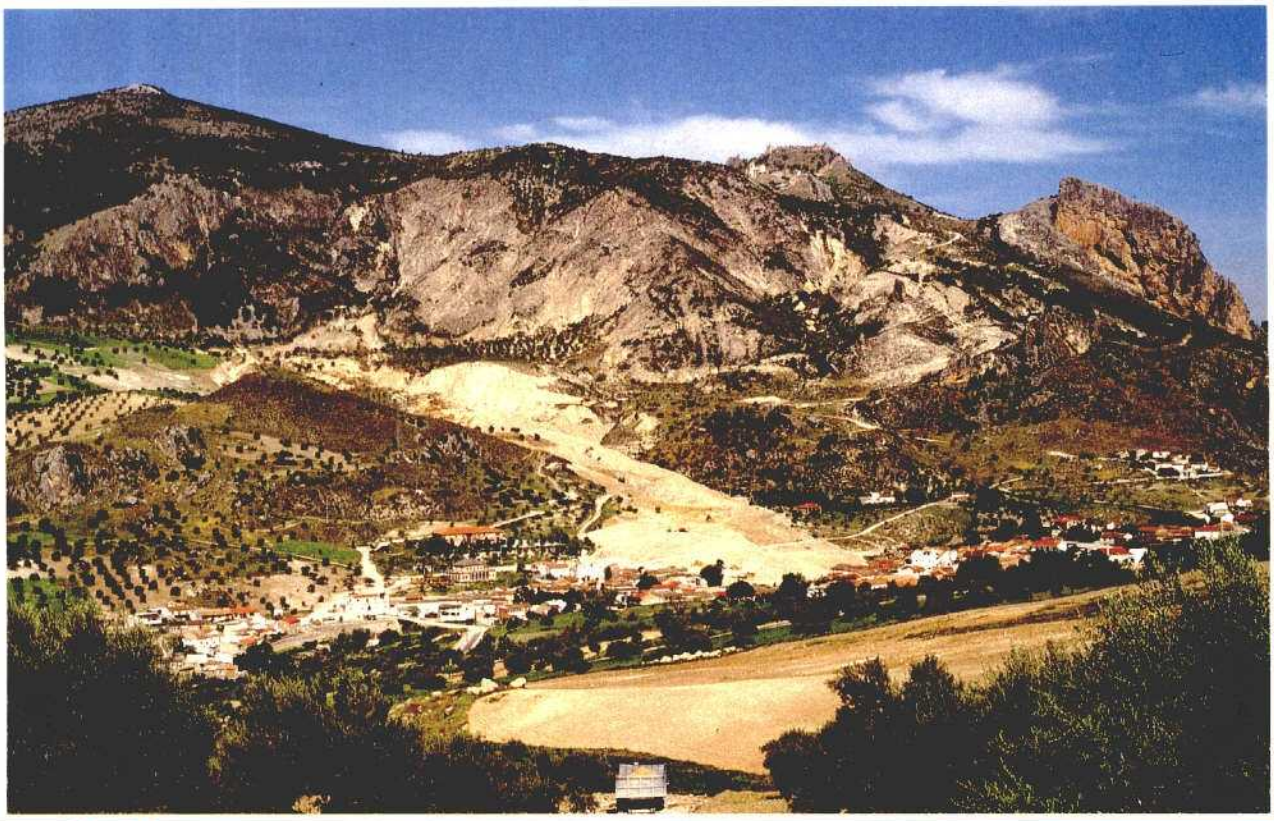
EL DESLIZAMIENTO DE LOS OLIVARES (GRANADA) DE ABRIL DE 1986



J.M. RODRIGUEZ ORTIZ
C. PRIETO ALCOLEA
F.J. AYALA CARCEDO
J.J. DURAN VALSERO

The Olivares mudflow of April 1986 (English summary)

SERIE: GEOLOGIA AMBIENTAL

INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

966

00966

EL DESLIZAMIENTO DE LOS OLIVARES (GRANADA) DE ABRIL DE 1986

INSTITUTO GEOLOGICO
Y MINERO DE ESPAÑA
Serie: Geología Ambiental.

00966

El presente trabajo ha sido realizado por EQUIPO DE ASISTENCIA TECNICA, S.A. en colaboración con la Dirección General de Aguas Subterráneas y Geotecnia del Instituto Geológico y Minero de España.

Han Intervenido:

JOSE Mª RODRIGUEZ ORTIZ
Dr. Ingeniero de Caminos, E.A.T., S.A.

CARLOS PRIETO ALCOLEA
Geólogo, E.A.T., S.A.

Supervisión y Dirección I.G.M.E. :

FRANCISCO AYALA CARCEDO
Ingeniero de Minas

JUAN JOSE DURAN VALSERO
Geólogo

Las fotografías que acompañan al trabajo han sido realizadas por los señores: R. Ortiz, Valverde, Durán y Martínez Simón.

SUMMARY

This pamphlet is an abridged version of several reports issued by the authors following the mudflow occurred in April 1986 at Los Olivares, a small village in the mountain range near Granada (South Spain), located on the banks of the Velillos river.

The mudflow started on April 12th, increasing its velocity downslope up to a maximum of about 1 m/hour on April 19th. Thereafter the movement rate decreased until an apparent stopping a week later.

The mud originated in a valley with an elongated bowl shape (perhaps a "cirque" of glacial origin) hanging at about 70 m over the riverbed. Disruption of the natural drainage network, following exploitation of a dolomite quarry, resulted in generalized rotational slides, sheet slides and subsidence of the Cretacic marls. The displaced saturated clay flowed towards a natural sill closing the valley, overtopped it and slid downslope as a viscous mass until reaching the river at the toe. Near the base a secondary lobe appeared following a lateral change in slope. This lobe approached houses of the village and caused minor cracks.

Most of the slide developed on unoccupied ground (already qualified by the native people as "dangerous") without damaging housing or properties.

As the tongue approached the Velillos river, the danger of damming the riverbed, with a potential downstream flooding following impoundment, became apparent. Efforts to place corrugated steel conduits allowing continuous water passage were uneffective. Only the digging out of important earth volumes (up to 5,000 tons a day) precluded the build up of the barrier.

Important features of the slide are:

Mean slope	:	*16% (9°)*
Thickness of the mud sheet	:	*5 to 8 m*
Volume	:	*130,000 m³*
Width at the upper sill	:	*60 m*
Width at the tongue	:	*150 m*
Length of the flow path	:	*380 m*

The marly clays involved in the mudflow were of mean plasticity ($w_L = 33$-60%, $PI = 15$-32%), with a carbonate content between 34 and 64 percent. Mineralogical analyses showed a percentage of montmorillonitic clays from 14 to 29%.

The performed backanalyses have shown that the mobilized shear strenghth of the mud at the peak of the movement was of the order of $c' = 10$ KN/m² and $\phi' = 20°$, which assure a safety factor above $F = 1,10$ even for the worse groundwater conditions in the near future.

It is interesting to point out that recent borings have shown that the present slope was already covered by ancient mudflows of an age not yet determined but presumibly of the last thousand years.

Vista general de Los Olivares en la margen opuesta el deslizamiento.

PRESENTACION

La presente publicación tiene un carácter divulgativo e intenta ofrecer una síntesis de los numerosos trabajos realizados para analizar los factores que concurrieron en el espectacular deslizamiento que afectó a la localidad granadina de Los Olivares en Abril de 1986.

Se han evitado complejas disquisiciones técnicas en favor de una mayor sencillez y claridad, resumiendo las conclusiones más importantes.

Con este trabajo el I.G.M.E. pretende suministrar a las Autoridades Locales, Técnicos relacionados con la Ordenación del Territorio, Organizaciones de Protección Civil, etc., un ejemplo singular de aplicación de una metodología de estudio y seguimiento de problemas de inestabilidad.

Estos problemas son bastante frecuentes en nuestro país y producen cuantiosos daños en edificaciones y obras públicas. Sin embargo, las experiencias rara vez se transmiten de unos lugares a otros y con gran frecuencia las actuaciones distan mucho de tener una justificación técnica adecuada.

Esperemos que el caso Olivares constituya una alerta y un ejemplo útil para el tratamiento de otros problemas de estabilidad de laderas.

INDICE

PAG.

1. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES 13
2. GEOLOGIA DE LA ZONA 21
3. TIPOLOGIA Y CARACTERISTICAS DEL DESLIZAMIENTO 27
4. ANALISIS GEOTECNICO 33
5. OTROS ESTUDIOS 51
6. CONDICIONES ACTUALES DE ESTABILIDAD Y ACTUACIONES PROPUESTAS 53
7. AGRADECIMIENTOS 57

1. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

1.1. Situación

La localidad granadina de Los Olivares pertenece al término municipal de Moclín (Fig. 1) y se sitúa a unos 23 Km al noroeste de la capital provincial. Tiene unos 1.000 habitantes que en parte se dedican al cultivo de los olivos, aunque abundan los desempleados y la zona es de las más deprimidas de la provincia.

Inicialmente el pueblo ocupaba la margen izquierda del río Velillos, pero con el desarrollo derivado del retorno de los emigrantes se construyó en la otra margen el denominado Barrio del Arenal, que es el que ha resultado más afectado por los fenómenos aquí reseñados (Fig. 2).

1.2. Pequeña historia del deslizamiento de abril de 1986

El deslizamiento que se comenta se manifestó de forma clara el 12 de abril de 1986 en la ladera que termina en la margen derecha del río Velillos y en cuya base existen diversas edificaciones correspondientes al Barrio del Arenal.

La toponimia de la zona resulta muy expresiva, por cuanto la cabecera del deslizamiento

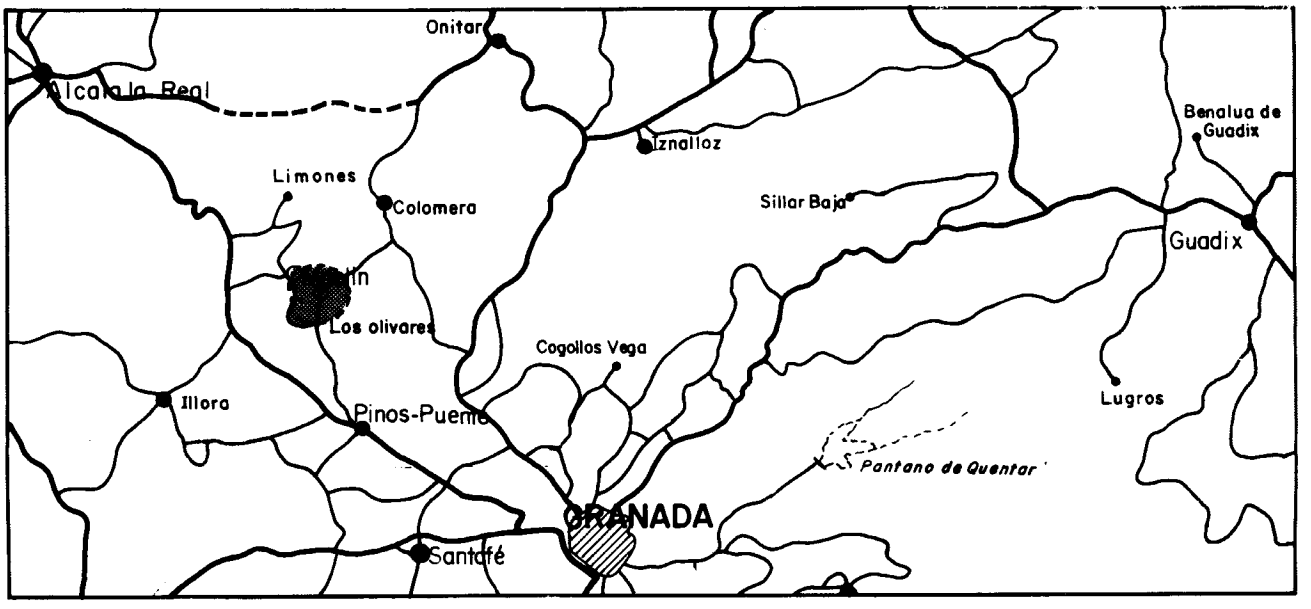


Fig. 1.— Plano de situación de Los Olivares.

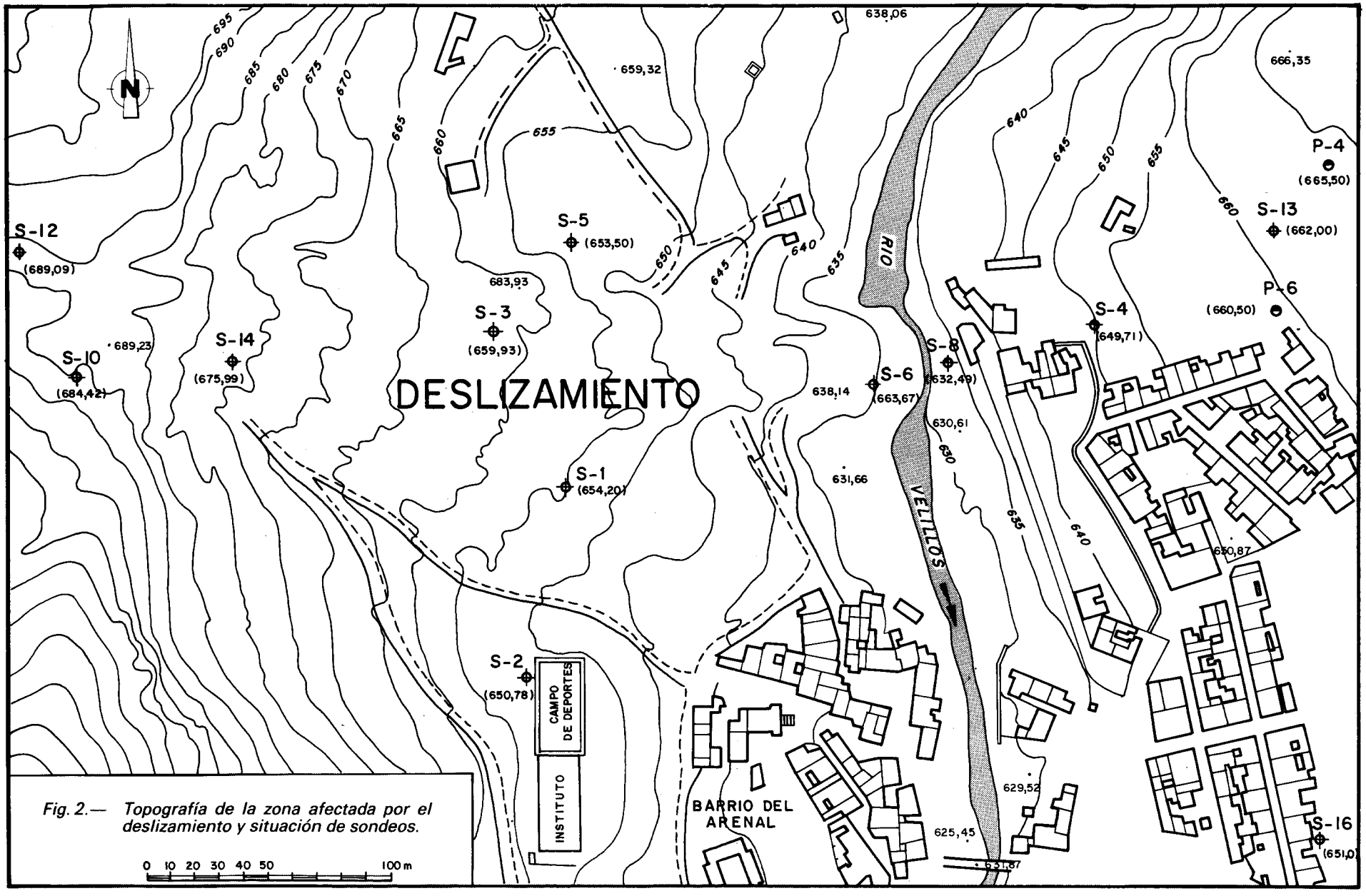


Fig. 2.— Topografía de la zona afectada por el deslizamiento y situación de sondeos.

se denomina "Los Bujeos" y la ladera por la cual se encauzó el mismo recibe el nombre de "Barranco del Hundidero". Aunque no existen datos históricos, todo ello permite suponer que a distancia de algunos centenares de años sucedieron fenómenos semejantes a los actuales, cuando Los Olivares ya era una zona habitada.

