

FACTORES DESENCADENANTES DE LOS DESLIZAMIENTOS DE LA CANTERA DEL BARRIO DE LA CORONA (Ejea de los Caballeros, Depresión del Ebro)

F. GUTIÉRREZ, T. ARAUZO, C. SANCHO
&
M. GUTIÉRREZ

Dpto. Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza.
50009 Zaragoza.

Resumen. El Barrio de la Corona, en Ejea de los Caballeros, se asienta sobre un escarpe generado como consecuencia del encajamiento y migración lateral del río Arba de Luesia durante su evolución cuaternaria. Este escarpe constituido por argilitas miocenas y una cobertera de gravas cuaternarias, presenta numerosos movimientos de ladera que afectan a diversas construcciones de dicha localidad. El estudio de los materiales del escarpe y el análisis geomorfológico de los deslizamientos indican que el principal factor desencadenante de los movimientos de ladera es el aporte de agua procedente de fugas existentes en la red de saneamiento. Este agua provoca la rápida reducción de la resistencia mecánica de los sedimentos terciarios del escarpe, afectados por una densa red de discontinuidades y caracterizados por un comportamiento dispersivo y expansivo.

Palabras clave: deslizamientos, dispersividad, riesgo geológico, Depresión del Ebro

Abstract. The Corona area, in Ejea de los Caballeros, is located on top of a scarp generated by the entrenchment and lateral migration of the river Arba de Luesia through the Quaternary. This scarp is constituted by Miocene mudstones and a cover of Quaternary gravels and shows numerous slope movements affecting several buildings. A study of the materials of the scarp and the geomorphological analysis of the landslides indicates that the main triggering factor of slope movements are water leakages from the water supply to the city. This water causes a reduction of strength in the Tertiary sediments, which are densely jointed and characterized by high dispersivity and a swelling behaviour.

Key Words: Landslides, dispersivity, geological hazard, Ebro Basin

1. Introducción

El límite noroccidental de la ciudad de Ejea de los Caballeros viene marcado por la existencia de un escarpe muy verticalizado de unos 30 m de altura. Al pie de este cantil discurre el río Arba de Luesia y sobre el mismo se asienta el Barrio de la Corona. En este escarpe, constituido por argilitas miocenas y una cobertera de gravas cuaternarias, se han desarrollado una serie de movimientos de ladera que traen como consecuencia el retroceso del mismo. En épocas recientes se ha observado un incremento en la actividad de estos movimientos de ladera, llegando a afectar a diversas edificaciones. El objetivo de este trabajo consiste en determinar los distintos factores que condicionan el desarrollo de estos movimientos de ladera, como paso previo a actuaciones posteriores encaminadas a la estabilización de la ladera.

2. Situación geológica y geomorfológica de los deslizamientos

En el entorno de la localidad de Ejea de los Caballeros, situada el sector central o aragonés de la Depresión del Ebro, los sedimentos del relleno de esta cuenca terciaria están constituidos por argilitas, areniscas y arcillas de edad miocena. Estos materiales corresponden a las facies detríticas distales de la Formación Uncastillo (Riba et al., 1981; Arenas, 1993) y desde el punto de vista estructural se encuentran escasamente deformados y en disposición subhorizontal.

En buena parte de este sector, los sedimentos terciarios se encuentran fosilizados por una cobertera de depósitos cuaternarios, correspondientes a distintos niveles aluviales (glacis-terrazas) relacionados con los ríos Arba de Luesia y Arba de Biel (Fig. 1). Se han diferenciado cinco niveles aluviales escalonados y encajados en el sustrato. Las alturas relativas respecto al cauce actual de los distintos niveles de terraza son 26-33 m, 15-18 m, 8-9 m, 4-6 m y 1-2 m (Gracia, 1985).

La distribución de los niveles de terraza en este sector muestra como el río Arba de Luesia ha migrado hacia el sureste depositando una secuencia escalonada de terrazas en su margen derecha y excavando un prominente escarpe en la margen opuesta (Fig. 1). En este cantil, de unos 30 m de altura, se han desarrollado los movimientos de ladera que afectan a diversas construcciones de Ejea de los Caballeros y que son objeto de estudio.

3. Caracterización de los materiales del escarpe

3.1. Litoestratigrafía

Desde el punto de vista litoestratigráfico, en los materiales que constituyen el escarpe podemos diferenciar dos unidades fundamentales de gran uniformidad, los sedimentos terciarios y los depósitos aluviales cuaternarios (Fig. 2). La columna visible de sedimentos es de aproximadamente 32 m.

3.1.1. Sedimentos terciarios

Esta unidad de 28 m de potencia está formada por argilitas masivas, arcillas e intercalaciones de areniscas de grano fino. Se trata de materiales sobreconsolidados que han soportado una carga importante de material (al menos 300 m) y que con la excavación del relleno de la Depresión del Ebro han experimentado una descarga progresiva. Para el conjunto de los sedimentos terciarios hemos diferenciado los siguientes tramos de base (cauce del río Arba de Luesia) a techo (Fig. 2):

Tramo 1: 5,4 m de argilita con intercalaciones de niveles tabulares de hasta 30 cm de espesor de arenisca de grano fino. Ambas tienen un color gris en corte fresco y beige en superficie alterada. Las argilitas presentan un diaclasado de espaciado decimétrico, formado por planos curvos que individualizan bloques de geometrías irregulares. En las areniscas, más competentes, el diaclasado presenta menor densidad.

Tramo 2: 11,5 m de argilita masiva (muestra M-1) con algún nivel tabular de arenisca de grano fino de espesor decimétrico. Ambas son de color gris en corte fresco y beige en superficie. La argilita se encuentra afectada por un diaclasado de planos ligeramente curvados. Estos planos son mayoritariamente subpa-

