

IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables
Santander, Junio 2017
E.Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.)
CIMNE, Barcelona, 2017

EL DESLIZAMIENTO DE PICO DE NAVAS (BURGOS, ESPAÑA): UNA ROTURA CAUSADA POR LA FLUIDIFICACIÓN DE ARENAS CAOLINÍFERAS DE LAS FACIES UTRILLAS

Eugenio SANZ-PÉREZ*, **Ignacio MENÉNDEZ-PIDAL***, **Alejandro LOMOSCHITZ†** y **Rubén GALINDO-AIRES***

** Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Madrid, España.
esanz@caminos.upm.es; impidal@caminos.upm.es; rubenangel.galindo@upm.es*

*† Departamento de Ingeniería Civil
Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles.
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España.
e-mail: alejandro.lomoschitz@ulpgc.es*

RESUMEN

El deslizamiento de Pico de Navas (Burgos, España) fue un movimiento rotacional de gran magnitud, que involucró $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ de rocas. Los objetivos de este trabajo han sido: (1) caracterizar el deslizamiento a partir de la geología, los elementos geomorfológicos y los parámetros geotécnicos; y (2) obtener un modelo geomecánico que permita explicar adecuadamente la rotura, teniendo en cuenta la topografía, previa y posterior al movimiento, y las condiciones hidrogeológicas y geomecánicas.

Además, se ha deducido que el deslizamiento ocurrió en el Holoceno reciente o medio, ciertamente antes del 500 a.C y probablemente durante un periodo climático húmedo. En referencia a su actividad, el deslizamiento de Pico de Navas es considerado inactivo, e incluso un deslizamiento relicto. Por sus dimensiones, características y mecanismo de rotura propios constituye un caso de estudio particular.

Palabras clave:

Deslizamiento rocoso, Cordillera Ibérica, facies Utrillas, Cretácico, simulación numérica.

1. INTRODUCCIÓN

El depósito del deslizamiento de Pico de Navas (Burgos, España) se encuentra bien conservado y llama la atención en el relieve por el contraste que existe entre los materiales superiores, esencialmente calcáreos y duros, y los inferiores, esencialmente arenosos y más deleznable. A primera vista, pareció sufrir un movimiento rotacional de gran magnitud. Las causas probables del deslizamiento deben estar relacionadas con las propiedades geomecánicas de las facies Utrillas del Albense (Cretácico Inferior) y las condiciones hidrogeológicas en la zona, que pudieron facilitar el movimiento.

De hecho, un número considerable de construcciones civiles a lo largo de la Cordillera Ibérica han sido afectadas por el comportamiento inestable de estas facies, y han causado la rotura de numerosos taludes, principalmente después de periodos de lluvias (Menéndez-Pidal, 2006).

2. CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

La Sierra de Navas (Burgos) forma parte del extremo oriental del macizo del Cañón del río Lobos. Este incluye materiales del Cretácico de la Cordillera Ibérica del norte y centro peninsular.

Esta sierra tiene una forma de “proa de barco” invertida, también característica de otras zonas de la región y en cuyos puntos topográficos superiores las formaciones geológicas están bien preservadas y su estratigrafía bien expuesta. El Pico de Navas (1.351 m) constituye el punto superior de la Sierra de Navas y también el punto más elevado del escarpe superior de un extenso deslizamiento gravitacional que se desplazó hacia el NO (Figura 1).

3. CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES DEL DESLIZAMIENTO

Las características del deslizamiento están muy condicionadas por las estructuras geológicas y por aspectos hidrogeológicos. Por un lado, el deslizamiento se produjo en la zona axial de un sinclinal, que además tiene una serie de fallas paralelas de dirección SW-NE, normales al eje del sinclinal. Por otro lado, las condiciones hidrogeológicas debieron tener una influencia directa en el movimiento, afectando a la superficie de rotura y también facilitando la erosión y avance del pie.

