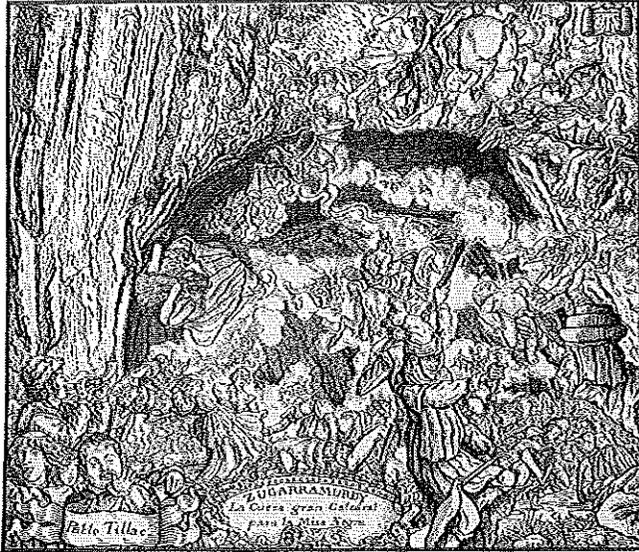


ANÁLISIS GEOMÉTRICO Y DE ESTABILIDAD DE UN DESLIZAMIENTO ROTACIONAL: EL MONTE HUNDIDO DE TUDELA

Inmaculada Gil Peña, Belén Leránoz Istúriz, Antonio M. Casas Sainz



Introducción

La noche del 23 de marzo de 1970 tuvo lugar un importante movimiento de tierras en el Monte Canraso de Tudela, en el paraje conocido como Visos del Cristo. De forma repentina una parcela de unos 25.000 m² de superficie se hundió, alcanzando un desplazamiento máximo en la vertical de 10 m. El suceso tuvo un fuerte impacto en Tudela y ocasionó el abandono agrícola de la totalidad de una parcela que antes del hundimiento tenía una superficie aproximada de 40.000 m². Desde entonces el lugar es conocido con el nombre de «Monte Hundido». En 1991 fueron ubicados en la parte del cerro que no se hundió los nuevos depósitos de agua de Tudela. Como consecuencia de las obras se modificó la morfología inicial de la ladera, hecho que alteró las condiciones originales de equilibrio alcanzadas tras el deslizamiento.

Las explicaciones que se barajaron para este fenómeno fueron muy variadas (Diario de Navarra, 25 y 26 de marzo y 4 de abril), y algunas bastante pintorescas. Así, se habló de la existencia de una corriente de agua subterránea en el lugar, del efecto de un posible sismo de baja intensidad, de la caída de un aerolito, del efecto de un avión del Polígono de tiro de las Bardenas al romper la barrera del sonido o de la existencia de un polvorín de la Batalla de Tudela de la Guerra de la Independencia en ese lugar.

Los objetivos perseguidos con este trabajo son caracterizar la geometría del movimiento de ladera, realizar un análisis retrospectivo del mismo para evaluar las causas que determinaron la inestabilidad del terreno y analizar las condiciones actuales de estabilidad de la ladera tras las modificaciones sufridas en su morfología.

Situación geológica

El área estudiada se encuentra ubicada en el sector central de la Depresión del Ebro. En él afloran unidades lacustres del terciario cubiertas de forma discontinua por extensos mantos aluviales cuaternarios. Los materiales terciarios dominantes son arcillas margosas rojas con intercalaciones finas de arenisca y paquetes de caliza de hasta 2 m de potencia; pertenecen a la formación Tudela (CASTIELLA et al, 1978) y han sido datados como Agenienses (Mioceno inferior) en los yacimientos de vertebrados Tudela I y Tudela II (CRUSAFONT et al, 1966). La disposición de la estratificación es subhorizontal y está afectada por un doble sistema de fallas normales y direccionales de edad Miocena (GRACIA y SIMON, 1986; GIL y SIMON, 1992).

Los depósitos cuaternarios principales que afloran en este sector están ligados a la evolución del río Ebro y presentan morfología de terraza. Se pueden diferenciar nueve niveles de terraza más la llanura de inundación, los cuales están escalonados entre 185 m y 3 m sobre el nivel del cauce actual del río Ebro (LERANOS ISTURIZ, 1993). Estos depósitos, con potencias variables entre 2 y 8 m, están compuestos por gravas poligénicas, redondeadas y heterométricas, con algunas intercalaciones de limos y arenas; los niveles antiguos están fuertemente cementados por el desarrollo de costras calcáreas a techo de hasta 1-2 m de espesor. Otros depósitos cuaternarios importantes son los glaciares, sedimentos de suave pendiente que tapizan gran parte de las laderas que descienden de los niveles altos cuaternarios y enlazan con sistemas inferiores de terraza (Fig. 1).

