

RECONOCIMIENTO GEOFÍSICO DEL DESLIZAMIENTO DE ROSIANA (DEPRESIÓN DE TIRAJANA, GRAN CANARIA)

Rogelio Linares,* Alejandro Lomoschitz,** Lluís Pallí,* Carles Roqué,* David Brusi* y Aitor Quintana**

(*) Área de Geodinámica Externa. Universitat de Girona, 17071 Girona.

(**) Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de G.C.

RESUMEN

El deslizamiento de Rosiana es considerado el movimiento de ladera más importante de los conocidos en épocas históricas en Gran Canaria (Islas Canarias). Activado al menos cuatro veces durante el siglo pasado, el movimiento que tuvo lugar en 1956 involucró unos 3×10^6 m³ de materiales, provocó la evacuación de unas 250 personas y destruyó numerosas construcciones. El riesgo geológico actualmente existente ha sido motivo suficiente para llevar a cabo estudios específicos del fenómeno que, una vez caracterizado, pueda servir de pauta para trabajos, tanto científicos como técnicos, en ésta o en otras zonas similares.

En este artículo se profundiza en el conocimiento de la masa inestabilizada de Rosiana mediante la aplicación de técnicas geofísicas basadas en el método de sismica por refracción. Las mediciones geofísicas han sido interpretadas a partir de los datos geomorfológicos disponibles, obteniéndose, de esta forma, una primera aproximación a la geometría de los movimientos de ladera.

Palabras clave: Deslizamientos, terrenos volcánicos, métodos geofísicos, Gran Canaria

ABSTRACT

The landslide of Rosiana is considered the largest slope movement amongst those known in historical times in Gran Canaria, Canary Islands. It has been activated at least 4 times in the last century, and in the movement of 1956, when about 3.10^6 m³ of materials were involved, 250 people had to be evacuated and many buildings were destroyed. The present geological hazard has lead to specific studies of the phenomenon which, once characterised, can be used as a guide for the scientific and technical works that are to be made in this or similar areas.

This paper wants to increase the knowledge about the unstable mass of Rosiana by using geophysical techniques based on the method of seismic by refraction. The geophysical measures have been interpreted with the aid of the available geomorphologic data, thus obtaining a first approximation to the geometry of the slope movements.

Key words: landslides, volcanic terrains, geophysical methods, Gran Canaria

INTRODUCCIÓN

La investigación del subsuelo a través de la prospección geofísica constituye un método de trabajo de frecuente empleo entre los profesionales de la geotecnia, de la minería o de la geología ambiental. Comprende un conjunto de técnicas que se fundamentan en la medición, desde la superficie del terreno, de alguna propiedad física de los materiales en profundidad.

En determinados casos, el conocimiento de la variación en vertical o en horizontal del parámetro físico medido puede ser suficiente para resolver el problema planteado. No obstante, en la mayoría de las ocasiones, suele ser imprescindible llevar a cabo un análisis o interpretación de los datos geofísicos de acuerdo con la información geológica disponible. Habitualmente, la obtención de los datos de campo y su análisis posterior constituyen los dos elementos básicos del estudio geofísico. Así, el resultado final de la investigación dependerá en gran medida del grado de conocimiento del medio y de la capacidad de integrar esa información con la obtenida mediante la técnica de prospección geofísica utilizada.

En este trabajo se presenta un ejemplo de integración de datos geofísicos de tipo sísmico y de una información geomorfológica previa. En la zona estudiada, el problema planteado radica en conocer la geometría de unas masas de terreno inestables. Su caracterización resultará fundamental para el correcto diseño de las medidas preventivas o correctivas que se considere oportuno llevar a cabo para la minimización del riesgo que comporta.

EL DESLIZAMIENTO DE ROSIANA

Generalidades

En la actualidad la localidad de Rosiana (t.m. de Santa Lucía de Tirajana, Gran Canaria) consta de unas doscientas construcciones, dispuestas a ambos lados de la carretera C-815 (km 52-53) que une los pueblos de San Bartolomé de Tirajana y Santa Lucía (figura 1).

