

ESTUDIO MEDIANTE TÉCNICAS GEOFÍSICAS DE LA GEOMETRÍA DE LOS DESLIZAMIENTOS DE LA RAMBLA DE LA PARRICA SORBAS (ALMERÍA) Y ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE LA ESTABILIDAD GEOTÉCNICA AL PASO DE UNA TUNELADORA

L. ANDRES FERREIRO^{1*}, M. ARLANDI RODRIGUEZ² y I. JORDA BORDEHORE²

¹ Administrador de Infraestructuras Ferroviarias ADIF

² Geoconsult Ingenieros Consultores S.A.

RESUMEN

El presente estudio se enmarca dentro de los trabajos de reconocimiento geológico – geotécnicos llevados a cabo por GEOCONSULT para el proyecto de Construcción de Plataforma ferroviaria de Alta Velocidad, tramo Barranco de Gafarillos – Los Arejos, provincia de Almería. Se trata de un proyecto y obra promovidos por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) del Ministerio de Fomento.

La ladera Este de la “Rambla de La Parrica” (Sorbas, Almería), presenta una serie de paleo deslizamientos a modo de lóbulos, que aparentemente no presentan movimientos actuales. Los materiales afectados son unas calizas bioclásticas y calcarenitas del Messiniense, bajo las cuales aparecen margas arenosas con intercalaciones de areniscas del Tortoniense superior, bajo una suave discordancia angular erosiva. El fondo del barranco está ocupado por materiales cuaternarios de tamaño variable, desde arena hasta bloques.

En esta zona el trazado de la línea ferroviaria de Alta velocidad discurrirá por un túnel de doble tubo con tuneladora. El objetivo de este artículo es exponer los resultados de la investigación y cálculos geotécnicos realizados para determinar si el paso de la tuneladora en las proximidades de esta ladera puede desencadenar inestabilidades.



Figura 1. Perspectiva de la zona de antiguos deslizamientos en la Rambla de la Parrica (Sorbas, Almería) de materiales terciarios que afectan a la traza en el entorno de los P.P.K.K. 1+440 al 1+660. La traza del túnel proyectado es, en este punto, sensiblemente paralela al barranco.

El primer paso de la investigación consistió en determinar la geología interna de la ladera mediante la combinación de técnicas geofísicas (sísmica de refracción y pasiva, tomografía eléctrica) y sondeos con recuperación de testigo. Posteriormente se ha modelizado geotécnicamente el talud, efectuando un análisis retrospectivo para determinar los parámetros resistentes y deformacionales más probables de la superficie de deslizamiento (y que gobiernan la situación actual del mismo). Con estos parámetros se ha efectuado un análisis retrospectivo mediante el programa Slide y una modelización en 2D mediante el programa Phases 2D (ambos de la casa Rocscience) en la cual se modelizó el paso de la tuneladora y las características de sismicidad del entorno del Barranco.

Como resultado de las modelizaciones numéricas se ha comprobado que apenas se aprecian diferencias a ambos lados del plano de deslizamiento. Los fenómenos de concentración de tensiones, desplazamientos y plastificación son los que corresponderían a un túnel de estas características y no tiene lugar una “propagación” significativa de las deformaciones de este hacia la ladera. Esto ha permitido concluir que no se espera afcción del túnel a la estabilidad del deslizamiento.

De los resultados del estudio se desprende también que la geofísica es una herramienta muy útil para correlacionar los resultados de los sondeos y las observaciones de superficie, determinando así la estructura interna de la masa deslizada.

1. MARCO GEOLÓGICO

El trazado de la línea de alta velocidad objeto del presente proyecto se encuadra en el sector centrorienta de la provincia de Almería, afectando al término municipal de Sorbas. Geológicamente se sitúa en la cuenca neógena de Sorbas, que esta compuesta por importantes series de depósitos detríticos marinos y continentales discordantes sobre los materiales del sustrato. A grandes rasgos, están formados por: sedimentos detríticos groseros y carbonatados del Mioceno inferior (Burdigaliense, Serravalliense), formaciones calcareníticas y margoso-turbidíticas de edad Tortoniense, y sedimentos marinos de naturaleza margosa y calcárea del Mioceno superior (Messiniense).