Tanto las terrazas como los glaciares actúan preservando contra la erosión a los materiales terciarios y facilitan la aparición de un modelado en mesas. Los desniveles de éstas son de varias decenas de metros, alcanzando localmente las laderas pendientes en torno al 40%. Ocasionalmente se conserva algún cerro testigo coronado por un paquete de caliza o arenisca miocena, aunque, generalmente, el Terciario aparece intensamente incidido por la red, siendo característicos los profundos barrancos, cárcavas y valles de fondo plano o vales.

Los movimientos de ladera constituyen un fenómeno común en los procesos geomorfológicos de la Ribera de Navarra. El encajamiento de los ríos en los yesos, arcillas y margas del Terciario da lugar a escarpes de elevada altura con fuertes pendientes. La socavación de la base de estos taludes, principalmente por la acción erosiva del agua, provoca el desprendimiento de grandes bloques rocosos. Cuando estos procesos se dan en las inmediaciones de núcleos de población adquieren una elevada importancia socioeconómica por el riesgo que entrañan para habitantes y bienes de valor económico. Son de destacar por estos aspectos los desprendimientos de Falces, Valtierra, Azagra, Funes, Arguedas, Peralta, Carcar, Andosilla y Caparrosa (AYALA, 1984; AYALA y APARICIO, 1985; FACI et al. 1988 a, b, 1992).

Ocasionalmente se reconocen también algunos ejemplos de deslizamientos rotacionales que, por lo general, son de pequeña entidad. Esto es debido a que a una litología adecuada se oponen unas precipitaciones escasas (inferiores a 400 mm. anuales) y bajas pendientes medias del terreno (pendientes superiores al 20 % se dan en menos del 5 % del territorio). Se pueden

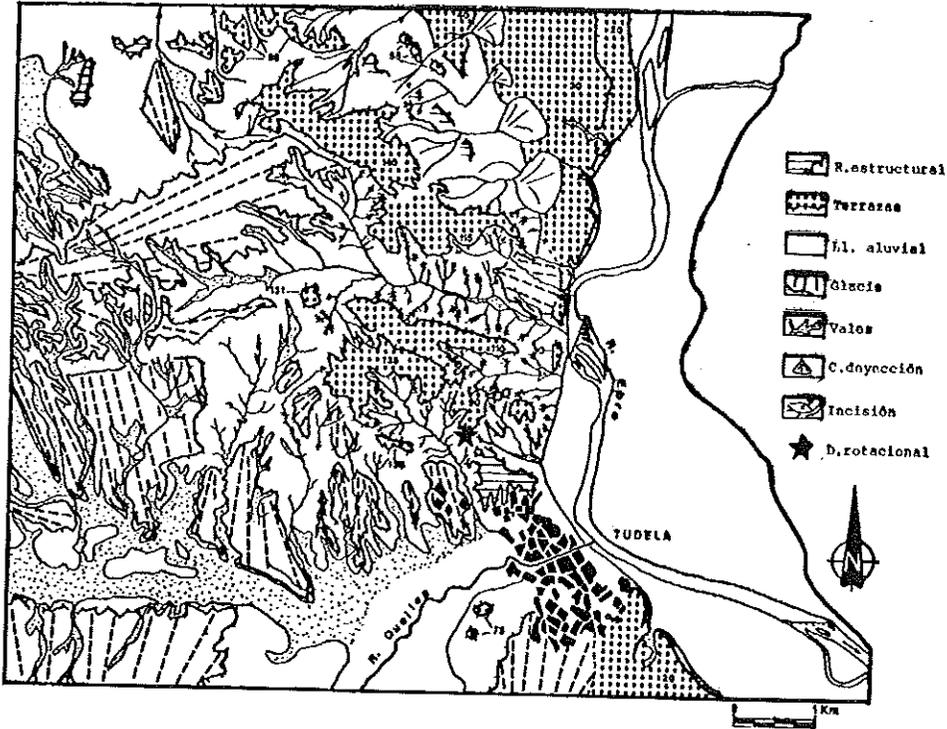


Fig. 1

citar los deslizamientos rotacionales ocurridos en Sancho Abarca (GRACIA, 1985), Funes (RODRIGUEZ-AVIAL, 1985), Cárcar y Miranda de Arga (AYALA y APARICIO, 1985). Ninguno de éstos alcanzó las dimensiones del deslizamiento de Tudela.