La superficie reducida (en planta) del deslizamiento tiene unos 1,25 km de ancho por unos 0,8 km de longitud promedio, es decir, alcanza 1 km² de extensión. La superficie afectada por el deslizamiento puede dividirse en tres zonas: superior, media e inferior; de 0,15; 0,65 y 0,2 km², respectivamente. (a) La zona superior tiene un escarpe principal, de 60-70 m de alto y unos 1.600 m de longitud. En superficie este escarpe coincide con la cicatriz principal superior del deslizamiento; (b) la zona media incluye laderas de pendientes medias (10°-15°), cicatrices secundarias y varios lóbulos de deslizamiento; y (c) la zona inferior, constituye el pie del deslizamiento, con un amplio frente semicircular y de baja pendiente (<5°) (Figura 2).

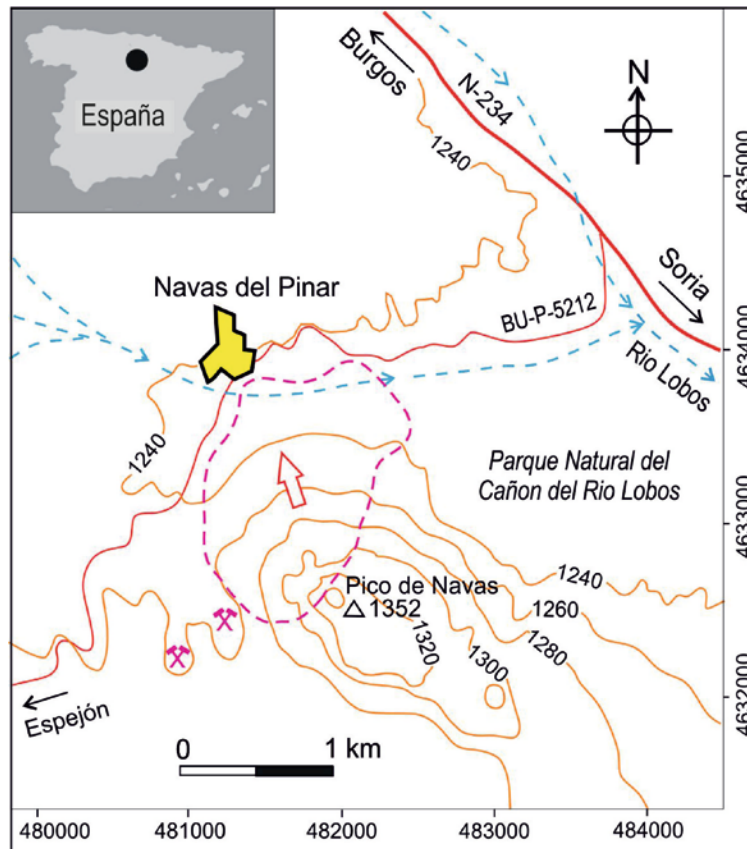


Figura 1. Mapa de situación del deslizamiento de Pico de Navas, Burgos, España.



Figura 2. Vista frontal del deslizamiento de Pico de Navas desde el Norte, mostrando el escarpe principal (en verde) y el contorno de la masa deslizada (en rojo) que tiene unos $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ de volumen.

Las dimensiones principales de la masa deslizada, de acuerdo a la terminología de Dikau et al. (1996), son: 1.280 m de anchura, 1.030 m de longitud y 153 m de profundidad de la superficie de deslizamiento. La longitud total del deslizamiento alcanza los 1.030 m, según medidas directas en campo.

4. PROPIEDADES Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

La capa inferior de la sección estratigráfica de Pico de Navas tiene espesores de 100-150 m y está compuesta de arenas limosas y arcillosas del Albiense (facies Utrillas), que constituye la unidad superior del Cretácico Inferior (Figura 3). Por encima, hay principalmente capas de margas y calizas del Cretácico Superior, de mayor dureza y resistencia que los materiales de la capa inferior.

