

Los deslizamientos de la ladera de la margen izquierda del torrente de Fornalutx (Mallorca)

R. M. Mateos⁽¹⁾, M. Bermejo⁽³⁾, T. Hijazo⁽³⁾, J. A. Rodríguez-Franco⁽³⁾, M. Ferrer⁽²⁾,
L. I. González de Vallejo⁽³⁾ e I. García⁽¹⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Avda. Ciudad Querétaro s/n. 07007 Palma de Mallorca.
E-mail: rm.mateos@igme.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.
E-mail: m.ferrer@igme.es

(3) Prospección y Geotecnia S.L. Pedro Muguruza, nº1- 8ºD. 28036 Madrid.
prospeot@arrakis.es

RESUMEN

La ladera de la margen izquierda del Torrente de Fornalutx, junto al Valle de Sóller en la isla de Mallorca, ha sufrido una serie de movimientos en los años 1924, 1954, 1974 y 2002, todos ellos desencadenados por episodios de lluvias intensas y prolongadas durante varios días. En el año 2002, la posibilidad de taponamiento del torrente por la masa deslizada, puso en alerta a las autoridades de la isla y condicionó la realización de un estudio detallado de la zona. Este estudio incluyó la realización de perfiles geofísicos mediante sísmica de refracción y tomografía eléctrica; la ejecución de 4 sondeos mecánicos de reconocimiento, así como numerosos ensayos *in situ* y de laboratorio que tuvieron como objetivo determinar las propiedades hidráulicas y resistentes de los materiales de la ladera. El análisis e interpretación de los datos obtenidos pone de manifiesto la existencia de un deslizamiento principal de tipo planar, cuya superficie de rotura coincide con el contacto entre dos tipos de materiales de diferente naturaleza y propiedades resistentes. El deslizamiento (y sucesivas reactivaciones), aunque superficial, involucra un volumen de material de unos 300.000 m³ y determina que la zona sea una de las de mayor riesgo por este tipo de procesos en la isla, debido a la cercanía del pueblo de Fornalutx.

Palabras clave: caracterización geomecánica, deslizamientos, laderas, Mallorca, riesgo

Landslides on the left side of the Fornalutx torrent (Majorca, Spain)

ABSTRACT

The slope on the left hand side of the Fornalutx Torrent, close to the Valley of Soller on the island of Majorca, has been affected by a series of movements in 1924, 1954, 1974 and 2002, all of which were triggered by episodes of intense and continuous rainfall. In 2002, the possibility of the torrent being blocked by the material from the slide, alerted the island authorities to the need for a detailed study of the area. The work included a geophysical study of the slope, using seismic and electrical tomography techniques; the drilling of 4 boreholes as well as numerous in situ and laboratory tests, which aimed to determine the hydraulic and stress properties of the materials of the slope. The analysis of the data obtained clearly shows the existence of a planar main landslide and the breaking surface of which coincides with the contact between two types of materials of different nature and stress properties. The landslide, although very shallow, involves a volume of material of 300,000 m³ and means that the area is one of those at greatest risk on the island, due to the proximity of the village of Fornalutx.

Key words: geomechanical characterization, landslides, Majorca, risk, slope, Spain

Introducción

La isla de Mallorca presenta diferentes dominios geomorfológicos, destacando la Sierra de Tramuntana en el sector noroccidental de la isla. La abrupta topografía de esta cadena montañosa, ligado a su complejidad geológica y a las características climáticas de la zona, determina una intensa dinámica de laderas con

la consecuente ocurrencia de movimientos de diversas tipologías (Mateos, 2001; Mateos y Azañón, 2005).

El movimiento de ladera más relevante en la Isla de Mallorca es el deslizamiento de Biniarroi de 1721 (Mateos y Giménez, 2007), en la vertiente meridional de la Tramuntana, que afectó a unos 300.000 m² de tierras de labor modificando totalmente la topografía original del valle de Biniarroi, así como la red de dre-

naje. Otros movimientos de ladera en esta sierra han dejado también su impronta en los registros históricos del siglo XX. Así, en el año 1931, el pueblo de Estellencs tuvo que ser parcialmente desalojado por un deslizamiento que sepultó algunas viviendas de esta localidad (Grimalt, 1992) y posteriormente, en octubre de 1978, una de las laderas de la colina donde se asienta el pueblo de Deyà se vio afectada por un deslizamiento que destruyó algunas viviendas del pueblo (Corominas, 1985). En todos los casos, el factor desencadenante fueron unas intensas y continuadas lluvias.

No obstante, en el dominio de la Sierra de Tramuntana, es el entorno del Valle de Sóller una de las zonas que presenta mayor peligrosidad por movimientos de ladera, debido principalmente a la coincidencia de un relieve acusado, la presencia de terrenos susceptibles y un régimen de lluvias favorable a este tipo de procesos. Son numerosos los movimien-

tos de tipo superficial (flujos de derrubios principalmente) que han interceptado en varias ocasiones la carretera del Coll de Sóller, generando serios problemas de circulación (Mateos, 2001).

En este contexto geográfico, la ladera de la margen izquierda del torrente de Fornalutx (al pie de los relieves de la Sierra de Alfàbia) registra una serie de deslizamientos de mayor envergadura y frecuencia que, en ocasiones, han supuesto un grave peligro para el pueblo. Existen numerosas referencias históricas (Última Hora, 1924 y Darder, 1924) al deslizamiento que ocurrió en esta ladera el día 17 de diciembre de 1924, en el paraje denominado "Es Marroigs", arrasando y destruyendo una superficie de olivar de 150.000 m² y ocasionando importantes pérdidas económicas (Darder, 1924). En la primavera del año 1954 la ladera se movilizó de nuevo, justo en la parte situada frente al núcleo urbano de Fornalutx. Testigos presenciales relatan cómo se movían los olivos ladera



Figura 1. Mapa de la Isla de Mallorca con la localización de las principales poblaciones de la Sierra de Tramuntana que han sufrido movimientos de ladera relevantes. Ubicación de Fornalutx al NE de la localidad de Sóller.

Figure 1. Map of the island of Majorca with the location of the main villages in the Tramuntana Range which have experienced relevant slope movements. Location of Fornalutx to the NE of Soller.

abajo y cómo aparecieron numerosas grietas y pequeñas balsas de agua a lo largo de la ladera. Este deslizamiento, superficial y con una superficie aproximada de 40.000 m², se ha reactivado parcialmente en varias ocasiones (1974, 2002), siempre debido a la ocurrencia de episodios de lluvias intensas.

Recientemente, en el mes de mayo del año 2002, sucedieron una serie de días con intensas precipitaciones y la inestabilidad de la ladera volvió a ponerse de manifiesto. Se movilizaron zonas puntuales del pie, dando lugar a pequeños flujos de barro y derrubios que alertaron de un posible riesgo por taponamiento del torrente. Las autoridades de la isla, junto al Servicio de Emergencias, mantuvieron la alerta durante varios días, temiendo la afección a numerosas viviendas que, en los últimos años, se han construido en los márgenes del torrente y aguas abajo del pueblo.

Ante esta situación, la Consellería de Medio Ambiente del Gobierno Balear propone al Instituto Geológico y Minero de España la realización de un estudio detallado de la ladera, cuyos objetivos eran los siguientes:

- Identificar los procesos de inestabilidad
- Determinar los factores que controlan la inestabilidad
- Establecer el tipo de movimiento y el mecanismo de rotura
- Conocer el/los factor/es desencadenantes, así como la secuencialidad del proceso

Todos ellos con el objetivo final de diseñar las medidas de estabilización de la ladera.

El presente trabajo expone los resultados obtenidos en este estudio (Garau y Mateos, 2006) dentro del marco de colaboración entre ambas instituciones.

Localización del área de estudio

Fornalutx es un pequeño pueblo de 650 habitantes situado en el corazón de la Sierra de Tramuntana. Se ubica en un estrecho y escarpado valle de naranjos y olivos, que constituye la prolongación hacia el NE del Valle de Sóller. Fornalutx se rodea de un entramado montañoso constituido por los relieves del Puig de Sa Bassa (819 m) al N, Puig Major (1436 m) al NE, Puig de l'Ofre (1093 m) al SE, y la Sierra de Alfàbia al S, presentando ésta última numerosas cimas con más de 950 m de altitud (Figura 2 y 3).

