



## ¿PUDO EL DESLIZAMIENTO DE DÚDAR (GRANADA, SUR DE ESPAÑA) HABER SIDO CAUSADO POR UN TERREMOTO RECIENTE?

M.J. Rodríguez-Peces (1), J.V. Pérez-Peña (2) y J.M. Azañón (2,3)

- (1) Dpto. de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28040-Madrid. [martinjr@geo.ucm.es](mailto:martinjr@geo.ucm.es)  
(2) Dpto. de Geodinámica. Universidad de Granada. Campus de Fuentenueva s/n. 18071 Granada. [vperez@ugr.es](mailto:vperez@ugr.es)  
(3) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (UGR-CSIC). Campus de Fuentenueva s/n. 18071-Granada. [jazonon@ugr.es](mailto:jazonon@ugr.es)

**Abstract (Could the Dúdar landslide (Granada, southern Spain) be triggered by a recent earthquake?):** In this work, a slope stability back-analysis in dynamic conditions of the Dúdar landslide (Granada, southern Spain) have been performed in order to identify the failure mechanism and the main triggering factors, particularly the seismicity. This analysis confirms that the presence of water in the slide did not affect its stability significantly. However, it has been found that the landslide could be triggered by an earthquake of moderate to high magnitude ( $M_w=5.5-6.5$ ) located close to the slide ( $<10$  km), in relation to the rupture of one of the active faults located at the eastern border of the Granada Basin.

**Palabras clave:** Cordillera Bética, deslizamiento, Dúdar, sismicidad  
**Key words:** Betic Cordillera, Dúdar, landslide, seismicity

El deslizamiento de Dúdar es una de las mayores inestabilidades de ladera (~380 ha) que se desarrollado en el borde oriental de la Cuenca de Granada (sur de España). Esta cuenca representa una depresión intramontañosa de edad Neógeno-Cuaternario localizada en el sector central de la Cordillera Bética. Como en otros grandes deslizamientos ocurridos en la zona, como el deslizamiento de Güevéjar (Rodríguez-Peces et al., 2011), el principal factor desencadenante parece ser un gran terremoto. Sin embargo, no existen registros históricos de este evento ya que los primeros textos históricos en el datan del año 1400 en la población de Dúdar, localizada al pie del deslizamiento. Por tanto, es probable que el terremoto fuera anterior a esta fecha, pudiendo estar asociado a la rotura de alguna de las fallas activas presentes en el borde noreste de la Cuenca de Granada. Estas fallas son potencialmente capaces de generar terremotos con magnitudes mayores a  $M_w=6.0$  (Sanz de Galdeano et al., 2003), pudiendo considerarse como una de las zonas con mayor actividad sísmica de España.

La masa deslizada comprende materiales pertenecientes al relleno sedimentario de la Cuenca de Granada, que de abajo hacia arriba son: a) calcarenitas, areniscas y margas (Tortonense inferior); b) conglomerados grises, areniscas y margas (Tortonense superior); c) conglomerados rojos (Tortonense superior). El contacto entre estas unidades sedimentarias es discordante, pero puede ser considerado sub-horizontal o ligeramente inclinado hacia el interior de la cuenca. Además, las calcarenitas, areniscas y margas, y los conglomerados grises, areniscas y margas se encuentran ligeramente plegados por un sinclinal abierto de dirección NE-SO.

Los parámetros resistentes de los materiales implicados en el deslizamiento han sido obtenidos a partir de algunos ensayos geotécnicos desarrollados en estudios previos en materiales neógenos de la Cuenca de Granada, similares a los del deslizamiento (El Amrani Paaza et al., 1998 y 2000; Oteo, 2001; Azañón et al., 2010; Rodríguez-Peces, 2010; Rodríguez-Peces et al., 2011). Tanto los valores medios como la variabilidad (desviación

estándar) de estos parámetros (Tabla 1) se han empleado en el análisis de estabilidad retrospectivo del deslizamiento de Dúdar.