Su situación, en el centro-sur de la isla de Gran Canaria, es peculiar, tanto geográfica como geológicamente. Se encuentra en la parte baja de la gran depresión de Tirajana que, con una extensión en planta de 35 km², presenta desniveles de más de 900 m.

Numerosos científicos que han estudiado la geología y geomorfología de Gran Canaria consideran el deslizamiento de Rosiana como uno más de los movimientos de gran envergadura que se han producido en la depresión de Tirajana, desde épocas geológicas pasadas. No obstante, su carácter dinámico en una escala temporal humana y el riesgo geológico que comporta para la zona, lo convierten en uno de los movimientos de ladera más importantes de los conocidos en la isla.

Se tiene conocimiento de que este deslizamiento se ha reactivado en varias ocasiones (1879, 1921, 1923, 1956 y posiblemente 1991). El que tuvo lugar en febrero de

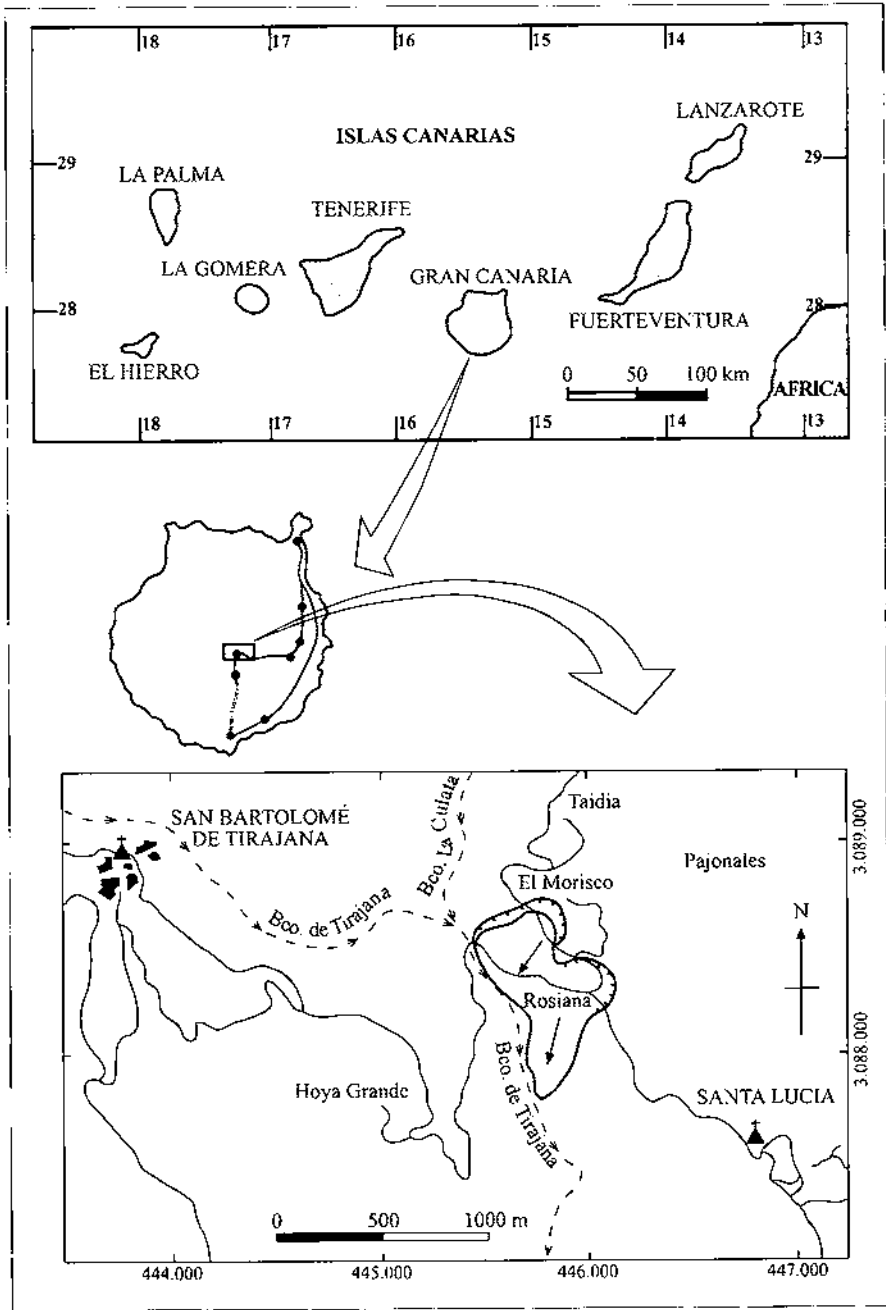


Figura 1. Plano de situación del deslizamiento de Rosiana.

1956 se desencadenó como consecuencia de precipitaciones excepcionales que alcanzaron los 272 mm en 24 h y se mantuvo en movimiento nueve días. La inestabilidad afectó a un tramo de carretera de 600 m y a numerosas construcciones, las cuales quedaron destruidas y desplazadas de su posición original. Se movilizaron unos $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ de materiales, afectando a una superficie de 330.000 m^2 y provocando la evacuación de unas 250 personas.

Los datos obtenidos de los desplazamientos relativos entre los estribos del antiguo puente de Rosiana permiten concluir que, con posterioridad al importante deslizamiento de 1956, las masas de terreno se han seguido moviendo (9,3 cm hasta 1990 y 11,8 cm entre 1990 y 1996).

Las sucesivas reactivaciones –por lo menos cuatro en los últimos 100 años– demuestran el carácter dinámico del deslizamiento, por lo que la zona constituye un área de riesgo elevado.

Características geomorfológicas