El torrente de Fornalutx nace en las faldas del Puig Major, donde se nutre de una serie de manantiales y discurre hacia el valle de Sóller siguiendo un intrincado trazado y excavando un valle de escarpadas laderas. A su curso se unen las aguas de numerosos tri-



Figura 2. Pueblo de Fornalutx con el Valle de Sóller al fondo. Se observan los relieves de la Sierra de Alfàbia, una barrera montañosa que aísla el Valle de Sóller del resto de la isla de Mallorca.

Figure 2. The village of Fornalutx with the Valley of Sóller in the background. Relief of the Alfàbia Range can be seen, a mountainous barrier which separates the Valley of Sóller from the rest of the island of Majorca.

butarios, como los torrentes de s'Olivaret, Sa Cabana, Cas Cabo y es Racó, entre otros, delimitando una cuenca de drenaje de unos 10 km². La pluviometría media de la zona es de 1200 mm anuales, produciéndose intensos aguaceros durante los meses otoñales, que pueden sobrepasar los 400 mm en 48 horas. Los caudales instantáneos máximos medidos en el torrente de Fornalutx son del orden de 5 a 10 m³/s, con velocidades de 1 a 6 m/s (ICONA, 1977).

La ladera objeto de estudio se ubica en la margen izquierda del torrente de Fornalutx, frente al pueblo (Figura 3 y 4). Con una pendiente media de 30°, más acusada en el pie, presenta un desnivel de 75 m (desde la cabecera hasta el torrente), discurriendo por ella el camino de acceso a las diferentes viviendas que se ubican en el paraje denominado "Es Marroigs", donde tuvo lugar el deslizamiento de 1924. El terreno se encuentra abancalado en la mitad superior de la ladera y, sobre ella, existen tres viviendas habitadas. El área deslizada presenta una superficie de 40.000 m², con una longitud y anchura máximas de 250 m y 150 m, respectivamente. En el año 1977, a raíz de un estudio geotécnico de la ladera que realizó ICONA, se adoptaron algunas medidas de estabilización en la misma, que consistieron en la perforación de una serie de pozos drenantes, la siembra de cipreses y la construcción de un muro de contención al pie de la ladera (Figura 3).



Figura 3. Ladera objeto del estudio. Situada en la margen izquierda del Torrente de Fornalutx, que deja el casco urbano en su ribera derecha. La ladera se encuentra muy vegetada debido a las medidas adoptadas después del movimiento de 1974.

Figure 3. The slope of the study. Located on the left hand side of the Fornalutx Torrent, with the village of Fornalutx on the right side. The slope has ample vegetation due to the measures adopted after the movement in 1974.

Metodología

Para conseguir los objetivos propuestos en el apartado de introducción, se han establecido las siguientes etapas de trabajo:

- Recopilación y análisis de información y cartografías previas. Se ha dispuesto de una topografía de la zona a escala 1:5.000 de la Conselleria de Medio Ambiente del Gobierno Balear; de una cartografía geológica a escala 1:25.000 (Gelabert, 1998), así como de la cartografía geológica a escala 1:50.000 de la Serie MAGNA del ITGE (1992). Se ha trabajado con fotografía aérea a color de la zona (año 1990) a escala 1:18.000.
- Elaboración de un plano topográfico de la ladera a escala 1:500, con una extensión aproximada de 8 has. La equidistancia de las curvas de nivel es de 0,5 m.
- Realización de una campaña de prospección geofísica mediante sísmica de refracción y tomografía eléctrica. Se han realizado dos perfiles de sísmica de refracción de 240 m de longitud cada uno, ambos transversales al movimiento de la ladera. También se han llevado a cabo 2 perfiles de tomografía eléctrica de 250 m de longitud, siguiendo la traza de los perfiles sísmicos.
- Elaboración de una cartografía geológica de detalle de la ladera, a escala 1:1000.
- Perforación y testificación de 4 sondeos mecánicos

a rotación. La extracción de testigo continuo ha permitido el estudio directo del terreno así como la toma de 7 muestras inalteradas. Se han realizado 18 ensayos SPT y 3 ensayos de permeabilidad in situ (Lefranc, de carga constante y variable), así como la instalación de piezómetros e inclinómetros en los sondeos.

- La profundidad alcanzada en cada sondeo ha sido la siguiente (P, indica instalación de piezómetro e I, de inclinómetro):

S-1P: 16,5 m

S-2I: 21 m

S-3I: 19 m

S-4P: 20 m

- Caracterización geomecánica de los materiales mediante ensayos de laboratorio. A partir de las muestras inalteradas y alteradas obtenidas en los 4 sondeos mecánicos, se han realizado los siguientes ensayos de laboratorio:

- de identificación y clasificación: densidad, humedad, granulometría por tamizado y límites de Atterberg.

- de resistencia: resistencia a compresión simple y resistencia al corte.

- Estudio hidrológico e hidrogeológico de la ladera. Ha incluido numerosos aspectos como: análisis de series históricas de precipitaciones, cálculo de los parámetros morfológicos e hidrológicos de la cuenca en la que se encuentra la ladera, cálculo de caudales por lluvias torrenciales para diferentes períodos de retorno, caudales de infiltración y escorrentía, balance hídrico de la ladera y el diseño de la red de flujo.

- Modelo geológico-geotécnico de la ladera. A partir de la consecución de las etapas anteriores se han definido una serie de unidades geotécnicas en la ladera, que permiten establecer el modelo y tipología de la rotura.

- Análisis de la frecuencia del proceso, teniendo en cuenta las diferentes reactivaciones que se han producido del movimiento.

- Por último, se proponen una serie de medidas correctoras para la estabilización de la ladera.

En la figura que muestra la geología de la ladera (Figura 5) se representa la topografía realizada de la misma, así como la ubicación de los perfiles sísmicos, tomografía eléctrica y sondeos mecánicos realizados.

Contexto geológico y geología de la ladera

El valle de Sóller se encuentra situado en el sector central del dominio geomorfológico de la Sierra de Tramuntana, una cadena alpina formada por un siste-

ma imbricado de cabalgamientos vergentes hacia el NO y cuyo nivel regional de despegue lo constituyen los materiales de naturaleza arcilloso-evaporítica del Triásico superior (Keuper). Son precisamente estos últimos materiales los que conforman el sustrato geológico de los pueblos de Sóller y Fornalutx, rodeados por los imponentes relieves calcáreos de las si-

erras circundantes, donde predominan los materiales del Jurásico inferior (Lías), constituidos por calizas y dolomías principalmente. Discordantemente, sobre los materiales anteriormente citados, se disponen una serie de depósitos de edad cuaternaria correspondientes a sedimentos aluviales y coluviales que tapizan las laderas del valle (Figura 4).



Figura 4. Mapa geológico del valle de Sóller y relieves circundantes (modificado de Gelabert, 1998), donde se observa la secuencia de mantos de cabalgamiento vergentes hacia el NO, cuyo nivel regional de despegue está constituido por los materiales arcillosos con rocas volcánicas del Keuper. Estos materiales triásicos constituyen el sustrato geológico de la zona de estudio, tapizados por sedimentos de origen coluvial recientes.

Figure 4. Geological map of the Valley of Sóller and surrounding relief (modified from Gelabert, 1998). The sequence of thrusting towards NW can be observed as well as the rising base level, made up of Keuper clays and volcanic rocks. These Triassic materials constitute the geological substratum of the study area, covered by recent colluvial sediments.

Geología de la ladera

Los materiales más antiguos que afloran en la ladera son las rocas volcánicas (ofitas) del Keuper. Estos materiales volcánicos de color verdoso constituyen el sustrato firme y estable de la ladera. Afloran en su extremo sur (Figura 5) y se han localizado mediante sondeos (ICONA, 1977) al pie de la misma. Como intercalaciones laterales en los materiales volcánicos aparecen en ocasiones yesos negros y niveles de

argilitas rojas y verdes, que se han detectado en el sondeo S-1l. También aparecen intercalados niveles de calizas micríticas, de hasta algunos metros de espesor, identificados en algunos de los sondeos realizados.

Sobre estos niveles más duros de ofitas y calizas del Keuper, aparece en la ladera un nivel de arcillas litificadas con tonalidades muy diversas, que van desde el marrón-verdoso al gris oscuro. Este material aparece entre los 6 y 12 m de profundidad y constituyen una roca blanda o un suelo firme- muy firme, dentro de la serie del Keuper.