En los *Estudios de Movimientos del Terreno* realizados por el M.O.P.U. a finales de los años 70 se marcaban en la zona numerosos deslizamientos activos y potenciales. Las fotos aéreas ya muestran una zona movida bastante semejante a la actual (Figs. 3 y 4).

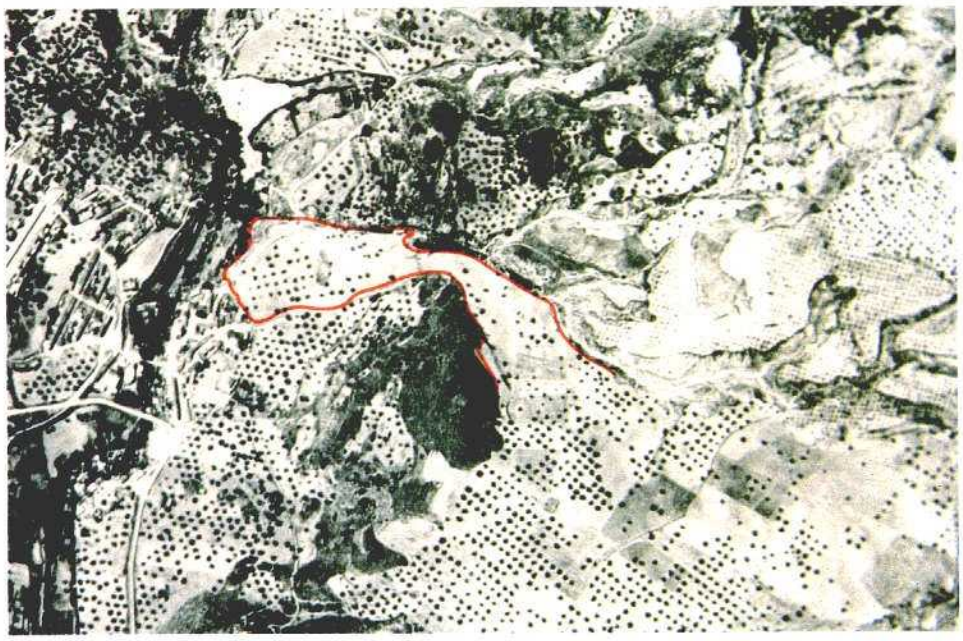


Fig. 3.— Los Olivares, en una fotografía aérea anterior a 1960.

Fig. 4.— Fotografía tomada durante el deslizamiento.

Durante el mes de marzo y primera semana de abril de 1986 ya se habían detectado algunos movimientos en los taludes de la parte alta de la ladera y algunas ondulaciones del terreno en el paraje conocido como Las Angosturas, un estrechamiento en la cabecera del Barranco del Hundidero en cuyas inmediaciones existe una cantera de extracción de áridos dolomíticos.

Es de lamentar que en esta primera fase no se hicieran observaciones detalladas que habrían servido de base para la interpretación de los fenómenos posteriores. Parece, no obstante, que en la parte alta se generaron fuertes empujes de agua y arcilla que dieron lugar a roturas en la base del talud, desplazando y levantando la carretera que cruzaba el mismo.

El sábado 13 de abril, el deslizamiento ya se manifestó en forma de lengua de barro, rebasando Las Angosturas y descendiendo por la ladera a velocidad apreciable (≃ 1 m/h). En la fig. 5 se muestra una secuencia cronológica del contorno de la masa deslizada.

Desde los primeros momentos las autoridades locales, la Diputación de Granada, la Dirección General de Protección Civil, la Confederación Hidrográfica del Sur y otros organismos prestaron la máxima atención al problema, destacando equipos técnicos para controlar el avance de la lengua de barro y adoptar las decisiones oportunas. A partir de la primera semana se personaron en la zona técnicos especializados del Instituto Geológico y Minero de España, Servicio Geológico de Obras Públicas, Laboratorio de Geotecnia del CEDEX-MOPU, Universidad de Granada, Junta de Andalucía, etc., algunos de los cuales pasaron a constituir una Comisión de Seguimiento, asesora del Gobernador Civil.

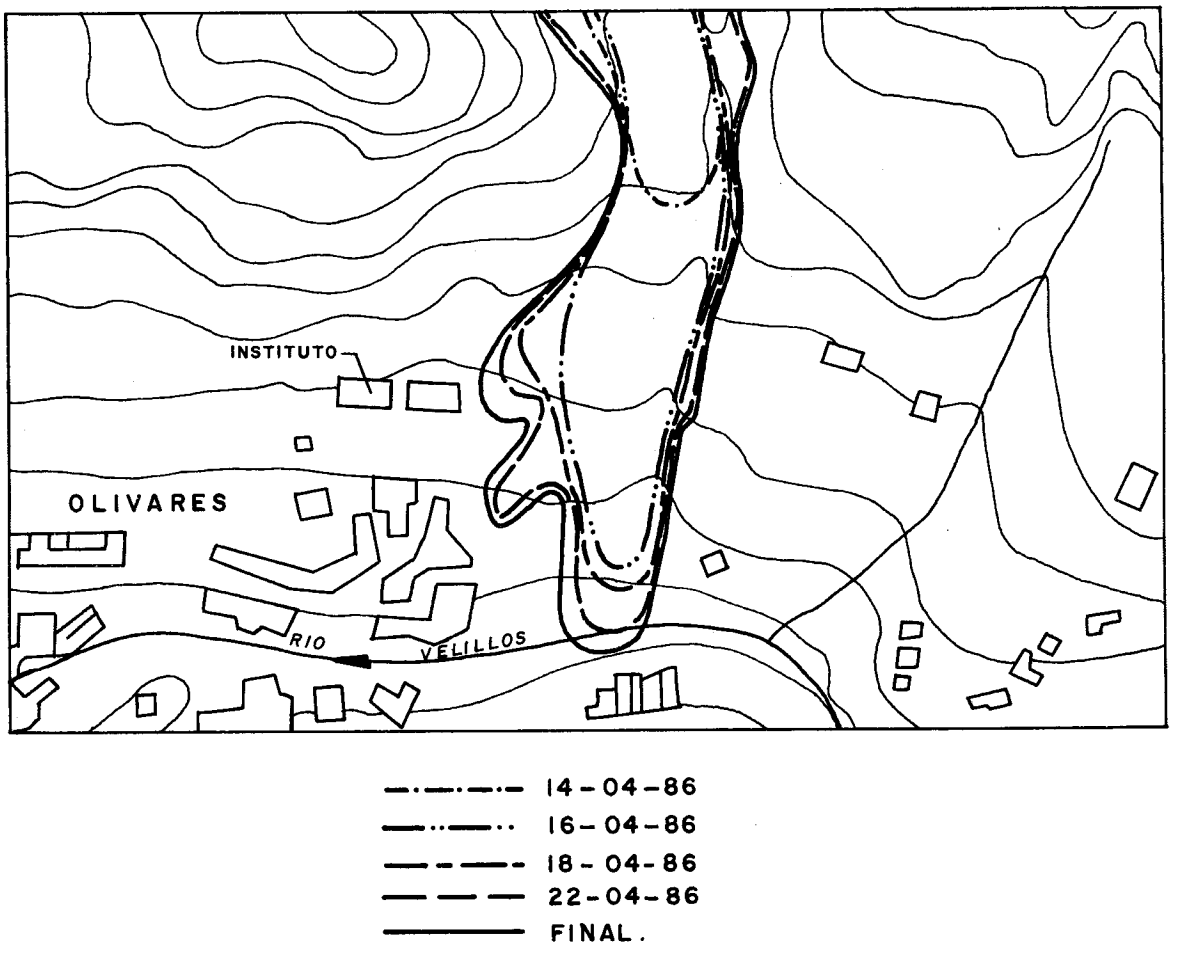


Fig. 5.— Posiciones sucesivas de la lengua deslizante. (Según J.J. Durán).

Es necesario reconocer, sin embargo, que una acumulación excesiva de opiniones no siempre produce los mejores resultados, siendo deseable que exista un único técnico, coordinador y responsable de todas las actuaciones. Desgraciadamente la autoridad de este técnico no siempre es reconocida por organismos que operan en campos paralelos y que se consideran a sí mismos de la máxima competencia.

Hecho este inciso, sigamos con la descripción de los hechos.

El jueves 17 la lengua de tierra ya se había aproximado peligrosamente a las casas del pueblo y en particular al Instituto de Enseñanza Media.

Por supuesto ya se habían suspendido las clases y Protección Civil consideró oportuno proceder al desalojo de las viviendas amenazadas, llegando a desocuparse setenta casas.

Además de los problemas de realojamiento, esta operación obligó a los técnicos de la Diputación a hacer una valoración aproximada de estas viviendas para que en el hipotético caso de que fueran llevadas por el barro, sus propietarios, que en su mayoría no las tenían escrituradas, pudieran reclamar algún tipo de indemnización.

A lo largo de la tarde del 18 de abril, la lengua, que en principio se desplazaba en una única dirección, se conformó con mayor nitidez en dos frentes: uno que avanzaba en dirección al río y otro que se desplazaba en dirección al barrio bajo del pueblo, la zona donde estaban las escuelas, la iglesia y el grueso de las viviendas desalojadas.

Por otra parte, la lengua había dejado aislados algunos barrios de la margen derecha, planteándose el tendido por parte del Ejército de un puente de cables y tablas.

El 19 de abril el lóbulo lateral de la lengua alcanzaba las casas extremas y producía algunas grietas en las mismas (Fig. 6). Debe señalarse, sin embargo, que la altura de barro era muy pequeña en esta zona y las viviendas tenían una construcción muy deficiente.

El principal problema se planteaba no obstante en el frente del lóbulo principal.

Desde el primer momento se vio que era imposible construir una barrera que frenara la imponente masa de barro que descendía por la ladera. La resistencia de ese hipotético muro habría sido de varios miles de toneladas por metro y, por otro lado, el tiempo para construirlo resultaba incompatible con la velocidad del deslizamiento.

Fig. 6.— Llegada del flujo de arcilla a las primeras casas.

Sin embargo, también quedó claro desde un principio el enorme riesgo que suponía el corte del río Velillos por la lengua de tierra que el día 18 de abril ya había llegado al borde del cauce.

En efecto, cuando una masa deslizante ocupa un cauce, el agua queda embalsada temporalmente contra la "presa" así creada, pero, al ser ésta muy floja y erosionable, se rompe al alcanzar una cierta altura de agua, abriéndose una brecha por donde escapa una ola de agua y barro que puede producir graves daños aguas aguas abajo.

Para evitar estos problemas se pensó en principio en recortar la lengua de tierra en su base, impidiendo que llegara al cauce.

Se daba la afortunada circunstancia de que en la cercana Presa de Colomera, cuya construcción estaba parada temporalmente, la empresa constructora mantenía un importante parque de maquinaria.

Sin embargo, la maquinaria disponible (2 excavadoras, 1 retro y 2 bulldozers, así como 17 volquetes de transporte) no era capaz de extraer el importante volumen de tierras descendente (*) y, por otra parte, esta medida contribuía a aumentar la inestabilidad, ya que el frente de la lengua, por su mayor recorrido y desecación, constituía un muro natural que, aunque insuficiente para impedir el corrimiento, contribuía a frenarlo.

Como alternativa se pensó colocar dos conductos de chapa metálica de 20 m de longitud y 1 m de diámetro, como desagües de la eventual presa. (Fig. 7).

Sin embargo, estos tubos colocados el 20 de abril, sólo resistieron dos horas, quedando destruidos bajo el empuje de la lengua de tierra.

(*) En los días 19 a 21 de abril se llegaron a extraer 5.000 t/día.

Se llegó así a formar una presa de unos 3 m de altura sobre el cauce, si bien con auxilio de las excavadoras se mantuvo el paso del agua (Fig. 8). La alternativa de fluidificar los lodos mediante agua a presión para facilitar su arrastre por las aguas no llegó a ponerse en práctica.

Debemos señalar que las actuaciones en el cauce correspondieron a la Confederación Hidrográfica del Sur, del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

En todo este tiempo el movimiento había avanzado de forma inexorable, alcanzándose el domingo 20 de abril velocidades de 1,5 m/h.

La observación de la lengua de tierra había indicado una acumulación de agua importante en la parte superior derecha de la misma, en una zona donde se abrían grietas de tracción al ir cesando los aportes fluidos desde el circo superior.

Se pensó que una eventual lluvia, muy probable según las predicciones meteorológicas, podía cargar de aguas dichas grietas, actuando de forma desfavorable sobre el deslizamiento.

Para evitar tal fenómeno se abrió una zanja de drenaje, con salida al río, en la que se colocaron posteriormente unos tubos.

El día 21 se pudo apreciar una importante disminución de velocidad de la masa deslizante, a valores de 0,5 m/h. La tendencia se confirmó el día siguiente con 0,3 m/h y 0,10 m/h el día 23 de abril.

En días sucesivos se llegó a una estabilización casi completa (para la precisión de los controles de medida) y desde entonces no se han apreciado síntomas de reactivación. Cabe señalar que el día 25 de abril cayeron 14 l/m² de lluvia y el 26 del mismo mes se produjo un terremoto de magnitud 4,3 en la vega granadina.

Fig. 7.— Extremo de la lengua ocupando el río Velillos. Obsérvese la carretera desplazada. En primer término los tubos metálicos con los que se intentó mantener el paso del río.

Fig. 8.— La brecha abierta en la lengua por las excavadoras para permitir el paso del río Velillos.

2. GEOLOGIA DE LA ZONA

2.1. Encuadre geológico

El casco urbano de Olivares y su entorno se sitúan a orilla del río Velillos, en la vertiente sur de la Sierra de Moclín; geológicamente este lugar corresponde al borde meridional del denominado Manto de Moclín y la situación del pueblo queda muy cerca del contacto con los materiales postectónicos que rellenan la Depresión de Granada.

El *Manto de Corrimiento de Moclín* es una gran estructura tectónica, cuyos materiales han sido desplazados varios kilómetros hacia el noroeste desde su posición original al sur de Sierra Elvira, hasta quedar detenidos en la zona de Limones. El paso por Los Olivares queda caracterizado por un gran farallón de materiales calizos de edad jurásica (Lías) que enmarca al pueblo por el norte y noroeste del mismo (Fig. 9).

Dada la estructura tectónica de manto de corrimiento, los materiales calizos jurásicos mencionados aparecen encima de unas margas y margo-calizas de edad cretácica (y por tanto, más modernos). El contacto entre las dos formaciones se distingue al noreste del casco urbano. Hacia el norte del mismo, estas margas y margo-calizas quedan recubiertas por arcillas y conglomerados de edad probablemente plio-pleistocénica y que corresponden, en su génesis, a mantos de arroyada cuyos materiales provienen de la Sierra. Dichos depósitos impiden ver el contacto Jurásico-Cretácico, aunque probablemente se trate, en éste área, de un contacto por falla normal, con hundimiento importante del labio meridional.

En el área del casco urbano, así como hacia el este, sur y oeste del mismo, el substrato está formado por los depósitos cretácicos mencionados, por encima de los cuales se han depositado arcillas y conglomerados de naturaleza calcárea, correspondientes a conos de deyección y mantos de arroyada.

Sobresaliendo de entre estos materiales y fundamentalmente en la ladera oeste del pueblo (margen derecha del río Velillos), se pueden distinguir unos afloramientos rocosos de naturaleza carbonatada de notable extensión relativa. Son materiales jurásicos correspondientes a retazos del manto de Moclín.

Sobre esta disposición estructural se depositó la serie terciaria (neógena) que rellena la depresión de Granada, estando representada en este área por una masa de arcillitas y limolitas con intercalaciones conglomeráticas, cuyos espesores aumentan rápidamente hacia el centro de la depresión granadina, al ser ésta una zona fuertemente subsidente. Esta formación es reconocible a un kilómetro, al sur del pueblo en la margen izquierda del río Velillos.