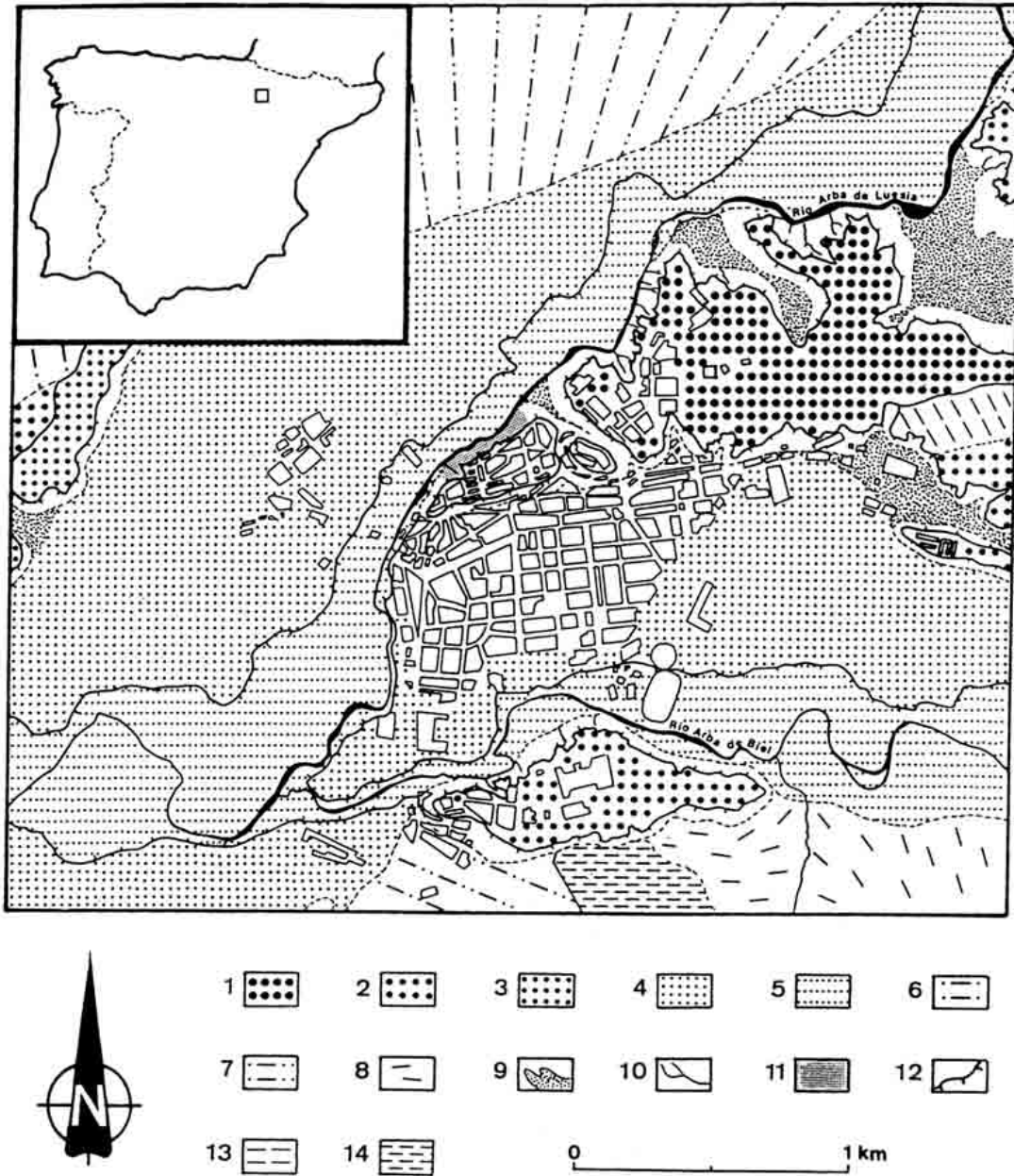


Figura 1. Localización y mapa geomorfológico de los alrededores de Ejea de los Caballeros. 1, 2, 3 y 4: Terrazas T_5 , T_4 , T_3 y T_2 . 5: Llanura de inundación. 6 y 7: Glacis G_4 y G_2 . 8: Derrames o glacis recientes. 9: Valles de fondo plano. 10: Barrancos de incisión lineal. 11: Área afectada por deslizamientos. 12: Escarpe. 13: Ladera regularizada. 14: Área endorreica. *Location and geomorphological map of Ejea de los Caballeros surroundings. 1, 2, 3 and 4: Terraces T_5 , T_4 , T_3 and T_2 . 5: Floodplain. 6 and 7: Covered pediments G_4 and G_2 . 8: Recent covered pediment. 9: Flat bottom infilled valleys. 10: Gullies. 11: Sector with slope movements. 12: Scarp. 13: Covered slope. 14: Endorheic area.*

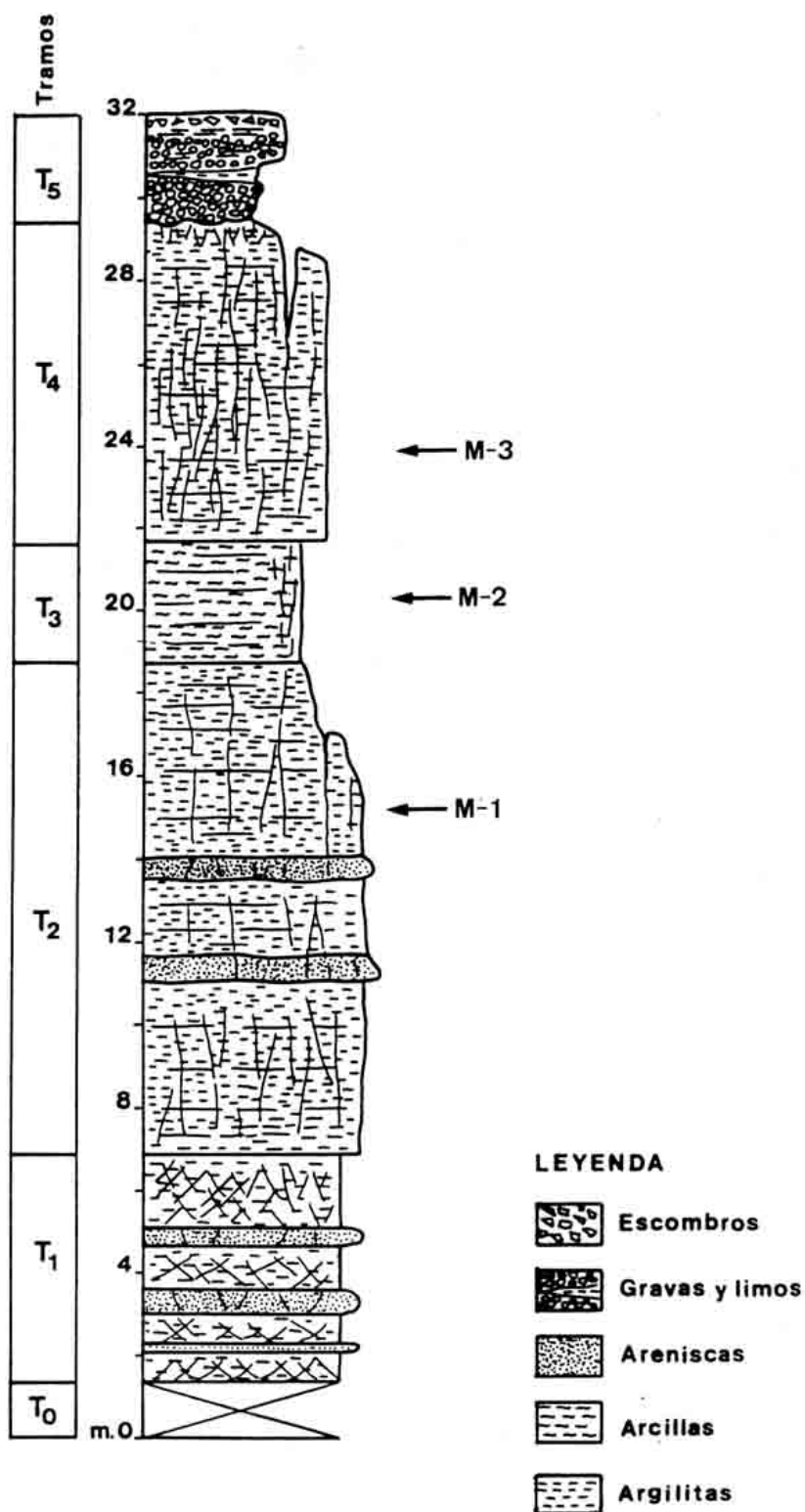


Figura 2. Columna litoestratigráfica de la Cantera del Barrio de la Corona con indicación de los niveles donde se han tomado las muestras. *Lithostratigraphic profile of the Cantera del Barrio de la Corona, indicating the sampled levels.*

ralelos al escarpe (generados por descompresión lateral) y su espaciado de orden métrico disminuye hacia el frente del escarpe. La apertura de las discontinuidades es de hasta 3 cm. En los niveles de arenisca la densidad de diaclasas es claramente inferior.

Tramo 3: 3 m de arcilla (muestra M-2) en niveles decimétricos y centimétricos de colores rojo, gris y negro. En superficie presenta un agrietamiento generado posiblemente por procesos de desecación. Hacia el interior posee un alto contenido en humedad y no está afectada por discontinuidades visibles. Este tramo puede actuar como nivel impermeable, colgando hidrológicamente los materiales suprayacentes.

Tramo 4: 8 m de argilita masiva (muestra M-3), gris en corte fresco y beige en superficie. Está afectada por un diaclasado de planos curvos y espaciado decimétrico que individualizan bloques de este orden de magnitud. A techo, en la zona de contacto con los depósitos de terraza cuaternaria, el material se encuentra afectado por una importante alteración física y química presentando numerosas discontinuidades.

3.1.2. Depósitos de terraza

Se trata de materiales detríticos gruesos en los que la litificación existente es debida únicamente a procesos de carbonatación y desarrollo de costras carbonatadas. Estos depósitos no han llegado a estar confinados verticalmente.