La meteorización de los materiales del Keuper anteriormente descritos, da lugar a la presencia de un nivel arcilloso, de unos 2 a 7 m de espesor, que aparece en todos los sondeos a partir de los 4-8 m de profundidad. Se trata de una arcilla limosa, con cantos de calizas y ofitas muy alteradas.

Tapizando toda la ladera, sobre los materiales descritos, aparecen depósitos coluviales del Cuaternario, formados por arenas limosas y arcillosas con un contenido variable de gravas, bolos y cantos de calizas. Se trata de depósitos recientes generados por la propia dinámica de la ladera. El espesor es variable, entre 4 y 8 m.

Ligeramente al sur de la coronación de la ladera inestable afloran unas brechas carbonáticas fuertemente cementadas y de gran dureza. Estos materiales, descritos en otros puntos de la sierra y a los que se ha atribuido una edad Pleistoceno superior (Mateos y Azañón, 2007), parecen tener un origen kárstico, presentando unas grietas verticales de orientación N-S, con aperturas de hasta 10 m, que dan lugar a escarpes de varios metros de altura y constituye una zona preferencial de infiltración de agua en la ladera (Figura 6).

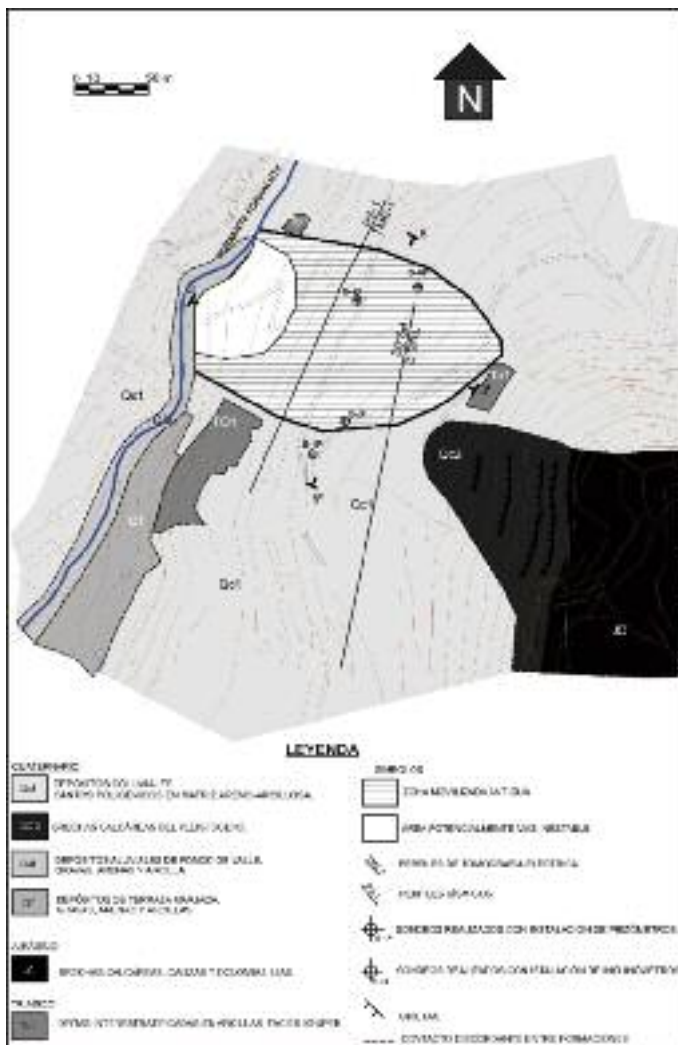


Figura 5. Mapa geológico de la ladera. Se ubican los perfiles de geofísica realizados, así como los sondeos mecánicos. Se delimita toda el área movilizada. El torrente de Fornalutx circula justo al pie de la ladera.

Figure 5. Geological map of the slope. Geophysical profiles as well as the mechanical boreholes are shown. All the moved area is outlined. The Fornalutx Torrent flows at the toe of the slope.

Interpretación de los perfiles geofísicos

La campaña de prospección geofísica ha consistido en la realización de:

- dos perfiles de sísmica de refracción (PS-1 y PS-2), transversales a la ladera, de 240 m de longitud cada uno, con 9 puntos de disparo y 5 m de separación entre los geófonos. La ubicación se observa en la Figura 5.
- dos perfiles de tomografía eléctrica (TME-1 y TME-2), transversales a la ladera, de 250 m de longitud cada uno, y que siguen el trazado de los perfiles de refracción (Figura 5).

La interpretación de los perfiles obtenidos (Figura 7) permite diferenciar con claridad un nivel superficial, de unos 5 m de potencia, que presenta una



Figura 6. Escarpe de una de las grietas que afectan a las brechas cementadas del Pleistoceno superior, situadas ligeramente al sur de la coronación de la ladera inestable, y que constituyen una zona preferencial de infiltración.

Figure 6. Escarpment of one of the cracks affecting the cemented breccias in the Upper Pleistocene, located slightly to the south of the crown of the unstable slope, and which constitute an area that facilitates the infiltration.

menor velocidad de propagación de ondas longitudinales (1000 m/s) y valores medio-altos de resistividad, que correspondería a materiales alterados de tipo granular. Bajo ellos, se distingue un nivel conductor, con mayor velocidad de propagación de las ondas sísmicas (2.500 m/s), que corresponde a materiales también alterados con un elevado contenido en arcillas. Ambos materiales se disponen sobre un sustrato rocoso inalterado, con valores elevados de velocidad de propagación (> 3.200 m/s) y resistividades entre 50 y 100 Ω/m , que se localiza a una profundidad en torno a los 20 m.

El plano de deslizamiento puede intuirse en el contacto entre los materiales más alterados y los inalterados, un contacto irregular que parece seguir en profundidad la topografía de la ladera.

Unidades geotécnicas y caracterización geomecánica e hidráulica de los materiales

La testificación de los sondeos mecánicos, unido a la interpretación de los perfiles geofísicos y de los ensayos in situ y de laboratorio realizados a las muestras obtenidas, permiten establecer las siguientes unidades geotécnicas en la ladera:

- 1.- Ofitas y calizas del Keuper: constituyen el sustrato firme y estable de la ladera. Según datos de ICONA (1977), los valores de resistencia a compresión simple de los materiales volcánicos se sitúan en torno a 300 kp/cm^2 , disminuyendo a 70 kp/cm^2 si se encuentran alterados. Los niveles de calizas micríticas presentan resistencias superiores, en torno a 475 kp/cm^2 . Esta unidad presenta una velocidad de propagación de ondas sísmicas (V_p) superior a 3200 m/s. La tomografía eléctrica muestra valores de resistividad entre 50 – 100 Ω/m .
- 2.- Arcillas litificadas del Keuper: constituyen un suelo tipo CL-ML (clasificación de suelos U.S.C.S.), con un contenido en finos en torno al 62%. Se trata de materiales muy duros (N_{spt} = rechazo) y de baja plasticidad. Los valores de resistencia a compresión simple de esta unidad varían entre 2 y 5 kp/cm^2 , y la resistencia al corte sin drenaje entre 0,4 y 0,7 kp/cm^2 . Se trata de materiales con una baja permeabilidad: $k = 10^{-6}$ cm/s.
- 3.- Arcillas alteradas del Keuper (Figura 8): constituyen un suelo tipo ML-CL-SC (clasificación de suelos U.S.C.S.), con un contenido medio en finos en torno al 60%. Se trata de materiales no plásticos o de baja plasticidad, con un Índice de Plasticidad medio de 7,5. Se trata de depósitos moderadamente firmes o muy firmes ($N_{spt} = 4-30$) y suelos muy duros ($N_{spt} > 50$) a mayor profundidad. La resistencia a compresión simple de estos materiales varía entre 2 y 6 kp/cm^2 , y la resistencia al corte (tipo UU) da valores de cohesión en torno a 1,4 kp/cm^2 y un ángulo de rozamiento interno de 32°. Se trata de depósitos muy poco permeables: $k = 10^{-4}$ cm/s.
- 4.- Depósitos coluviales del Holoceno: En conjunto estos materiales se clasifican como SM-SC (clasificación de suelos U.S.C.S.), pero pueden ser también GC en los tramos con mayor contenido en gruesos. El contenido medio de gravas es de un 35%, y el porcentaje medio de finos del 31%. Se trata de materiales no plásticos o de baja plasticidad, con valores medios del Índice de Plasticidad en torno al 14,5. En cuanto a su resistencia, puede decirse que, desde la superficie hasta una profundidad de 5 m, se trata de suelos sueltos ($N_{spt} = 4-10$) y a partir de dicha profundidad, de suelos