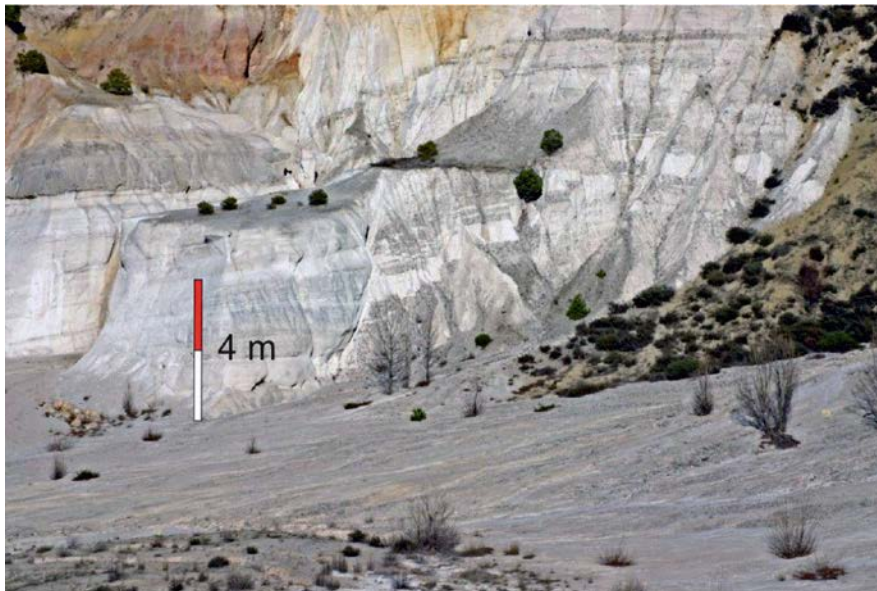


Figura 3. Capa del Albiense (facies Utrillas), densamente fracturada, al SW de la masa deslizada. Los niveles blancos en ocasiones alcanzan en su composición el 40% de Caolinita.

Fueron tomadas 10 muestras en una zona próxima al deslizamiento, que representaran la variedad litológica de la capa con facies Utrillas. Se agruparon en los siguientes tipos: 5 de arena arcillo-limosa, de color gris a marrón; 3 de arena limosa blanca; 1 de arena arcillo-limosa roja, con niveles cementados de gravas. Estas muestras no reaccionaron al ataque del ácido clorhídrico, indicando bajo contenido en carbonatos, y tampoco contenían materia orgánica. De los análisis granulométricos se concluye que en la zona del deslizamiento las facies Utrillas básicamente consisten en limos y arenas con algo de arcillas. El contenido de finos (limos + arcillas) es alto (77,08% de media) si bien el contenido de arcillas es generalmente bajo. No obstante, en algunos casos alcanza el 11%, e incluso el 43%, cuando el contenido en Caolinita es alto. En cualquier caso, debe haber una considerable influencia de las partículas finas en el comportamiento geomecánico de este tipo de suelo, pues su contenido es $>35\%$.

Los parámetros de plasticidad indican que la fracción fina de los suelos está en el campo CL-ML de la clasificación de Casagrande (arcillas y/o limos de baja plasticidad). El Índice de fluidez indica consistencias sólida a plástica, según la humedad, y los valores de Actividad tienen un amplio rango de valores (0,2-2,21), mostrando una expansividad potencial de baja ($A < 0,5$) a alta ($A > 1$), que depende principalmente del contenido de arcilla de cada muestra.

Como la unidad de facies Utrillas en detalle consiste en una sucesión de niveles sedimentarios, de espesores decimétricos a métricos y de varias litologías, resulta difícil obtener parámetros geotécnicos de la unidad en su conjunto. Por ello, fueron escogidas muestras de cuatro litologías comunes y fueron obtenidos sus parámetros geotécnicos mediante ensayos de laboratorio (Tabla 1).

Muestra	Descripción	%	δ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)
4	Arena limosa	20	20	27.5	10
5	Arena con gravas ligeramente cementadas	10	19	38	15
6	Arena limosa algo arcillosa	50	23	22.24	35
7	Limo arcillo-arenoso	20	20	12.74	48

Tabla 1. Parámetros geotécnicos básicos de la unidad Utrillas en Pico de Navas. %: indica la proporción aproximada de cada tipo de suelo presente en la sección estratigráfica local (Sanz-Pérez et al., 2016).

