

Susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en Alcoy (Alicante) y sectores adyacentes

J. Delgado¹, J.A. Peláez², R. Tomás³, C. López Casado⁴,
C. Doménech⁵, A. Estévez¹, A. Cuenca⁶ y J. Henares¹

1 Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Alicante, Ap. Correos 99, 03080 Alicante. jose.delgado@ua.es, antonio.estevez@ua.es

2 Dpto. Física, Universidad de Jaén, C/ Virgen de la Cabeza 2, 23071 Jaén. japelaez@ujaen.es

3 Dpto. Expresión Gráfica y Cartografía, Universidad de Alicante, Ap. Correos 99, 03080 Alicante. roberto.tomas@ua.es

4 Dpto. Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada, 18071 Granada. elcasado@ugr.es

5 Instituto Técnico de la Construcción S.A., Av. Eleche s/n, Alicante. geotecnia.alicante@itcsa.es

6 Laboratorio de Carreteras, COPUT, Generalitat Valenciana, Av. Orihuela s/n, Alicante. artemio.cuenca@coput.m-400.gva.es

ABSTRACT

We present an approach developed to estimate the seismically-induced landslide susceptibility of the Alcoy (Alicante) area. It combines the Newmark's method of evaluation of slope stability with a seismic hazard study of the region through a GIS. The obtained results show that the distribution of susceptible areas is closely related to the position of river valleys, specially the Molinar and Serpis rivers. Due to Alcoy city has developed around these rivers, some zones of the city show moderate to high susceptibility, which is in accordance with historical data which describe the occurrence of seismically-induced landslides along these valleys. The results emphasize areas of susceptibility that actually are being occupied, thus pointing out the necessity of incorporating this information into the land use planning.

Key words: landslides, seismic hazard, susceptibility maps, GIS.

INTRODUCCIÓN

Terremotos recientes han puesto de manifiesto la importancia que la ocurrencia de inestabilidades de ladera sismoinducidas tiene en el cómputo global de daños. Algunos ejemplos, como el ocurrido en Santa Tecla (El Salvador), donde una inestabilidad produjo casi el 60% de las muertes ocasionadas por el terremoto de Enero de 2001 (M_w 7,6), demuestran la importancia de estos fenómenos y el riesgo que representan para la sociedad.

Actualmente, un método muy empleado para estudiar la estabilidad en condiciones dinámicas de un área extensa es el desarrollado por Newmark (1965). En él se trata a la posible masa inestable como un bloque rígido que puede deslizarse sobre un plano inclinado, y calcula la aceleración mínima necesaria para que las fuerzas perturbadoras (componente del peso paralela al talud) iguale a la resistencia al corte del terreno. Asumiendo un equilibrio límite, esta aceleración (Ac) viene dada por:

$$Ac = (FS - 1) g \sin \theta \quad (1)$$

En esta expresión FS es el factor de seguridad de la ladera en condiciones estáticas, g la aceleración de la gravedad y θ la pendiente del talud. Dado que la aceleración debida al terremoto fluctúa en el tiempo, esporádicamente superará el valor crítico Ac y el talud sufrirá un desplazamiento irreversible. No

obstante, un desplazamiento de pequeña magnitud no necesariamente implica inestabilidad. Es por ello que se considera que Ac es una medida de la susceptibilidad de la ladera a sufrir inestabilidad (Wilson y Keefer, 1985; Jibson *et al.*, 2000).

En este trabajo se presentan los resultados del análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera sismoinducidos en el entorno de Alcoy (Alicante), un área caracterizada por haber sufrido este problema en el pasado (Ayala Carcedo *et al.*, 1990). Para ello se ha utilizado un Sistema de Información Geográfica (SIG) que ha permitido combinar el anterior criterio con un estudio de peligrosidad sísmica. Estos resultados son parte de una investigación en curso conducente a la obtención de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera desencadenados por terremotos.

LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA

El área seleccionada para el presente estudio (Fig. 1) corresponde a la hoja 821-III del Mapa Topográfico Nacional de España a escala 1:25.000. El sector considerado es parte de la cuenca neógena de Alcoy. Dentro de ésta se han estudiado sólo aquellos materiales que geotécnicamente se pueden describir por la mecánica de suelos, concretamente las margas del Mioceno Medio-Superior, conocidas localmente como "Tap", y los sedimentos de las diversas generaciones de abanicos aluviales que parten de los relieves que rodean la cuenca.