2.- CONSIDERACIONES SOBRE LA SISMICIDAD

Históricamente, la región de Almería ha sufrido las consecuencias de numerosos terremotos por encontrarse en una de las principales áreas sísmicas de la Península Ibérica. La traza atraviesa una de las zonas con mayor peligrosidad sísmica de España, con valores de aceleración básica de 0,14g. La sismicidad de carácter histórico más frecuente es del tipo microsísmico, con magnitudes generales inferiores a 4,5 y algún terremoto de magnitud de hasta 6,0 grados en la escala de Richter localizadas en unos núcleos muy específicos. Como ejemplo de terremotos sufridos por la zona costera almeriense los de 1487, 1522 y 1658, cuyos epicentros se localizaron cerca de la ciudad de Almería. El 24 de agosto de 1804, tuvo lugar uno en el campo de Dalías, bastante al sur de la traza, alcanzando una intensidad MSK=IX. El 16 de junio de 1910, se produjo el terremoto registrado de mayor magnitud (6,3) que tuvo lugar en el Mar de Alborán, cerca de la costa.

El terremoto más importante registrado en la zona en los últimos 100 años corresponde a 4,2 grados de la escala de Richter, registrado en 1956, ubicándose en el entorno de la Falla de Gafarillos. Unos ocho años más tarde (1964), se registró otro terremoto en dicha área, alcanzándose en este caso una magnitud de 4 grados en la escala de Richter. Por todo ello el estudio de estas laderas debe de contemplar el efecto de los seismos.

Los deslizamientos son uno de los daños más frecuentes asociados a terremotos, aunque se requiere una intensidad muy alta para que se produzcan. Según GONZALEZVALLEJO (2002) la magnitud mínima para inducir caídas de bloques rocosos o pequeños deslizamientos es de 4,0, mientras que para producir avalanchas de rocas y suelos se precisan magnitudes de 6,0 a 6,5 (o intensidades mayores de VIII). Además, en general, se requieren que sean laderas ya de por sí inestables o en condiciones precarias de estabilidad previas al terremoto. También se darían en suelos de baja resistencia o estructuras metaestables, suelos colapsables, con fuertes pendientes y en escarpes rocosos con riesgos previos de desprendimientos.

Para el cálculo del deslizamiento sísmico de laderas es frecuente emplear una metodología

“pseudo estática”, que consiste en incorporar una fuerza desestabilizadora más a las ecuaciones estáticas de equilibrio límite. A la acción sísmica se le asigna una fuerza cuya dirección de aplicación puede ser horizontal o según las líneas o planos de deslizamiento, de modo que sea, en general lo más desfavorable posible. Dicha fuerza “pseudo estática” es el producto de un coeficiente sísmico K (horizontal K_h y/o vertical K_v) y el peso de la masa analizada:

$$F_{\text{sis}} = K_h W = (a_c / g) * W$$

Siendo a_c , la aceleración sísmica de cálculo.