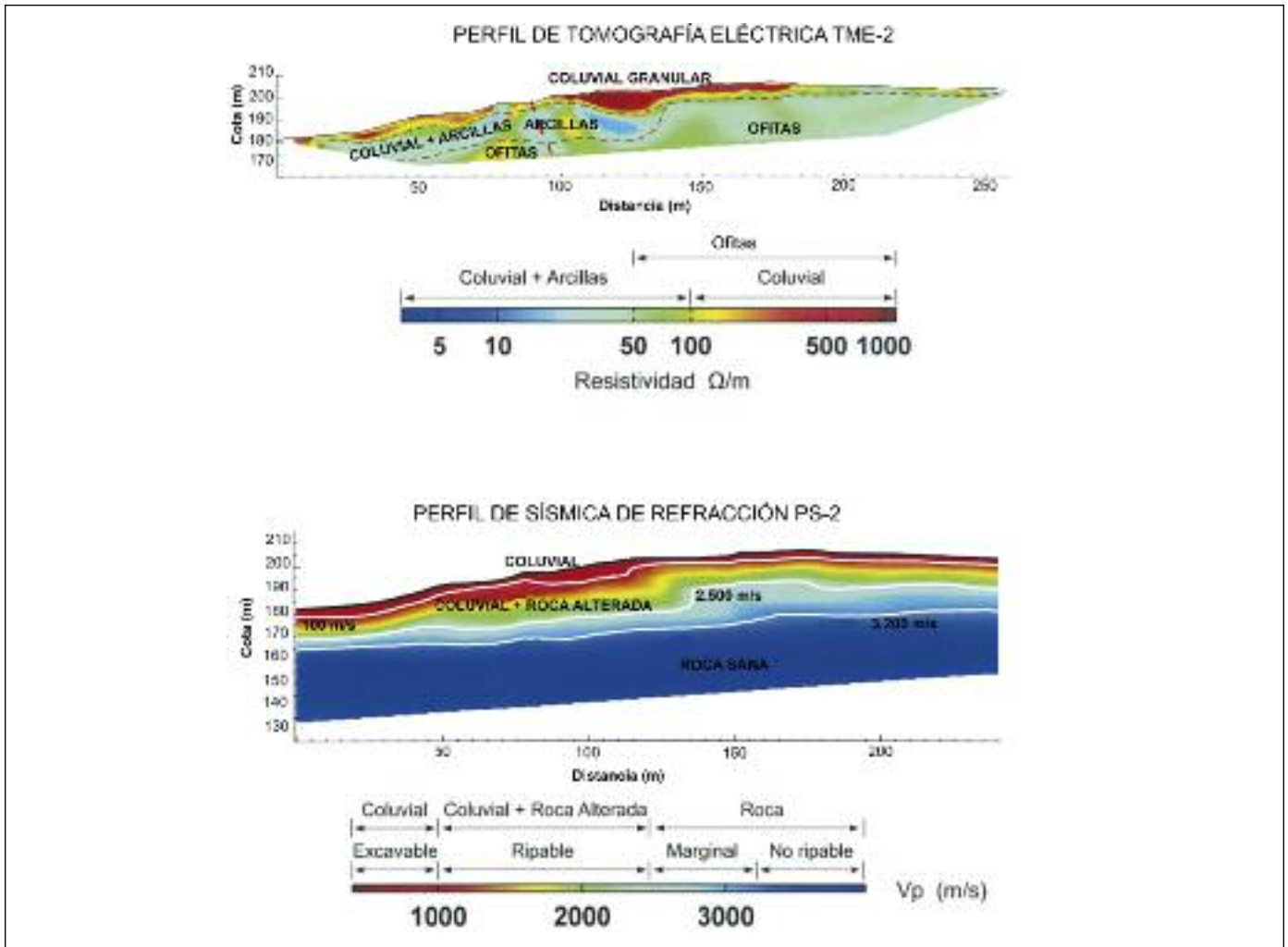


Figura 7. Perfiles de sísmica de refracción y tomografía eléctrica. En ambos perfiles se observa un nivel superficial, de unos 20 m de potencia, que corresponde a materiales granulares y arcillosos muy alterados, que se dispone sobre un sustrato rocoso inalterado. La superficie de deslizamiento podría corresponder con el contacto entre estos dos tipos de materiales, que parece seguir en profundidad la topografía de la ladera.

Figure 7. Seismic refraction and electrical tomography profiles. In both profiles we can see a shallow layer, 20 m in depth, which corresponds to very weathered granular and clay materials on an unweathered substratum. The landslide surface could be the contact between these two types of materials, which appears to follow the slope topography.

muy densos ($N_{spt} > 50$). Los valores de resistencia a compresión simple obtenidos en laboratorio varían entre 2 y 3,8 kp/cm², siendo los valores deducidos por los ensayos SPT algo mayores. Respecto a la resistencia al corte de estos materiales se han obtenidos valores de cohesión de 0,9 kp/cm² y ángulos de rozamiento interno entre 18 y 26°. ICONA (1977), mediante la realización de un ensayo triaxial (tipo CU), aporta valores de cohesión para estos materiales de 0,3 kp/cm² y ángulos de rozamiento menores ($\phi = 11,5^\circ$). La permeabilidad de estos materiales, según los ensayos Lefranc

realizados, es media- alta, con valores medios de $k = 1,1 \times 10^{-3}$ cm/s, superiores en los primeros 5 m del terreno, donde $k = 2,3 \times 10^{-1}$ cm/s.

En la Tabla I se resumen los valores de los principales parámetros geotécnicos obtenidos, para cada una de las unidades definidas.

Hidrogeología e hidrología de la ladera

Desde el punto de vista hidrogeológico, tan solo los 5 primeros metros superficiales están constituidos por



Figura 8. Arcillas alteradas del Keuper, entre los 3 y 6 m de profundidad en el sondeo S1P. Son arcillas de baja plasticidad, con valores de cohesión en torno a 1,4 kp/cm² y valores de resistencia a compresión simple entre 2 y 6 kp/cm². La tomografía eléctrica revela valores elevados de conductividad al atravesar estos niveles arcillosos.

Figure 8. Weathered Keuper clays, from a depth of between 3 and 6 m in S1P borehole. They are low plasticity clays, with cohesion values of around 1.4 kp/cm² and uniaxial compressive strength of between 2 and 6 kp/cm². The electrical tomography reveals high values of conductivity in these materials.

materiales con una permeabilidad alta ($2,3 \times 10^{-1}$ cm/s), correspondientes a los sedimentos coluviales del Cuaternario. Se detecta un nivel de agua a la profundidad de 2 y 6,20 m, en los sondeos S-1P y S-4P respectivamente, lo cual indica la existencia de un acuífero de poca entidad en los materiales cuaternarios. El resto de los materiales presentan una permeabilidad muy baja, lo que dificulta enormemente la infiltración del agua de lluvia y de escorrentía superficial. Este hecho, unido a una pendiente media de la ladera de 30°, favorece la generación de mantos de arroyada difusa, que coinciden con episodios de lluvias torrenciales.

Análisis de precipitaciones intensas en la zona

Los valores de precipitaciones medias anuales en el área de Fornalutx – 1200 mm- son de los más elevados de la isla de Mallorca, destacando el año hidrológico 1958-1959, que registró valores de casi 2.900 mm. Los meses de máxima precipitación son octubre y noviembre, generándose lluvias intensas y concentradas en cortos períodos de tiempo. Son habituales valores de precipitaciones diarias durante estos meses otoñales del orden de 80 mm.