Geometría

El deslizamiento estudiado afecta al extremo S de un cerro de 45 m de altura (entre las cotas 320 y 365 m.s.n.m.) formado por arcillas y margas de la Fm. Tudela. Presenta una pendiente media de 25° (40 %) y está coronado por la terraza T 7 del Ebro (90 m de altura sobre el cauce actual del río). Esta última presenta 5 m de potencia media y está constituida por gravas y arenas localmente cementadas por una costra calcárea compacta.

La geometría de la superficie de ruptura ha podido caracterizarse a partir del estudio de campo y de fotografía aérea y cartografías topográficas de escala 1:5.000 pre- y post-deslizamiento (fig. 2). Esta superficie es de tipo circular, pero con su parte basal plana siguiendo la superficie de contacto entre un paquete de calizas de 2 m de potencia y las arcillas de la Fm. Tudela.

La masa deslizada presenta unas dimensiones en superficie de 200 x 200 m (relación longitud / anchura = 1), con un volumen desplazado de 0,3 Hm³. La cicatriz principal del deslizamiento (actualmente cubierta por una escombrera) presenta una altura máxima de 10 m y dirección NW - SE. La cabecera, originalmente horizontal y con una extensión algo



Foto 1

menor de 1 Ha, presenta un buzamiento a contrapendiente de unos 12° . En esta zona la terraza, fuertemente cementada, presenta numerosas fracturas abiertas (con aberturas que varían desde varios cm hasta 1 m) de dirección dominante WNW - ESE, que corresponden a grietas transversales (fig 2. A y 2. C y foto 1). En el cuerpo principal del material desplazado aparecen grietas de dirección dominante NE - SW (paralelas a la dirección de transporte) que marcan la expansión lateral en la zona de acumulación. En la parte basal del deslizamiento se observan por una parte pliegues de orientación paralela al frente de avance y además material triturado, resultado del empuje horizontal hacia el SW de la masa deslizada (efecto «bulldozer»). La modificación de la topografía original fue importante en las zonas altas del deslizamiento (fig. 2. B), donde además de la aparición del escarpe principal se produjeron otros deslizamientos secundarios. En la parte inferior únicamente se encuentran modificaciones de menor escala, observándose la aparición de umbrales y depresiones que han dado lugar a la formación de charcas estacionales. En la actualidad la geometría del talud ha sido modificada con el vertido de una importante cantidad de escombros sobre la cabecera del deslizamiento y con una ligera excavación de su pie.

En cuanto a la evolución temporal del deslizamiento, se ha podido establecer a partir de entrevistas personales con los agricultores del lugar que antes de 1940 existía ya una grieta de tracción de escasa amplitud en la parte alta del cerro. Esta fue ensanchándose de forma lenta pero progresiva hasta que atravesó todo el cerro, alcanzando en algunos puntos una anchura aproximada de medio metro. El desplazamiento del material tuvo lugar de forma práctica-