El peso específico varía entre 19 y 23 kN/m³; los ángulos de fricción entre 13° y 38° y la cohesión entre 10 y 48 kN/m². Para estos rangos de valores tan amplios es muy difícil establecer un valor promedio representativo. Por otro lado, para la secuencia de capas superior (calizas y margas) que afloran por encima de la unidad Utrillas se han adoptado los parámetros de resistencia siguientes: cohesión, $c = 10$ kN/m² y ángulo de fricción $\phi = 30^\circ$.

5. BACK ANALYSIS Y MECANISMO DE ROTURA

Hemos hecho una hipotética reconstrucción de la topografía previa al deslizamiento basada en la topografía actual y en las formas del relieve circundante (Figura 4). Si se realiza un análisis de estabilidad de la ladera con las dimensiones de la geometría previa, se pueden inferir las condiciones al inicio del deslizamiento. Con este propósito, se ha recreado la topografía original antes de la rotura y se ha obtenido la situación inicial de la rotura mediante modelado numérico, con el uso del software de cálculo geotécnico FLAC.

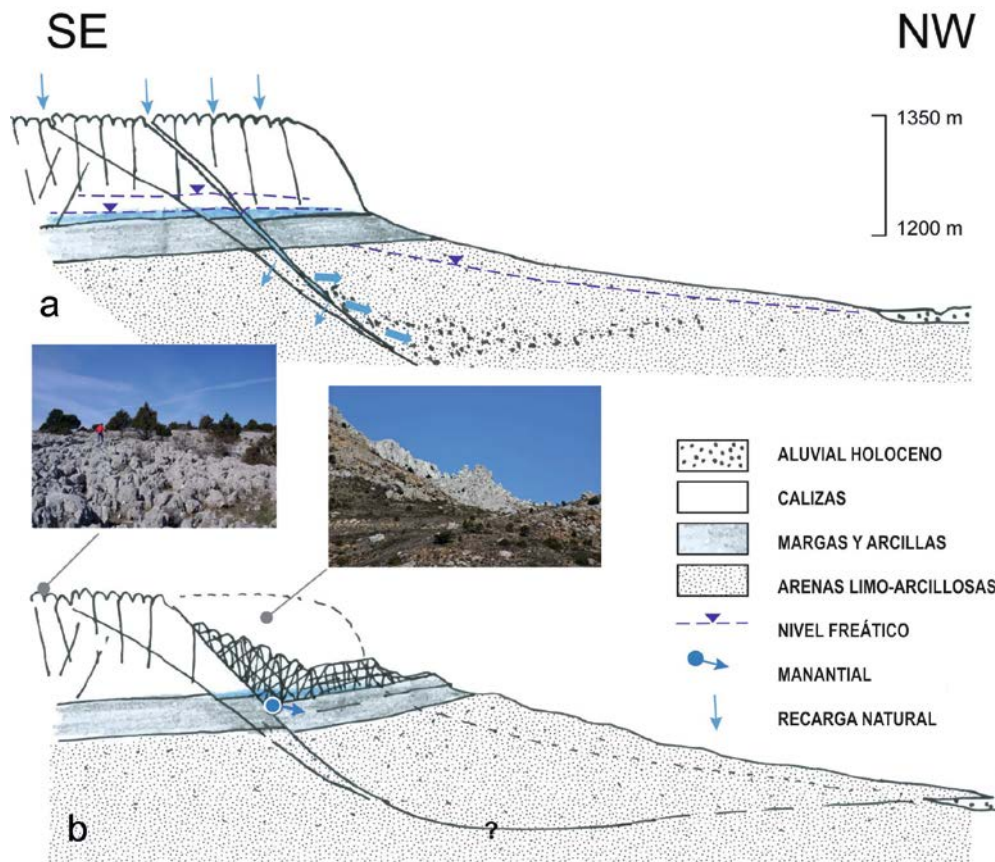


Figura 4. Sección geológica principal del deslizamiento: **a)** situación previa al deslizamiento. Las capas de calizas y margas retuvieron el agua y facilitaron su infiltración por la falla; **b)** después del deslizamiento rotacional, el agua se concentró en una zona específica (debajo de la unidad de calizas fracturadas y por encima de la unidad de margas y arcillas) coincidiendo con el manantial principal en la zona (Sanz-Pérez et al., 2016).

