (2010). Microzonación sísmica de las inestabilidades de ladera. Diseño de una metodología y su aplicación a una zona piloto en el Pirineo aragonés (Alto Tena, Huesca). *Informes Técnicos*, nº 2, IGME. CD-Rom.
- Olivera, C., E. Redondo, J. Lambert, A. Riera Melis i A. Roca (2006). *Els terratrèmols dels segles XIV i XV a Catalunya*. Institut Cartogràfic de Catalunya, Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- Orueta y Duarte, D. (1885). *Informe sobre los terremotos ocurridos en el sud de España en diciembre de 1884 y enero de 1885*. Imprenta F. Muñoz, Málaga.
- Prado, C. (1863). Terremotos en la provincia de Almería. *Escenas Contemporáneas*, I, 385-386.
- Reichert, K., A.M. Michetti and P.G. Silva (2009). Palaeoseismology: historical and prehistorical records of earthquake ground effects for seismic hazard assessment. *Soc. Geol. London Spec. Publ.*, 316, 1-10.
- Rodríguez, C.E., J.J. Bommer and R.J. Chandler (1999). Earthquake-induced landslides: 1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, 325-346.
- Rodríguez-Peces, M.J. (2008). *Evaluación regional de inestabilidades de ladera por efecto sísmico: Mapas de desplazamiento de Newmark para la Cuenca de Lorca, Cuenca de Granada y Sierra Nevada*. Tesis de Máster. Universidad de Granada, Granada.
- Rodríguez-Peces, M.J. (2010). *Analysis of earthquake-triggered landslides in the South of Iberia: Testing the use of the Newmark's method at different scales*. Tesis doctoral, Universidad de Granada, Granada.
- Rodríguez-Peces, M.J., J. García-Mayordomo, J.M. Azañón y A. Jabaloy (2008). Evaluación de inestabilidades de ladera por efecto sísmico en la Cuenca de Lorca (Murcia): Implementación del método de Newmark en un SIG. *Boletín Geológico Minero*, 119(4), 459-472.
- Rodríguez-Peces, M.J., J. García-Mayordomo and J.M. Azañón (2009a). Comparing Newmark's method at regional, sub-regional and site scales: seismically induced La Paca rock-fall case (Murcia, SE Spain). 8IWSMRR Workshop Abstract and Short Paper CD, *8th International Workshop on Seismic Microzonation and Risk Reduction*, Aguadulce (Almería), 15-18th March 2009.
- Rodríguez-Peces, M.J., J. García-Mayordomo and J.M. Azañón (2009b). Comparación del método de Newmark a escala regional, local y de emplazamiento: el caso del desprendimiento de la Paca (Murcia, SE España). *Geogaceta*, 46, 151-154.
- Rodríguez-Peces, M.J., J. García-Mayordomo y J.M. Azañón (2009c). Evaluación regional de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos para diferentes escenarios sísmicos en Sierra Nevada (Granada, SE España). En: E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (eds.): VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. 25 años. Tomo II, 687-698.
- Rodríguez-Peces, M.J., J. García-Mayordomo, J.M. Azañón, J.M. Insua-Arévalo, J.L. Pérez-García and J. Delgado (2009d). Comparación del método de Newmark a Escala regional, Local y de Emplazamiento en las Cuencas de Lorca y de Granada (SE España). En: E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (eds.): VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. 25 años. Tomo II, 699-710.
- Rodríguez-Peces, M.J., J. García-Mayordomo, J.M. Azañón and A. Jabaloy (2011a). Regional Hazard Assessment of Earthquake-Triggered Slope Instabilities Considering Site Effects and Seismic Scenarios in Lorca Basin (Spain). *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XVII, 2, 183-196.
- Rodríguez-Peces, M.J., J.L. Pérez-García, J. García-Mayordomo, J.M. Azañón, J.M. Insua-Arévalo and J. Delgado (2011b). Applicability of Newmark method at regional, sub-regional and site scales: seismically induced Bullas and La Paca rock-slide cases (Murcia, SE Spain). *Natural Hazards*, 59, 1109-1124.
- Rodríguez-Peces, M.J., J.M. Azañón, J. García-Mayordomo, J. Yesares, E. Troncoso and M. Tsige (2011c). The Diezma landslide (A-92 motorway, Southern Spain): history and potential for future reactivation. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 70, 681-689.
- Rodríguez-Peces, M.J., J. García-Mayordomo, J.M. Azañón, J.M. Insua-Arévalo and J. Jiménez Pintor (2011d). Constraining pre-instrumental earthquake parameters from slope stability back-analysis: Palaeoseismic reconstruction of the Güevéjar landslide during the 1st November 1755 Lisbon and 25th December 1884 Arenas del Rey earthquakes. *Quaternary International*, 242, 76-89.
- Sanz, E. (1992). El deslizamiento de ladera de Güevéjar (Granada) durante los terremotos de Lisboa (1755) y Andalucía (1884). III Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, 195-203.
- Sanz, E. (1997). Le mouvement de versant de Güevéjar (Grenade) au cours des tremblements de terre de Lisbonne (1755) et d'Andalousie (1884). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 56, 83-87.
- Silva, P.G., F.M. González Hernández, J.L. Goy, C. Zazo and P. Carrasco (2001). Paleo and historical seismicity in Mallorca (Balears, Spain): a preliminary approach. *Acta Geológica Hispánica*, 36, 3-4, 245-266.
- Silva, P. G., M.A. Rodríguez-Pascua, R. Pérez-López, T. Bardají, J. Lario, P. Alfaro, J.J. Martínez-Díaz, K. Reichert, J. Giménez, J. Giner, J.M. Azañón, J.L. Goy y C. Zazon (2008). Catalogación de los efectos geológicos y ambientales de los terremotos en España en la Escala ESI-2007 y su aplicación a los estudios paleosismológicos. *Geotemas*, 6, 1063-1066.
- Vidal, F. (1986). *Sismotectónica de la región Béticas-Mar de Alborán*. Tesis doctoral. Universidad de Granada, Granada.