	CA.	CU.	FD.	FILOSILICATOS			HE
				ilita	clorita	esmectita	
M-1	37	44	4	12	2	<1%	0
M-2	9	38	0	40	5	3	5
M-3	50	34	2	10	2	<1%	0

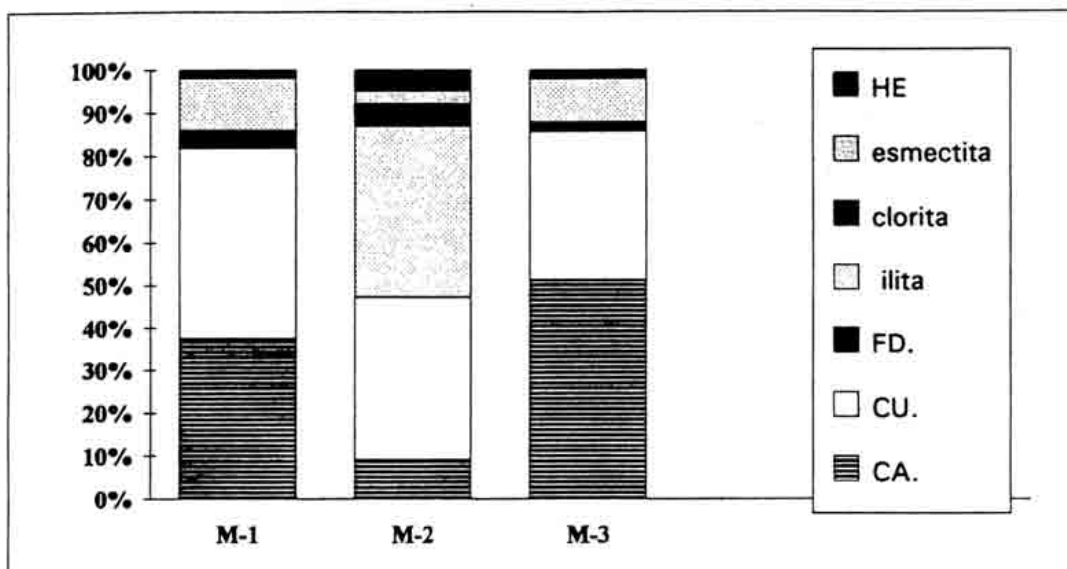


Figura 3. Resultados del análisis mineralógico recalculado de la muestra total. HE.: Hematites, FD.: Feldespatos, CU.: Cuarzo, CA.: Calcita. Results of the recalculated mineralogical analysis of the total sample. HE.: Hematite, FD.: Feldspars, CU.: Quartz, CA.: Calcite.

Tramo 5: 2,7 m de gravas redondeadas sueltas en la base que pasan a gravas cementadas y niveles de costra calcárea hacia el techo. Por encima del depósito aluvial aparecen unos 90 cm de escombros, en los que se observan sillares de antiguas construcciones afectadas por los deslizamientos y el retroceso del escarpe.

3.2. *Fracturación*

En los materiales terciarios ligados al escarpe se diferencian dos tipos de discontinuidades (Corominas, 1989b): un diaclasado de origen tectónico, con planos de direcciones y buzamientos muy variables y una densa red de discontinuidades subverticales controladas topográficamente, cuya génesis está ligada a la descompresión que ha experimentado el escarpe. También hay que tener en consideración todo el conjunto de planos de discontinuidad que determinan la estratificación subhorizontal de la serie y los límites entre tramos de distinta litología.

3.3. *Mineralogía*

Se ha analizado la mineralogía de las tres muestras tomadas en la unidad de sedimentos terciarios (M-1, M-2 y M-3) (Fig. 2). El análisis del contenido mineralógico total ha sido realizado mediante difracción de rayos-X sobre muestra de polvo. En las tres muestras se reconoce mayoritariamente cuarzo, calcita y filosilicatos (ilita y clorita). Además en las muestras M-1 y M-3 aparecen feldespatos y en la M-2 hematites. También se han identificado en las muestras M-1 y M-2 sulfatos hidratados de magnesio con diferentes fases mineralógicas, siendo problemática su cuantificación (<5%).

Para determinar la mineralogía de la fracción menor de 20 micras se ha recurrido a la difracción de rayos-X sobre agregados orientados. El análisis en las tres muestras indica un predominio de la ilita con cantidades importantes de clorita, menores de esmectita e indicios de caolinita. En la muestra M-3 aparecen ilita-esmectita como interestratificados.

En la figura 3 aparece la composición mineralógica total recalculada de las tres muestras. Conviene señalar la presencia de pequeños porcentajes de esmectitas, sobre todo en la muestra M-2, que pueden tener importancia en el hinchamiento del material en presencia de agua (Salinas, 1988).

3.4. *Dispersividad de los sedimentos terciarios*

Autores como Crozier (1986) y Selby (1993) destacan la importancia de la dispersividad de las arcillas en el desarrollo de movimientos de ladera. Esta propiedad hace referencia a la rapidez con que se desintegran las partículas de un material en presencia de agua, lo que implica una reducción substancial de la resistencia del mismo. Existen algunos parámetros que cuantifican esta propiedad y que, aunque se aplican fundamentalmente en estudios edafológicos y relativos a erosión de suelos, pueden aportar una información de interés para estudios de estabilidad de laderas en materiales arcillosos.

3.4.1. *Índice de dispersión*

Se han obtenido los índices de dispersión (Volk, 1937) de las tres muestras de sedimentos terciarios mediante análisis granulométrico. Las granulometrías se han realizado a partir de las muestras secadas al aire y pasadas por un tamiz de 2 mm. Posteriormente se ha tamizado por vía húmeda, con agua destilada y en sucesivas etapas hasta obtener la fracción menor de 0,595 mm. Las muestras M-1 y M-3 presentan un 0,5 % en peso de partículas con diámetro superior a 0,595 mm, mientras que la muestra M-2 supera ligeramente el 1 %. La fracción menor a este tamaño se ha determinado mediante un analizador de tamaños de partículas Master Sizer/E, cuyo fundamento es un haz de rayos láser que mide la concentración de partículas en suspensión presentes en un recipiente con agua, donde se encuentra la muestra en agitación. Las curvas granulométricas obtenidas indican que las muestras M-1 y M-3 presentan una buena selección de tamaño, con una mediana en torno a 10 μm , mientras que la muestra M-2 tiene una granoselección menor.

Los análisis granulométricos de la fracción menor a 0.595 mm fueron realizados de forma paralela con agua destilada, por un lado, y utilizando un dispersante (hexa-metafosfato sódico al 1 por mil), por otro. Con ello es posible calcular el índice de dispersión de cada material, a partir de la determinación del porcentaje de la fracción menor de 2 μ m de cada muestra, según la expresión (Volk, 1937):

$$I.D. = \% \text{ material } < 2\mu\text{m con agua} / \% \text{ material } < 2\mu\text{m con dispersante}$$

Las muestras M-1 y M-3 presentan un índice de dispersión elevado, con valores de 1 y 0,84 respectivamente, mientras la muestra M-2 posee una dispersión media (0,42). Por otra parte, la relación entre el índice de dispersión y el porcentaje de la fracción menor de 2 μ m, indica igualmente que las muestras M-1 y M-3 son dispersivas según el criterio de Marshall & Workman (1977) (Fig. 4).

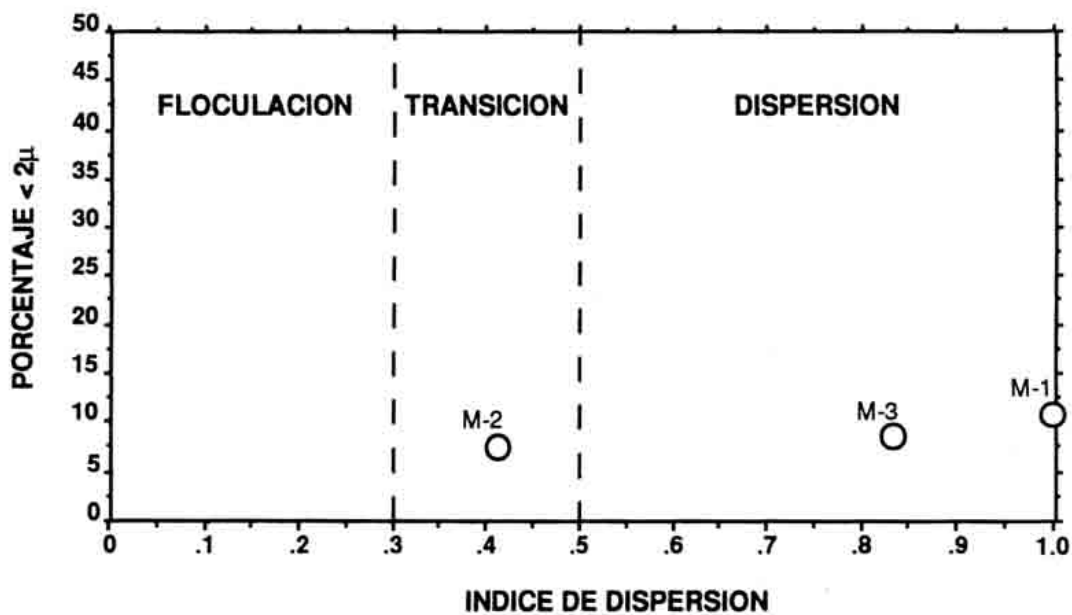


Figura 4. Relación entre el índice de dispersión y el porcentaje menor de 2 μ m, según el criterio de Marshall & Workman (1977). *Relationship between the dispersion index and the weight percentage of the grain-size fraction lower than 2 μ m according to Marshall & Workman (1977) criteria.*