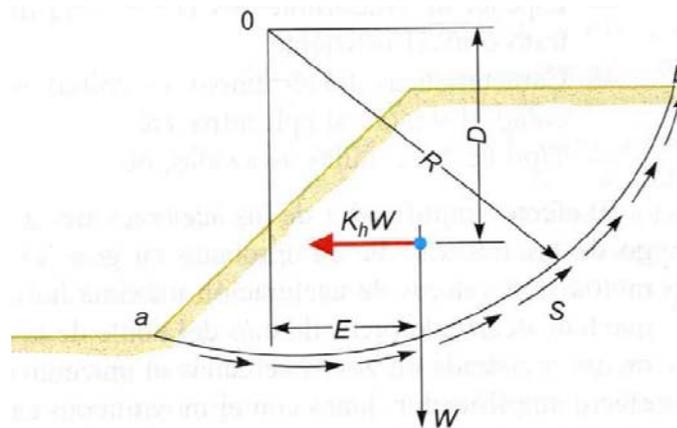


Figura 2: Esquema del análisis pseudo estático en un talud de suelo (Gonzalez Vallejo, 2002). Se emplea habitualmente en los programas comerciales, en el cálculo de masas de suelo en roturas circulares (métodos de Bishop y Jambu), cuñas de roca exteriores o deslizamientos planos y cuñas en galerías.

3.- CAMPAÑA GEOFÍSICA: ESTUDIO DE LA GEOMETRÍA DE LA MASA DESLIZADA

La geofísica habitualmente se implanta siguiendo alineaciones, las cuales registran los datos dando lugar a perfiles del terreno a modo de secciones x-z. En el caso de taludes y deslizamientos, ya que se buscan los mayores contrastes geofísicos, lo más habitual es realizarlos siguiendo la pendiente del terreno.

Técnica.	Deteccion de grietas de tracción en coronación.	Detección de zonas saturadas.	Deteccion de planos de deslizamiento y fallas enmascaradas.
Tomografía eléctrica	si	si	si
Sísmica de reflexión	No	No	sí
Sísmica de refracción	No	No, excepto horizontales	Si (si la Vp aumenta)
Tomografía sísmica	si	No evidente	si
Sísmica pasiva	No	Depende del encajante	si
georradar	si	No	Si, hasta unos 10 m dependiendo de la litología

Tabla 1: Cuadro orientativo de la aplicabilidad de las técnicas geofísicas de superficie (no diagrfas) más usuales.

Las técnicas geofísicas escogidas ha sido las se han estimado más adecuadas para la investigación de un posible plano de deslizamiento o despegue enmascarado: se han considerado que los métodos más adecuados a las características de la zona de trabajo y los objetos marcados es la realización de un estudio geofísico combinando perfiles de tomografía sísmica y perfiles de sísmica pasiva (ReMi).

Estas técnicas permiten diferenciar zonas de baja velocidad sísmica (posibles planos de deslizamiento, fallas o zonas alteradas) de zonas de alta velocidad correspondientes al substrato rocoso. Para contrastar estos datos, se ha realizado, en las zonas en las que se ha dispuesto de acceso, sondeos con recuperación de testigo.

La tomografía sísmica es, similar a la técnica de la sísmica de refracción, con la salvedad de que nos permite mayor grado de detalle y que la presencia de capas de baja velocidad, fuertes gradientes laterales o elevados buzamientos no son limitaciones tal y como ocurre en la sísmica de refracción. Se ha considerado que esta técnica, que da como resultado un perfil de propagación de las ondas Vp, es la más adecuada para detectar espesores de coberteras así como la posible continuidad de refractores (eventuales planos de despegue, etc).

La sísmica pasiva o ReMi Refraction Microtremor permite obtener un modelo de velocidad de las ondas s en función de la profundidad, en una zona determinada. Es decir obtener una distribución de la velocidad de ondas de cizalla con la profundidad, mediante el análisis espectral de registros de vibración natural del terreno.