Por último, los depósitos cuaternarios, aparte de los conos de deyección y los mantos de arroyada mencionados, están representados por los aluviones del río Velillos, así como pequeños retazos de niveles de terraza, litoló-

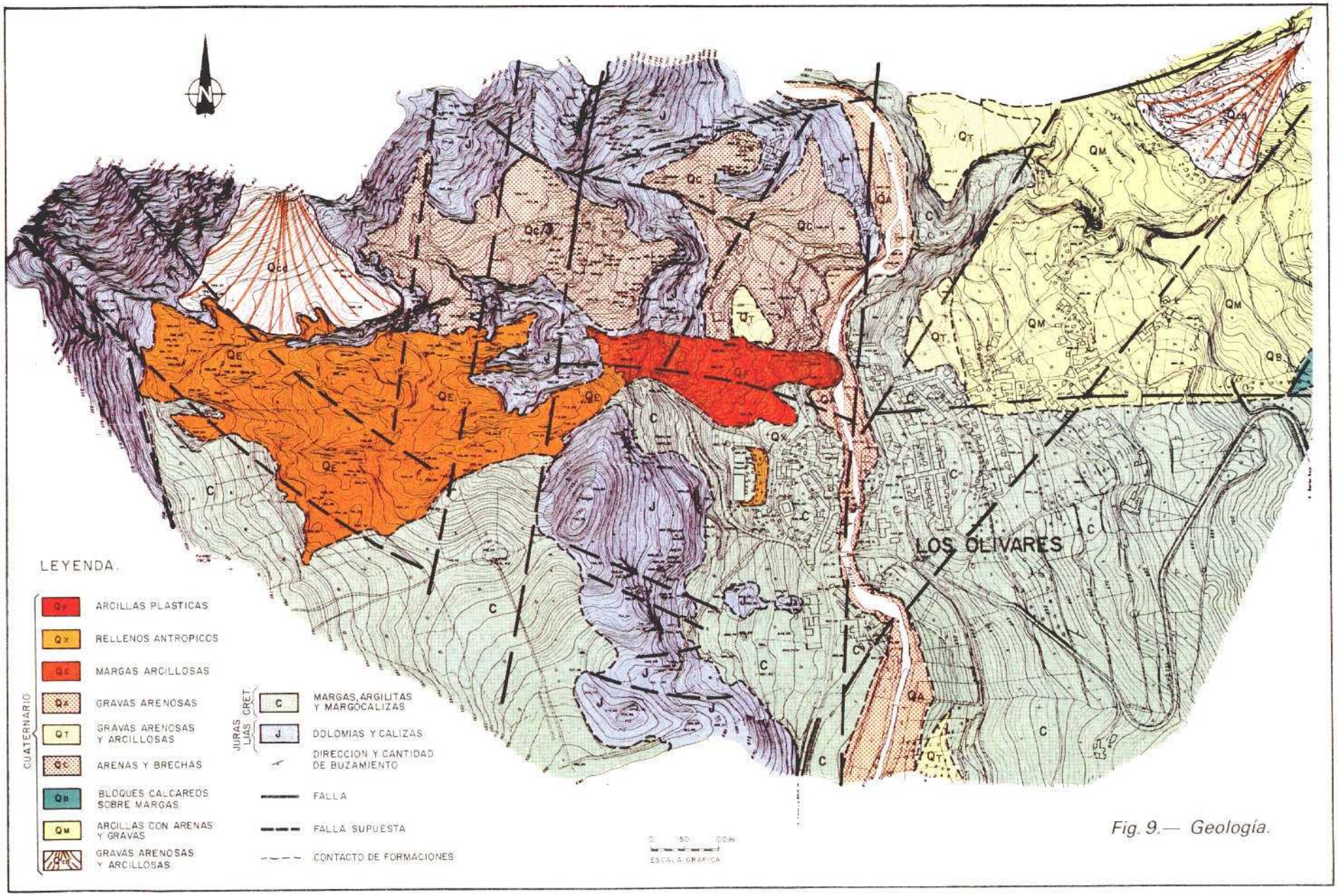
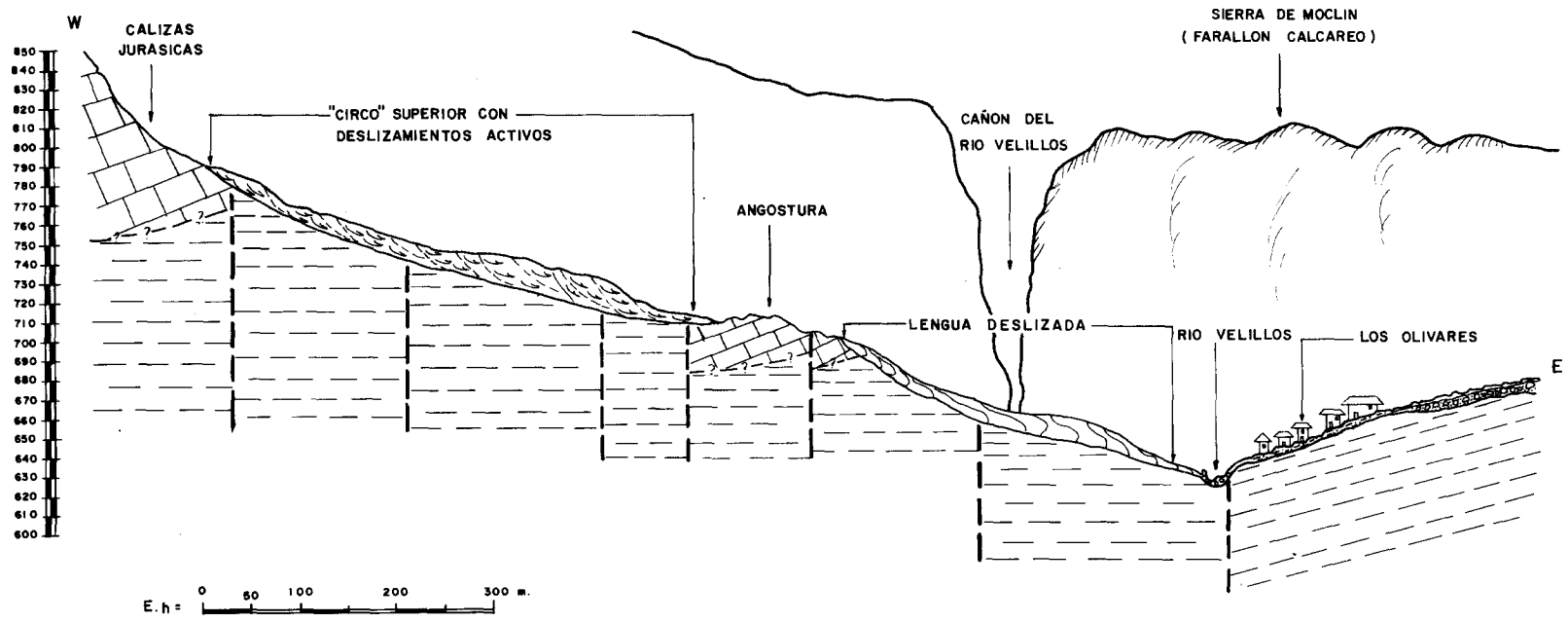


Fig. 9.— Geología.



LEYENDA

Cuaternario	Arcillas (lengua deslizada)
	Arcillas arenosas (suelos de alteracion)
	Margas y arcillas (deslizamientos activos)
	Gravas y arenas (Aluvial)
	Gravas, arenas y arcillas (mantos de arroyada)
Cretacico	Margas y margocalizas.
Jurasico	Calizas y/o dolomias
	Falla probable o deducida

Fig. 10.— Corte geológico esquemático. (Según J. Rubio Amo).

gicamente compuestas por gravas redondeadas fundamentalmente calcáreas con matriz arenosa, limosa y progresivamente más arcillosa a medida que nos desplazamos hacia el sur.

Por otra parte, existen depósitos coluviales y de pie de monte poco transportados, constituidos por gravas angulosas calcáreas con matriz arcillosa, así como suelos residuales de alteración, de naturaleza principalmente margosa, dispuestos fundamentalmente a la formación cretácica.

En la fig. 10 se da un corte geológico esquemático del valle de Los Olivares, incluyendo la zona deslizada.

2.2. Geomorfología

Al llegar al pueblo de Los Olivares, lo primero que llama la atención es el gran farallón calizo que se alza por el norte de aquél constituyendo una importante barrera a las comunicaciones viarias. El río Velillos en su proceso erosivo, ha entallado un cañón en estos materiales, en una longitud de 2,5 Km, con cantiles pronunciados en ambas márgenes.

Al este del pueblo, se distingue una ladera de pendiente longitudinal no muy pronunciada y abancalada con algunas lomas redondeadas en las partes altas, mientras por el oeste destaca un conjunto de afloramientos calizos, aislados entre la formación margosa. Estos afloramientos constituyen unos contrafuertes que dan lugar a cerros abruptos de aspecto inaccesible con cantiles de importante desnivel (20 a 40 m). Entre estos cerros se dispone, no obstante, un paso de unos 60 m de anchura (La Angostura) a través del cual se deslizó la colada de barro ahora estudiada.

Aguas arriba de La Angostura se dispone una cuenca de recepción de naturaleza margosa y arcillosa, con abundantes deslizamientos activos y que ha alimentado con materiales removilizables el proceso dinámico de la ladera (ver Fig. 12 más adelante).

Dicha Angostura es muy posible que a lo largo del Cuaternario llegara a taparse, debido a la existencia de numerosos bloques desprendidos que cerrarían el paso tanto al material movilizable como al agua, constituyendo, por tanto, el nivel de base local de la cuenca de recepción superior. Posteriormente este umbral se rompería, quizá bruscamente, dando origen a un deslizamiento importante. Este proceso natural ha podido originarse en numerosas ocasiones durante todo el Cuaternario.

2.3. Hidrogeología

Los materiales margosos y calco-margosos del Cretácico, deben considerarse como impermeables. En cambio, los depósitos carbonatados jurásicos son permeables por karstificación y fisuración pudiendo contener en su seno acuíferos de volumen apreciable, con una elevada transmisividad y permeabilidad.

Estos depósitos, cuyo exutorio natural era hacia la zona del "circo" proporcionaron el agua que, al irse acumulando en períodos sucesivos con escasas posibilidades de drenaje, rebasó la capacidad de almacenamiento del mismo y escapó violentamente arrastrando en forma de flujo viscoso los materiales cretácicos.

En la antigua vaguada donde se originó el flujo de arcilla, existía, según algunas informaciones, un manantial con caudales de 1 l/sg (ver Fig. 11). Esta surgencia podría explicarse por la intersección de un nivel freático alto con la superficie del terreno, ya que este puede considerarse de una permeabilidad muy baja ($K = 10^{-8}$ cm/sg) y, por tanto, en época de estiaje donde los niveles freáticos se rebajan, daría lugar a que se secara el manantial.

En el Apartado 4.5. se analizan las condiciones hidrogeológicas de la zona deslizada.

Por otra parte el río Velillos es un acuífero libre, cuyo caudal procede fundamentalmente, del drenaje interno de las formaciones carbonatadas del Manto de Moclín que vierten al propio río.

Fig. 11.— Surgencia próxima a la Angostura, alimentada desde el circo superior. Obsérvense los bloques arrastrados por el flanco de la lengua.

3. TIPOLOGIA Y CARACTERISTICAS DEL DESLIZAMIENTO

3.1. Tipología

Aunque no existe una clasificación de aceptación general respecto a la tipología de los deslizamientos, el producido en Los Olivares podría caracterizarse como una colada de arcilla o "mudflow", si bien con una velocidad más elevada que las de los flujos viscosos citados en la literatura para casos similares.

La colada de arcilla constituye el derrame de una masa fluida formada en una cuenca elevada de la cual escapa a través de un rebosadero natural. Se pueden diferenciar por tanto, las siguientes zonas (Fig. 12):

a) La *zona de alimentación,* contituida por el gran "circo" margoso existente por encima de la cota 700 aproximadamente y que se extiende en una longitud de unos 830 m y un ancho máximo de unos 330 m.

b) El *umbral* de escape de los materiales movilizados en la zona anterior. Es la zona más baja de la misma, a la cota ≃ 680 y está configurada por materiales dolomíticos y margosos relativamente consolidados. Coincide con el paraje denominado Las Angosturas. Su ancho es del orden de 60-70 m.

c) La *"lengua"* o masa deslizada sobre la ladera. A su vez esta lengua presentaba un frente curvo y convexo, y su ancho iba en aumento desde el umbral anterior. En la

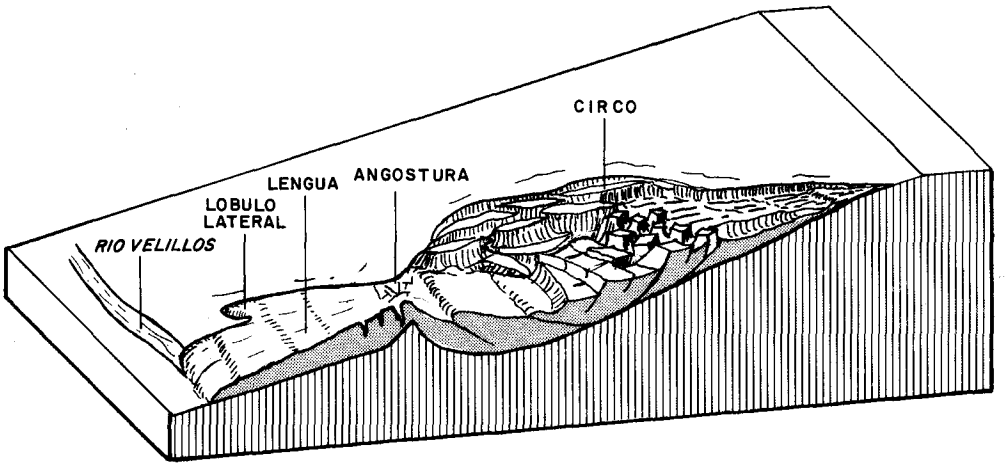


Fig. 12.— Esquema morfológico del deslizamiento.

parte final el frente se dividió en dos lóbulos, llegando el de la parte izquierda a aproximarse al Instituto de Enseñanza Media y a algunas casas del pueblo. El otro lóbulo llegó a avanzar sobre el anterior, alcanzando el río Velillos.

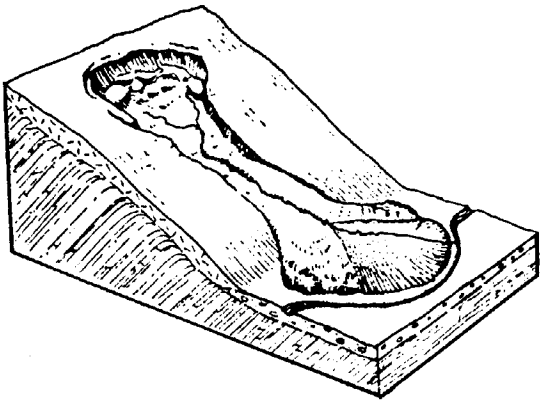
Esta morfología es muy típica de flujos viscosos, no sólo de suelos, sino también de glaciares, lavas, etc.

En la fig. 13 se muestran ejemplos de deslizamientos semejantes.