3.4.2. Grado de dispersividad y análisis químicos de los sedimentos y del extracto de pasta saturada

Se han realizado análisis químicos de los sedimentos terciarios tanto sobre muestra sólida como sobre el extracto de pasta saturada. En primer lugar se ha determinado sobre muestra sólida, secada al aire y tamizada a 2 mm, el pH 1:2,5 en agua y en ClK, la conductividad eléctrica (cE) y el contenido de materia orgánica por el método de Wallkey & Black (1934). Los resultados obtenidos indican que se trata de materiales claramente alcalinos con conductividad alta y escasa materia orgánica.

Para determinar las sales susceptibles de pasar a disolución se obtuvo el extracto de la pasta de saturación siguiendo el método de Richards (1954). Los elementos analizados son Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄⁼, CO₃⁼ y HCO₃⁻, utilizando electrodos selectivos y fotómetro de llama. El pH del extracto es alcalino. En el análisis de los cationes destaca un importante contenido en sodio, sobre todo para las muestras M-1 y M-3. Por otro lado, entre los aniones, sobresale el contenido en sulfatos, fundamentalmente de la muestra M-2. Con los datos de estos análisis es posible obtener una serie de índices (SAR, ESP y % Na/total de cationes) que permiten conocer el grado de dispersividad del material siguiendo el criterio de Sherard (Sherard & Decker, 1977) (Fig. 5). Esta gráfica pone el manifiesto que las muestras M-1 y M-3

caen dentro del campo de la dispersión y la M-2 se aleja ligeramente del mismo, lo que corrobora el carácter dispersivo de las muestras M-1 y M-3, representativas de gran parte de la columna (Fig. 2). Por otro lado, en caso de que la capacidad de intercambio catiónico sea elevada, las altas concentraciones de sodio pueden favorecer la adsorción de agua y el desarrollo de importantes cambios volumétricos en el material, mermando la resistencia del mismo (Hilbert, 1981).

3.5. Límites de plasticidad y liquidez

Se han calculado los límites plástico y líquido (Límites de Atterberg) y el índice de plasticidad para las tres muestras (M-1, M-2 y M-3) siguiendo el método de la Cuchara de Casagrande (Fig. 6). Estos parámetros toman valores muy similares para las tres muestras y son sensiblemente inferiores a los que habitualmente presentan materiales de granulometría similar. Cabe esperar que los materiales terciarios del talud, una vez disgregados y tras la adición de pequeñas cantidades de agua, sean susceptibles de perder la cohesión y comportarse de forma semilíquida.

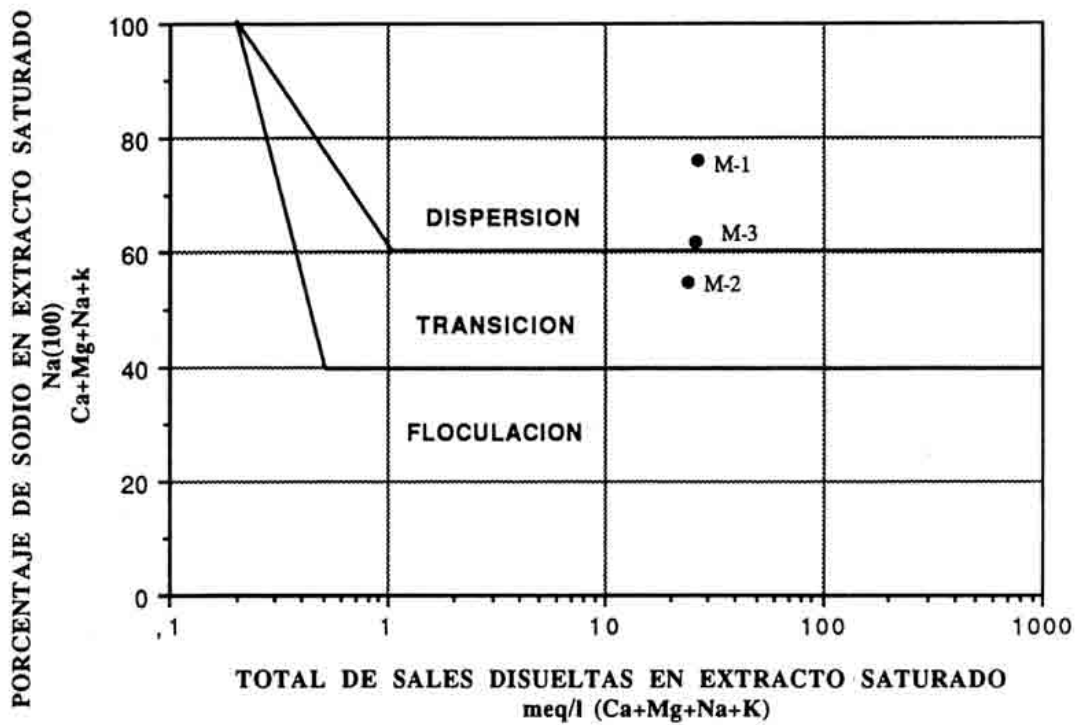


Figura 5. Grado de dispersividad de las muestras M-1, M-2 y M-3 según el criterio de Sherard (Sherard & Decker, 1977). *Dispersivity of the samples M-1, M-2 and M-3 according to Sherard criteria (Sherard & Decker, 1977).*

	M-1	M-2	M-3
Límite líquido	32.0	32.6	32.7
Límite plástico	24.2	19.6	19.3
Índice de plasticidad	7.8	13.0	13.4

Figura 6. Límites de Atterberg para las muestras de materiales miocenos. *Atterberg limits for Miocene samples.*

3.6. Edometrías

Se ha determinado la presión máxima de hinchamiento y el hinchamiento a diversas presiones para la muestra M-3. Las características de la muestra inicial eran de 50 mm de diámetro, 20 mm de altura, 2 % de humedad y 2,17 g/cm³ de densidad seca inicial. Tras la adición de agua la muestra ha alcanzado una humedad del 11 %, ejerciendo una presión máxima de hinchamiento de 7,6 kg/cm². Posteriormente se ha descargado la muestra, registrando los valores de hinchamiento para distintas presiones (Fig. 7).

Los valores de hinchamiento y de presión máxima de hinchamiento obtenidos para la muestra M-3 son elevados (Salinas, 1988), lo que demuestra el carácter expansivo de las argilitas del escarpe. El hinchamiento por adición de agua puede afectar a los materiales asociados a planos de discontinuidad, reduciendo su resistencia y modificando los estados de esfuerzos, lo que puede facilitar el deslizamiento a través de estos planos (Hilbert, 1981).

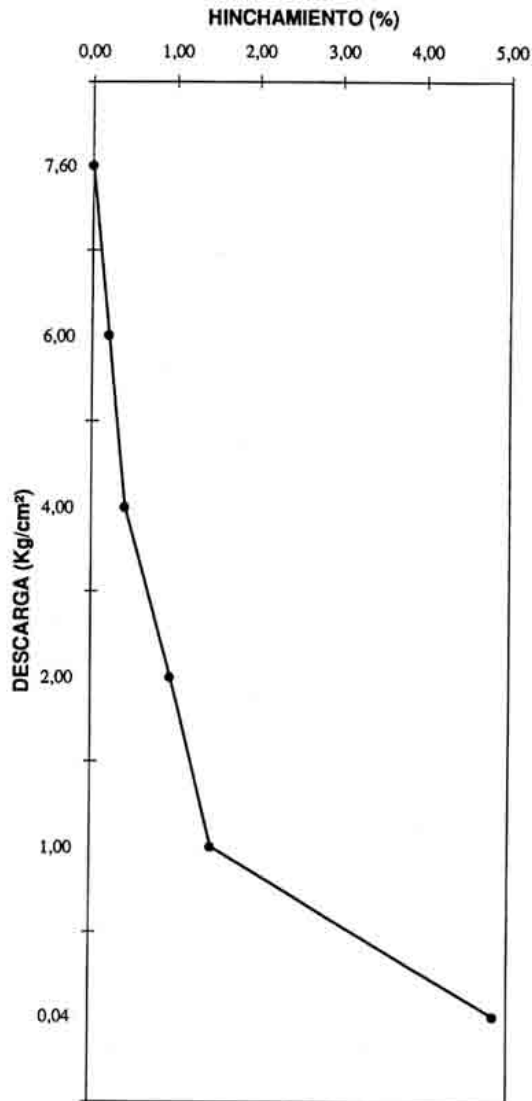


Figura 7. Relación entre la descarga y el hinchamiento para la muestra M-3. Relationship between unloading and swelling for sample M-3.