UNIDADES GEOTÉCNICAS	DEPÓSITOS COLUVIALES DEL HOLOCENO	KEUPER		
		ARCILLAS ALTERADAS	ARCILLAS LITIFICADAS	OFITAS Y CALIZAS
Clasificación U.S.C.S.	SM-SG-GC	CL-ML-SC	CL-ML	Roca dura
Nº Golpes (N_{sp1})	<30 (0-5 m) > 30 (>5 m)	<30 (8-13 m) >30 (>13 m)	Rechazo	
Compresión Simple (Laboratorio)	2- 3,8 kp/cm ²	3 kp/cm ²	3,8 kp/cm ²	Ofitas=307,7 Kp/cm ² Calizas=477,3 kp/cm ²
Compresión Simple (Penetrómetro)	3,5 kp/cm ²	3,5 kp/cm ²	3,5 kp/cm ²	
Resistencia al corte: UU	C=0,9 kp/cm ² = 22,5°	C=1,4 kp/cm ² = 30°		
Resistencia al corte (Vane Test)		Su=0,5-0,6 kp/cm ²	Su=0,4-0,7 kp/cm ²	
Triaxial: CU (ICONA, 1977)	C' = 0,2 kp/cm ² φ' = 12,2° C = 0,3 kp/cm ² = 11,5°			
Excavabilidad	Excavable	Ripable	Ripable	No ripable
Drenaje	Favorable k (0-5 m)= $2,3 \times 10^{-1}$ cm/s k = $1,1 \times 10^{-3}$ cm/s	Desfavorable k = 10^{-4} cm/s	Muy desfavorable k = 10^{-6} cm/s	Favorable
Velocidad sísmica (v_p)	370-1000 m/s	1200-2000 m/s	2300-3200 m/s	>3200 m/s

Tabla I. Valores de los principales parámetros geotécnicos obtenidos para las diferentes unidades litológicas definidas en la ladera de Fornalutx

Table I. Values of the main geotechnical parameters obtained for the lithological units defined in the Fornalutx slope

La localidad de Fornalutx y su vecina Sóller han sufrido numerosas inundaciones a lo largo de su historia (Rullán, 1885) y constituyen una de las zonas con mayor peligrosidad de la isla a este tipo de procesos. Para el análisis de precipitaciones intensas se ha recopilado la información disponible de 5 Estaciones meteorológicas localizadas en el entorno del área de estudio. Se han considerado los valores de precipitaciones máximas diarias correspondientes a toda la serie disponible, que se inicia en el año 1958. A partir de estas series de precipitación y mediante la aplicación de la función de distribución de Gumbel, que ha dado buenos resultados en otros estudios previos ligados a movimientos de ladera (Fiorillo & Wilson, 2004; Mateos *et al.*, 2007), se han obtenido los valores de precipitaciones máximas diarias para diferentes períodos de retorno (Tabla II).

Estudio hidrológico

Se ha diseñado la red de flujo en la ladera inestable (Figura 9), teniendo en cuenta la morfología de la ladera, así como las características litológicas e hidrogeológicas de la misma. La cuenca estimada tiene una extensión de 103.500 m². La zona de recarga coincide, en su extremo meridional, con las grandes grietas que afectan a los materiales brechificados del Pleistoceno. Las líneas de flujo siguen las líneas de

máxima pendiente del terreno, con ligeras irregularidades debido a la modificación antrópica de la ladera. La dirección general del flujo es subperpendicular al torrente de Fornalutx, con sentido hacia el NO. A partir de esta red de flujo y del análisis previo de precipitaciones intensas, se ha llevado a cabo el cálculo (Témez, 1991) de caudales de escorrentía superficial que pueden circular por la ladera inestable, para diferentes períodos de retorno (Tabla III). Los resultados ponen de manifiesto valores de escorrentía superficial de 3,2 m³/s, para un periodo de retorno de 100 años, relacionado con la ocurrencia de lluvias intensas de hasta 300 mm en 24 horas. Las medidas actuales de drenaje de la ladera no pueden evacuar este caudal.

Procesos de inestabilidad. Tipología y mecanismo de rotura

A pesar de que la densidad de vegetación en la ladera y su abancalamiento dificultan las observaciones, ésta presenta una topografía muy irregular con ondulaciones en el perfil transversal del terreno. Aparecen grietas en el camino, así como en dos de las viviendas que existen sobre la ladera. En el pie hay evidencias de lóbulos de material movilizado, que constituyen relieves positivos en esta zona. Se observan humedades en puntos muy localizados y una fuerte

Periodo retorno (años)	Probabilidad	Valor de precipitación máxima diaria (mm)
2	0,5	98,2
5	0,8	142,6
10	0,9	176,4
25	0,96	223,6
50	0,98	261,4
100	0,99	302,2
200	0,995	345,4
500	0,998	406,6
1.000	0,999	455,0
2.000	0,9995	506,8
5.000	0,9998	580,0
10.000	0,9999	638,4

Tabla II. Precipitaciones máximas diarias para diferentes períodos de retorno en la zona de estudio. A partir de las series pluviométricas de las estaciones: Fornalutx "Bálitx d'Avall"; Fornalutx "Es Marroig"; Fornalutx "Monnáber"; Fornalutx "Binibassi"; Fornalutx "Binirrossi".
 Table II. Maximum daily precipitation for different return periods in the area of study. Taken from rainfall gauges at the following stations: Fornalutx "Bálitx d'Avall"; Fornalutx "Es Marroig"; Fornalutx "Monnáber"; Fornalutx "Binibassi"; Fornalutx "Binirrossi".

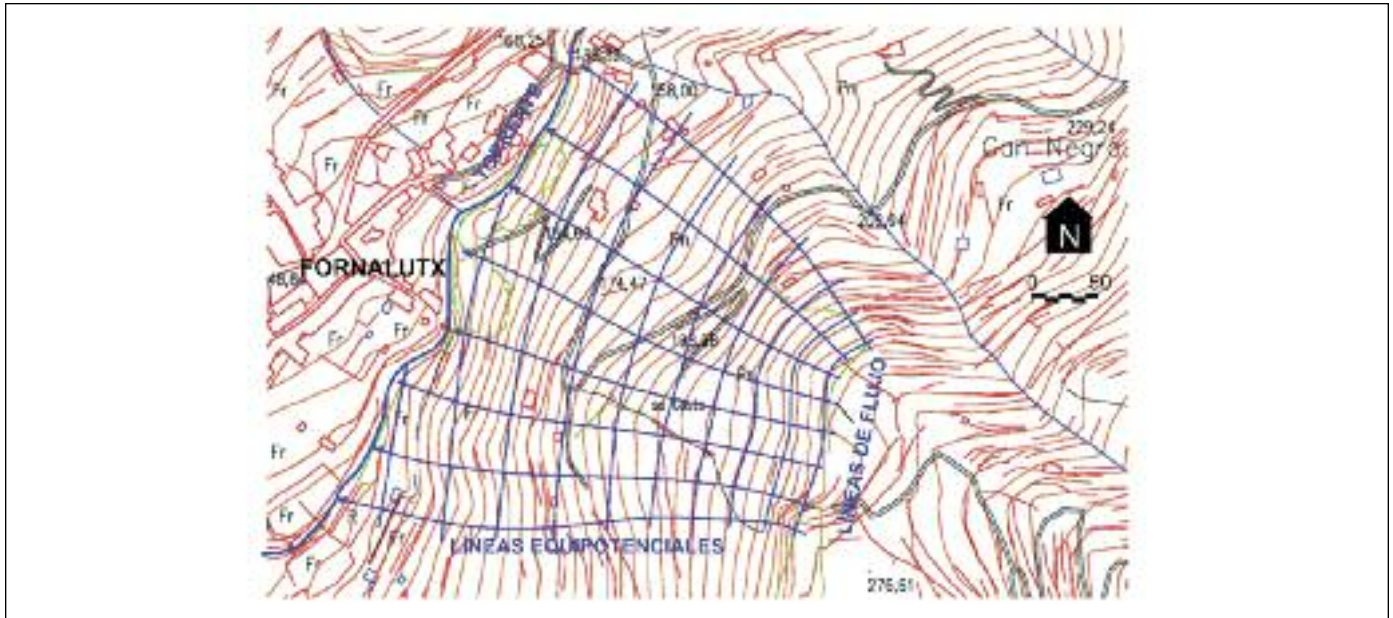


Figura 9. Red de flujo de la ladera inestable. En su extremo SE, la zona de recarga coincide con las grandes grietas que afectan a los materiales del Pleistoceno. El flujo se dirige hacia el Torrente de Fornalutx.
 Figure 9. Flow network of the unstable slope. At its SE limit, the recharge area coincides with the large cracks which affect the Pleistocene materials. The flow is towards the Fornalutx torrent.

inclinación en los árboles, especialmente en los cipreses plantados en 1977.