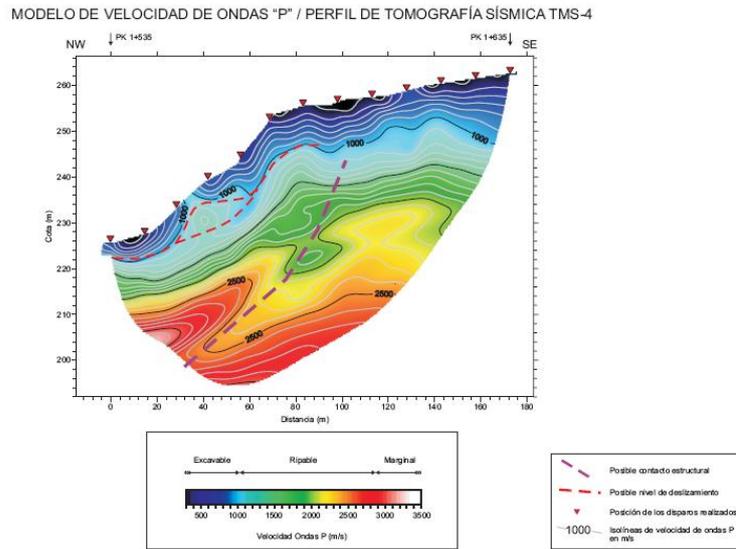


Figura 3: Sobre estas líneas perfil de tomografía sísmica (escala exagerada), realizado perpendicular a la Rambla, siguiendo la máxima pendiente de la ladera.

Los resultados obtenidos de la sísmica pasiva se presentan gráficamente en forma de columnas que muestran la variación en la velocidad de onda S con la profundidad.

VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDAS S EN PROFUNDIDAD
ENSAYOS DE SÍSMICA PASIVA (REMI)

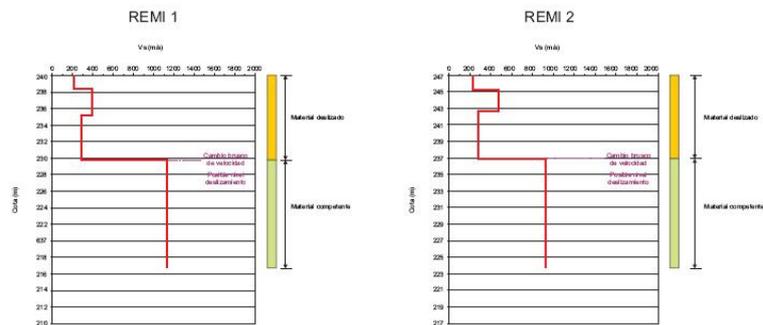


Figura 4: sobre estas líneas, resultados de 2 ensayos de sísmica pasiva ubicados sobre la traza de un perfil de tomografía sísmica. Ambos presentan distribuciones de velocidad muy similares, y han sido simplificados a un modelo de velocidad de cuatro capas.

En ambos casos se observa un marcado cambio de velocidad sísmica de ondas S a aproximadamente 10 a 11 m. desde la superficie del terreno (cotas 230 y 237 respectivamente). Este cambio podría estar asociado a la presencia de una interfase definida por materiales sueltos y poco competentes y probablemente húmedos, y los materiales infrayacentes más competentes que definan el nivel de deslizamiento.

La información de ambos ensayos ReMi se ha integrado en el perfil de tomografía sísmica TMS-3 paralelo a la traza, para una mejor visualización de los resultados obtenidos mediante las dos técnicas sísmicas empleadas.

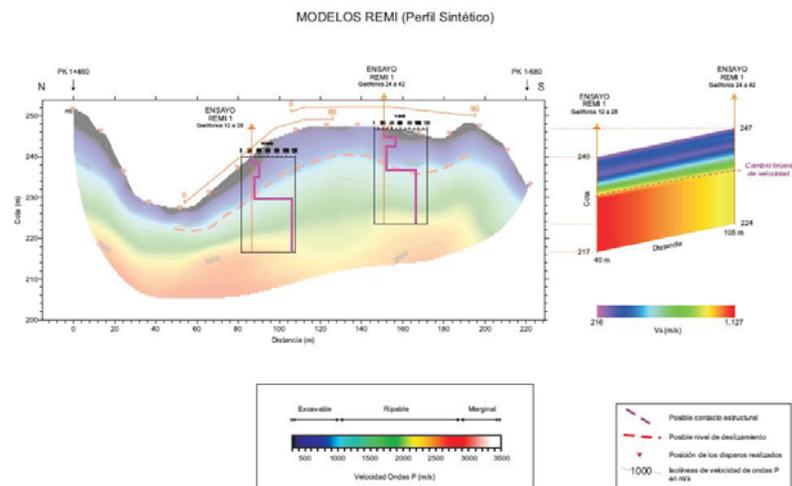


Figura 5: superposición de los ensayos de sísmica pasiva con el perfil de tomografía sísmica paralelo al barranco.