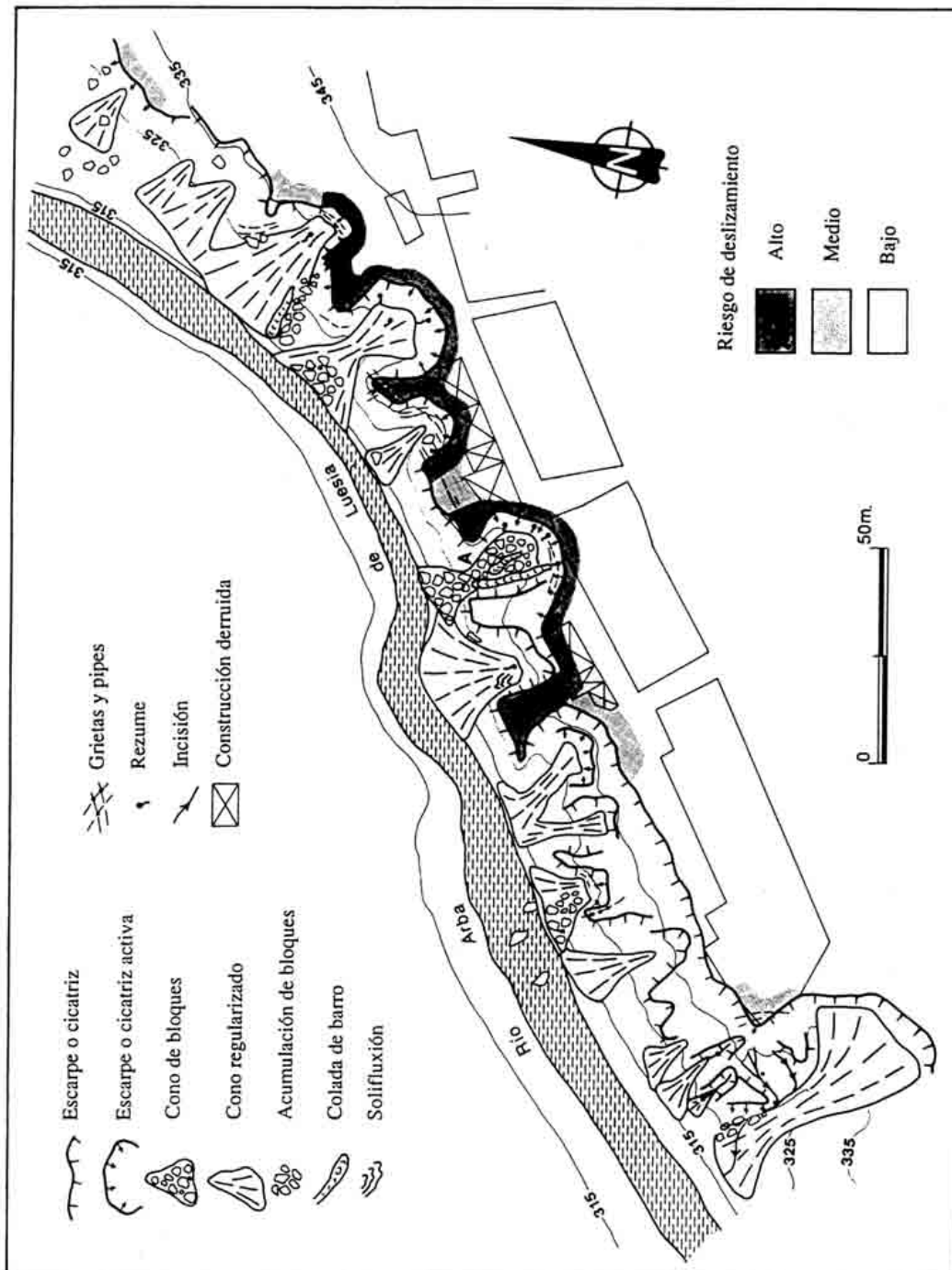


Figura 8. Mapa geomorfológico y de riesgo de deslizamiento del escarpe de la Cantera del Barrio de la Corona. *Geomorphological and landslide hazard map of Barrio de la Corona scarp.*

4. Tipos de movimientos de ladera y su dinámica

A lo largo de todo el escarpe se han detectado numerosos movimientos de ladera con diferentes grados de actividad, además de diversos marcadores que denuncian la inestabilidad de la ladera. Todos estos elementos han sido cartografiados en el Mapa geomorfológico y de riesgo de deslizamiento (Fig. 8). Atendiendo a las clasificaciones de Varnes (1978) y Corominas (1989a) hemos diferenciado dos tipos esenciales de movimientos de ladera: movimientos complejos de deslizamiento y caída (*rock slide-rock fall*) y desprendimientos (*rock fall*).

4.1. Movimientos complejos de deslizamiento y caída

El tipo principal corresponde a un movimiento de masas complejo en el que intervienen los mecanismos de deslizamiento sobre uno o varios planos (*rock slide*) y de caída libre (*rock fall*) siendo este segundo mecanismo el de mayor importancia (Fig. 9). En estos movimientos complejos, cuando los esfuerzos de cizalla superan la resistencia al corte, los materiales densamente fracturados del escarpe deslizan aprovechando planos de discontinuidad preexistentes. La cicatriz del deslizamiento adopta aquella geometría para la que la resistencia al corte es menor, en nuestro caso una morfología en embudo. Una vez que comienza a deslizarse la masa rocosa, el material se descompone en numerosos bloques que se golpean y fragmentan en el transcurso de su caída.



Figura 9. Movimiento complejo de deslizamiento y caída. *Complex movement with sliding and fall.*

De acuerdo con la clasificación geotécnica de los deslizamientos de Sassa (1989), este tipo de movimientos correspondería a un deslizamiento de resistencia pico (*peak-strength slide*). En estos deslizamientos, cuando los esfuerzos alcanzan la envolvente de rotura que determina la resistencia pico, el deslizamiento comienza a producirse. Tras un reducido desplazamiento inicial, la resistencia que opera en el pla-

no pasa a ser residual, de forma que el incremento entre el esfuerzo de cizalla y la resistencia (residual) suministra una aceleración a la masa que desliza, generándose un deslizamiento rápido.

El material movilizado por deslizamiento y caída se acumula en la base del escarpe formando un cono (Fig. 9), en el que los bloques mayores tienden a alcanzar las partes más distales y cuya pendiente (unos 35°) corresponde al ángulo de reposo (Carson, 1977) (Fig. 10). Algunos de estos conos llegan a invadir el cauce del Arba de Luesia, estando afectados por procesos erosivos que socavan la base de la acumulación (Fig. 8).

Los bloques de material altamente dispersivo, con el transcurso del tiempo se disgregan, de forma que tras un período de inactividad suficiente la superficie del cono termina regularizándose y cubriéndose de vegetación. Estos movimientos de ladera experimentan roturas episódicas, produciéndose nuevas acumulaciones de bloques sobre el cono y retrocediendo la cicatriz del deslizamiento (Fig. 11). Son por tanto movimientos de ladera recurrentes y retrogresivos. En algunos de los deslizamientos el retroceso de la cicatriz ha llegado a afectar a edificaciones (Fig. 12), procediéndose al derrumbe de las mismas (Fig. 8). La mayor parte de estos movimientos de deslizamiento y caída que presentan actividad reciente, aparecen asociados a la presencia de rezumes en el escarpe provocados por fugas existentes en la red de saneamiento del Barrio de la Corona (Fig. 8).