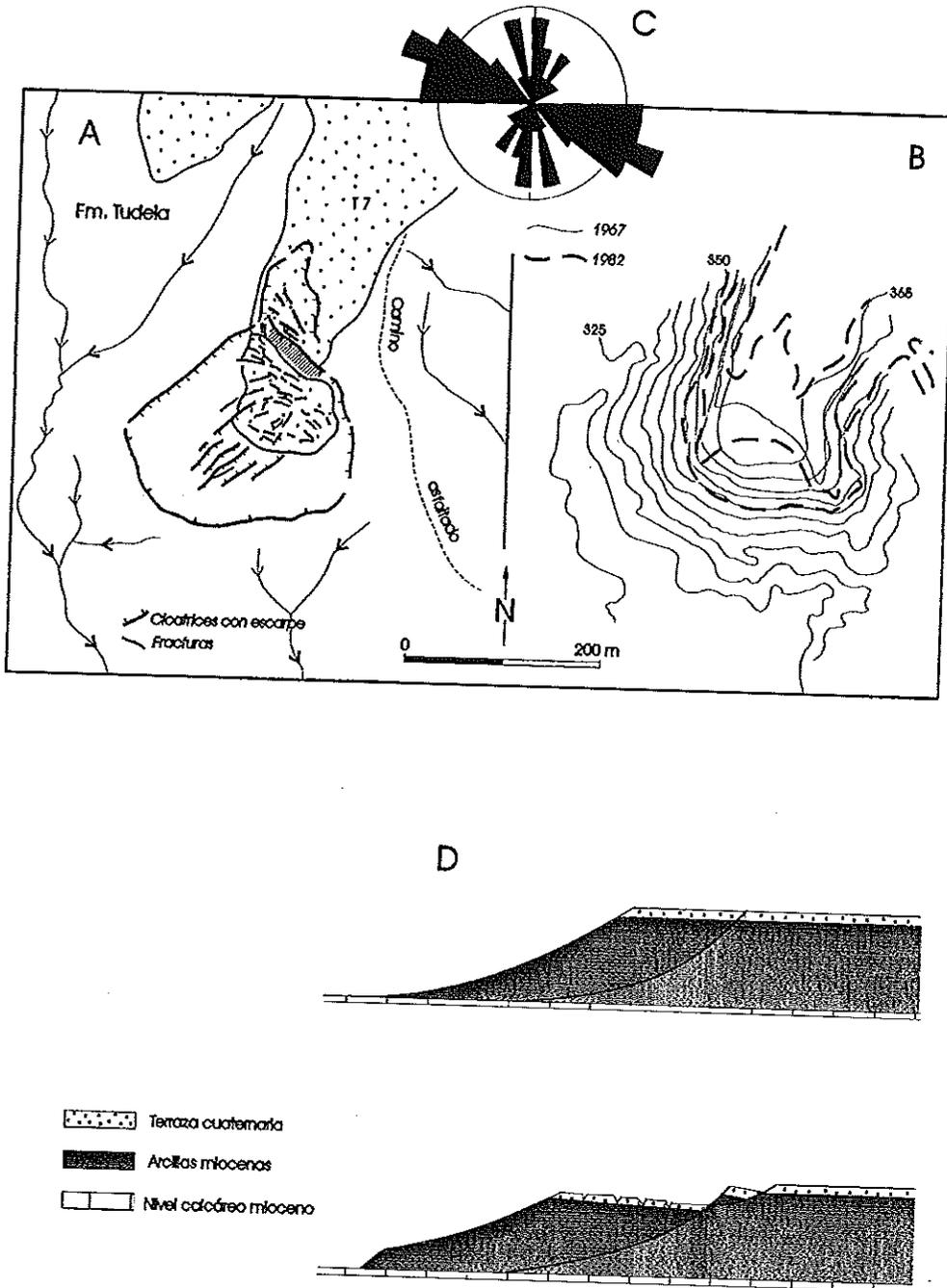


Fig. 2

mente instantánea el 23 de marzo de 1970; al menos durante los dos días siguientes continuaron produciéndose movimientos lentos de asiento diferencial del terreno (*Diario de Navarra* - 26 de marzo). El movimiento principal fue acompañado por un fuerte ruido, escuchado en las casas más cercanas al lugar.

Aunque en primera instancia parecía probable que el deslizamiento hubiera estado asociado a un periodo con lluvias relativamente intensas, se ha comprobado que la pluviosidad de los primeros meses de 1970 fue la normal para esa época del año (100 l/m^2 entre enero y febrero).

Análisis de estabilidad

Las características de los materiales de este cerro fueron estudiadas por I.N.I.T.E.C. (1986) a partir de distintos testigos de sondeo. Se trata de arcillas sobreconsolidadas con un cierto carácter expansivo. Densidad seca: $1.7 - 2.10 \text{ g/cm}^3$; límite líquido: $35 - 52 \%$; índice de plasticidad: $17 - 29 \%$; Resistencia a la compresión simple: $10,7 - 15,4 \text{ kg/cm}^2$. Estos parámetros pueden sufrir importantes variaciones, situándose el valor de la resistencia a la compresión simple de estas arcillas en otros lugares en torno a 4.0 kg/cm^2 y llegando puntualmente a 1.6 kg/cm^2 (E. Pitarch, com. pers.). No se han podido analizar muestras del plano de deslizamiento por encontrarse en la actualidad cubierto.