Con objeto de verificar y ajustar los resultados de la campaña geofísica, se realizó un sondeo con recuperación de testigo de 85,2 m de profundidad en el cruce de los perfiles sísmicos. El resultado fue que el sondeo interceptó un posible plano de deslizamiento en el entrono de la cota -17,5 m. de profundidad desde boca del sondeo.



Figura 6: Emplazamiento del sondeo geotécnico en la zona del “paleo deslizamiento”.

4.- GEOMETRÍA DEL DESLIZAMIENTO

Los resultados de esta campaña (figura 7) muestran una posible masa movilizada con un plano de deslizamiento situado a unos 10 a 11 m. de profundidad. Los materiales presentes en el talud son unas calizas bioclásticas y calcarenitas del Messiniense, de la unidad Mar bajo las cuales aparece una suave discordancia angular erosiva y la formación Tsa (margas arenosas con intercalaciones de areniscas del Tortoniense superior).

El fondo del barranco está ocupado por un cuaternario denominado en nuestro caso indistintamente como Q. Se ha modelizado una superficie de deslizamiento de 1 m de espesor dentro de la formación Tsa, de la cual se pretende determinar sus parámetros resistentes. Con los datos geológicos y geofísicos se ha establecido un modelo geométrico del plano de deslizamiento del talud. Mediante análisis retrospectivo se ha buscado obtener unos parámetros resistentes de la superficie de deslizamiento acordes con la situación real de campo.

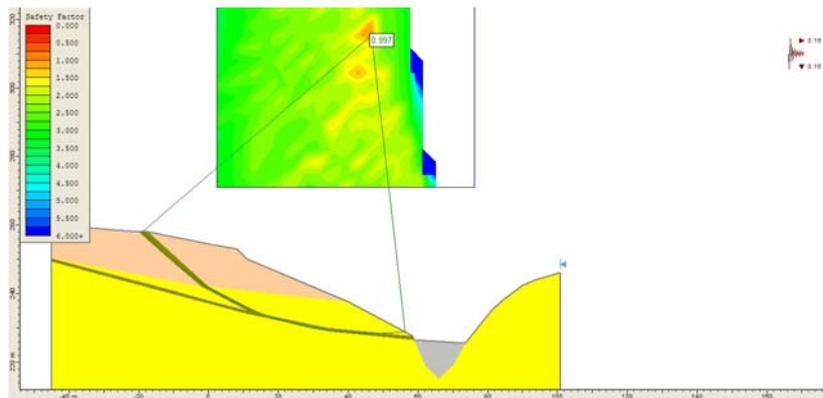


Figura 7: El análisis de estabilidad del talud se ha efectuado según los métodos de Bishop y Jambu con el programa comercial SLIDE de la casa Rocscience.

Se han realizado diversos tanteos con pares de cohesión y fricción, asumiendo un criterio de rotura Mohr - Coulomb (C y ϕ). En un primer cálculo buscamos obtener un FS entorno a la unidad, que indica la situación de equilibrio límite. En el cálculo se ha empleado además una aceleración sísmica de 0,16 g. El par que gobierna este FS = 0,997 es $C = 0$, $\phi = 18^\circ$. El círculo pésimo pasa por la superficie de deslizamiento.