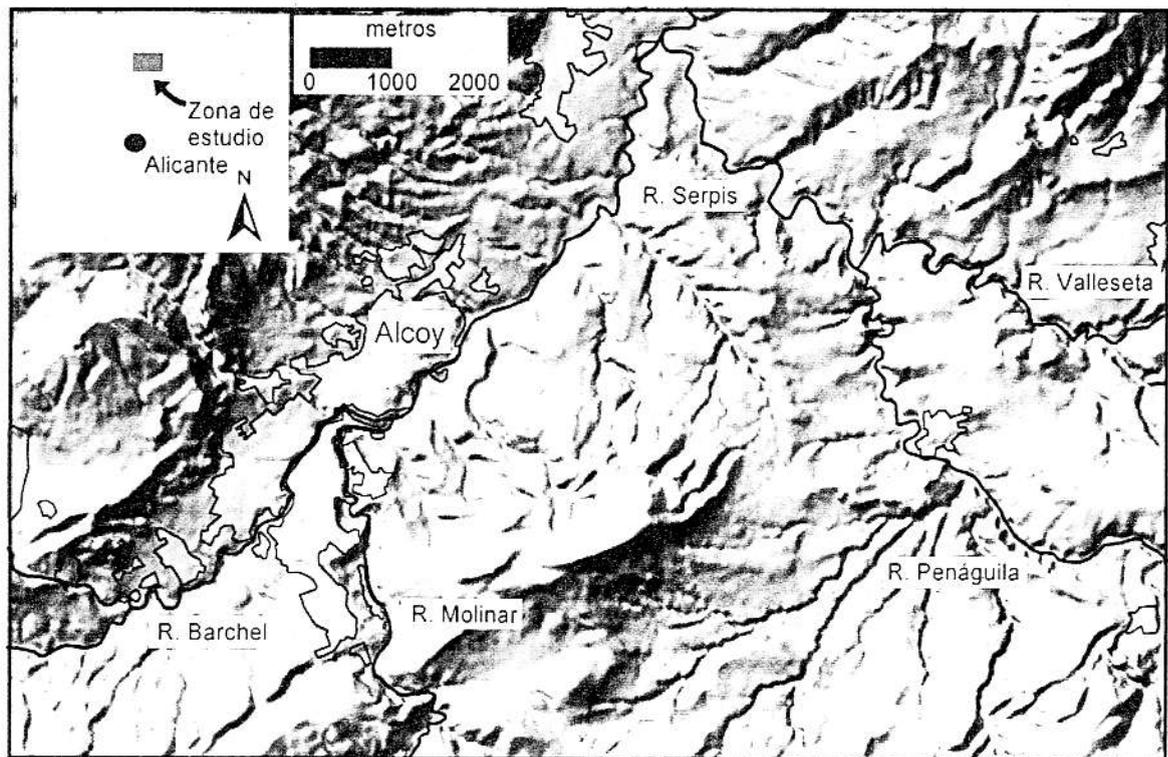


FIGURA 1. Localización geográfica de la zona de estudio.

El relieve se caracteriza por pendientes moderadas, generalmente inferiores a 10° . La elevación de los macizos que rodean la cuenca durante el Plioceno y Cuaternario (Goy *et al.*, 1989), así como la comunicación de la misma con el Mediterráneo a través del barranco del Infierno en el Pleistoceno (IGME, 1985), ha dado lugar a un rejuvenecimiento del relieve. Como consecuencia, los valles excavados por los ríos son profundos y con fuertes pendientes, donde son frecuentes los episodios de inestabilidad en condiciones estáticas que afectan, sobre todo, a las margas del *Tap*.

Al objeto de introducir la información geológica y topográfica en un SIG se ha digitalizado la cartografía geológica de la zona de estudio (Almela *et al.*, 1975), definiendo polígonos para cada formación cartografiada. Posteriormente los polígonos se han rasterizado según una rejilla (píxel) de 25 m de lado. Adicionalmente se ha elaborado un modelo digital del terreno con el cual se ha obtenido un mapa de pendientes.

Las propiedades geotécnicas de los materiales se han obtenido a partir de más de un centenar de informes geotéc-

nicos que se han podido consultar. Para asignar propiedades a cada polígono resultante de la digitalización de la geología superficial, se localizaron los sondeos sobre el mapa litológico y promediaron las propiedades densidad (γ), cohesión efectiva (c') y ángulo de rozamiento efectivo (ϕ') de todos los ensayos efectuados sobre materiales de un mismo polígono. Un resumen de las propiedades de los diversos materiales considerados aparece en la tabla 1. Como consecuencia de este procedimiento ha resultado que polígonos de una misma litología pueden tener propiedades geotécnicas ligeramente diferentes entre sí.