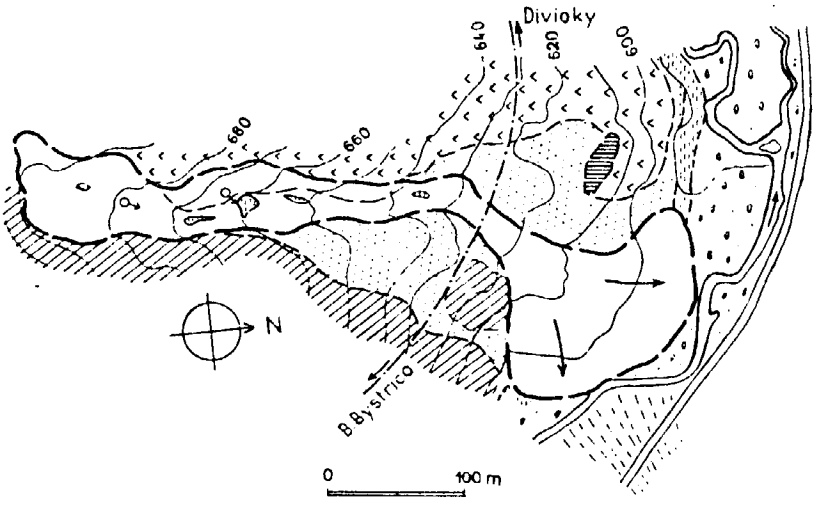
Las características morfométricas generales de la lengua son del orden siguiente:

Pendiente media	: 16% (9°)
Potencia de la masa deslizante	: ≃ 5 a 8 m
Volumen aproximado	: 130.000 m³
Ancho en cabecera (Las Angosturas)	: 60 m
Ancho máximo en la base (río Velillos)	: 150 m

Evidentemente, las masas movidas en el "circo" superior son mucho más importantes, aunque de dificultosa evaluación.



a) Morfología típica de un flujo de arcilla.



b) Flujo de Zarnovice.

Fig. 13.— Morfología de flujos según Záruba y Mencl (1969).

3.2. Génesis y desarrollo del deslizamiento

El fenómeno puede esquematizarse en la forma siguiente (Fig. 14):

Como consecuencia de la interrupción del drenaje natural en el circo superior se produce un embalsamiento que genera fuertes empujes sobre el umbral y transmite presiones intersticiales a la base de la capa superior de arcillas depositadas sobre la ladera en un deslizamiento anterior.

Este doble efecto de empuje y saturación induce un fenómeno de relajación y fluencia lenta (probablemente iniciado con las lluvias de primavera) hasta producirse la movilización del manto superior de arcilla, desplazando la carretera que circula por la parte baja de la ladera.

Una vez roto el umbral la gran masa fluidificada rebosa por el umbral de cabecera con potencia apreciable y bajo los empujes de tipo hidrostático generados en la zona de alimentación. Al descender por la ladera el flujo sufre una expansión lateral al no estar confinado y, consecuentemente, disminuye su calado o potencia. Al mismo tiempo, al aumentar la superficie de base, en contacto con el terreno original, las fuerzas de resistencia tangencial van aumentando, con lo cual la masa sufre un frenado progresivo.

Por otra parte, la alimentación en cabecera no es continua y permanente, ya que al cesar las lluvias, reducirse las aportaciones a la cuenca endorreica superior y haber llegado a un cierto equilibrio las masas deslizadas en esa zona, el flujo que rebasa el umbral es cada vez menor y de menor empuje, llegando prácticamente a anularse.

En nuestro caso, este fenómeno vino favorecido por el taponamiento del umbral por grandes bloques de dolomía procedentes de la cantera, los cuales impidieron nuevas aportaciones. De hecho se produjeron grietas de despegue y discontinuidad en la zona de cabecera, quedando la masa deslizante desconectada de la zona de alimentación.

En correspondencia con este proceso, la masa arcillosa, en su descenso por la ladera, va sufriendo una ligera consolidación y drenaje, con lo que su resistencia viscosas aumenta y lógicamente cada vez fluye con más dificultad.

Cabe destacar que, en este caso, tuvieron una influencia importante en el proceso las zanjas de drenaje abiertas en el flanco izquierdo del deslizamiento el 19 de abril y que llegaron a dar 18 l/seg. Este drenaje estuvo facilitado por los materiales de cantera que quedaron englobados, en su arrastre, entre los materiales arcillosos.

Este conjunto de factores hace que los procesos de estabilización sean relativamente rápidos, aunque siempre pueden quedar movimientos remanentes, tipo "creep" o fluencia lenta, pero ya en la gama de velocidades de milímetros/mes.

En algunos casos el frenado de la masa se acelera por formarse un repié en el fondo del valle o incluso ascendiendo por la ladera opuesta. Aquí, el lógico interés por mantener despejado el río Velillos, no permitió contar con este apoyo y muy probablemente las labores de eliminación de tierras en el frente de la lengua retardaron la estabilización.

3.3. Cinemática del deslizamiento

La velocidad del deslizamiento es un factor importante para su caracterización y análisis.

Así, por ejemplo, Záruba y Mencl (1969), al comentar el flujo en flysch de Handlová, considerado como muy rápido, indican velocidades iniciales de 0,26 m/h, del orden de la décima parte de las de Los Olivares.

Por otra parte, existen deslizamientos con velocidades muy altas, como los flujos de detritos ("debris flows") o movimientos de materiales granulares cargados de agua. En estos casos las velocidades son del orden del metro/segundo, muy superiores a las de Los Olivares.

Debemos concluir, por tanto, que nos encontramos en un caso mixto en el que la combinación de materiales arcillosos cretácicos y materiales granulares cuaternarios, con una carga de agua anormal, produjo un movimiento de velocidad intermedia entre los casos típicos reseñados.

A efectos de la evaluación geotécnica, la velocidad del movimiento puede considerarse suficientemente alta para que predominaran las condiciones no drenadas, salvo en algunas capas granulares de las que el agua escapó con facilidad, tal como pudo observarse en algunas zonas.

El seguimiento realizado en los primeros días permitió definir la evolución de la lengua tal como aparece en la fig. 5.

Respecto a la velocidad de desplazamiento es usual tomar la correspondiente al frente de la lengua o a puntos del eje, ya que en los bordes las velocidades son menores, al ser menor la potencia del flujo y tener más influencia el contacto con el terreno natural.

La falta de medidas en las primeras fases del deslizamiento impide conocer con precisión la historia velocidades-tiempo antes del día 20 de abril.

En la fig. 15 se ha representado la gráfica elaborada por la Comisión de Seguimiento y la que, a nuestro juicio, resulta más probable recogiendo algunos de los testimonios de prensa y por analogía con el comportamiento de otras coladas. De hecho parece improbable que un movimiento que se inicia con el paso por una angostura y rebose de un umbral, comience con altas velocidades.

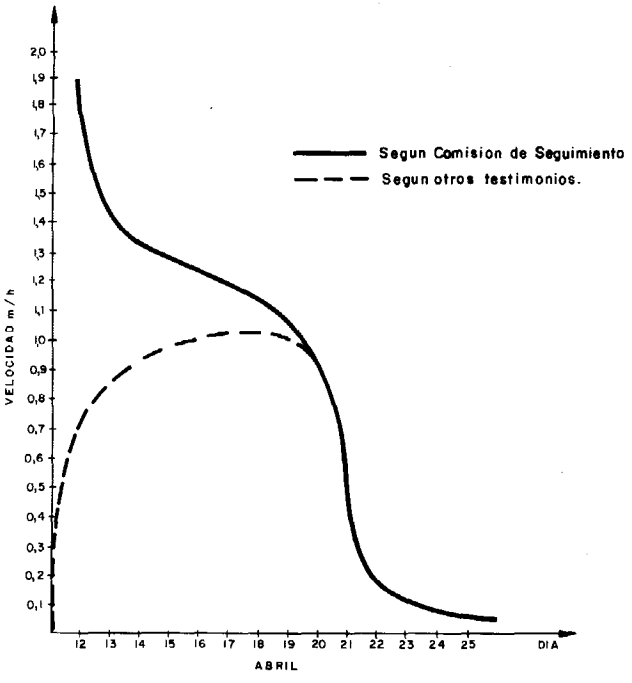


Fig. 15.— Velocidad del deslizamiento. (Fuente. Comisión de Seguimiento).

A partir del día 20 el movimiento se fue amortiguando conforme la masa deslizante se iba extendiendo por la ladera, hasta llegar prácticamente al reposo al cabo de unos 12 días.

Es difícil valorar el efecto de las medidas de drenaje, ya que la interrupción del avance coincidió con el cese de la alimentación superior, produciéndose grietas de separación por debajo de la Angostura.

A partir del mes de mayo se siguió el control de movimientos superficiales mediante hitos topográficos, a cargo de un topógrafo de la Confederación. Estas medidas indicaron movimientos muy pequeños, con tendencia a la estabilización, por lo que se suspendieron dichas medidas en el mes de julio.

Por otra parte se planteó la necesidad de "auscultar" el deslizamiento, es decir, controlar sus movimientos a largo plazo.

Para ello existen técnicas muy diversas, desde la colocación de hitos superficiales que se siguen por métodos taquimétricos, hasta la instalación de *inclinómetros* o tubos verticales cuyas deformaciones se pueden registrar con gran precisión mediente un elemento cilíndrico que desliza por su interior.

Como los hitos topográficos ya no detectaban movimientos en el mes de agosto, se pensó recurrir a los inclinómetros. Sin embargo, razones de coste, obligaron a utilizar como alternativa una solución cualitativa del tipo siguiente:

Por el interior del tubo de PVC de 72 mm dejado en los sondeos se introducía mediante un cable una pesa consistente en un tubo de PVC de 63 mm de diámetro exterior y 50 cm de longitud, relleno de mortero, hasta hacerla descansar en el fondo.

Asimismo, se disponía de otra pesa de 2,00 m de longitud y de igual diámetro externo que la anterior, sujeta de un cable de longitud suficiente para las profundidades alcanzadas en los sondeos.

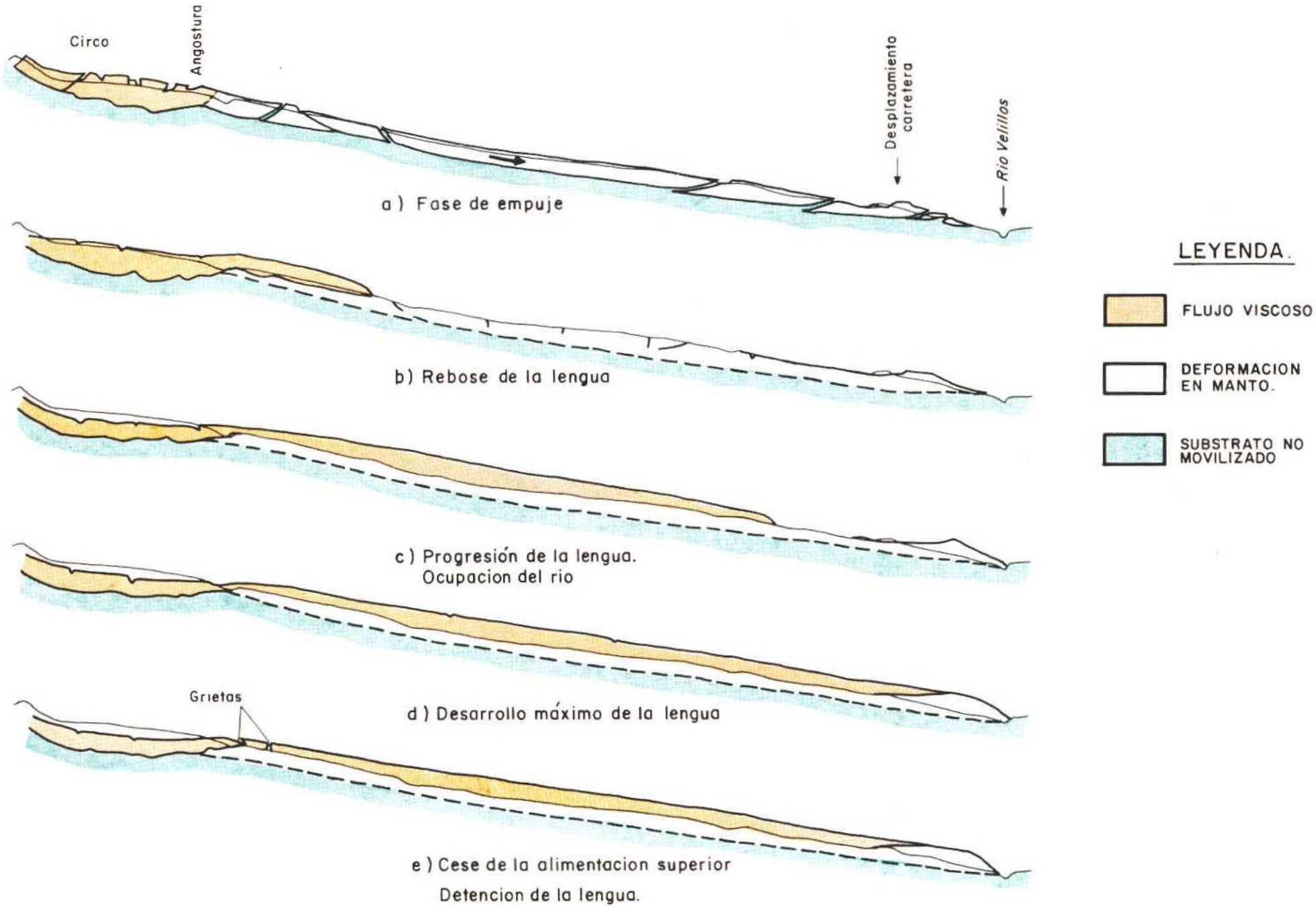


Fig. 14.— Desarrollo del deslizamiento.

El método de control consistía en introducir en el sondeo, con cierta periodicidad, la pesa más larga, conprobando si se desplazaba hasta el fondo o, por el contrario, quedaba encajada en las paredes de la entubación. Si se daba esta última circunstancia, se podía acotar con suficiente precisión el nivel superior de la superficie de deslizamiento.

El nivel inferior se podía delimitar actuando de igual forma con la pesa pequeña alojada desde el principio en el fondo de la perforación. Una mayor precisión puede conseguirse con pesas de menor longitud.

Debe señalarse que las medidas efectuadas hasta octubre de 1986 no indicaron movimientos en ninguno de los sondeos.

4. ANALISIS GEOTECNICO

4.1. Necesidad del análisis geotécnico

Cuando se produce un fenómeno de este tipo es necesario investigar las causas naturales o artificiales que lo han producido con objeto de:

— adoptar unas medidas correctoras suficientemente justificadas.
— prever el riesgo de removilización del deslizamiento y los factores que pueden producirla.
— delimitar responsabilidades.
— adquirir experiencia respecto a situaciones análogas, etc.

Con estos objetivos la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la junta de Andalucía contrató un Estudio Geológico-Geotécnico[1], terminado en Diciembre de 1986, y cuyos aspectos más interesantes se resumen aquí.

En el citado Estudio se incluía también la localización e investigación de posibles zonas para edificar nuevas viviendas en las que serían realojados los afectados por el deslizamiento. Debe señalarse que estas personas rechazaron las viviendas prefabricadas construídas a unos 2 km del casco urbano, en una zona "segura".

4.2. Trabajos de campo

Para la investigación del deslizamiento se realizaron 9 sondeos mecánicos en la situación que aparece en la fig. 2.

Se ha contado también con algunos ensayos de penetración realizados en la parte superior por el Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada.

Evidentemente la zona de alimentación superior es el origen de las masas deslizadas, pero dado lo caótico de su relieve y los grandes desplazamientos producidos, la realización de sondeos habría suministrado muy poca información adicional a la observación geológica y ello a un coste desmesurado.

Los sondeos fueron supervisados por un geólogo especializado y se tomaron numerosas muestras para los oportunos ensayos de laboratorio.

Una vez realizado cada sondeo con el revestimiento introducido y efectuada la limpieza del fondo, se colocaba un tubo de PVC de 72 mm de diámetro interior para control del nivel freático.

1. Elaborado por los Ingenieros de Caminos D. José Mª Rodríguez Ortiz y D. Juan Carlos Hernández del Pozo.

4.3. Naturaleza del terreno en la zona deslizada

En la fig. 16 aparece el perfil aproximado del terreno en el eje de la zona deslizada.

Conviene señalar que la elaboración de dicho perfil ha planteado considerables dificultades, dado lo especial del proceso de deposición de los materiales que configuran las capas superiores del terreno.

En efecto, todo parece indicar que sobre un sustrato original de margas y margo-calizas que actualmente se encuentra a unos 40 m de profundidad en la zona de Las Angosturas y a unos 12 m bajo el aluvial del río Velillos, se han ido depositando sucesivos mantos de deslizamiento, con una secuencia y morfología que recuerda los depósitos de tipo deltaico.