Se ha realizado un análisis retrospectivo de las condiciones de estabilidad de la ladera mediante el método de BISHOP modificado (1955), considerando distintos niveles de saturación hídrica del material. Se ha evaluado desde el nivel freático en posición 0 (es decir, condiciones de estabilidad cuando el talud estaba «seco») hasta aproximadamente $1/2$ de la altura del talud, analizando en este último caso distintos valores de la presión de fluidos. Para cada una de estas situaciones se han calculado los pares de valores $c' - f'$ con los que el factor de seguridad (F_s) toma el valor de 1 (es decir, pares de valores con los que se podría producir el deslizamiento. Ver fig. 3). Así definida, esta zona de inestabilidad es incompatible con el

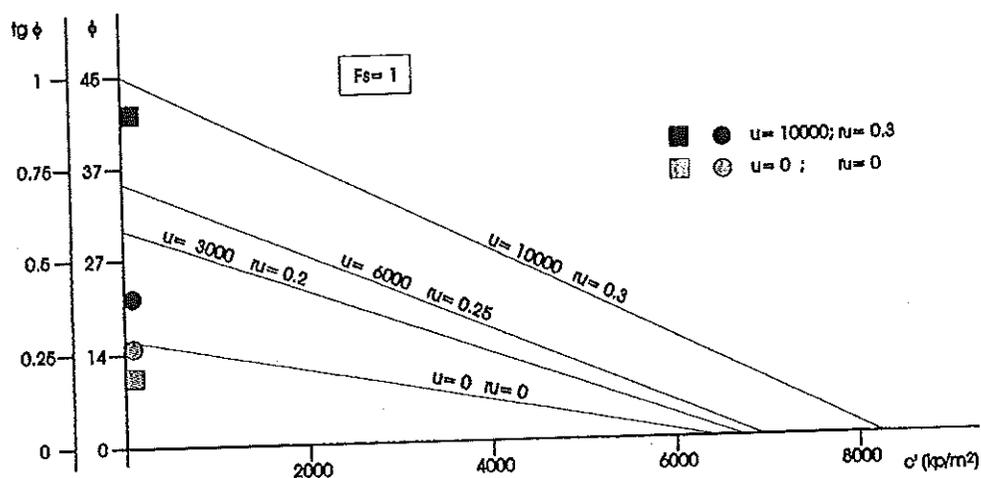


Fig. 3

valor de la resistencia del material obtenida en los ensayos. Esto lleva a considerar la posibilidad de que el deslizamiento haya progresado a favor de una zona de meteorización del material en la que las características geomecánicas iniciales de las arcillas han sido considerablemente modificadas (TAYLOR y CRIPPS, 1987). Este proceso estaría favorecido por la existencia de numerosos planos de fractura en las arcillas y por la presencia de un material permeable (terracea T 7) por encima de la formación arcillosa que favorece el proceso de infiltración de agua en las discontinuidades.

Consideramos ahora la estabilidad del talud una vez producido el deslizamiento (con distintos niveles de saturación hídrica y valor de la cohesión en el plano de deslizamiento próximo a 0). Comparando el valor de f'_r necesario para hacer $F_s = 1$ con los datos obtenidos del retroanálisis y con el valor probable de f'_r estimado a partir de tablas (10 - 20° según datos en JIMENEZ SALAS et al, 1976) se deduce que la estabilidad futura del talud depende en gran parte de la presión de fluidos. Sería, pues, necesario un control de los parámetros hidrogeológicos del talud para llegar a conclusiones más precisas.

Las modificaciones antrópicas actuales en la geometría del talud (aumento de peso y volumen de la cabecera del deslizamiento por vertido de escombros y disminución de la zona basal por excavación del pie del deslizamiento) actúan como factores que disminuyen la estabilidad del sector, aumentando en 5° el valor de f'_r para el que $F_s = 1$.

Conclusiones

El movimiento de ladera de Tudela de 1970 puede caracterizarse como un deslizamiento rotacional cuya superficie de ruptura presenta una zona basal plana a favor del contacto de los niveles arcillosos con las calizas infrayacentes que presentan estratificación horizontal. Se observa un buen desarrollo de grietas longitudinales (NE) y transversales (WNW-ESE) en la parte alta de la zona deslizada. El sentido de movimiento de la masa deslizada fue SW. Este tipo de fenómeno es poco frecuente en este sector de la Depresión del Ebro, especialmente con estas dimensiones, ya que afecta a 0.3 Hm^3 de material.