Estos parámetros podrían ser los que gobernarían una situación de equilibrio límite, sin embargo no creemos que sean realistas, pues según las observaciones de campo, el talud no se desliza actualmente. Según nuestra experiencia un valor de fricción igual a 18° sería posible para un deslizamiento en margas de este tipo, sin embargo la cohesión debería ser mayor y tratarse de un parámetro residual. Dejando fijo en nuestro retro análisis $\phi = 18^\circ$, buscamos

unos parámetros de cohesión más acordes con la situación actual. La solución adoptada es una cohesión = 50 KPa para un FS = 1.42. Estos valores de cohesión corresponden a la mitad de la cohesión que presentan los materiales supra yacentes de la unidad Mar.

Por tanto los parámetros resistentes considerados para el plano de deslizamiento son: $C = 50 \text{ KPa}$ $\varphi = 18^\circ$

5.- MODELO NUMÉRICO

Para la modelización de la interacción de los túneles con el talud se ha empleado el programa comercial de modelización en dos dimensiones por elementos finitos: PHASES 2D v.6 de la casa Rocscience.

Para obtener unos parámetros resistentes según el criterio de Mohr - Coulomb para la formación Tsa y Mar se han tomado los parámetros geotécnicos de proyecto y se ha elaborado la envolvente de Hoek- Brown (2002) con el programa ROCDATA. Se han determinado los parámetros C y φ para el rango de tensiones esperables en el entorno de las excavaciones o del túnel.

Los parámetros empleados para la modelización PHASES 2D son los siguientes:

Litotipo/ Parámetro y fuente	TSA	MAR	Q	Superficie de Deslizamiento en TSA
Densidad (T/m ³)	2,25	1,958	1,66	2,0
E MPa	1305	590	50	500
C' (KPa)	81	100	50 KPa	50 KPa FS 1,4 0 (FS 1)
φ'	41° (Hoek 2002)	30° (Hoek 2002)	35° (proyecto)	18° (retroanálisis)
Aceleración sísmica ab				0,16 g
K0				2,75
σ_v				$\rho^* g^* h$

Tabla 2: Parámetros geotécnicos de los materiales.

Para la modelización del sostenimiento de dovelas, se ha considerado un espesor de 0,5 m, asimismo dado el tiempo que pasa entre el paso de la tuneladora y la colocación del revestimiento, para el modelo se ha considerado una relajación del macizo del 70%.

6.- RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN NUMÉRICA

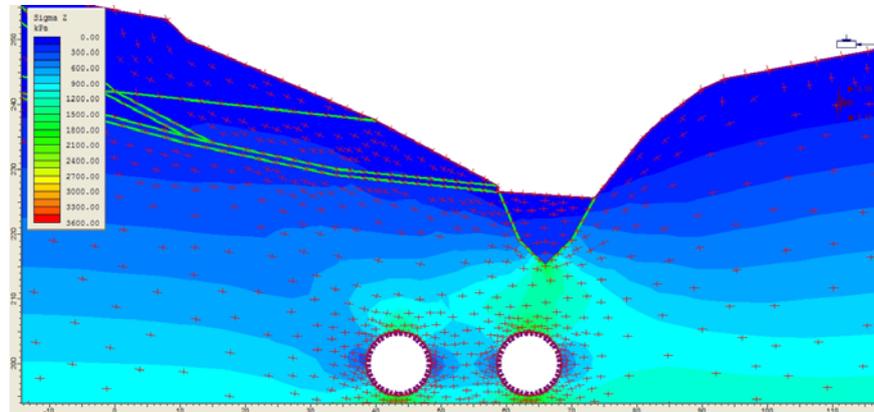


Figura 8: Tension vertical y trayectorias de las tensiones principales. (Pk 1+580)