Se ha tomado la secuencia de calizas y margas que yace sobre la capa de facies Utrillas, según la sección geológica de Pico de Navas. También se han tenido en cuenta los parámetros de los ensayos previamente realizados (Tabla 1). Con la intención de realizar un modelado geomecánico del momento inicial del deslizamiento, deben ser elegidos parámetros del criterio de rotura Mohr-Coulomb correspondientes a ese instante.

Se ha adoptado un valor promedio de la densidad igual a 21 kN/m^3 . Se ha considerado un valor nulo de la cohesión para representar el estado inicial del proceso de rotura en la situación de inestabilidad inicial, ya que el comportamiento cohesivo está limitado por la fracción más gruesa. Mientras que el comportamiento friccional está principalmente marcado por la fracción de finos. Esta es predominante en la unidad de facies Utrillas, de manera que ha sido elegido un valor promedio del ángulo de fricción igual a 18° .

Se ha considerado un módulo elástico de 10 MPa para ambos materiales y un coeficiente de Poisson de 0,3. No obstante, como es bien sabido, para problemas de este tipo el módulo de deformación no afecta al valor del factor de seguridad. Estos parámetros están en la Tabla 2. Para las condiciones de frontera del modelo han sido consideradas restricciones horizontales para los contornos laterales, y restricciones horizontales y verticales, para el contorno inferior.

Material	Peso específico aparente (kN/m³)	Cohesión (kN/m²)	Angulo de fricción (°)	Módulo elástico (MPa)	Coefficiente de Poisson
Secuencia de calizas y margas	25	20	30	10	0,3
Unidad Utrillas	21	5	18	10	0,3

Tabla 2. Parámetros geotécnicos de la secuencia de las unidades de calizas y margas y de facies Utrillas.

La posición de la falla ha sido incorporada en el modelo, según se muestra en la Figura 5. El modelo incluye una interfaz con ángulo de fricción residual igual a 1/3 del ángulo de fricción del material superior de calizas y margas (10°). Por razones de cálculo, el nivel freático ha sido calculado hasta la cota 1.285 m para el equilibrio estricto. Lo primero de todo, han sido calculadas las presiones bajo condiciones estáticas (sólo bajo carga vertical de la gravedad), considerando la presión del agua causada por el nivel freático.

La estimación de las presiones horizontales efectivas ha sido realizada con la fórmula de Jaky, ya que, aunque esta configuración no sea claramente de suelo estratificado, puede ser considerada suficientemente precisa para esta estimación. Como conclusión de este cálculo, se ha hallado la estabilidad de esta ladera bajo condiciones estáticas.