A partir del análisis de estabilidad retrospectivo mediante el método de Bishop se ha determinado que los parámetros geomecánicos que controlaron el deslizamiento no se corresponden con los de la roca inalterada. Los escasos datos existentes sobre la historia del deslizamiento permiten inferir que éste evolucionó a partir de una grieta de tracción formada en la terraza superior, la cual progresó desde la superficie hacia abajo; esto favoreció la meteorización progresiva de los materiales cercanos a la superficie de ruptura disminuyendo considerablemente su resistencia. La masa alterada se comprimió longitudinalmente, provocando el desplazamiento progresivo de la parte superior del cerro; cuando este desplazamiento fue suficiente para vencer la resistencia residual de la ladera, la superficie de rotura progresó hacia abajo hasta alcanzar la base del talud. Se produjo entonces el deslizamiento brusco del material (mecanismo de rotura progresiva de JIMENEZ SALAS, 1984).

Se puede descartar la acción de un sismo o la existencia de un periodo de lluvias anormalmente intensas como causa de la inestabilidad ya que ni uno ni otro fenómeno han quedado registrados en los observatorios correspondientes. El deslizamiento es consecuencia principalmente de una alteración lenta y progresiva del material a favor de un plano previo de fractura.

Actualmente las intervenciones humanas en la zona deslizada están aumentando el peligro de nuevos movimientos de la zona ya deslizada. Para estimar con cierta exactitud el coeficiente de seguridad actual de la ladera sería necesario un conocimiento más preciso de los parámetros hidrogeológicos y mecánicos del material.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Ruperto Miranda, agricultor de la zona, la información aportada sobre la evolución del deslizamiento. Así mismo a Jesús Mendoza, empleado del Ayuntamiento de Tudela, por la gran colaboración prestada. La Junta de Aguas de Tudela nos facilitó algunos de los datos empleados. Las dos primeras firmantes del artículo han disfrutado de sendas becas de Investigación concedidas por el Gobierno de Navarra.

Fig. 1.- Esquema geomorfológico del área donde se ubica el deslizamiento. Los números indican la altura en metros de los distintos niveles de terraza sobre el cauce actual del río Ebro.

Fig. 2.- A: Cartografía geológica del deslizamiento. B: Modificación sufrida en la topografía a causa del deslizamiento, a partir de las cartografías de los años 1967 y 1982. Los números en las curvas de nivel indican su altura en metros sobre el nivel del mar. C: Diagrama en rosa de las direcciones de fracturación en la terraza. D: Geometría en corte del deslizamiento.

Fig. 3.- Relaciones $f-c'$ para las que el factor de seguridad $F_s=1$. u = presión intersticial (kp/m^2); $ru= u/gz$ (g = peso específico del agua; z = altura de agua en el talud). Las zonas tramadas corresponden a las condiciones de estabilidad de la ladera después del deslizamiento (cuadrado: sin modificaciones antrópicas en la ladera; círculo: con las modificaciones actuales).

Foto 1.- Aspecto actual de la cabecera del deslizamiento, parcialmente cubierto por escombros. Se observa la red de fracturas transversales que afectan a la terraza superior.