Las descripciones de varios testigos que presenciaron el deslizamiento de 1954, ponen de manifiesto que se movilizó un gran volumen de material y que, prácticamente, toda la ladera se vio afectada: *“subiendo por el camino de Fornalutx al paraje de Cas Abats y Punyol d’en Blanc con la mula, se produjo un escalón que no podía superar el animal, se abrió una enorme grieta que me hizo regresar al pueblo”*; *“Más abajo, donde hoy en día se encuentran las filas de cipreses, había una balsa de agua, donde aparecieron grietas importantes”*; *“Las marjadas de olivar fueron totalmente arrasadas”*; *“siempre se ha movido esta ladera, cuando llueve fuerte, el agua descende a manta y, en algún punto, el terreno desliza, lo sabemos todos los del pueblo”*.

El último movimiento se produjo en el mes de abril del año 2002, tras cinco días de continuadas e intensas lluvias, afectando únicamente al pie de la ladera y generándose una serie de pequeños flujos de barro y derrubios (Figura 10) que invadieron el curso del torrente. Afortunadamente, el torrente fue capaz de arrastrar y lavar todo el material movilizado. Según la información recogida en el informe del ICONA (1977), el evento de 1974 también fue de este tipo, no movilizándose la ladera en su conjunto, sino zonas de la base de la misma.

Tipología y mecanismo de rotura

La información descrita previamente pone de manifiesto que el deslizamiento principal que afecta a la ladera del margen izquierdo del torrente de Fornalutx es de tipo translacional o planar (Cruden & Varnes, 1996). La superficie de rotura viene definida por el contacto entre los sedimentos coluviales del Cuaternario y los materiales del Keuper, aunque a

Periodo de retorno (años)	Caudal de escorrentía (m³/s)
2	0,19
5	0,59
10	0,99
25	1,67
50	2,29
100	3,02
500	5,10

Tabla III. Caudales de escorrentía superficial en la ladera inestable para diferentes periodos de retorno
 Table III. Runoff flow values on the unstable slope for different return periods.



Figura 10. Flujo de barro y derrubios en el pie de la ladera, abril del año 2002. La posibilidad de taponamiento del torrente generó una gran alarma, manteniendo en alerta a los Servicios de Emergencia durante varios días. Afortunadamente, el propio torrente evacuó todo el material.

Figure 10. Mud and debris flow at the toe of the slope, April 2002. The possibility of the torrent being blocked caused great concern and kept the Emergency Services on alert for several days. Fortunately, the torrent itself removed all the material.

veces implique también a los niveles más alterados y superficiales de éstos últimos (Figura 11). La notable diferencia en cuanto a la naturaleza y propiedades resistentes de ambas formaciones, condiciona que el proceso de rotura afecte únicamente a los materiales con comportamiento de suelo, cuya resistencia al corte es comparativamente mucho menor. El espesor de material movilizado varía entre 4 y 8 m. Se trata pues de un movimiento superficial. No obstante, dada su extensión puede implicar un volumen de material de casi 300.000 m³.

El área más inestable, situada al pie de la ladera (Figura 5), se encuentra muy removilizada por la ocurrencia de sucesivos flujos de barro y derrubios, como el que se muestra en la Figura 10. El volumen de material implicado por este tipo de procesos se estima en 40.500 m³, constituyendo la zona de mayor inestabilidad y riesgo debido a la posibilidad de taponamiento del torrente.

El agua es el factor desencadenante de los movimientos en todos los casos. Durante episodios de llu-

vias intensas, los sedimentos coluviales se saturan en agua, aumentando el peso de los mismos y disminuyendo sus propiedades resistentes frente a los esfuerzos cortantes. Paralelamente, el agua no puede infiltrarse a mayores profundidades, debido a la baja permeabilidad de los materiales del Keuper. Se produce por tanto un flujo de agua paralelo a la ladera, que lubrica el contacto entre los sedimentos cuaternarios y los del Keuper, favoreciendo el deslizamiento a favor de este plano. La pérdida de cohesión y el incremento de las presiones efectivas en los materiales coluviales del Cuaternario, con una matriz fina que engloba cantos y bloques, determina también la generación de los pequeños flujos que afectan principalmente al pie de la ladera.

Factores desencadenantes y secuencialidad del fenómeno

A falta de conocer datos cuantitativos sobre las precipitaciones ocurridas durante los diferentes eventos del deslizamiento, ya que la serie histórica de precipitaciones comienza en el año 1958, y teniendo en cuenta la información histórica recopilada, se puede afirmar que éstos tienen lugar durante episodios lluviosos anómalos, por su abundancia y duración. El único evento del que se dispone de datos cuantitativos corresponde al del año 2002. Este movimiento parcial se desencadenó tras la sucesión de 4 días lluviosos, registrándose valores de precipitaciones máximas diarias de 120 mm y una lluvia acumulada de 223,6 mm (Estación Fornalutx Binirossi). Según el análisis de precipitaciones intensas (Tabla II), se obtiene un período de retorno para estos valores de precipitaciones máximas diarias, entre 2 y 5 años.

Si tenemos en cuenta que se han producido movimientos en los años 1924, 1954, 1974 y 2002, todo parece indicar que, aproximadamente cada 25-30 años, se produce un evento significativo en la zona.

Ligado también a la ocurrencia de lluvias intensas, la excavación que produce el torrente en el pie de la ladera durante los períodos de arroyada, con caudales punta de hasta 10 m³/s (ICONA, 1977), puede contribuir también significativamente a la desestabilización de la ladera.

Inclinometría

Tras la ejecución de los sondeos de reconocimiento se instrumentaron los sondeos S-21 y S-31, mediante la instalación de una tubería inclinométrica que permite la introducción de una sonda de registro (mode-