Estos depósitos corresponden a situaciones relativamente diferentes en cuanto a la naturaleza de los materiales movilizados, el volumen de los mismos y el alcance del flujo sobre la ladera. Ello se debe lógicamente a la importancia de los fenómenos de inestabilidad ocurridos en distintas épocas en la zona de alimentación, predominando en unos casos los materiales granulares de naturaleza dolomítica o, con mayores frecuencias, los mantos arcillosos o margosos, con diverso contenido de cantos.

Las diferencias de coloración son representativas de las condiciones de deposición del material residual en la zona superior (sedimentos pelágicos-turbiditas) y de los períodos de reposo transcurridos entre deslizamientos sucesivos, ya que reflejan la oxidación por exposición a agentes atmosféricos. Habría sido interesante una datación de estas capas para estimar el período de retorno de estos grandes deslizamientos.

Desde un punto de vista estratigráfico se han diferenciado los siguientes niveles:

a) *Lengua del deslizamiento actual*: Es una capa de potencia variable, con una media de unos 5 m, pero que en algunos puntos llega hasta los 8 m.

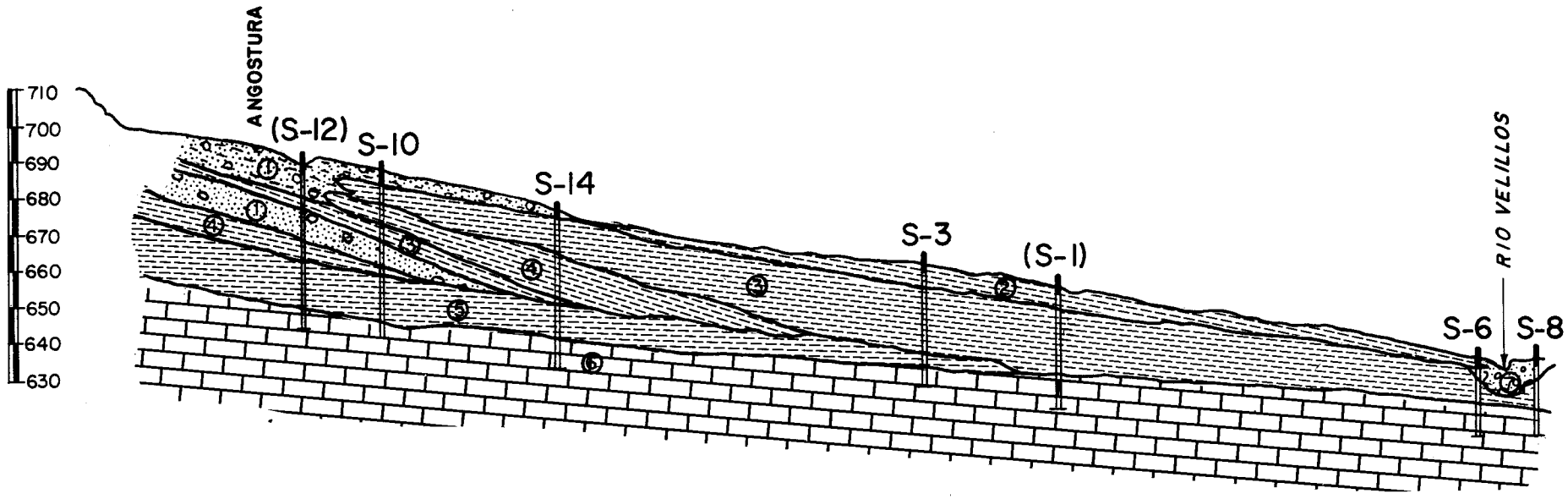
Su naturaleza es variable según las zonas, ya que depende de los materiales movilizados en el área de alimentación.

En la parte superior abundan los detritos y cantos de tipo dolomítico, posibles arrastres de materiales de cantera o de zonas caquerizadas. Estos detritos van perdiendo potencia y llegan a desaparecer en la zona del sondeo S-14 (aprox. cota 676,0) donde los materiales son de tipo arcillo-margoso, con algún canto.

Dada la gran similitud de los materiales arcillosos en toda la zona resulta muy difícil diferenciar los depósitos del último deslizamiento de los de movimientos anteriores. Desde un punto de vista resistente resulta sorprendente la velocidad con que materiales, capaces de fluir en forma viscosa, llegan a recuperar, por desecación y consolidación, su consistencia inicial. Unicamente una resistencia a la penetración algo menor que en profundidad marca una ligera diferencia. Resulta por tanto, bastante difícil conocer los parámetros operativos en la época del deslizamiento, habiendo sido muy interesante la toma de muestras en el período activo.

Descendiendo por la ladera, los materiales superficiales presentan una diferenciación más marcada y es frecuente la presencia de cantos claramente procedentes de la zona de cantera. La composición, como es lógico, no es uniforme y más hacia el río vuelven a predominar las arcillas margosas.

b) *Deslizamiento fósil de arcillas crema-verdosas*: Es una masa importante que constituía la ladera anterior al actual deslizamiento. Probablemente la topografía original había sufrido una importante denudación y erosión, por lo que es difícil evaluar la potencia inicial de la masa deslizada. Actualmente, en la zona central de la ladera puede alcanzar los 19 m, lo cual da idea de movimientos de mucha mayor envergadura que el de ahora. En la parte inferior, la potencia es de 10-12 m y es muy probable que cuando se produjo este deslizamiento,



LEYENDA

(1): Arenas y cantos con algo de arcilla.

(2): Arcillas crema-verdosas.

(3): Arcillas gris-verdosas.

(4): Arcillas negruzcas.

(5): Arcillas versicolores.

(6): Margas y margocalizas gris-verdosas.

(7): Aluvial de gravas del rio Velillos.

S-N Sondeo

(S-N) Sondeo proyectado

0 25 50m

Fig. 16.— Corte estratigráfico.

el río Velillos no existiera o fuera cegado totalmente por las arcillas, volviendo posteriormente a establecer su cauce sobre las mismas, tal como aparece actualmente.

En la parte superior la potencia va disminuyendo, como corresponde al rebosamiento sobre un umbral preexistente y llega incluso a desaparecer, siendo ocupada la ladera por cantos y derrubios de degradación de las monteras dolomíticas.

Esta capa presenta, en superficie, tonalidades rojizas y versicolores, correspondientes a los ya indicados procesos de oxidación.

c) *Deslizamiento de arcillas negruzcas*: Es una lengua que aparece a profundidades entre 10 y 20 m en la mitad superior de la ladera, con una potencia máxima en su parte central de unos 12 m. Es probable, sin embargo, que la geometría original fuera más amplia, quedando recortada por efecto del deslizamiento anterior. No existe una diferenciación clara respecto a la naturaleza de las arcillas, siendo en este caso la coloración el carácter distintivo.

d) *Segundo deslizamiento de arcillas crema-verdosas*: Está acuñado bajo el anterior en la parte alta de la ladera y su potencia actual no supera los 8 m. Litológicamente, es muy semejante al descrito como Nivel b.

e) *Deslizamiento de derrubios profundo*: Es una cuña de materiales granulares con escaso componente arcilloso, cuya potencia no supera los 8 m en la parte central, aproximadamente coincidente con la actual angostura.

Su techo en dicha zona aparece a 12-14 m de profundidad, mientras que su desarrollo ladera abajo se estima en unos 40 m. Ello confirma la menor movilidad de estos materiales frente a las arcillas saturadas.

f) *Segundo deslizamiento de arcillas negruzcas*: Es una pequeña lengua de escasa potencia (<5 m) que aparece bajo los derrubios anteriores, a una profundidad de unos 24 m en la zona de la angostura. Litológicamente es análoga al Nivel c.

g) *Nivel de arcillas versicolores*: El techo de esta capa es sensiblemente paralelo a la ladera actual, apareciendo a profundidades entre 25 y 30 m. En la parte alta su potencia es de unos 12 m, pero se va acuñando progresivamente hasta desaparecer en la mitad inferior.

Esta capa ha debido ser fuertemente erosionada y remodelada por los deslizamientos suprayacentes por lo que es difícil reconstruir su morfología original.

Si bien no puede descartarse que se trate de un manto de deslizamiento nos inclinamos a pensar que corresponde al nivel superior, alterado y oxidado del substrato cretácico.

h) *Substrato de margas y margo-calizas*: Aparece a 40 m de profundidad en la zona de angostura y a unos 12 m bajo el cauce del río Velillos, con un techo sensiblemente plano y una pendiente algo inferior a la de la ladera actual.

Puede considerarse frontera inferior de los fenómenos de inestabilidad.

4.4. Propiedades geotécnicas de los materiales

Con las muestras extraídas de los sondeos se han realizado numerosos ensayos de laboratorio, habiéndose contado además con ensayos realizados por otros investigadores.

Tal como se ha expuesto en apartados anteriores, la mayor parte de los materiales arcillosos que constituyen la ladera del deslizamiento son de origen cretácico, lo cual les confiere una afinidad de propiedades, aunque cabe una cierta diferenciación por determinadas características secundarias. Reseñamos a continuación las propiedades de mayor interés:

a) *Mineralogía*

Los ensayos realizados en el Departamento de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Granada, indican una proporción importante de filosilicatos y esmectitas, así como cuarzo y calcita como componentes secundarios. También aparecen trazas de feldespatos y

yesos en las muestras con calcita (pelitas turbidíticas).

Otros ensayos han dado los resultados de la Tabla 4.1.

También aparecen como componentes el cuarzo (8 a 12%), caolinita (2-6%) y dolomita (<2%).

Puede advertirse que se trata de arcillas de actividad media en las que el contenido en esmecitas está contrarrestado con el importante contenido en carbonatos. No obstante, el porcentaje de esmectitas es similar al observado en otras formaciones donde se han producido flujos de arcilla.

b) *Plasticidad*

Está, lógicamente, en correspondencia con la mineralogía. En la fig. 17 se han representado en el gráfico de Casagrande los puntos correspondientes a las muestras ensayadas.

Como puede advertirse, la mayoría de las muestras quedan sensiblemente alineadas respecto a la línea "A", lo cual refleja un origen mineralógico semejante, debiéndose la mayor o menor plasticidad al contenido en componentes inertes tipo calcita, cuarzo, etc.

Las arcillas negruzcas muestran una dispersión notable e incluso llegan a presentar carácter limoso. Ello se debe, a nuestro juicio, a tratarse de un suelo residual cuya deposición en cabecera del deslizamiento estuvo acompañada en unos casos por materiales finos limosos, y en otros predominó la fracción fina arcillosa, según la posición dentro de la cubeta de decantación.

Excluyendo estas singularidades se advierte que la mayor parte de las muestras está comprendida en el intervalo:

Límite líquido :	33-60%
Límite plástico:	18-28%
Indice de plasticidad:	15-32%

con una mayor concentración en la zona de menor plasticidad.

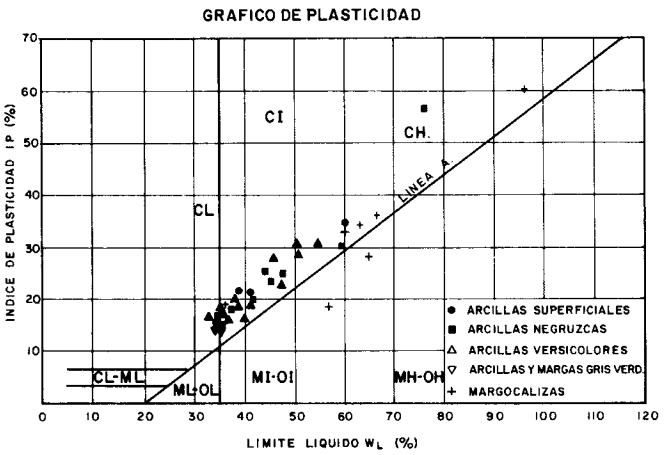


Fig. 17.— Plasticidad de las formaciones arcillosas.

c) *Expansividad*

Aunque no es una propiedad de especial interés en el problema que nos ocupa, puede decirse que las arcillas gris-negruzcas presentan una expansividad media a alta, en correspondencia con su contenido en montmorillonita.

Se han medido hinchamientos libres del 3,5% en muestras inalteradas con humedades algo superiores al límite plástico, y valores considerablemente mayores en muestras remoldeadas, lo cual indica un riesgo notable para las construcciones que se realicen en zonas movidas o deslizadas.

TABLA 4.1

COLORACION DE LA ARCILLA	% DE CO_3Ca	<74 μ	<2 μ	PORCENTAJES DE MONTMOR.	CALCITA	ILLITA	ACTIVIDAD (IP/<2 μ)
Crema	62	90-95	52	14	64	12	0,61
Gris oscura	34	93	64	29	33	20	0,81
Gris crema	46	90	53	22	45	17	0,68

Se han hecho también determinaciones de la presión de hinchamiento de muestras inalteradas, con los resultados que aparecen en la fig. 18.

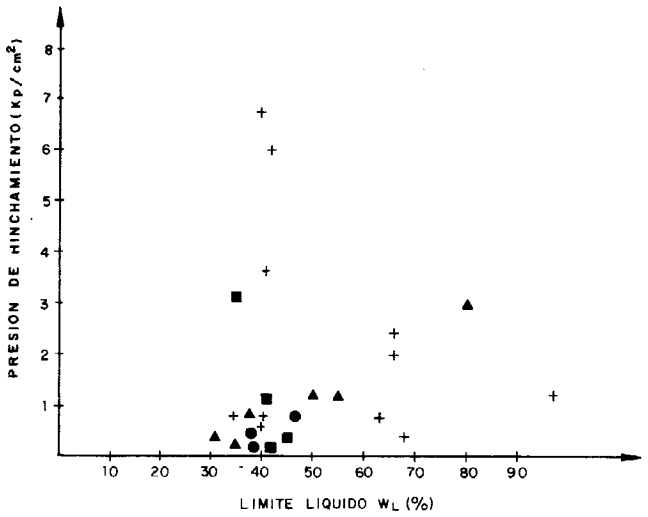


Fig. 18.— Presiones de hinchamiento en función del límite líquido.

Se observa que, en general, las presiones son inferiores a 1,5 Kp/cm², salvo en el caso de las arcillas negruzcas, las cuales llegan a superar los 6 Kp/cm², lo cual confirma nuevamente el carácter activo de estas arcillas.

d) *Resistencia al corte*

Se consideró muy importante su determinación correcta con vistas a explicar la mecánica del deslizamiento y evaluar las condiciones actuales de estabilidad.

Existe, sin embargo, el problema de estimar las condiciones de humedad presentes en la lengua deslizante, ya que en la época de realización de los sondeos ya se había producido una desecación y reconsolidación notable, probablemente con una cierta tixotropía. Este proceso se aprecia claramente en la fig. 19,

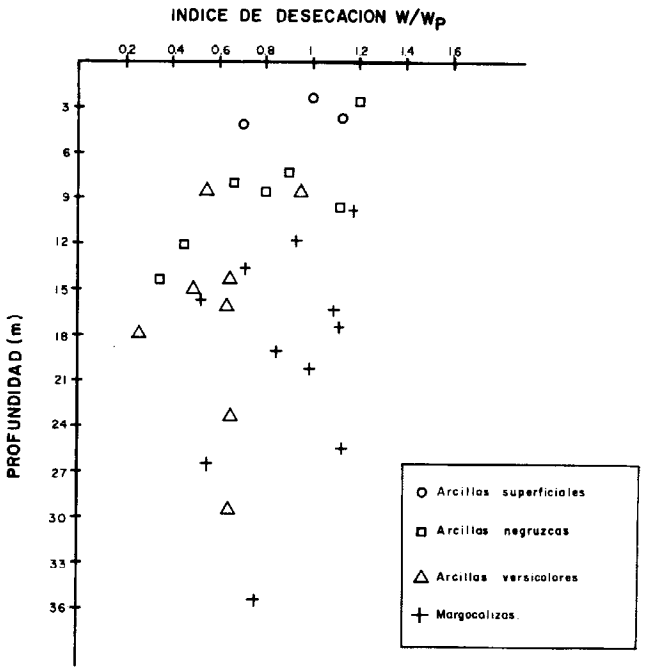


Fig. 19.— Relación entre el índice de desecación y la profundidad.

donde se ha representado el índice de desecación w/w_p en función de la profundidad. En la zona superior ($z < 9$ m) se observa una desecación algo menor que en profundidad, pero con humedades relativamente moderadas, que difícilmente recuerdan las existentes en el flujo de arcilla.