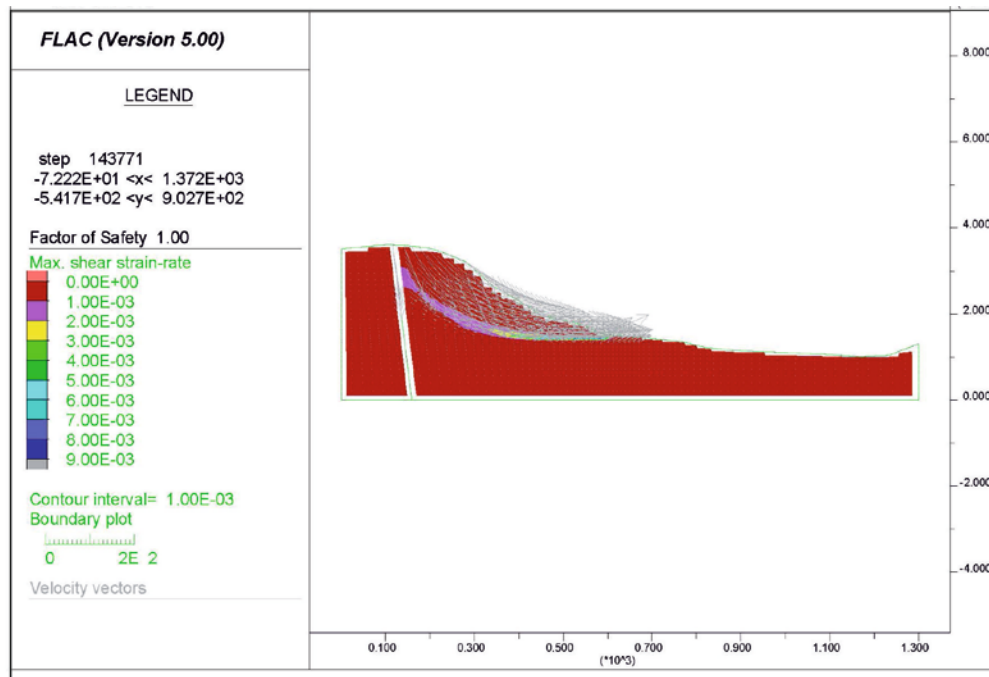


Figura 5. Modelo de la geometría inicial de la ladera, considerado para la simulación numérica con el software FLAC (Sanz-Pérez et al., 2016).

Para el propio “*back analysis*”, se ha realizado un análisis de sensibilidad variando los parámetros resistentes de las dos unidades geotécnicas y la posición del nivel freático (Tabla 3). La superficie de rotura obtenida concuerda con las observaciones de campo. La estabilidad ha sido calculada antes que el deslizamiento ocurriera, utilizando los parámetros geomecánicos testeados. Esto da una superficie con un factor de seguridad próximo al 1,000, que indica el equilibrio estricto de la masa considerada en este cálculo.

Además, se ha pretendido representar la correcta dirección del movimiento para la situación final de equilibrio. Para hacer esto, se ha implementado un modelo 3D utilizando el programa de cálculo geotécnico FLAC 3D.

El deslizamiento de Pico de Navas tiene todas las características para ser clasificado como un movimiento rotacional de gran amplitud (Varnes, 1978; Corominas, 1989; Cruden y Varnes, 1996) al haber involucrado a más de $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ de terreno. La rotura principal de la rotación afectó a las arenas de las facies Utrillas. Sin embargo, el movimiento rotacional también incluyó al resto de la secuencia estratigráfica superior de calizas y margas, con 150 m de espesor, y de arcillas y margas, de 30 m de espesor.

Estos materiales sometieron a toda la sucesión estratigráfica a una serie de cambios de expansión, puesto que el peso de las calizas pudo deformar las capas infrayacentes, causando la pérdida de resistencia y provocando una extrusión o flujo plástico radial hacia el contorno libre y hacia el valle en la base de la montaña.

Unidad Utrillas: Ángulo de fricción (°)	Unidad de Calizas y Margas: Cohesion (kN/m ²)	Cota máxima del nivel freático (m)		
		1290	1285	1275
16	7.5	0.87	0.91	0.96
	10	0.90	0.92	0.98
	12.5	0.91	0.93	0.99
18	7.5	0.93	0.97	1.04
	10	0.96	1.00	1.07
	12.5	0.99	1.02	1.08
20	7.5	1.01	1.05	1.12
	10	1.03	1.07	1.15
	12.5	1.06	1.10	1.18

Tabla 3. Análisis de sensibilidad. Factores de seguridad en el modelo 2D (Sanz-Pérez et al., 2016).

La extrusión de las margas debe haber sido posible por las condiciones húmedas, dado que el límite permeable-impermeable se encuentra dentro de esta capa. Hoy, estas margas y arcillas aún actúan como una base impermeable, pues a ellas se debe la presencia de dos manantiales a media altura de la montaña, que drenan el acuífero de neoformación creado en la masa fragmentada de calizas y calizas margosas, y que actualmente suministran agua a la población de Navas del Pinar.

Entre los factores condicionantes de la rotura, tuvieron un papel crucial la existencia de grandes fracturas (de fallas tectónicas) y la acción del agua de infiltración a través de ellas; así como la litología local de la unidad de facies Utrillas y la hidrología del macizo rocoso.

Las fallas permitieron la comunicación hidráulica en la vertical de las tres unidades hidroestratigráficas y estimularon las fuerzas de tracción del deslizamiento. Además, la saturación casi permanente de los niveles inferiores, con baja permeabilidad, también facilitarían la disminución de los valores de los parámetros resistentes de las rocas.