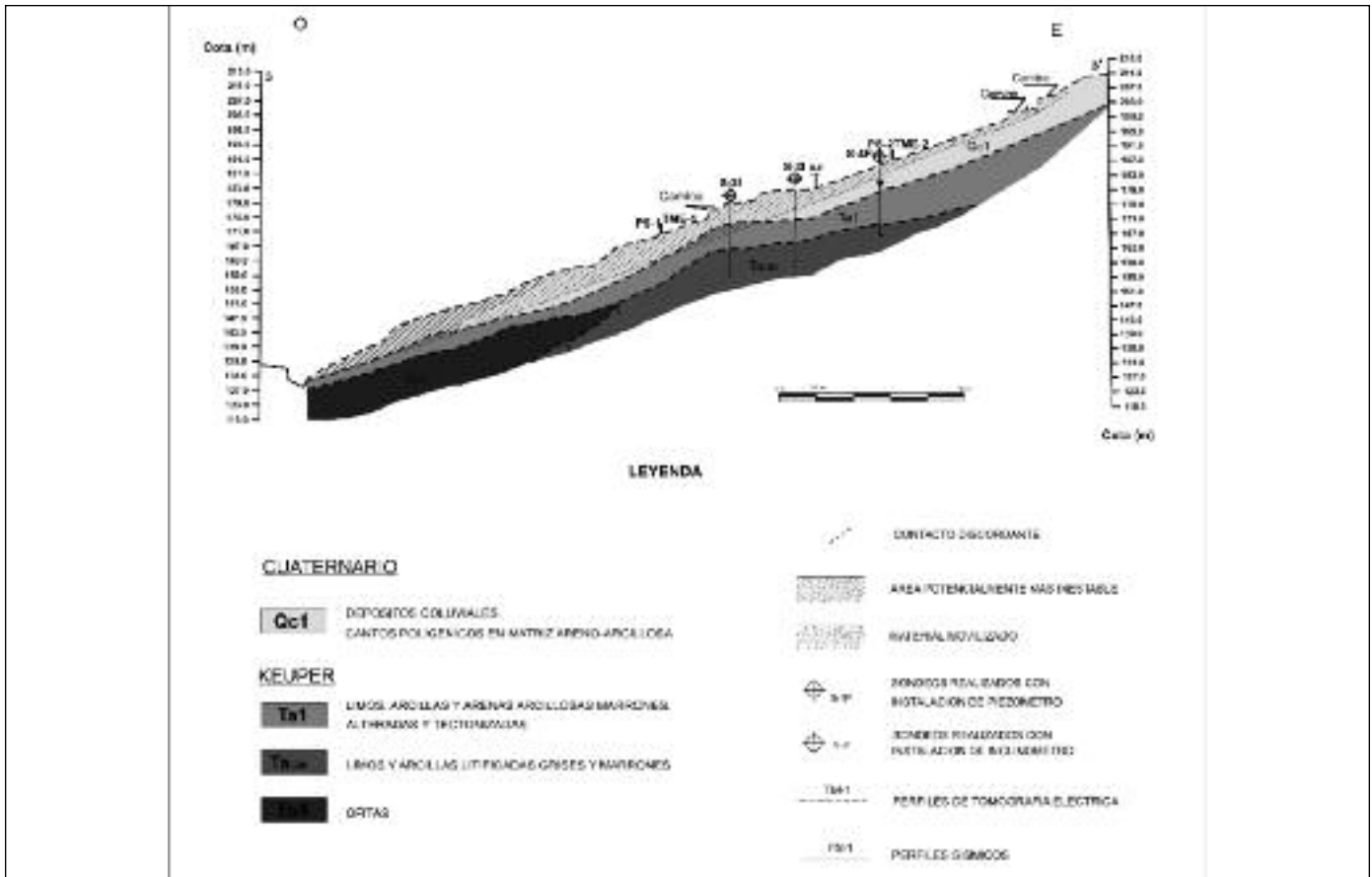


Figura 11. Corte longitudinal a la ladera (en la Figura 5 indicado como 3-3'). Se ha incorporado toda la información obtenida de los sondeos, de los perfiles de geofísica, así como las observaciones realizadas en superficie. La ladera está afectada por un deslizamiento planar o traslacional que afecta a los sedimentos coluviales del Cuaternario y a los niveles más alterados y superficiales del Keuper. El pie de la ladera constituye la zona más inestable, donde frecuentemente tienen lugar flujos de barro y derrubios.

Figure 11. Cross section of the slope (indicated as 3-3' in Figure 5). All the data obtained from the boreholes, the geophysical profiles and observation made on the surface have been included. The slope is affected by a planar landslide which involves the Quaternary colluvial sediments and the most altered and shallow levels of the Keuper sediments. The toe of the slope constitutes the most unstable area, where mud and debris flows frequently take place.

lo S242SV30 SIGGEO). La sonda, que consta de un torpedo biaxial, cable de conexión y unidad lectora, permite obtener dos perfiles perpendiculares al tubo, donde se pueden registrar movimientos con un error de medida de $\pm 4,0$ mm.

Desde abril del año 2006 se han realizado cuatro mediciones y, hasta el momento, los desplazamientos obtenidos son inferiores a 4 mm, no detectándose ningún indicio de movimientos en la ladera.

Medidas de estabilización propuestas

Las actuaciones propuestas para la estabilización de la ladera van todas encaminadas al drenaje de la

misma, con el objeto de reducir el grado de saturación del terreno y limitar la escorrentía superficial sobre la ladera.

En la Figura 12 se representan las medidas a adoptar. Se propone la ejecución de tres zanjas drenantes, transversales a la ladera y aprovechando el trazado del camino asfaltado que la atraviesa. Su misión sería interceptar el flujo de agua subsuperficial en la ladera, antes de que pueda alcanzar la zona de mayor pendiente y más inestable. Las zanjas estarían coronadas por una cuneta de drenaje con la finalidad de captar y encauzar el agua hasta el pequeño torrente que circula por el margen septentrional del deslizamiento. Se propone también la ejecución de una batería de drenes californianos (en torno a 340 unida-

des), prácticamente horizontales, de unos 10 de m de longitud cada uno y que se perforarían a través de los bancales del camino. Los drenes californianos permitirán la captación del agua subterránea que circule por el interior del terreno y se drenará por gravedad hacia las cunetas drenantes.

Complementariamente a los trabajos de drenaje se propone también la construcción de un muro de contención al pie de la ladera, en la margen izquierda del cauce del torrente. La misión principal de este muro será evitar la socavación del pie de la ladera por la erosión del torrente.

Teniendo en cuenta que la Villa de Fornalutx ha sido declarada Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO, las medidas adoptadas deberán visualizarse lo menos posible y adaptarse a la estética tradicional de las construcciones en la zona.

Conclusiones

La ladera de la margen izquierda del torrente de Fornalutx ha sufrido una serie de movimientos en los años 1924, 1954, 1974 y 2002, todos ellos desencadenados por episodios de lluvias intensas y prolongadas durante varios días. En el año 2002, la alerta creada por la ocurrencia de una serie de flujos de barro y derrubios que invadieron el cauce del torrente, determinó la realización de un estudio detallado que incluía la realización de perfiles geofísicos, la ejecución de 4 sondeos mecánicos de reconocimiento, así como numerosos ensayos in situ y de laboratorio cuyo objetivo era determinar las propiedades hidráulicas y resistentes de los materiales de la ladera. La interpretación de los datos obtenidos permite establecer las siguientes conclusiones:

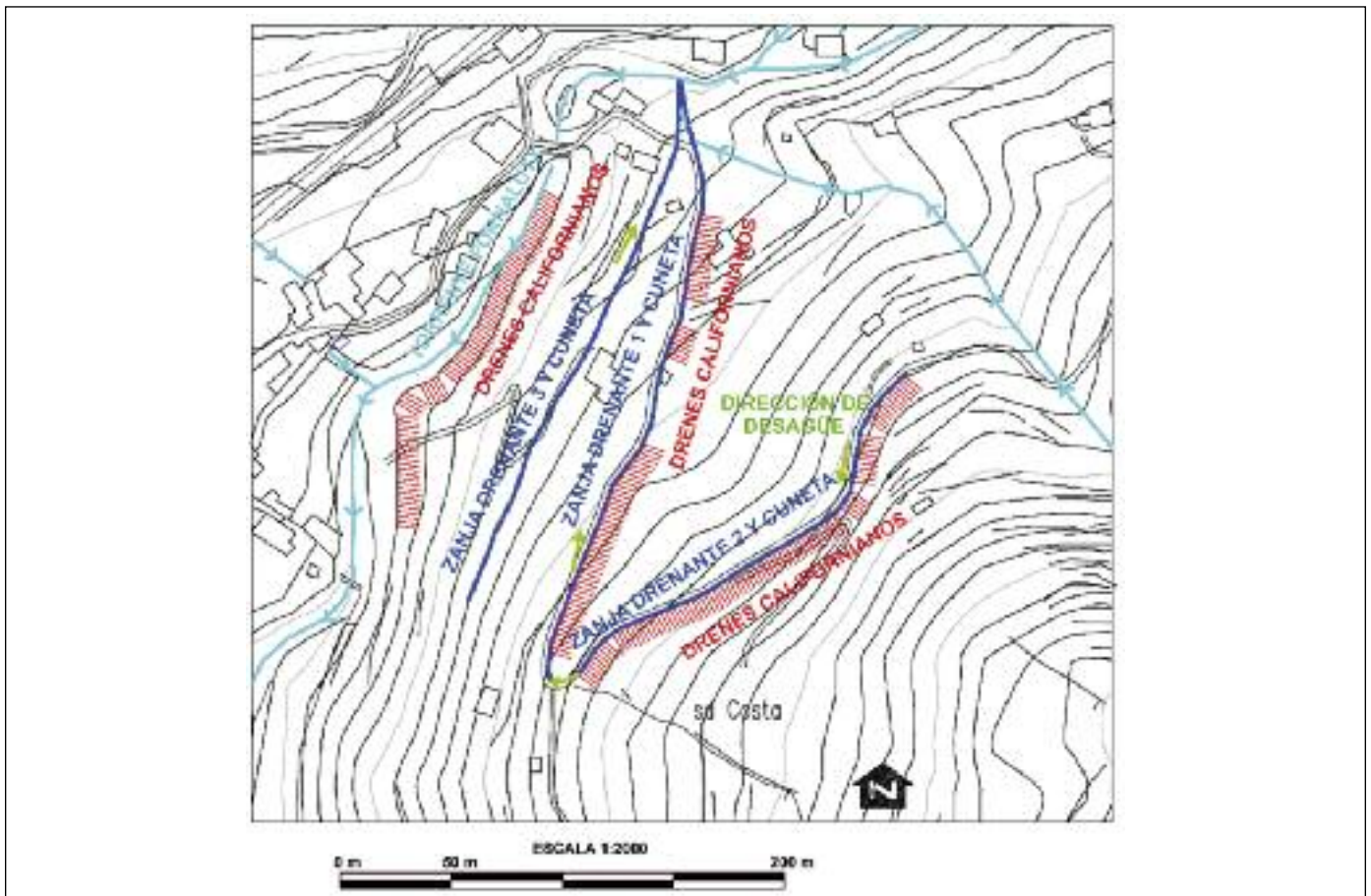


Figura 12. Medidas de estabilización de la ladera. El objetivo fundamental es favorecer el drenaje de la misma, para lo que se propone la ejecución de una serie de zanjas y cunetas drenantes, así como una batería de drenes californianos. El agua recogida se evacuaría hacia el torrente que discurre en el margen septentrional del deslizamiento que, a su vez, drena hacia el torrente de Fornalutx.