Considerando la situación posterior al deslizamiento, se dispone de diversos resultados de corte y triaxiales, realizados con distintas velocidades y condiciones de drenaje, tanto en muestras inalteradas como remoldeadas.

Después de un cuidadoso análisis de estos resultados se llegó a la conclusión de que los valores más probables de los parámetros de resistencia al corte son del orden siguiente:

	RESISTENCIA DE PICO		RESISTENCIA RESIDUAL	
	c' (t/m²)	ϕ'	c'_{res} (t/m²)	ϕ'_{res}
Arcillas crema-verdosas y gris verdosas	2	20-25°	0	20°
Arcillas versicolores y abigarradas	2,5	20°	1	10°
Arcillas negruzcas	0,5-3	22-16°	0	22-14°

A la vista de estos valores puede concluirse que los materiales arcillosos retienen un rozamiento interno del orden de unos 20°, incluso en condiciones residuales. Este ángulo es muy superior al de inclinación de la ladera, lo cual garantiza la estabilidad de la misma en la situación actual, como se indica más adelante.

Evidentemente, estos valores de resistencia son muy superiores a los movilizados en el flujo de arcilla saturada.

Para determinar la resistencia de las arcillas en estados de consistencia fluida se recurrió a ensayos de molinete en laboratorio, sobre muestras remoldeadas. Los resultados se han representado en la fig. 20 junto con otros valores citados en la literatura.

Se puede apreciar que las arcillas de Los Olivares tienen un comportamiento muy semejante a las de otras localidades, pero se aproximan más a los resultados de mezclas artificiales de bentonita con otros suelos no activos. Esto es lógico si admitimos el proceso de deposición y flujo posterior supuestamente sufrido por estas arcillas.

En la fig. 21 se muestra la relación entre la resistencia al corte sin drenaje (en escala logarítmica) y la humedad.

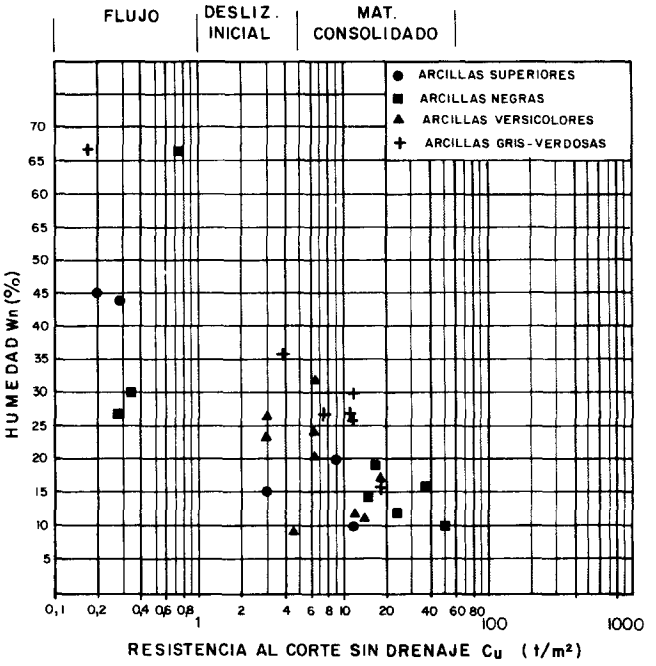


Fig. 21.— Relación entre la resistencia al corte sin drenaje y la humedad.

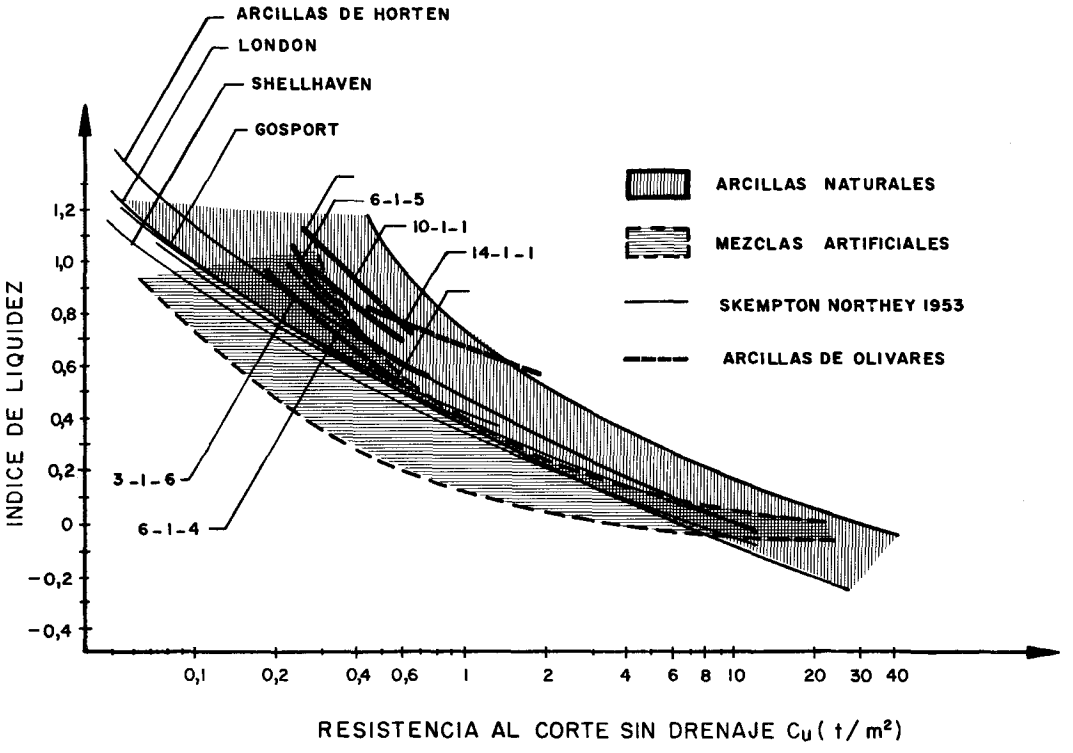


Fig. 20.— Relación entre la resistencia al corte sin drenaje y el índice de liquidez.

Se observa que el intervalo de resistencia en la situación actual es

$q_u = 0{,}6$ a 10 kp/cm² $\quad (q_u = 2\ c_u)$

correspondiendo los mayores valores a las margas y arcillas carbonatadas. Los valores medios más característicos están en el intervalo:

$q_u = 1{,}2$ a 4 kp/cm²

lo cual corresponde a suelos de consistencia dura.

A título indicativo señalemos que en la revisión hecha por Brunsden (1984) sobre diversos flujos de arcilla, la resistencia al corte movilizada variaba entre 0,05 y 4 t/m², es decir muy por debajo de los valores actuales medidos en la lengua.

4.5. Condiciones hidrológicas e hidrogeológicas

Ante la coincidencia de una época de lluvias con el deslizamiento, se consideró conveniente analizar si había existido una situación de aguas subterráneas que favoreciera la inestabilidad, como suele suceder habitualmente. Posteriormente la explicación por acumulación de escorrentías en la zona superior ha resultado más adecuada, como se indica en el apartado 4.7a.

De hecho el conjunto de materiales arcillosos presenta una permeabilidad muy baja, inferior a 10^{-8} cm/seg, por los que es casi imposible el establecimiento de acuíferos con cierta continuidad. Sin embargo, existen entre las capas arcillosas niveles de cantos, presumiblemente comunicados con las dolomías de la cubeta superior que en época de lluvia pueden elevar los niveles piezométricos en la ladera. No obstante, estas capas más permeables carecen de continuidad, por lo que debe hablarse más propiamente de diversos niveles colgados que de un nivel freático general. A efectos prácticos, sin embargo, podrían considerarse los niveles representados en la fig. 22.

Algunas informaciones señalan la existencia en la ladera de un manantial con caudales de 1 l/seg antes del deslizamiento, lo cual sería coherente con el afloramiento de alguno de estos niveles colgados bajo la importane presión hidrostática previa al flujo de arcilla.

Considerando ahora las condiciones hidrológicas, en la fig. 23 se ha presentado la pluviometría anual de la última década, con datos

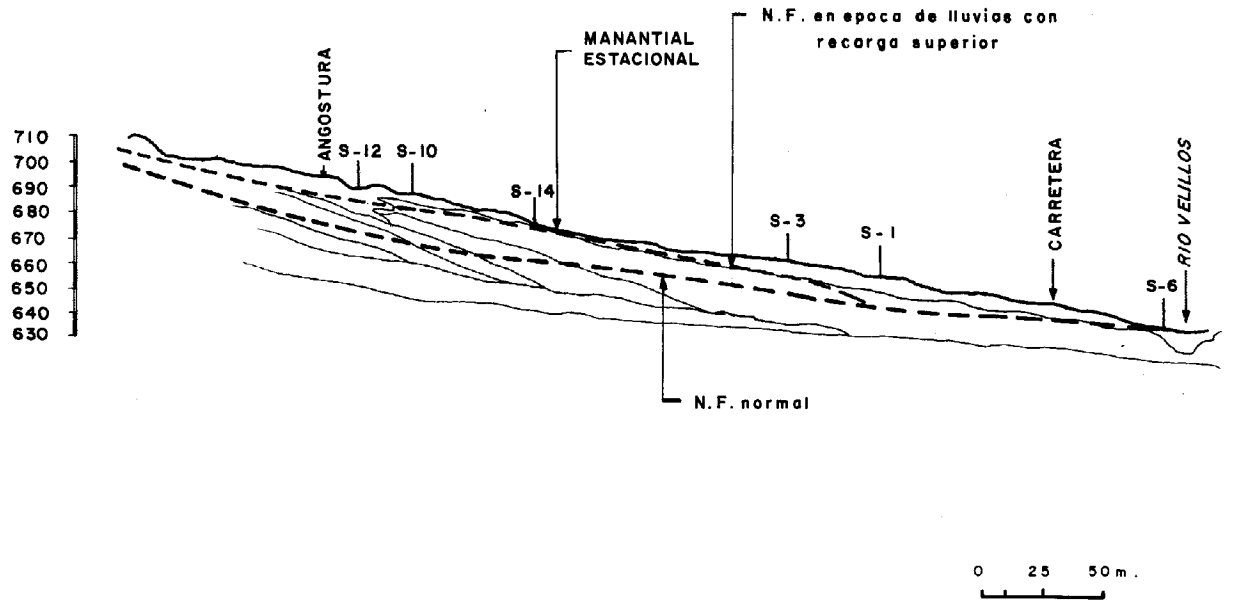


Fig. 22.— Posición aproximada del nivel freático.

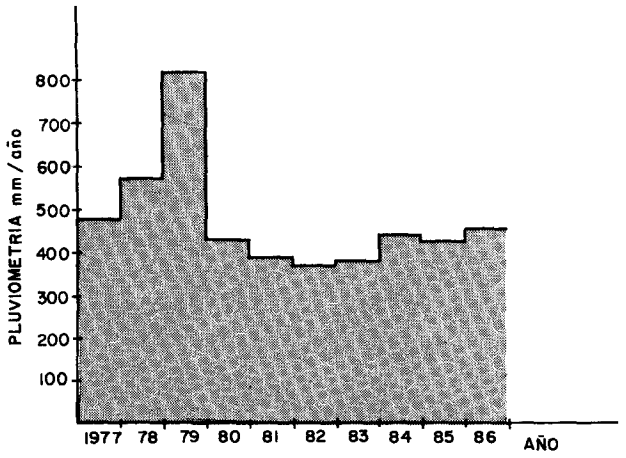


Fig. 23.— Pluviometrías anuales de la última década.

de la estación del Embalse de Cubillas, la más próxima a Los Olivares aunque con unas condiciones algo diferentes.

Estudiando, tanto las series Enero-Diciembre (representadas) como los períodos hidrológicos Septiembre-Abril, no se aprecia que el período 1985-1986 fuera especialmente lluvioso.

Sin embargo, considerando los meses que precedieron al deslizamiento (Fig. 24) se observan cuatro meses de lluvias intensas, Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero, con una pluviometría total en el período Septiembre-Abril de 409 mm, que es la media anual de los años normales. Es probable que esta concentración de lluvias se dé con una frecuencia no inferior a 10 años, a la vista de la información pluviométrica.

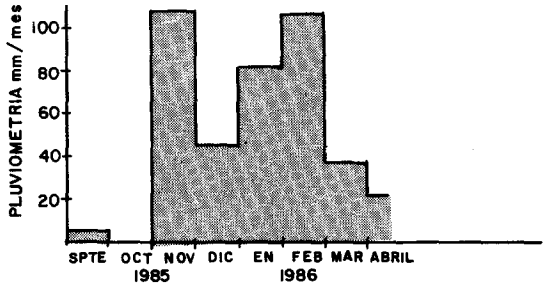


Fig. 24.— Lluvias anteriores al deslizamiento.

Evidentemente, circunstancias mucho peores que las de este año se han dado en 1978-79, sin que se tenga noticia de problemas de inestabilidad. En otro lugar se comentan las posibles causas de este diferente comportamiento.

4.6. Acciones sísmicas

Los registros del Observatorio de La Cartuja, anteriores al deslizamiento, no indicaron una actividad sísmica significativa.

Tampoco se apreciaron efectos debidos al sismo de intensidad 4,3 ocurrido en Chauchina el 24 de abril.

Aunque en general existe una tendencia en zonas activas a asociar los deslizamientos con fenómenos sísmicos, debe tenerse en cuenta que los materiales cohesivos presentan una apreciable resistencia frente a tal tipo de acciones. No sucede así con los materiales arenosos saturados que se convierten en auténticos fluidos por efecto de los terremotos.

4.7. Análisis del deslizamiento

Se pueden considerar diversos aspectos del problema:

a) La génesis del deslizamiento
b) El desarrollo de la lengua

a) *Génesis del deslizamiento*

Resulta evidente que el flujo de arcilla se ha generado en el "circo" o cubeta endorreica superior.

En esta zona, los deslizamientos han sido múltiples en ambas márgenes de la vaguada preexistente, ofreciendo en la actualidad un aspecto caótico (ver figs. 25 a 32).

El comportamiento observado es muy complejo, combinándose los deslizamientos regresivos o remontantes, con problemas de extrusión o fluidificación y la formación de cuñas flotantes separadas por grietas por las que asciende la arcilla fluida. Todo ello va acompañado de importantes flujos horizontales según las vertientes naturales, con lo que el relieve final presenta un aspecto claramente hundido, con escarpes importantes respecto a la superficie original del terreno. El nombre de Barranco

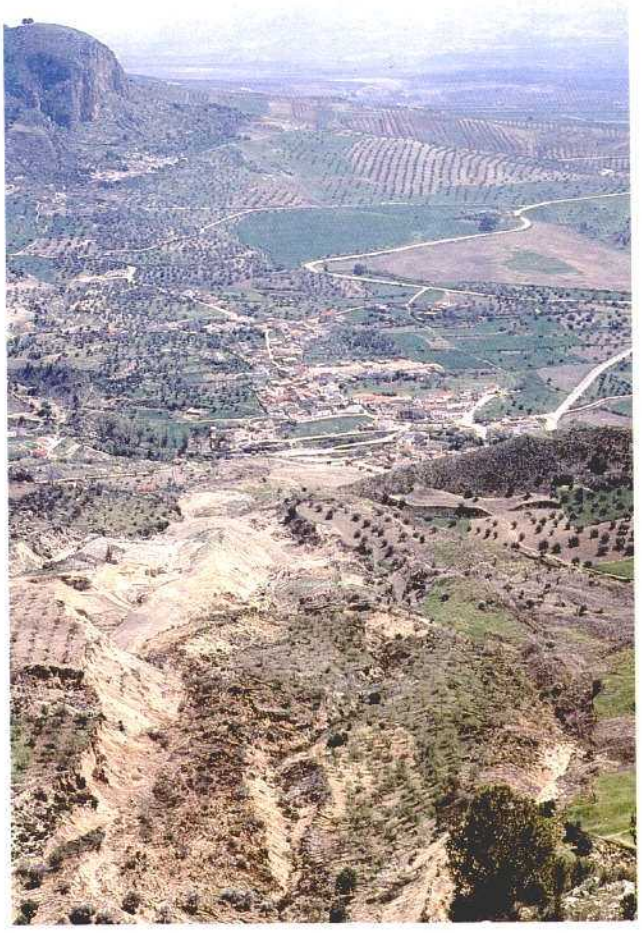


Fig. 25.— Vista del deslizamiento desde el circo. Obsérvense las cicatrices de deslizamientos antiguos en la parte inferior izquierda.