MÉTODO DE CÁLCULO DE LA SUSCEPTIBILIDAD

Se ha definido la susceptibilidad a movimientos de ladera en condiciones dinámicas a partir de dos elementos. Por una parte se ha calculado la A_c derivada del método de Newmark y, por otra, se ha considerado la peligrosidad sísmica de la región (aceleración pico, PGA).

TABLA 1. Propiedades geotécnicas de los suelos de la cuenca de Alcoy.

Material / Unidad	Edad	Cohesión, c' (KPa)	Propiedades	
			Áng. rozamiento, ϕ' ($^\circ$)	Densidad, γ (KN/m ³)
Margas (<i>Tap</i>)	Mioceno Medio-Sup.	25 - 33	26,8 - 28,0	18,0 - 20,5
Abanicos aluviales	Pleistoceno Inf.-Med.*	10	32	19,5
Abanicos aluviales	Pleistoceno Medio*	10	34	21,3
Abanicos aluviales	Pleistoceno Med.-Sup.*	9 - 18	31,3 - 36	17,9 - 21,6
Llanural aluvial	Holoceno*	10	31	20,5

(*) Según Goy *et al.* (1989)

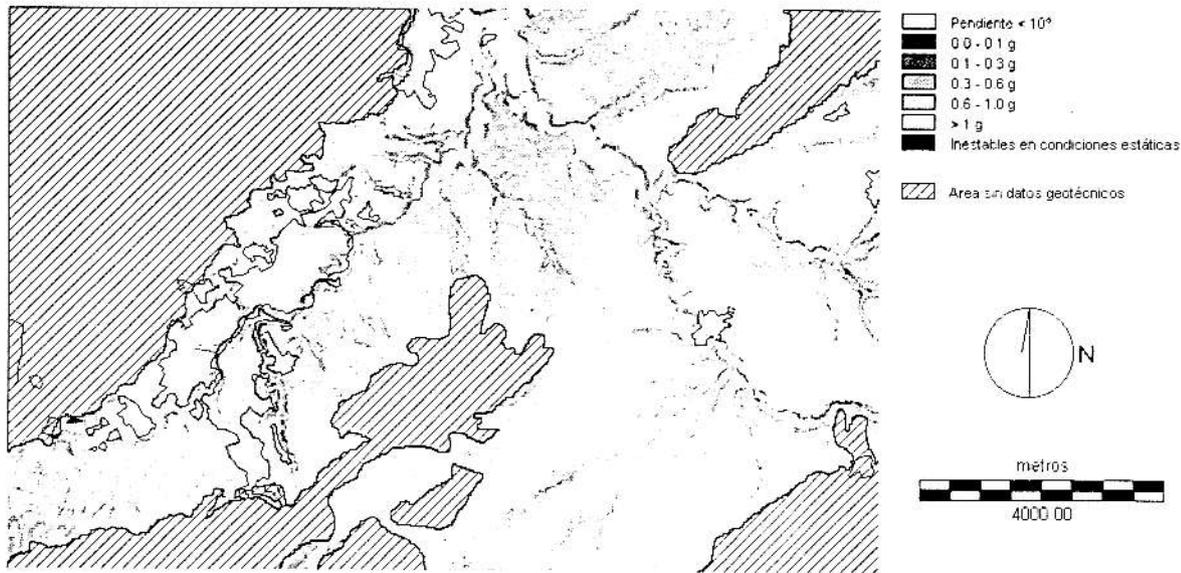


FIGURA 2. Aceleración crítica (en g) resultante de aplicar el método de Newmark.

El valor de A_c es constante y característico de cada punto (píxel) investigado, función de las propiedades geotécnicas de los materiales y de la pendiente de la ladera, mientras que la PGA varía en función del período de retorno. Se ha realizado una clasificación del territorio según el criterio: Susceptible ($A_c \leq PGA(T)$) y No Susceptible ($A_c > PGA(T)$), siendo T el período de retorno considerado (100, 475 y 1000 años, respectivamente). Como quiera que la PGA aumenta con el período de retorno, la porción de territorio susceptible, según la anterior condición, también lo hará. Al objeto de definir grados de susceptibilidad, se han establecido cuatro categorías: No susceptible, Susceptibilidad baja ($A_c < PGA(1000 \text{ años})$), Moderada ($A_c < PGA(475 \text{ años})$) y Alta ($A_c < PGA(100 \text{ años})$).