Litología	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_{sat}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	c (kPa)	$\phi$ (°)
Conglomerados rojos	21.5 ( $\pm 0.5$ )	23.2 ( $\pm 0.5$ )	81.9 ( $\pm 21.1$ )	38 ( $\pm 3$ )
Conglomerados grises, areniscas y margas	21.9 ( $\pm 0.8$ )	15.4 ( $\pm 0.8$ )	15.4 ( $\pm 10.7$ )	20 ( $\pm 8$ )
Calcarenitas, areniscas y margas	23.8 ( $\pm 1.7$ )	24.5 ( $\pm 1.7$ )	30.4	29 ( $\pm 1$ )

Tabla 1: Resumen de las propiedades geotécnicas de los materiales involucrados en el deslizamiento de Dúdar.  $\gamma$ , Peso específico aparente;  $\gamma_{sat}$ , Peso específico saturado; c, Cohesión residual;  $\phi$ , Ángulo de fricción residual.

En el análisis de la estabilidad del deslizamiento, la topografía previa al deslizamiento se ha reconstruido mediante el uso de un modelo digital de elevaciones de alta resolución (tamaño de píxel de  $3 \times 3$  m) obtenido mediante una campaña LIDAR, restituyendo la masa deslizada a su posición original. La superficie de rotura más probable se ha seleccionado a partir de las observaciones de campo, en particular fijando la localización del escarpe principal y el pie del deslizamiento. Esta superficie crítica puede ser relacionada con un movimiento traslacional desarrollado a través de los conglomerados grises, areniscas y margas (Fig. 1). Se han considerado dos factores que pudieron ser los desencadenantes del deslizamiento: la presencia de agua y la sismicidad. La saturación de los suelos con agua es uno de los principales factores desencadenantes de deslizamientos en España, donde el régimen de precipitaciones mediterráneo favorece esta situación. Por ello, en nuestro modelo hemos considerado una saturación completa del deslizamiento mediante un nivel freático muy somero. Para el estudio en condiciones dinámicas, se ha considerado el valor máximo de aceleración sísmica (Peak Ground Acceleration, PGA) como parámetro representativo del movimiento del terreno relacionado con la ocurrencia de un terremoto. La aceleración sísmica mínima requerida para sobrepasar la resistencia a la cizalla e iniciar el

deslizamiento, es decir la aceleración crítica, se ha estimado por iteración considerando diferentes valores de PGA hasta el factor de seguridad obtenido fuera igual a uno (condición de estabilidad). Se ha estimado además varios valores de magnitud-distancia epicentral desde el deslizamiento de posibles terremotos cuya PGA podría haber sido capaz de superar el valor de aceleración crítica y, por tanto, provocar el deslizamiento. Para ello se ha empleado una selección de diferentes ecuaciones de predicción del movimiento del terreno correspondientes al área mediterránea (Skarlatoudis et al., 2003; Ambraseys et al., 2005; Akkar y Bommer, 2007; Bindi et al., 2010).

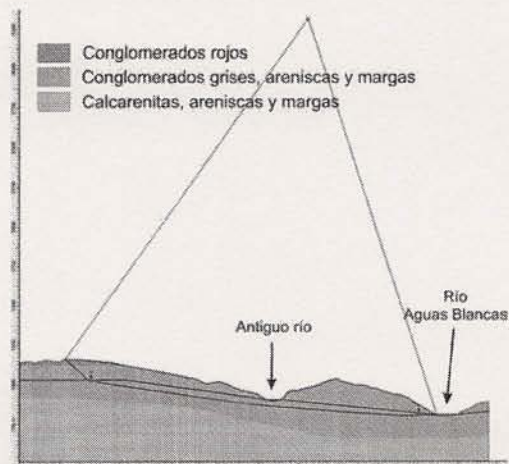


Fig. 1: Perfil geológico-geotécnico longitudinal del deslizamiento de Dúdar considerando un nivel freático somero (línea azul). La superficie de rotura se muestra mediante una línea roja.

El análisis de estabilidad, incluyendo la variabilidad de los parámetros geotécnicos, indica que la ladera era estable antes del deslizamiento. Hemos obtenido un factor de seguridad muy alto ( $FS=2.53 \pm 0.56$ ) y una probabilidad de rotura nula, considerando un nivel freático somero. La ladera permanece estable a pesar de que se considere la saturación completa de la misma. En este caso el FS sigue siendo alto ( $FS=1.71 \pm 0.38$ ) y la probabilidad de rotura nula.