BIBLIOGRAFIA

- AYALA, F. (1984): «Propuesta de estabilización de un posible desprendimiento en yesos en Lodosa (Navarra)». *SEMR VIII Simposio Nacional de Reconocimiento de Macizos Rocosos*. I, 3-6, 12 pp.
- AYALA, F. y V. APARICIO, (1985): «Estudio geotécnico de cinco zonas inestables en Navarra». *IGME* (inédito).
- BISHOP, A. W. (1955): «The use of slip circle in the stability analysis of slopes». *Geotechnique*, 10, 4, 129-150.
- CASTIELLA, J.; J. SOLE y J. del VALLE (1978): «Mapa geológico de síntesis de Navarra a escala 1:200.000». *Dip. Foral de Navarra. Serv. Geol. Dir. O.P.*
- CRUSAFONT, M.; J. TRUYOLS y O. RIBA (1966): «Contribución al conocimiento de la estratigrafía del Terciario continental de Navarra y la Rioja». *Notas y Com. del IGME*, nº 90, 53-76.
- FACI, E.; J.I. RODRIGUEZ-AVIAL y J. JUGO (1988a): «Estabilización y establecimiento de medidas preventivas en un talud rocoso en Azagra (Navarra)». *II Simposium sobre taludes y laderas inestables*, 485-496.
- FACI, E.; J.I. RODRIGUEZ-AVIAL y J. JUGO (1988b): «Estabilización y medidas correctoras del talud rocoso 'Las Tres Marías' en Falces (Navarra)». *II Simposium sobre taludes y laderas inestables*, 497-511.
- FACI, E.; J.I. RODRIGUEZ-AVIAL (1992): «Protección contra desprendimientos en varias poblaciones de Navarra». *III Simposium Nacional sobre taludes y laderas inestables*, II, 743-758.
- GIL, I. y J. L. SIMON (1992): «Aproximación al cálculo de paleoesfuerzos absolutos compresivos del Mioceno de Tudela (Navarra)». *Geogaceta*, 11, 31-34.
- GRACIA, F.J. (1985): *Geomorfología de las Bardenas orientales*. Tesis de Licenciatura. Fac. de Ciencias, Univ. de Zaragoza, 172 pp.
- GRACIA, F.J. y J.L. SIMON (1986): «El campo de fallas miocenas de la Bardena Negra (provs. de Navarra y Zaragoza)». *Boletín Geológico y Minero*, XCVII-VI, 693-703.
- I.N.I.T.E.C. (1986): «Estudio Geológico-Geotécnico». *Junta de aguas de Tudela*, 75 pp. Informe Inedito.
- JIMENEZ SALAS, J.A. (1984): «La rotura progresiva en la estabilidad de taludes». *Simposio sobre inestabilidad de laderas en el Pirineo*, II-4-1 a II-4-4.
- JIMENEZ SALAS, J.A.; J. L. de JUSTO, ALPAÑES y A. A. SERRANO GONZALEZ (1978): *Geotecnia y cimientos II. Mecánica del suelo y de las rocas*. Edit. Rueda, pp. 563-658.
- LERANOZ ISTURIZ, B. (1993). *Geomorfología y Geología Ambiental de la Ribera de Navarra*. Tesis Doctoral, Fac. de Ciencias, Univ. de Zaragoza.
- RODRIGUEZ-AVIAL, J.I. (1985): «Proyecto de estabilización de una ladera en el Rfo Arga en Funes». *Euroestudios S.A.* Informe inédito.
- TAYLOR, R. K. y J. C. CRIPPS (1987) in M.G. Anderson y K. S. Richards (ed.): *Slope stability*. John Wiley and sons: 405-445.

Belen Leránóz Istúriz. Nació en Ansoain en 1962. Disfrutó de una beca de Investigación del Gobierno de Navarra con la que realizó su Tesis Doctoral en la Universidad de Zaragoza sobre «Geomorfología y Geología Ambiental de la Ribera de Navarra». Ha publicado varios artículos sobre este tema.

Antonio M. Casas Sainz. Nació en Calahorra (La Rioja) en 1962. Se Doctoró en Geología con el trabajo «El frente norte de las Sierras de Cameros: Estructuras cabalgantes y campos de esfuerzos». Ha realizado diversas publicaciones sobre Neotectónica en el sector navarro-riojano de la Depresión del Ebro.

Inmaculada Gil Peña. Nació en Tudela en 1965. Licenciada en Geología por la Universidad de Zaragoza. Disfrutó de una Beca de Investigación del Gobierno de Navarra con la que realizó diversos trabajos de investigación sobre Tectónica y Neotectónica en Navarra.

"Lur deslizamendu relazional baten azterketa geometrikoa eta estabilitateari buruzkoa: Tuterako mendi hondatua".

1970garren urteko matxoaren 23an lur mugimendu handi handia gertatu zen Tuterako Canraso mendian. Mugimenduak toki horretako morfologia aldatu zen, azalerako 25.000 m² hondatu baitziren. Orduetik honat, leku horri "Monte hundido" esaten zaio. Artikulu honetan, bada, egileek lur mugimendu horren arrazoien nondik norakoak arakatzen dituzte.

A rotational slide happened in 1970 in Tudela, developing a 10 m high scarp face at crown and numerous tension cracks in the T7 strongly-cemented terrace at the top. The movement involved 0.3 Hm³ of argillaceous material. The back stability analysis shows that the f' - c' curves that makes Fs= 1 do not fit the experimental parameters of the unweathered soil. Therefore, the only possibility for the slope instability is the downwards progressive development of a weathering zone along the main rupture surface.