Para el cálculo de A_c es necesario determinar previamente el FS de la ladera. Para ello se ha utilizado el modelo del talud infinito, de fácil implementación en los SIG. Dicho factor queda definido como:

$$FS = \frac{c'}{\gamma Z \sin \theta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \theta} \quad (2)$$

en donde Z es el espesor del material inestable. Para el presente trabajo Z se ha fijado en 2,5 m, espesor de material típico observado en diversas inestabilidades actuales. Los valores de FS obtenidos varían entre 0,8 y más de 7 para las zonas más llanas (no se han considerado zonas de pendiente inferior a 10° en el análisis). Se ha realizado un chequeo de aquellos puntos donde $FS < 1$ y comprobado que tal condición se corresponde con movimientos de ladera actuales o recientes. Aquellos píxeles donde ocurre esta condición no han sido tenidos en cuenta en análisis posteriores. Los valores de FS obtenidos se han utilizado para determinar A_c a partir de la expresión (1), resultando valores que varían entre 0 y 1,1 g (Fig. 2)

Los valores de peligrosidad sísmica (PGA) utilizados en este trabajo han sido obtenidos utilizando el método de la

sismicidad suavizada espacialmente (Peláez y López Casado, 2002). Con este método se trata de combinar las ventajas de los clásicos métodos paramétricos y no paramétricos. El resultado obtenido con esta evaluación tiene en cuenta tanto los terremotos históricos como la reciente sismicidad instrumental, combinando para ello cuatro modelos de sismicidad que llegan a incluir hasta los terremotos más energéticos de los últimos 700 años. El catálogo utilizado ha sido el del área Ibero-Mogrebí compilado por el Instituto Geográfico Nacional y actualizado a 1999. La figura 3 presenta las curvas de peligrosidad para los vértices y centro de la zona de estudio. Las curvas muestran un incremento de la peligrosidad hacia el N de la zona de estudio como consecuencia de los terremotos históricos energéticos acaecidos en ese sector (terremotos de 18/12/1396 de Tavernes de la Valligna, de 19/06/1644 de Muro de Alcoy, o de 23/03/1748 de Estubeny).

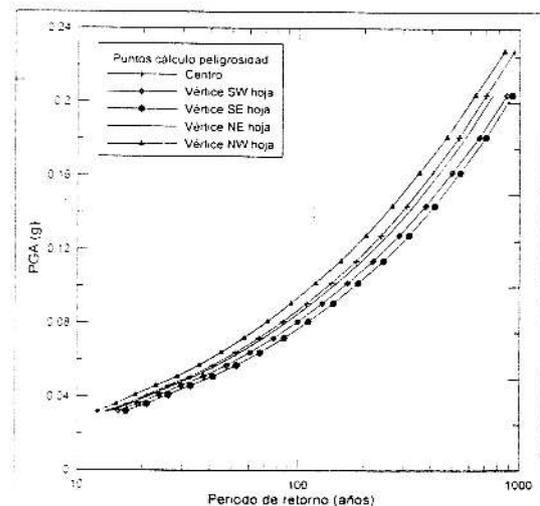


FIGURA 3. Peligrosidad sísmica para los vértices y punto central de la zona de estudio.