Considerando el análisis en condiciones dinámicas, el valor de aceleración crítica para el deslizamiento de Dúdar es de  $0.19g$  ( $1g=9.81 \text{ m/s}^2$ ), con una probabilidad de rotura del 51 %. Los valores más probables de magnitud-distancia de los potenciales terremotos que han podido superar la aceleración crítica indican que el deslizamiento de Dúdar pudo ser provocado por un terremoto de  $M_w=5.0-6.5$ , localizado en un perímetro en torno a 16 km del deslizamiento (Tabla 2). Las magnitudes obtenidas deben ser consideradas como magnitudes mínimas puesto que un terremoto que presente una magnitud superior a la estimada, para cada par de valores de magnitud-distancia, también podría provocar el deslizamiento. Por otra parte, las distancias epicentrales obtenidas representan las distancias máximas a las que se deben de localizar los terremotos para llegar a influir en el deslizamiento.

$M_w$	5.0	5.5	6.0	6.5
$R_{ep}$	$\leq 1$	$\leq 7$	$\leq 11$	$\leq 16$

Tabla 2: Valores de magnitud y distancia más probables de los terremotos que pudieron haber provocado el deslizamiento de Dúdar.  $M_w$ : magnitud momento;  $R_{ep}$ : distancia epicentral desde el deslizamiento (km).

Los terremotos estimados pueden ser asociados muy probablemente con la rotura de alguna de las fallas activas presentes en la Cuenca de Granada, las cuales pueden generar terremotos con magnitudes superiores a  $M_w=6.0$  (Sanz de Galdeano et al., 2003) y se localizan en las proximidades del deslizamiento de Dúdar.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación TOPOIBERIA CONSOLIDER-INGENIO2010 CSD2006-00041 y CGL2008-03249/BTE.

### Referencias bibliográficas

- Akkar, S. y Bommer, J.J. (2007). Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East. *B Seismol Soc Am*, 97, 511-530.
- Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K., Smit, P.M. (2005). Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration. *B Earthq Eng*, 37, 1-53.
- Azañón, J.M., Azor, A., Yesares, J., Tsige, M., Mateos, R.M., Nieto, F., Delgado, J., López-Chicano, M., Martín, W., Rodríguez-Fernández, J. (2010). Regional-scale high-plasticity clay-bearing formation as controlling factor on landslides in Southeast Spain. *Geomorphology*, 120 (1-2): 26-37.
- Bindi, D., Luzi, L., Massa, M., Pacor, F. (2010). Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA). *B Earthq Eng*, 8, 1209-1230.
- El Amrani Paaza, N., Lamas, F., Irigaray, C., Chacón, J. (1998). Engineering geological characterization of Neogene marls in the Southeastern Granada Basin, Spain. *Eng Geol*, 50: 165-175.
- El Amrani Paaza, N., Lamas, F., Irigaray, C., Chacón, J., Oteo, C. (2000). The residual shear strength of Neogene marly soils in the Granada and Guadix basins, southeastern Spain. *B Eng Geol Environ*, 58, 99-105.
- Oteo Mazo, C. (2001). Informe sobre el deslizamiento de Diezma (A-92) y las soluciones para estabilizarlo. Consejería de Obras Públicas y Urbanismo de la Junta de Andalucía, 60 pp.
- 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, España, 254 pp.
- Rodríguez-Peces, M.J., García-Mayordomo, J., Azañón, J.M., Insua, J.M., Jiménez Pintor, J. (2011). 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. *Quater Int* doi:10.1016/j.quaint.2010.11.027
- Sanz de Galdeano, C., Peláez Montilla, J.A., López Casado, C. (2003). Seismic Potential of the Main Active Faults in the Granada Basin (Southern Spain). *Pure Appl Geophys*, 160, 1537-1556.
- Skarlatoudis, A.A., Papazachos, B.N., Margaritis, N., Theodulidis, C., Papaioannou, I., Kologeras, E.M., Scordilis, E.M., Karakostas, V. (2003). Empirical peak ground-motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece. *B Seismol Soc Am*, 93, 2591-2603.