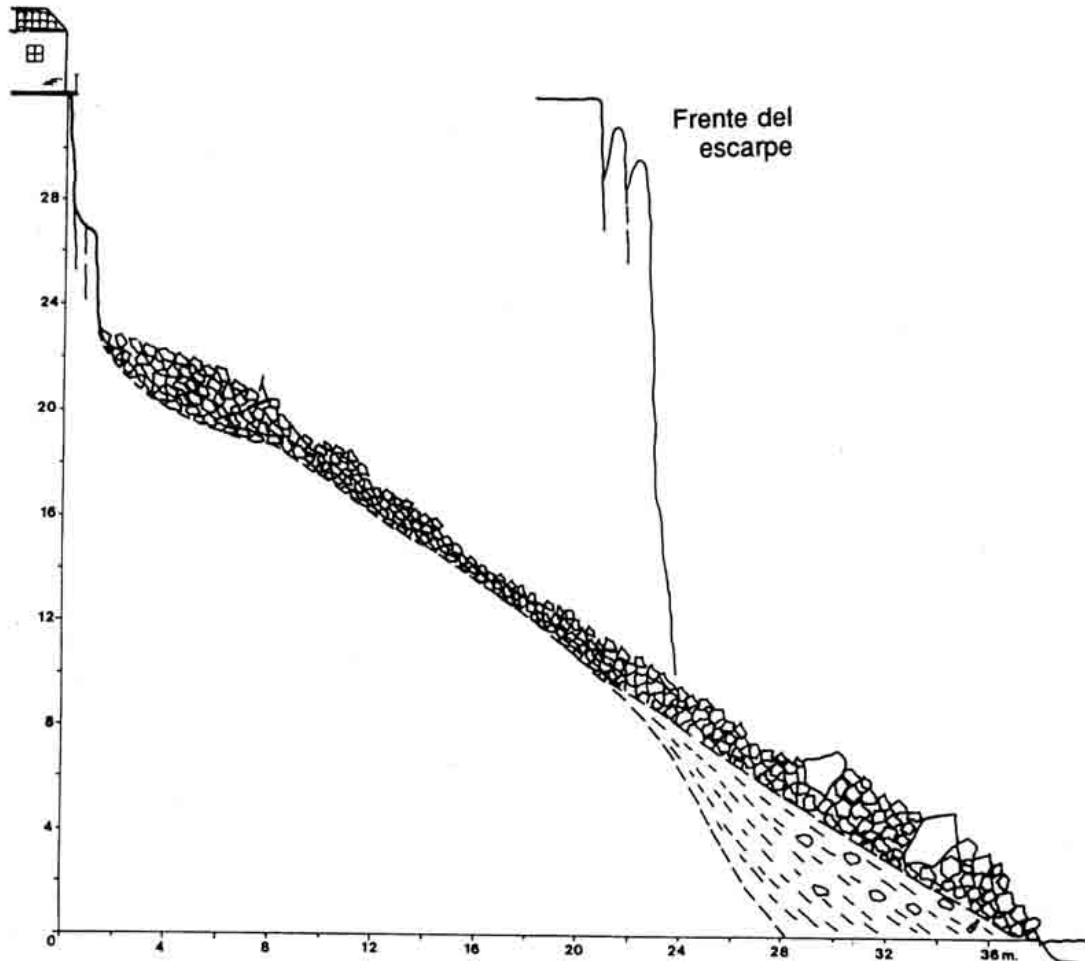


Figura 10. Corte transversal del deslizamiento activo correspondiente al punto A de la figura 8. La masa de bloques fosiliza a un depósito más antiguo originado por movimientos de ladera anteriores. *Cross section of the active slope movement corresponding to point A in figure 8. The mass of blocks fossilizes an older accumulation originated by previous slope movements.*

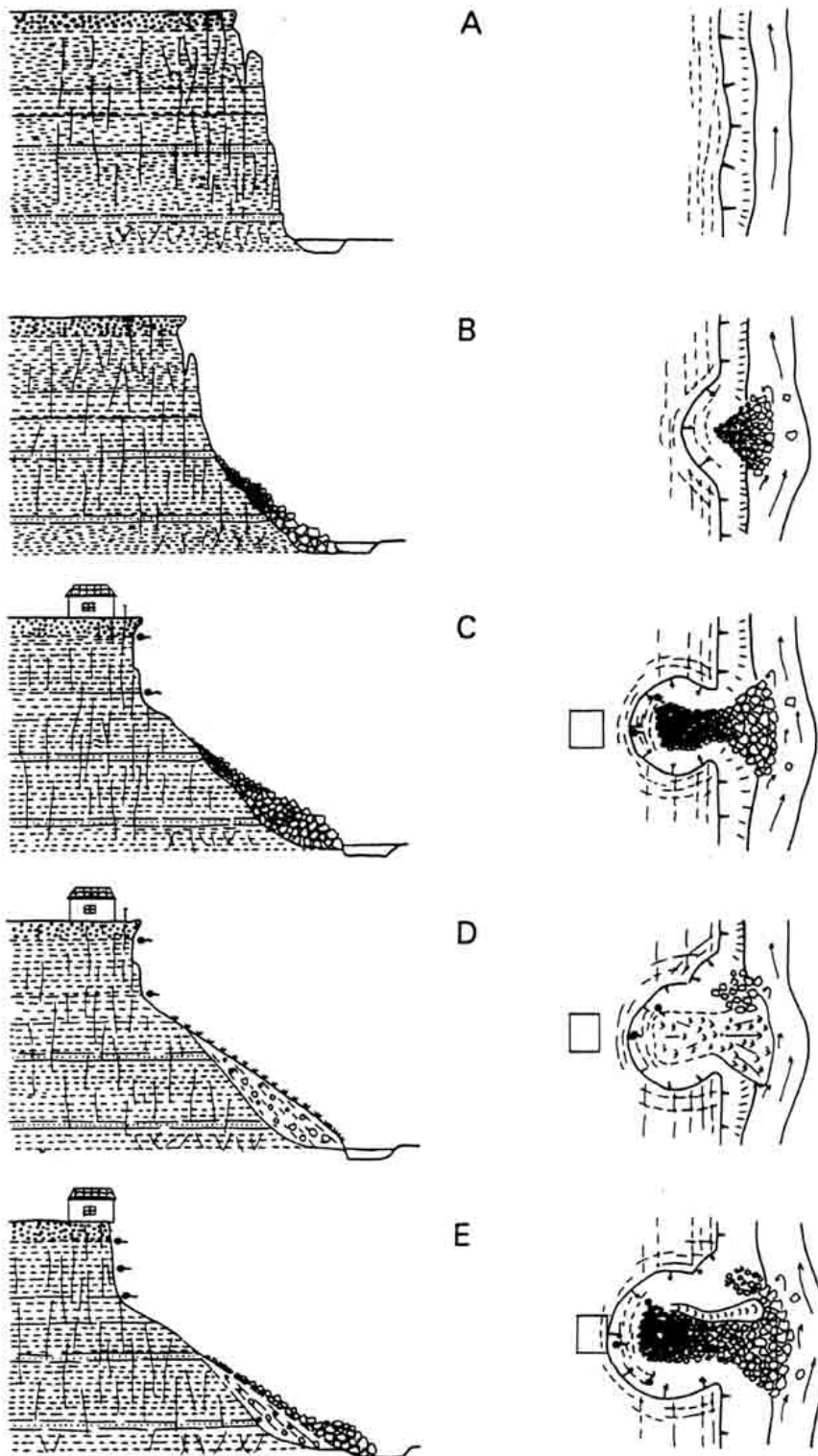


Figura 11. Esquema evolutivo de los movimientos de ladera que afectan a la Cantera del Barrio de la Corona.
Evolutionary sketch of slope movements in Barrio de la Corona scarp.

A este tipo de deslizamientos se superponen otros movimientos de ladera secundarios como coladas de barro (*mud flows*) o soliflucción (*solifluction*) (Fig. 8). El agua que suministran los rezumes provoca la disgregación y dispersión del material deslizado. Este material empapado en agua termina fluyendo de forma viscoplástica dando lugar a movimientos solifluidales y coladas de barro.