Fig. 26.— Detalle del gran escarpe en el flanco izquierdo del circo.

Fig. 27.— Escarpes y bloques flotantes en la Cabecera del deslizamiento.

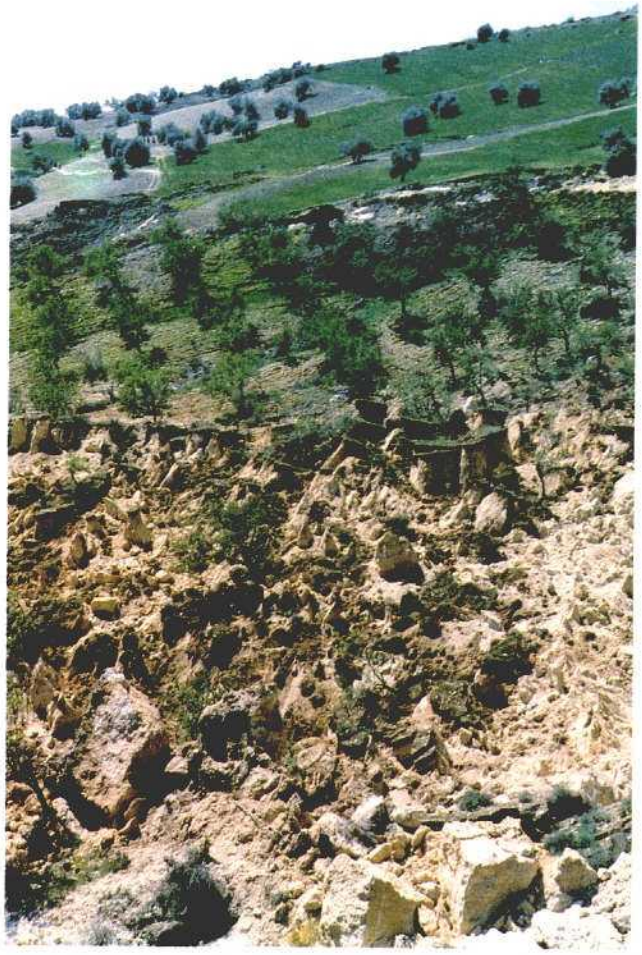


Fig. 28.— "Témpanos" de arcilla flotando en la masa deslizada.

Fig. 29.— Zona del circo deslizada en manto sobre una base fluida, con posterior distorsión y fragmentación.

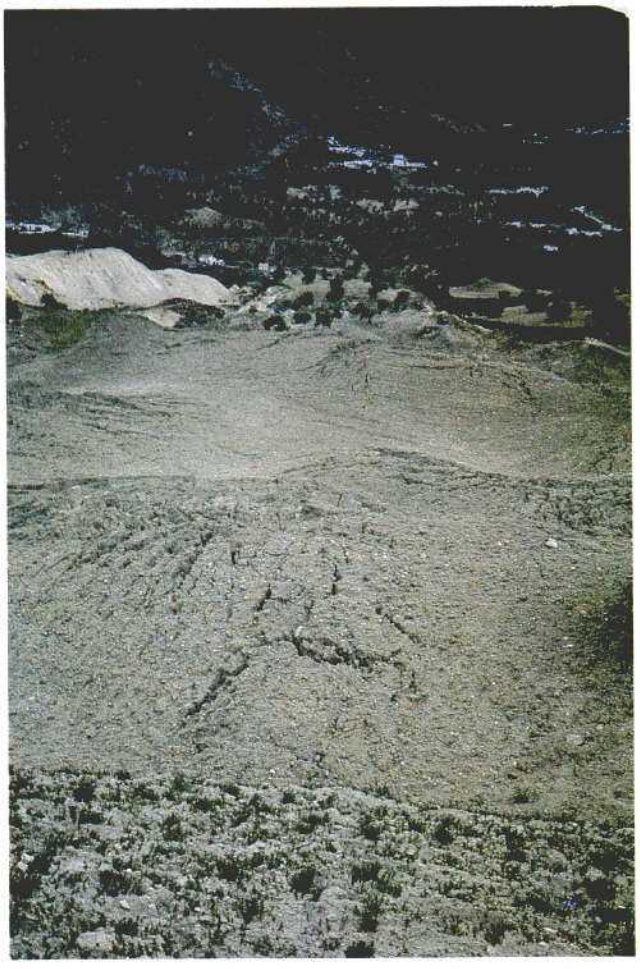


Fig. 30.— Aspecto del flujo de barro.

Fig. 31.— Vista de la "lengua" a su paso por la Angostura.

Fig. 32.— Maquinaria de la cantera y bloques desplazados por la "lengua".

del Hundidero no debe ser ajeno a un fenómeno de esta naturaleza.

Existía, sin embargo, la cuestión de por qué los movimientos en la cubeta se habían producido en proporciones no conocidas en los últimos siglos.

Parece evidente que situaciones de saturación de la cubeta superior se han dado con relativa frecuencia, probablemente cada 10 ó 12 años. Las condiciones naturales de drenaje o infiltración permitían el vaciado lento de las aguas acumuladas y la disipación de eventuales presiones intersticiales. Sin embargo, este drenaje debió verse reducido en los últimos cinco años por los movimientos de tierras de la cantera (ver más adelante). Por otro lado, la destrucción del umbral jurásico dejó sin contención la masa de depósitos cuaternarios saturados, fluyendo éstos en la forma ya conocida y produciendo un vaciado rápido de la cubeta. Este proceso es muy similar al de "desembalse rápido" en vasos de embalse. Según esto, las presiones inducidas en los contornos de margas cretácicas en los meses de lluvias abundantes anteriores quedaron desequilibradas al vaciarse la cubeta, produciéndose roturas rotacionales tipo "slump", con escarpes importantes, probablemente favorecidas por alguna erosión de pie y descenso del nivel de base de la cubeta.

Hemos señalado la necesidad de existir factores nuevos que hayan dado lugar ahora a estos fenómenos y no en épocas próximas en que han existido condiciones pluviométricas más desfavorables.

El único factor "nuevo" es evidentemente la existencia de una cantera en la zona de Las Angosturas que ha alterado la morfología original, si bien la falta de cartografía hace imposible una evaluación precisa de los volúmenes movidos. Todos los indicios apuntan a una alteración de las condiciones de escorrentía y drenaje natural, al crear explanadas, escombreras y caminos de servicio y, por otra parte, una destrucción parcial del umbral que cerraba la cuenca superior. Todo ello ha podido permitir el escape de los materiales deslizados, que, en otras circunstancias, habrían quedado retenidos en la parte alta de la ladera.

Según los datos facilitados por la Sección de Minas de Granada, la fecha de concesión de esta cantera fue el 6 de junio de 1978, comenzando la explotación simultáneamente sin interrupción, hasta que se produjo el deslizamiento.

El hecho de que las grandes lluvias de 1978-79 (ver apartado 4.5.) no produjeran daños se explica por no haber alcanzado aún un desarrollo suficiente la explotación. Los años siguientes, relativamente secos, no plantearon problemas especiales, siendo probablemente la coincidencia del primer período de fuertes lluvias con las alteraciones morfológicas antes mencionadas, lo que ocasionó el flujo de arcilla.

b) *Desarrollo de la lengua*

Pueden considerarse las fases siguientes:

i) Fase de empuje:

Corresponde a la acumulación de agua en la cubeta superior, generando empujes contra el umbral y aumentando las presiones intersticiales ladera abajo (Fig. 33).

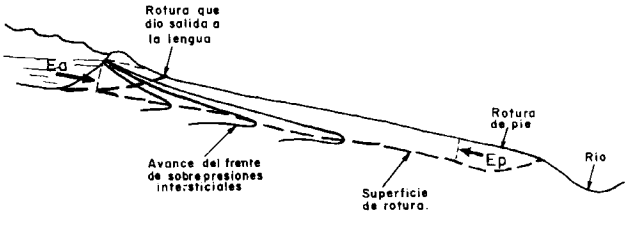


Fig. 33.— Esquema de la fase de empuje.

Como aproximación puede admitirse $E_a \simeq E_p$ ya que la resistencia pasiva al pie, en la arcilla relativamente seca debía ser bastante elevada.

Se tendría así, al iniciarse el deslizamiento

$$F \simeq \frac{c_u}{h\,\gamma\,\text{sen}\,\alpha} = 1$$

de donde

$$c_u = h \times 2 \times 0{,}156 = 0{,}31\ h\ \ t/m^2$$

Admitiendo que el manto movilizado tenía una potencia de 8-10 m, resultaría que el deslizamiento movilizaría una cohesión aparente media de unas 3 t/m².

Este valor se corresponde bastante bien con los más bajos medidos en la campaña de Julio-Agosto de 1986 (ver fig.21) y que pueden representar a zonas en las que había variado muy poco la consistencia de la arcilla al no existir condiciones adecuadas de desecación o consolidación.

ii) Fase de movilidad:

El movimiento del material arcilloso sobre la angostura y la ladera inferior presentó todas las características de un flujo viscoso por lo que su interpretación ha exigido el empleo de modelos adecuados a este tipo de comportamiento como el de Bingham (Fig. 34), donde la resistencia al corte viene dada por:

$$\tau = \tau_y + \eta_b \cdot \dot{\gamma}$$

siendo:

τ_y : la resistencia inicial hasta que se inicia el movimiento o límite de fluencia del material.
η_b : la viscosidad dinámica.
$\dot{\gamma}$: la velocidad de deformación tangencial.

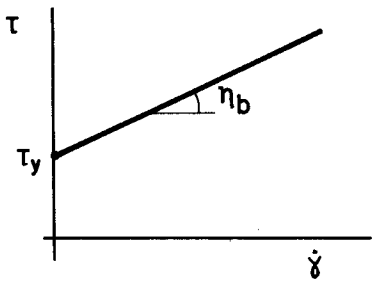


Fig. 34.— Modelo de Bingham.

Se ha estimado que en la fase inicial de movilización, la resistencia $\tau_y \simeq c_u$ estuvo comprendida entre 0,2 y 0,8 t/m² con un valor medio probable de 0,5 t/m².

Por lo que respecta a la viscosidad dinámica parece que un valor medio razonable sería:

$$\eta_b = 5 \times 10^7 \text{ Nsm}^{-2} = 5 \times 10^4 \text{ KNsm}^{-2}$$

En la fase intermedia del deslizamiento la velocidad de la lengua era

$$v = 1{,}2 \text{ m/h}$$

que equivale a una velocidad de deformación tangencial

$$\dot{\gamma} = v/h = 1{,}2/5 = 0{,}24 \text{ horas}^{-1} = 6{,}7 \times 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$$

La resistencia tangencial en la base de la masa deslizante sería:

$$\tau = 5 + 5 \times 10^4 \times 6{,}7 \times 10^{-5} = 8{,}35 \text{ KN/m}^2$$

mientras que la tensión tangencial ejercida por la misma era (Fig. 35):

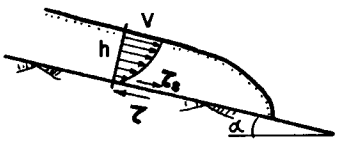


Fig. 35

$$\tau_s = \rho \text{ gh sen } \alpha = 20 \times 5 \text{ sen } 9° = 15{,}6 \text{ KN/m}^2 > \tau$$

lo cual explica el movimiento ladera abajo.

Un modelo sencillo del movimiento de estos flujos de arcilla es el propuesto por Vallejo (1983).

Partiendo de la ecuación del movimiento de fluidos viscosos:

$$-\frac{dv}{dz} = z - \frac{c_u}{\eta}$$

El citado autor obtuvo la siguiente expresión de la velocidad media:

$$v_m = 1/h \left(\frac{\gamma h^3 \text{ sen } \alpha}{3\,\eta} - \frac{c_u\, h^2}{2\,\eta} \right)$$

donde:

h = potencia de la lengua: 5 m
α = ángulo de la ladera con la horizontal $\simeq 9°$

η = coeficiente de viscosidad de la arcilla fluida $\simeq 5 \times 10$ KNs m^{-2}

c_u = resistencia al corte sin drenaje $\simeq 5$ KN/m^2 = 0,5 t/m^2

Resultando:

$$v_m = 1/4 \left(\frac{20 \times 5^3 \times 0{,}156}{3 \times 5 \times 10^4} - \frac{5 \times 5^2}{2 \times 5 \times 10^4} \right) =$$

$$= 2{,}7 \times 10^{-4} \text{ cm/s} = 0{,}972 \text{ m/h}$$

valor del mismo orden de los medidos.

Se observa que resulta relativamente sencillo, con una relación $\eta - c_u$, ajustar valores que reproduzcan las velocidades "v_m" medidas en cada fase del movimiento.

Los modelos anteriores simplifican notablemente el problema ya que consideran una situación estacionaria bidimensional. El comportamiento real es mucho más complejo ya que en él tiene gran influencia la topografía de la ladera y la expansión lateral de la masa deslizante, así como la rigidización progresiva al descender por el talud.

Una mejor aproximación puede obtenerse mediante modelos matemáticos que incluyen en la formulación del problema:

Ecuaciones de continuidad
Ecuaciones de flujo (tipo Navier-Stokes)
Ecuaciones constitutivas del material
Condiciones de contorno

Aunque este modelo no está aún desarrollado totalmente las soluciones que proporciona son del tipo que aparece en la fig. 36.

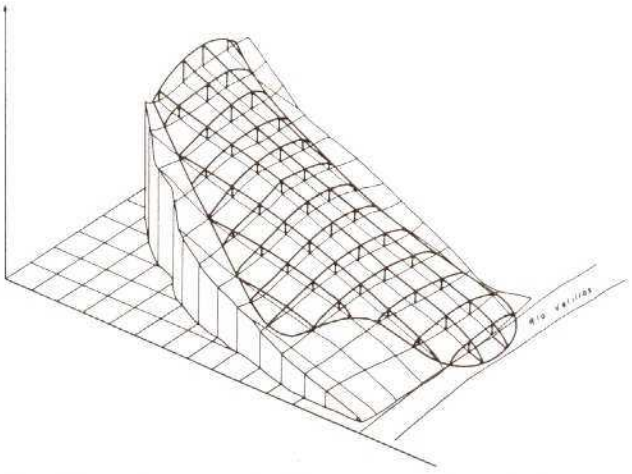


Fig. 36.— Representación del deslizamiento mediante un modelo matemático.

Fig. 37.— Grieta de corte en el flanco de la lengua.

iii) Fase de estabilización:

Los cálculos del apartado anterior permiten estimar que el equilibrio de la masa deslizante podía alcanzarse con unos parámetros de resistencia del orden

$\tau_y = c_u = KN/m^2$
$\eta_b = 10^5\ KNs\ m^{-2}$

Como se ha visto, estos valores se alcanzan con una pequeña disminución de humedad en la arcilla, la cual se produjo con bastante rapidez, tanto por evaporación hacia la atmósfera como por desecación en el contacto con el terreno de la ladera. Por supuesto, también contribuyó el cese de la alimentación superior y los drenajes que cortaron el aporte de agua a la masa fluidificada.

Lógicamente esta rigidización del flujo no fue uniforme, produciéndose más rápidamente en las zonas de menor espesor y en los bordes de la lengua, donde la superficie de contacto con terreno estable era mayor. Las diferentes velocidades y resistencias de la masa deslizante dieron lugar a roturas de corte y empuje en diversas zonas de la lengua (Fig. 37).