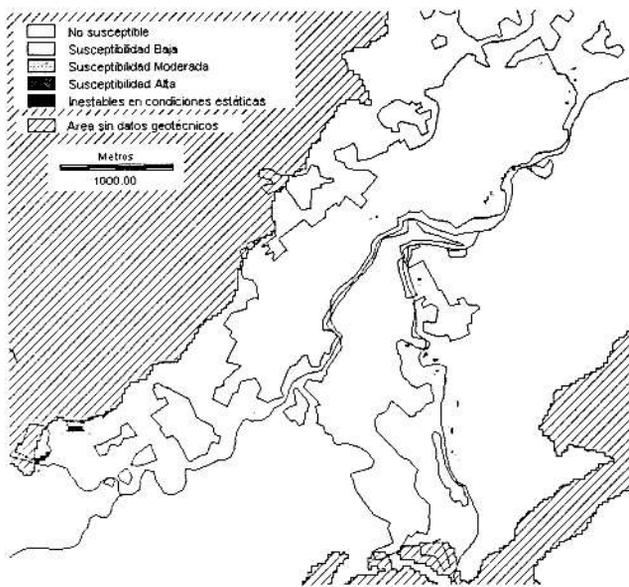


FIGURA 4. Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos del casco urbano de Alcoy.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los mapas resultantes de la superposición de los dos datos de base, A_c y $PGA(T)$, muestran que la localización geográfica de las zonas susceptibles a movimientos de ladera sismoinducidos está muy controlada por la posición de los valles de los ríos, especialmente en sus cursos altos, donde las laderas tienen pendientes elevadas, tal y como sucede a lo largo del curso del río Molinar en las inmediaciones de Alcoy (Fig. 4). Es importante señalar que para este valle, la estabilidad de las laderas es muy precaria. En condiciones estáticas existen varios procesos de inestabilidad que amenazan, incluso, el casco antiguo de la ciudad y algunas fábricas a lo largo del curso del río. Esta situación se agrava al introducir las condiciones dinámicas, de manera que la mayor parte del valle resulta ser de susceptibilidad moderada. Estos datos están en consonancia con la información histórica disponible (Ayala Carcedo *et al.*, 1990). Las mismas conclusiones se obtienen para los cursos de los ríos Barchel y Serpis, que también atraviesan Alcoy ciudad, siendo especialmente notable la zona de susceptibilidad identificada en la actual área de expansión de la ciudad (barrio Zona Norte y Polígono Industrial de Cotes Baixes). Resultados similares se han obtenido para los valles de los ríos Penáguila y Valleseta, pero en estos casos la amenaza que representa el fenómeno es menor, debido a la ausencia de núcleos urbanos importantes a lo largo de estos cauces.

El mapa de la figura 4 representa un primer paso en la investigación de las inestabilidades de ladera sismoinduci-

das, delimitando aquellas zonas más propensas a sufrirlas. El estudio detallado de estas zonas contribuirá a establecer la amenaza real de este fenómeno en el área de estudio, información que actualmente no poseemos, y a una mejor gestión del riesgo sísmico, facilitando la toma de decisiones acerca del potencial uso del suelo y la elaboración de planes de ordenación urbana.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CTI-DIB/2002/177. Contribución 03/2004 de la *Unidad de Ingeniería Geológica* del grupo AVCiT – GRUPOS 03/085 de la Generalitat Valenciana. Se agradece la colaboración de las empresas ITC S.A. y GEOSCAN S.A.

REFERENCIAS

- Almela, A., Gómez, E., Quintero, I. y Mansilla H. (1975): Mapa geológico de España E:1/50.000, Hoja 821 - Alcoy. 2ª serie. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 31 p.
- Goy, J.L., Zazo, C., Silva, P. y T. Bardají (1989): Actividad neotectónica cuaternaria en la cuenca neógena de Alcoy (España). Aplicación de criterios geomorfológicos. En: *2ª Reunión sobre el Cuaternario Ibérico*, Resúmenes.
- IGME (1985). *Mapa geotécnico y de riesgos geológicos para la ordenación urbana de Alcoy. Mapa de riesgos geológicos E:1/25.000, 1/2.500 y 1/1.000*. Memoria. Ministerio de Industria y Energía. Madrid, 165 p.
- Ayala Carcedo, F.J., Baretino, D., Mulas Peña, J., Laín Huerta, P., Burillo, J., Soria, J.M., Conconi, G.O., Gracia Bernal, A., Perez Picayo, M.A., Grao, J.A. y Rico, J. (1990): *Estudio de riesgos naturales en la ciudad de Alcoy. Riesgo de avenidas. Vulnerabilidad y riesgo sísmico*. Ministerio de Industria y Energía. Madrid. 214 p. y 3 planos.
- Jibson, R.W., Harp, E.L. y Michael, J.A. (2000): A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58: 271-289.
- Newmark, N.M. (1965): Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15: 139-160.
- Peláez, J.A. y López Casado, C. (2002): Seismic hazard estimate at the Iberian Peninsula. *Pure and Applied Geophysics*, 159: 2699-2713.
- Wilson, R.C. y Keefer, D.K. (1985): Predicting areal limits of earthquake-induced landslides. En: *Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region – An Earth Science Perspective* (J.I. Ziony, Ed.), U.S. Geological Survey Professional Paper 1360, 317-345.