4.2. *Desprendimientos*

El otro tipo de movimiento de ladera corresponde a desprendimientos de bloques (*rock fall*). Estos implican la caída libre de bloques individualizados por discontinuidades, pudiendo también intervenir procesos de rebote y rodamiento hasta alcanzar el reposo (López *et al.*, 1988). Este tipo de movimientos se genera a partir de escarpes verticalizados y dan lugar a acumulaciones caóticas de bloques en la base de los mismos (Fig. 8).



Figura 12. Cicatriz activa del deslizamiento correspondiente al punto A de la figura 8.
Active scarp of the slope movement corresponding to point A in figure 8.

5. Factores que controlan el desarrollo de los deslizamientos

Los factores que condicionan el desencadenamiento de los deslizamientos de la Cantera del Barrio de la Corona se han agrupado en intrínsecos y extrínsecos (Hansen, 1984; Ferrer, 1988), según se trate de características propias del sistema geomórfico que constituye la ladera o sean variables adicionales que influyen en su estabilidad.

5.1. *Factores intrínsecos*

Dentro de este tipo de factores se diferencian los relacionados con la geometría de la ladera y los relativos a la estructura y propiedades de los materiales que la constituyen.

En este sector de la Depresión del Ebro, los taludes constituidos por sedimentos terciarios arcillosos desarrollan, en su evolución normal, laderas con pendientes del orden de 30-35°. En general este tipo de laderas apenas presentan indicios de inestabilidad. Sin embargo, en la Cantera del Barrio de la Corona el encajamiento y la migración lateral del río Arba de Luesia ha generado un escarpe de 30 m de desnivel con tramos muy verticalizados. Tal y como demuestran las evidencias geomorfológicas, las características geométricas de esta ladera sobrepasan las condiciones límites de estabilidad, habiéndose generado numerosos movimientos de ladera.

En la Depresión del Ebro, el desarrollo de escarpes ligados al encajamiento y migración lateral de un sistema fluvial generalmente aparece asociado a litologías yesíferas de edad Oligocena-Miocena (Corominas, 1989b), siendo frecuente la aparición de deslizamientos importantes tanto en el entorno de Zaragoza (Pellicer et al., 1984; Benito, 1989; Gutiérrez et al., 1994) como en la ribera de Navarra (Ayala et al., 1988; Faci et al., 1988 a y b; Leránoz, 1993).

En cuanto a las características de los materiales terciarios del escarpe, estos presentan un densa red de planos de discontinuidad que pueden actuar como planos potenciales de deslizamiento y que tienden a individualizar bloques y disminuir la cohesión del conjunto rocoso (Carson, 1971; Záruba & Mencl, 1982; Crozier, 1986). La estabilidad de la ladera vendrá en gran medida determinada por la resistencia al corte de los planos de discontinuidad existentes (Carson, 1971; Piteau & Peckover, 1978; Lloret, 1989). Además, estos planos de fisilidad conducen y favorecen el flujo de agua, la cual puede actuar como agente de meteorización y dar lugar a presiones de fluido elevadas, reduciendo la resistencia al corte para estos planos (Piteau & Peckover, 1978; Veder, 1981; Záruba & Mencl, 1982; Whalley, 1984; Selby, 1987, 1993).

Por otra parte, los sedimentos terciarios poseen algunas propiedades que propician, ante la presencia de agua, la reducción de su resistencia mecánica. Por un lado se trata de materiales altamente dispersivos que pierden fácilmente su estructura original por adición de agua, disminuyendo considerablemente su cohesión. Esta dispersividad viene dada por las características granulométricas del material, el pH y la presencia de un elevado contenido en sodio. En las cabeceras de algunos deslizamientos se han observado *pipes* desarrollados preferentemente en la intersección de discontinuidades, que pueden contribuir de forma importante al desarrollo de movimientos de ladera (Pierson, 1983). También se ha comprobado el carácter expansible de las argilitas del escarpe, motivado por la presencia de arcillas esmectíticas y el alto contenido en sodio intercambiable. Los cambios volumétricos del material pueden contribuir a incrementar la inestabilidad de la ladera. Además estos materiales poseen un límite plástico y líquido relativamente bajos, por lo que una vez disgregados y tras la adición de pequeñas cantidades de agua son susceptibles de comportarse de forma semilíquida dando lugar a coladas de barro.

5.2. Factores extrínsecos

Entre los factores extrínsecos podemos diferenciar aquellos que tienden a modificar los esfuerzos que operan en la ladera y los que reducen la resistencia del material.

Entre los primeros destaca la actividad erosiva del río, que tiende a evacuar principalmente en épocas de avenidas los materiales que conforman la parte distal de los conos. Este proceso desestabiliza la masa deslizada por pérdida del soporte basal.

El factor más determinante en la generación y actividad de los movimientos de ladera, es el continuo aporte de agua que reciben los materiales del talud procedente de fugas existentes en la red de saneamiento del Barrio de la Corona. Dado que esta red se encuentra instalada en las gravas altamente permeables de la terraza, las pérdidas de agua se transmiten con rapidez a través de la misma, circulando posteriormente a través de la red de discontinuidades que afectan a los materiales terciarios. Los puntos de descarga corresponden a rezumes localizados tanto en el contacto terraza-terciario, como en los tramos superiores de la unidad terciaria. Estos rezumes se localizan esencialmente en las cabeceras de movimientos activos. El aporte continuo de agua pone en marcha los procesos de dispersión e hinchamiento reduciendo considerablemente la resistencia mecánica del conjunto rocoso. Por otra parte, en caso de que la entrada de agua supere la capacidad de descarga de los rezumes, pueden darse condiciones de sobrepresión, rebajándose

los esfuerzos normales efectivos (Veder, 1981; Záruba & Mencl, 1982). Bordonau & Vilaplana (1987) señalan también la importancia de las fugas de agua de la red de abastecimiento y del alcantarillado en el desencadenamiento de deslizamientos que afectan al municipio de El Papiol en el Baix Llobregat.

6. Zonificación de riesgo por deslizamiento

Se ha llevado a cabo una zonificación del escarpe del Barrio de la Corona diferenciando tres grados de riesgo de deslizamiento (alto, medio y bajo) (Fig. 8). Se trata de una cartografía interpretativa que expresa el riesgo previsible que puede presentar cada sector en un futuro próximo, por lo que debe considerarse como un documento orientativo. Este tipo de mapas detallados son de gran utilidad en los planos urbanísticos de los municipios (Cendrero, 1988).

El criterio básico utilizado para establecer esta zonación es la presencia de elementos geomorfológicos tales como cicatrices activas, *pipes* y grietas en el terreno y en las construcciones que indiquen la inestabilidad y actividad del escarpe. En estas zonas las pendientes son elevadas y suele ser frecuente la existencia de rezumes. Estos aspectos son propios de un mapa de geomorfología aplicada o de ingeniería geológica (C.E.G.M.I.A.E.G., 1976) y como señalan (Cooke & Doornkamp, 1990), este tipo de cartografías han sido utilizadas en numerosos países para elaborar mapas de riesgo de deslizamiento. Algunos ejemplos a nivel nacional son recogidos por Romero y Borja, (1988) y Díez y Martín (1993), entre otros.

7. Consideraciones finales

De acuerdo con Crozier (1986), aunque son muchos los factores que contribuyen a que una ladera sea inestable, a la hora de determinar las causas responsables de un movimiento de ladera se puede hablar de un factor desencadenante, sin cuya actuación la ladera permanecería estable. Para este mismo autor, en el desarrollo evolutivo de un movimiento de ladera intervienen unos factores preparatorios, responsables de que la ladera sea susceptible de experimentar movimientos y unos factores desencadenantes y de control que determinan el inicio y actividad del movimiento de ladera. Si aplicamos este planteamiento a los movimientos de ladera estudiados, el factor preparatorio correspondería a la generación del escarpe como consecuencia del encajamiento y migración lateral del sistema fluvial Arba de Luesia. El factor fundamental que determina el desencadenamiento y la actividad de los movimientos de ladera sería el aporte de agua procedente de las fugas de la red de saneamiento. Podríamos hablar por tanto de una causa antrópica.