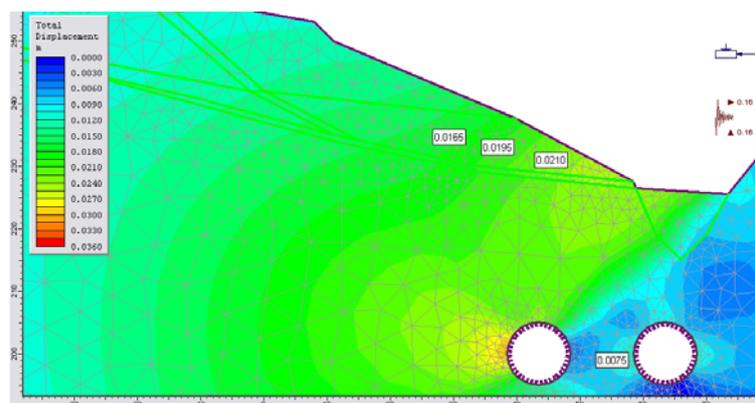


Figura 9: desplazamientos totales

Se aprecia como no se producen movimientos por efecto del túneles diferenciales por encima ni en el pie del deslizamiento. Los desplazamientos totales son del orden de 2 cm en pie del talud. El material se comporta como un sólido rígido

7.- CONSIDERACIONES FINALES

Como conclusión principal de la campaña geofísica cabe destacar que a cotas inferiores a 210 m. el terreno presenta velocidades superiores a 2000 m/s, lo que corresponde a roca “sana”. Los deslizamientos no alcanzan esta cota. Como la clave del túnel se localiza a la cota 194 m. se dispone de 16 m. de resguardo de roca sana (diámetro y medio de túnel), lo que garantiza la estabilidad del túnel y cabalgamientos que se localicen a cotas superiores a la 210 m. De todas las investigaciones realizadas se deduce que no hay afección al túnel por encontrarse la masa deslizada muy por encima de la cota de la clave.

Los movimientos se producen en conjunto de tal forma que se aprecian pocas diferencias a ambos lados del deslizamiento. Los fenómenos de concentración de tensiones, desplazamientos y plastificación son los que corresponderían a un túnel de estas características y no tiene lugar una “propagación” significativa de las deformaciones hacia la ladera. Las deformaciones y mayores desplazamientos quedan restringidos al entorno del túnel los cuales son admisibles.

8.- BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Calaforra, J.M., Pulido-Bosch A. (2003). Evolution of the gypsum karst of Sorbas (SE Spain). *Geomorphology* 50 173-180.

García Mayordomo, J., (2005) Caracterización y análisis de la peligrosidad sísmica en el sureste de España. Tesis doctoral. Dep. de Geodinámica Facultad de Ciencias Geológicas de la U.C.M.

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C., (2004) Ingeniería Geológica, 774 pp.

Hack, R., (2000) Geophysics for slope stability, *Survey in Geophysics* 21: 423-448

Hoek, E., y Brown, E.T., (1980) *Underground Excavations in Rock*. 5ª edición, de 2005. pp. 527

Jimenez Pintos, J., y Azor, A., (2006). El deslizamiento de Güevéjar (provincia de Granada): Un caso de inestabilidad de laderas inducida por sismos. *Geogaceta* 40, pp. 287 – 290.

Pérez Peña, J.V., Azañón J.M. Azor, A., Carrillo J.M: (2007) Deslizamientos rotacionales cuaternarios inducidos por la erosión fluvial en el arroyo de Gor (Cuenca de Guadix, SE de España) En: *La cuenca de Guadix – Baza, estructura, tectónica activa, sismicidad, geomorfología y dataciones existentes* (Sanz de Galdeano, C.Y Pelaez, J.A. eds.) Granada, pp. 263-281.

VVAA, (1975) Mapa Geológico de España (E. 1:50.000), Hoja de Sorbas IGME

VVAA (1985) Mapa Geológico - Minero de Andalucía. Consejería de Economía e Industria.

Wyllie, D.C., Mah, C.W., (2004) *Rock Slope Engineering*. 431 pp.