6. CONCLUSIONES

- 1) El deslizamiento de Pico de Navas (Burgos, España) fue un movimiento rotacional de gran magnitud, que involucró 50×10^6 m³ de rocas y suelos. La masa deslizada ocupa más de 1 km² de superficie, tiene unos 1.280 m de ancho, 1030 m de largo y un espesor de unos 160 m.
- 2) Los elementos distintivos son: a) una masa rocosa con una potente zona superior de calizas (300 m de espesor), fallada y parcialmente disuelta; b) que tras el movimiento quedó rotada e intensamente fragmentada en bloques; c) una zona intermedia de margas y arcillas (< 30 m) que es esencialmente impermeable y permitió la existencia de un nivel freático colgado antes del movimiento, la entrada de agua en la zona superior de la superficie de deslizamiento y condiciones saturadas en la zona inferior;

- d) una zona inferior de arenas limosas y arcillas caoliníticas (facies Utrillas) (150 m), con tramos de alta proporción de Caolinita (40%).
- 3) En dicha zona inferior se produjo un fenómeno de fluidificación (o solifluxión), por la presión de agua y el peso debido a los materiales suprayacentes, que facilitó que la superficie de rotura continuara hacia abajo y se curvara hasta ser plana y horizontal. El modelo geomecánico (2D y 3D) ha permitido simular las condiciones de estabilidad y rotura del deslizamiento, cuyos parámetros y condiciones coinciden con las anteriormente indicadas.
 - 4) El deslizamiento se produjo en el Holoceno medio o reciente, posiblemente durante un periodo climático húmedo, y con certeza antes del Siglo V AC. Esto ha sido deducido por: a) la presencia del aluvial del Holoceno que es condicionado en su traza por la masa deslizada; y b) por la presencia de un castro celtibérico sobre la coronación del escarpe superior y cuya construcción fue posterior al movimiento. Respecto a su actividad el deslizamiento de Pico de Navas es considerado inactivo, ya sea abandonado o bien relicto. Según los datos obtenidos sólo tuvo lugar un gran deslizamiento, y no son distinguibles morfológicamente etapas diferentes.
 - 5) El deslizamiento de Pico de Navas puede considerarse un caso de estudio particular. Su gran tamaño (1 km² de extensión y 50x10⁶ m³ de volumen) permite la comparación con otros deslizamientos complejos de la literatura científico-técnica, que serían del tipo “rock slide - earth flow” según la terminología de Varnes (1978) y Cruden & Varnes (1996). Sin embargo, el contexto geológico y las condiciones hidrogeológicas que concurrieron en este deslizamiento son específicas, lo que permite considerarlo un caso de estudio diferente a otros.

REFERENCIAS

- Corominas, J., 1989. Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. In: J. Corominas (Editor). Monografía nº 3. Sociedad Española de Geomorfología. Zaragoza, pp. 1-30.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996): Landslide Types and Processes. In: A.K. Turner, R. L. Schuster (eds.), *Landslide investigation and mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., pp. 36-75.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L. and Ibsen M.-L.(eds.), 1996. *Landslide Recognition*. International Association of Geomorphologists, Publication 5, John Wiley and Sons, Chichester, 251 pp.
- Menéndez-Pidal, I., 2006. Interacción de las arenas en facies Utrillas en las obras de Ingeniería Civil. Revisión documental y caracterización geológica geotécnica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 308 pp.
- Sanz-Pérez, E., Menéndez-Pidal, I., Lomoschitz, A. and Galindo-Aires, R. 2016. The Pico de Navas slump (Burgos, Spain): a large rocky landslide caused by underlying clayey sand. *Journal of Iberian Geology* 42 (1) 2016: 55-68.
- Varnes, D.J. (1978): Slope Movements, Types and Processes. In: Schuster, R.L. Krizck, R.J. (Eds.), *Special Report 176: Landslides: Analysis and Central*. Transportation Research Board. National Academy of Sciences, Washington DC, pp. 11-33.