Apoyándonos en criterios geomorfológicos, en el entorno de Ejea de los Caballeros, así como en otros sectores del centro de la Depresión del Ebro, es frecuente encontrar escarpes desarrollados en litologías equivalentes a las de la Cantera de Barrio de la Corona. Estos taludes en condiciones naturales no muestran el grado de inestabilidad ni el tipo de movimientos que hemos observado en el escarpe estudiado. Estos argumentos inducen a pensar que la dinámica actual del escarpe del Barrio de la Corona no responde a la de un sistema geomórfico natural, sino que está condicionada por la actividad antrópica. Paradójicamente, estos movimientos de ladera motivados por actividades humanas representan un riesgo geológico importante por los daños que ocasionan a las edificaciones de Ejea de los Caballeros.

Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades ofrecidas por el Excmo. Ayuntamiento de Ejea de los Caballeros para la publicación de este trabajo. Algunos datos analíticos se han obtenido gracias a la colaboración de Gloria Desir y Jaume Sirvent. Asimismo, el manuscrito original ha sido mejorado gracias a las sugerencias propuestas por el Prof. Antonio Cendrero y el Dr. Jordi Corominas.

Referencias bibliográficas

- Arenas, C.** (1993): *Sedimentología y paleogeografía del Terciario del margen pirenaico y sector central de la cuenca del Ebro (zona aragonesa occidental)*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 858 p. (inédita).
- Ayala, F.; Aparicio, V. & Conconi, G.** (1988): Estudio de inestabilidades en los acantilados yesíferos de la ribera de Navarra. *II Simposio sobre taludes y laderas inestables*, Andorra la Vella, 657-668.
- Benito, G.** (1989): *Geomorfología de la cuenca baja del río Gállego*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 764 p. (inédita).
- Bordonau, J. & Vilapalana J.M.** (1987): Movimientos de masa, actividad antrópica y riesgo geológico: El Papiol (Baix Llobregat, Catalunya), un ejemplo. *III Reunión Nacional Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Valencia, 1003-1019.
- Carson, M.A.** (1971): *The Mechanics of Erosion*, London: Pion Limited, 174 p.
- Carson, M.A.** (1977): Angles of repose, angles of shearing resistance and angles of talus slopes. *Earth Surface and Processes*, 2, 363-380.
- Cendrero, A.** (1988): Riesgos geológicos, ordenación del territorio y protección del medio ambiente. En Ayala, F.J.; Durán, J.J. & Peinado, T. (coords.): *Riesgos Geológicos*, Instituto Geológico y Minero de España, 327-333.
- Commission on Engineering Geological Maps of the International Association of Engineering Geology** (1976): *Engineering geological maps*. Earth Sciences, 15. The Unesco Press, 79 p.
- Cooke, R.U. & Doornkamp, J.C.** (1990): *Geomorphology in environmental management*, Oxford: Clarendon Press, 410 p.
- Corominas, J.** (1989a): Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. En Corominas, J. (ed.): *Estabilidad de taludes y laderas naturales*, Monografía S.E.G. 3, 1-30.
- Corominas, J.** (1989b): Litologías inestables. En Corominas, J. (ed.): *Estabilidad de taludes y laderas naturales*, Monografía S.E.G. 3, 81-96.
- Crozier, M.J.** (1986): *Landslides: causes, consequences and environment*, London: Croom Helm, 252 p.
- Díez, A. & Martín, J. F.** (1993): Fenómenos gravitacionales en el entorno de la ciudad de Segovia: análisis de riesgos y aplicación a la ordenación territorial. *V Reunión Nacional Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Murcia, 681-692.
- Faci, E.; Rodríguez-Avial, J.I. & Jugo, J.** (1988 a): Estabilización y establecimiento de medidas preventivas en un talud rocoso en Azagra (Navarra). *II Simposio sobre taludes y laderas inestables*, Andorra la Vella, 485-496.
- Faci, E.; Rodríguez-Avial, J.I. & Jugo, J.** (1988 b): Estabilización y medidas correctoras del talud rocoso "Las Tres Marías" en Falces (Navarra). *II Simposio sobre taludes y laderas inestables*, Andorra la Vella, 497-511.
- Ferrer, M.** (1988): Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas. En Ayala, F.J.; Durán, J.J. & Peinado, T. (coords.): *Riesgos Geológicos*. Instituto Geológico y Minero de España, 175-192.
- Gracia, J.** (1985): *Geomorfología de las Bardenas orientales*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Zaragoza, 172 p. (inédita).
- Gutiérrez, F.; Arauzo, T. & Desir, G.** (1994): Deslizamientos en el escarpe en yesos de Alfajarín. *Cuaternario y Geomorfología*, 8 (1-2), 57-68.
- Hansen, M. J.** (1984): Strategies for classification of landslides. En Brunnsden, D. & Prior, D.B. (eds.): *Slope Instability*, Chichester: Wiley & Sons, 1-26.
- Hilbert, F.** (1981): Chemistry of landslides in silt and clay soils. En VEDER, CH. (ed): *Landslides and their stabilitation*. New York: Springer-Verlag, 181-213.
- Leránóz, B.** (1993): *Geomorfología y geología ambiental de la Rivera de Navarra*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 521 p. (inédita).
- Lloret, A.** (1989): Propiedades y ensayos de suelos y rocas. En Corominas, J. (ed.): *Estabilidad de taludes y laderas naturales*, Monografía S.E.G. 3, 31-79.

- López, C.; Ruíz, J. & Riera M.** (1988): Análisis del movimiento de bloques y optimización de las posibilidades de protección. *II Simposio sobre taludes y laderas inestables*, Andorra la Vella, 269-281.
- Marshall, A. F. & Workman, J.P.** (1977): Identification of dispersive clays in the Texas Gulf Coast Area. En: Sherard, J. L. & Decker, R. S. (eds.): *Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 623, 274-286.
- Pellicer, F.; Echeverría, M.T. e Ibáñez, M.J.** (1984): Procesos actuales en el escarpe de Yesos de Remolinos. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, X (1-2), 159-168.
- Pierson, T. C.** (1983): Soil pipes and slope stability. *Quarterly Journal of Engineering Geology London*, 16, 1-11.
- Piteau, D.R. & Peckover, F.L.** (1978): Engineering of rock slopes. En Schuster, R.L. & Krizek, R.J. (eds.): *Landslides, Analysis and Control*. Washington: Transportation Research Board special report 176, 192-228.
- Riba, O.; Puigdefábregas, C.; Soler, M.; Quirantes, J. & Martí, C.** (1981): *Mapa Geológico de España*, E. 1:200.000, Tudela nº 22. Instituto Geológico y Minero de España, 16 p.
- Richards, L. A.** (1954): *Saline and alkali soils*. U. S. D. A. Agric. Handbook, 60, 160 p.
- Romero, J. M. & Borja, F.** (1988): Problemas de vertientes en la cornisa y laderas del Aljarafe (Sevilla): cartografía de procesos y riesgos geomorfológicos. *II Simposio sobre taludes y laderas inestables*, Andorra la Vella, 613-626.
- Salinas, J.L.** (1988): Riesgos ligados a arcillas expansivas. En Ayala, F.J.; Durán, J.J. & Peinado, T. (coords.): *Riesgos Geológicos*. Instituto Geológico y Minero de España, 295-304.
- Sassa, K.** (1989): Geotechnical classification of landslides. *Landslide News*, June, 21-24.
- Selby, M.J.** (1987): Rock Slopes. En Andreson, M.G. & Richards, K.S. (eds.): *Slope Stability*. Chichester: Wiley & Sons, 475-504.
- Selby, M.J.** (1993): *Hillslope Materials and Processes*. Oxford University Press, 451 p.
- Sherard, J. L. & Decker R. S.** (1977): *Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 623.
- Varnes, D.J.** (1978): Slope movement types and processes. En Schuster, R.L. & Krizek, R.J. (eds.): *Landslides, Analysis and Control*. Washington: Transportation Research Board special report 176, 11-33.
- Veder, Ch.** (1981): *Landslides and their stabilization*. New York: Springer-Verlag, 247 p.
- Volk, G. M.** (1937): *Proceedings*. Soil Science Society of America, 2, 561 p.
- Wallkey, A. & Black, I. A.** (1934): An examination of the Degtjarett method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Whalley, W. B.** (1984): Rockfalls. En Brunnsden, D. & Prior, D.B. (eds.): *Slope Instability*, Chichester: Wiley & Sons, 217-256.
- Záruba, Q. & Mencl, V.** (1982): *Landslides and their control*, Amsterdam: Elsevier, 324 p.