5. OTROS ESTUDIOS

El tema de Los Olivares ha provocado un enorme interés en la comunidad científica y se han elaborado numerosos informes y artículos.

Es importante señalar al respecto el Estudio Geofísico elaborado por D. Angel García Yagüe del Servicio Geológico de Obras Públicas en Marzo de 1987. Este Estudio ha comprendido la ejecución de 4 perfiles de sondeos eléctricos verticales. El método consiste en diferenciar las capas de terreno por su resistencia al paso de una corriente eléctrica (resistividad) generada en superficie entre unos electrodos dispuestos según se indica en la fig. 38.

Como puede apreciarse en la fig. 39, donde se han reproducido dos de los perfiles obtenidos las diferencias de resistividad permiten diferenciar la zona afectada por el actual deslizamiento, la correspondiente a movimientos anteriores y el substrado aparentemente estable. Las fronteras entre zonas son, no obstante, bastante difíciles de establecer.

Por otra parte, el S.G.O.P. va a realizar a finales de 1987 una campaña de unos 20 sondeos profundos en la zona de la lengua y el contorno del circo para definir con mayor precisión la estratigrafía y propiedades del terreno. Los ensayos geomecánicos correrán a cargo del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

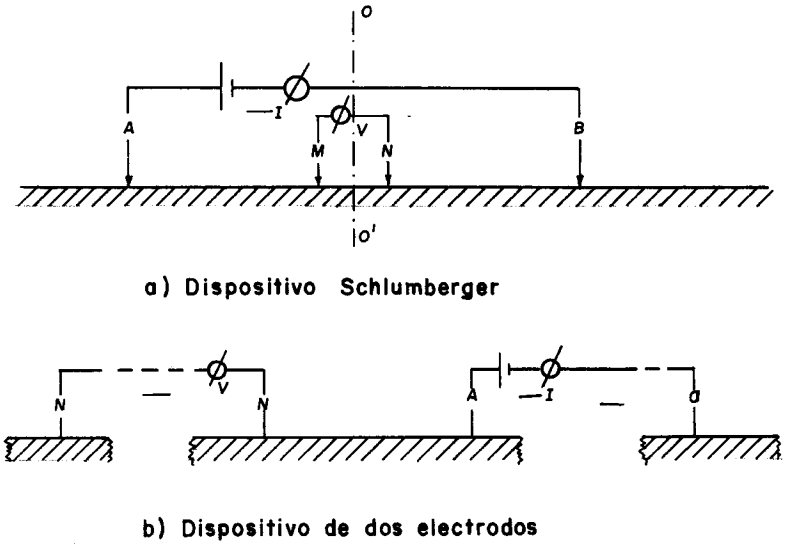
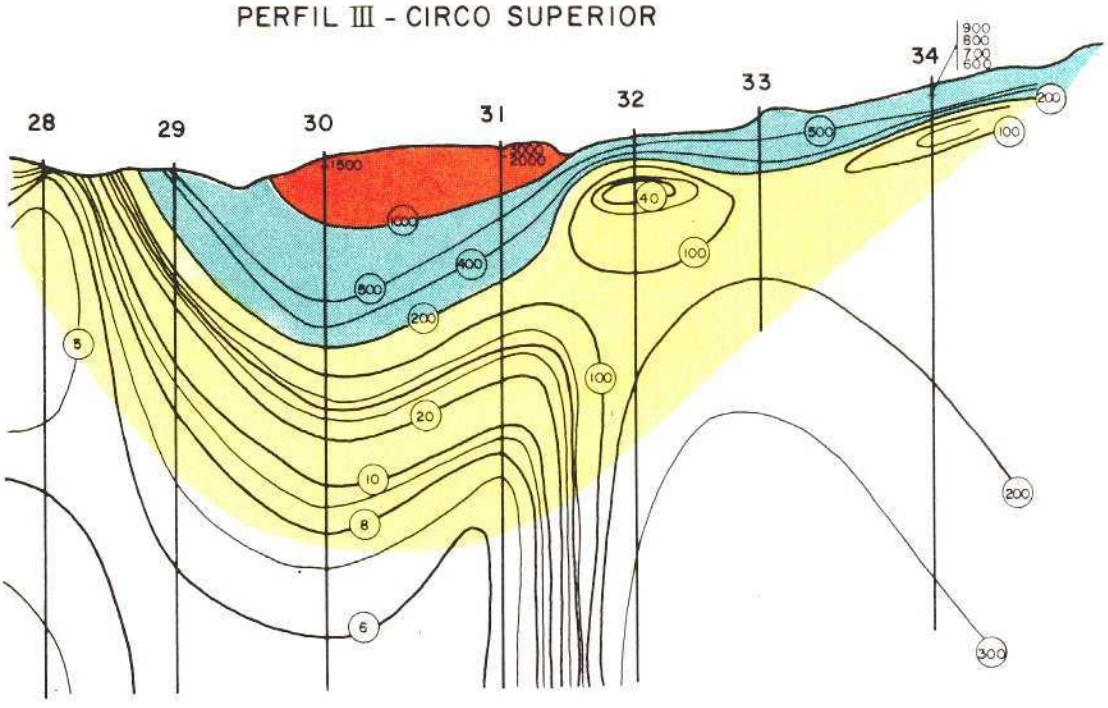
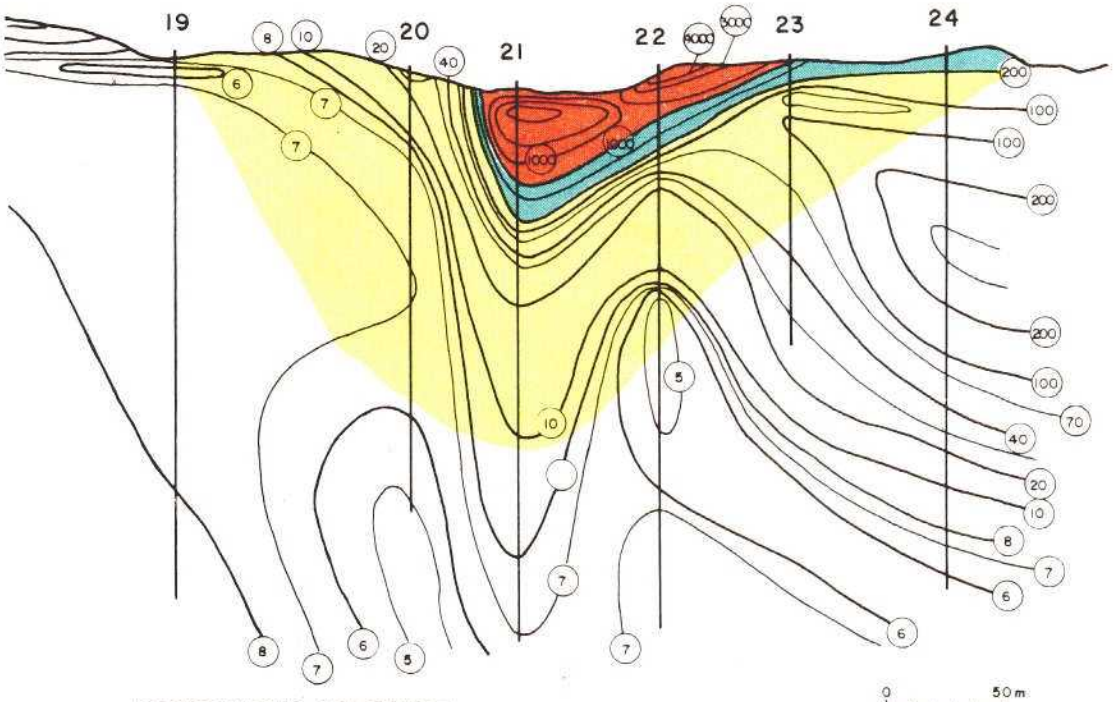


Fig. 38.— Dispositivos para sondeos eléctricos verticales.

PERFIL III - CIRCO SUPERIOR



PERFIL II - ANGOSTURA



RESISTIVIDAD APARENTE

> 100 Ωm. MOV. ACTUAL

200-100 Ωm. MOV. ANTERIORES

< 200 Ωm. SUBSTRATO

Fig. 39.— Perfiles de isoresistividad (SGOP, 1987).

6. CONDICIONES ACTUALES DE ESTABILIDAD Y ACTUACIONES PROPUESTAS

6.1. Condiciones actuales de estabilidad

Como se ha dicho, en la situación actual puede hablarse de una masa arcillosa "reconsolidada", merced a la reducción de humedad sufrida al depositarse sobre la ladera y a una cierta tixotropía o rigidización a partir del estado residual.

Los parámetros de resistencia al corte movilizables son los deducidos de las muestras inalteradas extraídas de la propia lengua. Partiendo de los valores más desfavorables se tendría:

$c_u = 6$ t/m² en rotura sin drenaje y $c' = 1$ t/m²
$\phi' = 20°$ en tensiones efectivas.

Adoptado el modelo del talud infinito, con inclinación $\alpha = 9°$, se tendría para el caso del talud seco y $c' = 0$;

$$F = \frac{\text{tg } 20°}{\text{tg } 9°} = 2{,}30$$

Con un nivel freático en superficie y filtración paralela al talud, que sería la situación más desfavorable:

$$F = (1 - \gamma_W/\gamma)\ 2{,}30 \simeq 1{,}15$$

Considerando las dimensiones reales de la "lengua" se tendría (Fig. 40), incluyendo la cohesión efectiva:

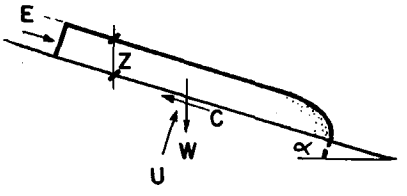


Fig. 40

$$F = \frac{c' + (\gamma\ z \cos^2 \alpha - u)}{\gamma z \text{ sen } \alpha \cos \alpha} \text{ tg } \phi'$$

Para talud sin nivel freático $u = 0$: $F = 2{,}95$.

Si se considera una subpresión de $u = 5$ t/m² en la base de la lengua deslizada

$F = 1{,}79$

Puede concluirse que, en la situación actual, la lengua tiene una estabilidad suficiente, incluso si por relajación se perdiera la cohesión.

Esta situación podría alterarse si en cabecera se produjeran empujes de agua o arcilla fluida. Considerando un fluido de densidad 2 y un área de empuje de 5 m de altura y 60 m de ancho, se tendría:

$$E = \frac{1}{2} \times 10 \times 5 \times 60 = 1\,500 \text{ t}$$

Lo cual supondría una reducción del coeficiente de seguridad a;

$$F = \frac{(W - u \cdot A) \cos \alpha \operatorname{tg} \phi + c'A}{W \operatorname{sen} \alpha + E} =$$

$$= \frac{26\,300\,(10^{-5}) \cos \alpha \operatorname{tg} \phi + 1}{26\,300 \operatorname{sen} \alpha + 1\,500} = 1{,}72$$

siendo A la superficie en planta de la lengua $= 26\,300\,m^2$. Si $c' = 0$, $F = 1{,}10$.

Este valor resulta algo bajo, pero cabe admitir que el riesgo de rotura es pequeño, dadas las críticas situaciones supuestas. Trabajando en rotura rápida, sin drenaje, se tendría:

$$F = \frac{c_u \cdot A}{W \operatorname{sen} \alpha + E}$$

Para $E = 0$ $\qquad F = \dfrac{6 \times 26\,300}{26\,300 \times 0{,}156} = 3{,}85$

Para $E = 1\,500$ t $\qquad F = 3{,}71$

Es decir, no existe riesgo de rotura en estas condiciones.

Para $F = 1$, debería ser:

$$c_u = \frac{W \operatorname{sen} \alpha + E}{A} = 10 \operatorname{sen} \alpha - E/A =$$

$$= 1{,}56 + 0{,}06 = 1{,}62 \text{ t/m}^2$$

Este valor tan bajo sólo podría obtenerse por saturación y remoldeo de la masa de arcilla, lo cual no es posible en su actual posición sobre la ladera.

Para que el empuje "E" removilizara el deslizamiento tendría que valer (en carga rápida):

$$E = c_u \cdot A - W \operatorname{sen} \alpha = 26\,300\,(6 - \operatorname{sen} 9°) = 116\,657\,t$$

equivalente a una masa de arcilla fluida de altura

$$1/2 \times 2\,h^2 \times 60 = 116\,657$$

$$h = 44 \text{ m.}$$

la cual no es verosímil. De hecho, al producirse una nueva ola de arcilla, deslizaría sobre la actual, sin movilizar ésta, tal como aparentemente ha ocurrido en situaciones anteriores.

Se deduce, por tanto, que la situación actual de la lengua y de la ladera es suficientemente estable, no siendo de temer efectos perjudiciales sobre las edificaciones ni sobre el río Velillos, sobre todo después de las obras de protección de márgenes con un repié de escollera realizadas por la Confederación.

Sin embargo, existe un riesgo potencial importante de que se produzcan nuevos flujos de arcilla, probablemente de menor intensidad y en épocas de grandes lluvias, si no se actúa en la zona de alimentación o "circo", actualmente muy degradada y expuesta a la infiltración.

En principio, no existen motivos para el desalojo de viviendas, salvo las efectuadas originalmente, pero sí debe evitarse la ocupación de la zona deslizada con nuevas edificaciones, al menos hasta que transcurra un período prudencial de observación que incluya al menos un año de lluvias intensas (> 600 mm).

6.2. Actuaciones recomendadas

En función de los estudios realizados, se han propuesto diversas actuaciones, como son:

— Remodelación de la morfología de la cubeta, suavizando escarpes y formas erosivas y sellando los agrietamientos más importantes.

— Restitución de la red de drenaje, proporcionando una salida controlada hasta el río Velillos o a una de las vaguadas afluentes.

— Refuerzo del cierre de la angostura para contener flujos moderados. La forma más efectiva de constituir este cierre sería crear un dique de escollera, utilizando por ejemplo las calizas jurásicas próximas.

Actualmente se están desarrollando estas actuaciones a nivel de proyecto de construcción por parte de la Junta de Andalucía, con objeto de acometer las obras lo antes posible.

— Alivio de presiones en la masa del talud.

Sería conveniente drenar las cuñas granulares ocluidas bajo la lengua, restituyendo el flujo de los antiguos manantiales. Esto puede conseguirse mediante drenes horizontales tipo California, dispuestos a media ladera.

— Fijación de la lengua y protección de la misma frente a la erosión. Debe pensarse en algún tipo de abancalamiento que corte la escorrentía erosiva y en una plantación arbustiva o arbórea de rápido crecimiento que absorba humedad y arme con sus raíces la arcilla.

— Mejora del drenaje superficial de la lengua, con un adecuado sistema de cunetas de guarda y creación de pendientes transversales.

— Sellado de grietas y posibles zonas de penetración de agua en la parte superior de la lengua.

En principio no son de prever nuevas actuaciones a nivel de cauce, una vez completado el importante repié de escollera construido por la Confederación (Fig. 41), aunque cabe mejorar el encauzamiento en el resto del tramo en su desarrollo a través del pueblo.

Fig. 41.— Estado actual de la zona deslizada. Obsérvese la reposición de la carretera y la protección de las márgenes del río Velillos con escollera.

7. AGRADECIMIENTOS

Para la elaboración de esta publicación se ha contado con la colaboración de numerosas personas y organismos, por lo que los autores expresan su agradecimiento a:

- La Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, patrocinadora del primer estudio geotécnico, en diciembre de 1986.
- La Excma. Diputación Provincial de Granada.
- La Comisión de Seguimiento, asesora del Gobernador Civil.
- Los Servicios Provinciales de Protección Civil.
- La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.
- El Servicio Geológico de Obras Públicas.
- El Departamento de Geodinámica de la Sección de Geológicas de la Universidad de Granada.
- El Observatorio de la Cartuja de Granada.
- La Empresa Geotécnica del Sur, S.A.

Así como al Alcalde y los vecinos de Los Olivares que prestaron todo tipo de ayuda para estos trabajos.

Madrid, Octubre de 1987