Figure 12. Stabilizing measures on the slope. The fundamental aim is to encourage drainage, for which a series of channels and ditches has been proposed, as well as a battery of californian drains. Collected water would be conducted towards the torrent which flows at the northern edge of the landslide and which, in turn, drains towards the Fornalutx torrent.

Los materiales más antiguos que afloran en el entorno de la ladera son las rocas volcánicas (ofitas) del Keuper con intercalaciones de calizas micríticas. Sobre estos materiales se superpone un nivel de arcillas litificadas así como una capa de alteración de este conjunto de materiales triásicos. La potencia media de estos sedimentos y rocas es de 20 m y constituyen unos materiales de baja permeabilidad, baja plasticidad y con valores de resistencia al corte elevados ($> 30^\circ$).

Sobre los materiales anteriormente indicados y, aflorando prácticamente en toda la ladera, se disponen unos depósitos de origen coluvial muy recientes (Holoceno) constituidos por gravas, bolos y cantos de calizas envueltos en una matriz limo-arcillosa, con una potencia que varía entre 4 y 8 m. Se trata de materiales permeables que constituyen un pequeño acuífero libre en la ladera. Los valores de resistencia al corte de estos materiales son menores que los correspondientes al Keuper, con valores de cohesión inferiores a 1 kp/cm^2 y ángulos de fricción entre $11,5^\circ$ y $22,5^\circ$.

La geología de la ladera determina la tipología del movimiento principal. Se trata de un deslizamiento planar, cuyo plano de rotura viene definido por el contacto entre los sedimentos coluviales del Cuaternario y los materiales del Keuper. La notable diferencia en cuanto a la naturaleza, propiedades resistentes y permeabilidad de ambas formaciones determina el proceso de rotura. El deslizamiento, aunque superficial, involucra un volumen de material de 300.000 m^3 .

La permeabilidad de los materiales que constituyen la ladera inestable disminuye con la profundidad. El flujo en sentido horizontal es mucho mayor que el vertical y, en épocas de lluvia intensa, la ladera se satura de agua subsuperficial. Se producen fenómenos de arroyada y los valores de escorrentía superficial estimados, para un periodo de retorno de 100 años, superan los $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Las medidas actuales de drenaje no pueden evacuar este caudal.

El deslizamiento de 1954 parece que afectó al conjunto de la ladera, mientras que los de 1974 y 2002 fueron de menor envergadura, limitándose a flujos superficiales de barro y derrubios que afectaron a su base. Estos últimos movimientos causaron una gran alerta a los habitantes de Fornalutx, ya que el material removido pudo causar el taponamiento del torrente.

La ocurrencia de episodios lluviosos anómalos, por su intensidad y duración, es el principal factor desencadenante de las inestabilidades en la ladera. La saturación de los sedimentos coluviales y su consecuente pérdida de resistencia interna, ligado a la

lubricación por el agua del plano de deslizamiento, reactivan la rotura.

La secuencialidad de los movimientos parece poner de manifiesto que cada 25-30 años se produce un movimiento significativo en la ladera. Las lluvias intensas registradas durante el último evento, en el año 2002, tienen un periodo de retorno entre 2 y 5 años. El control periódico de los inclinómetros instalados en el año 2006 no ha detectado ningún movimiento en la ladera desde entonces.

Las soluciones propuestas para la estabilización de la ladera se centran en el drenaje de la misma: zanjas, cunetas drenantes y drenes californianos. El objetivo de estos elementos es captar y evacuar el agua de escorrentía superficial y el flujo subsuperficial que discurre a través de los depósitos de ladera y roca alterada.

Debido a la ubicación del pueblo de Fornalutx frente a la ladera inestable, al otro lado del torrente, y a la existencia de numerosas viviendas que recientemente se han construido aguas abajo del torrente, la zona constituye una de las de mayor riesgo por este tipo de procesos en la isla de Mallorca.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del Convenio de colaboración entre el Instituto Geológico y Minero de España y la Conselleria de Medio Ambiente del Gobierno Balear, durante el año 2006.

Referencias

- Corominas, J. 1985. Els riscos geològics. En: Serrat, D. (coord.), *Recursos Geològics i sòls*". Història Natural del Paísos Catalans, Volum 3, Fundació Enciclopèdia Catalana, Barcelona, 225-270.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. 1996. Landslides Types and Processes. En: *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council. Special Report 247, Turner & Schuster, eds. Washintong, D.C, 36-71.
- Darder, B. 1924. Desprendimiento de tierras en Fornalutx. *Majorica, Vida, Arte*, 13, 3-6.
- Fiorillo, F. y Wilson, R.C. 2004. Rainfall induced debris flows in pyroclastic deposits, Campania (southern Italy). *Engineering Geology*, 75, 263-289.
- Garau, C. y Mateos, R.M. 2006. *Estudio del deslizamiento de la ladera de la margen izquierda del torrente de Fornalutx (Mallorca)*. Inédito, Oficina de Proyectos del Instituto Geológico y Minero de España en Baleares, 101 pp.
- Gelabert, B. 1998. La Estructura Geológica de la Mitad Occidental de la Isla de Mallorca. Tesis Doctoral. *Colección Memorias del I.T.G.E*, 129 pp.

- Grimalt, M. 1992. *Geografía del Risc a Mallorca. Les inundacions*. Publicaciones del Institut d'Estudis Baleàrics, Conselleria de Cultura, Educació i Esports del Govern Balear, 359 pp.
- ICONA. 1977. *Estudio geotécnico del margen izquierdo del Torrente de Fornalutx (Mallorca)*. ICONA, Informe inédito, Oficina de Proyectos del IGME en Baleares. 221 pp.
- ITGE. 1992. Hoja nº 670 de Sóller. *Serie MAGNA*, escala 1:50.000.
- Llabrés Bernal, J. 1962. *Noticias y relaciones históricas de Mallorca III (1841-1869)*. Societat Arqueològica Lul·liana, Escuela Tipográfica Provincial, Palma, 1045 pp.
- Mateos, R.M. 2001. *Los movimientos de ladera en la Serra de Tramuntana (Mallorca). Caracterización geomecánica y análisis de la peligrosidad*. Tesis Doctoral, Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense de Madrid, 299 pp.
- Mateos, R.M. y Azañón, J.M. 2005. Los movimientos de ladera en la Sierra de Tramuntana de la Isla de Mallorca: tipos, características y factores condicionantes. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 18 (1-2), 89-99.
- Mateos, R.M. y Azañón, J.M. 2007. Dinámica de laderas en la vertiente costera de la Sierra de Tramuntana de la Isla de Mallorca, desde el Pleistoceno superior. *Resúmenes XII Reunión Nacional de Cuaternario*, Ávila, 21-22.
- Mateos, R.M., Azañón, J.M., Morales, R y López-Chicano, M. 2007. Regional prediction of landslides in the Tramuntana Range (Majorca) using probability analysis of intense rainfall. *Zeitung für Geomorphology*, 51.3, 287-306.
- Mateos, R.M y Giménez, J. 2007. El deslizamiento de Biniarroi (Mallorca) de 1721. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 20 (1-2), 3-16.
- Rullán, J. 1885. Inundación de Sóller y Fornalutx. *Capítulo adicional a la Historia de Sóller en sus relaciones con la General de Mallorca*. Imprenta de Felipe Guasp y Vicens, Palma 1885, 70 pp.
- Témez, J.R. 1991. Extended and improved rational method. Version of the highways administration of Spain. *XXIV Congreso Internacional de la AIHR*, Madrid, Tomo A, 33-40.
- Redacción Última Hora 1924. Hundimiento de terrenos en Sóller. *Diario Última Hora*, 22 de diciembre de 1924.

Recibido: agosto 2008
Revisado: octubre 2009
Aceptado: enero 2009
Publicado: febrero 2009