De acuerdo con los trabajos realizados por Lomoschitz y Corominas (1996, 1997 a y b), la zona inestabilizada de Rosiana corresponde al pie de un conjunto de deslizamientos de grandes dimensiones, movilizados con anterioridad, que se extienden desde el fondo del barranco hasta la base de los escarpes superiores (figura 2).

El movimiento dominante se identifica como un deslizamiento traslacional en suelos. La superficie principal de rotura es plana y paralela a la ladera, y se sitúa a una profundidad comprendida entre 12 y 25 m respecto a la rasante topográfica.

Por debajo de las cicatrices superiores y hasta la carretera, la topografía es irregular y muestra escalones naturales que corresponden a planos de rotura que limitan una sucesión de cuerpos deslizados (rellanos) cuyo espesor disminuye en sentido descendente. En esta zona de cabecera del deslizamiento la pendiente general es de 20 a 35°.

La franja central de la masa deslizada, situada por encima y por debajo de la carretera, tiene pendientes elevadas (unos 25° de media) pero se suaviza algo más abajo (ángulos de 8 a 14°), en los denominados Llanos de Rosiana. Allí los límites laterales del deslizamiento son claros. El curso actual del barranco de Tirajana ha erosionado lateralmente la masa deslizada y ha dejado márgenes verticales de hasta 3 m de altura.

El límite inferior del deslizamiento está igualmente marcado por su morfología, ya que éste avanzó, a modo de lengua, invadiendo bancales de cultivo. Su forma lobulada y la ruptura de pendiente frontal son los mejores indicadores del borde más avanzado del pie.

Existen otros signos externos, además de los morfológicos, que tienen su origen en los movimientos de 1956. Se trata de construcciones rotas o agrietadas, palmeras inclinadas a favor y en contra del movimiento y construcciones no afectadas que indican su posición ajena al movimiento.

Los materiales involucrados en el deslizamiento son depósitos de estructura interna caótica, constituidos por fragmentos muy heterométricos, de tamaño grava a gran-

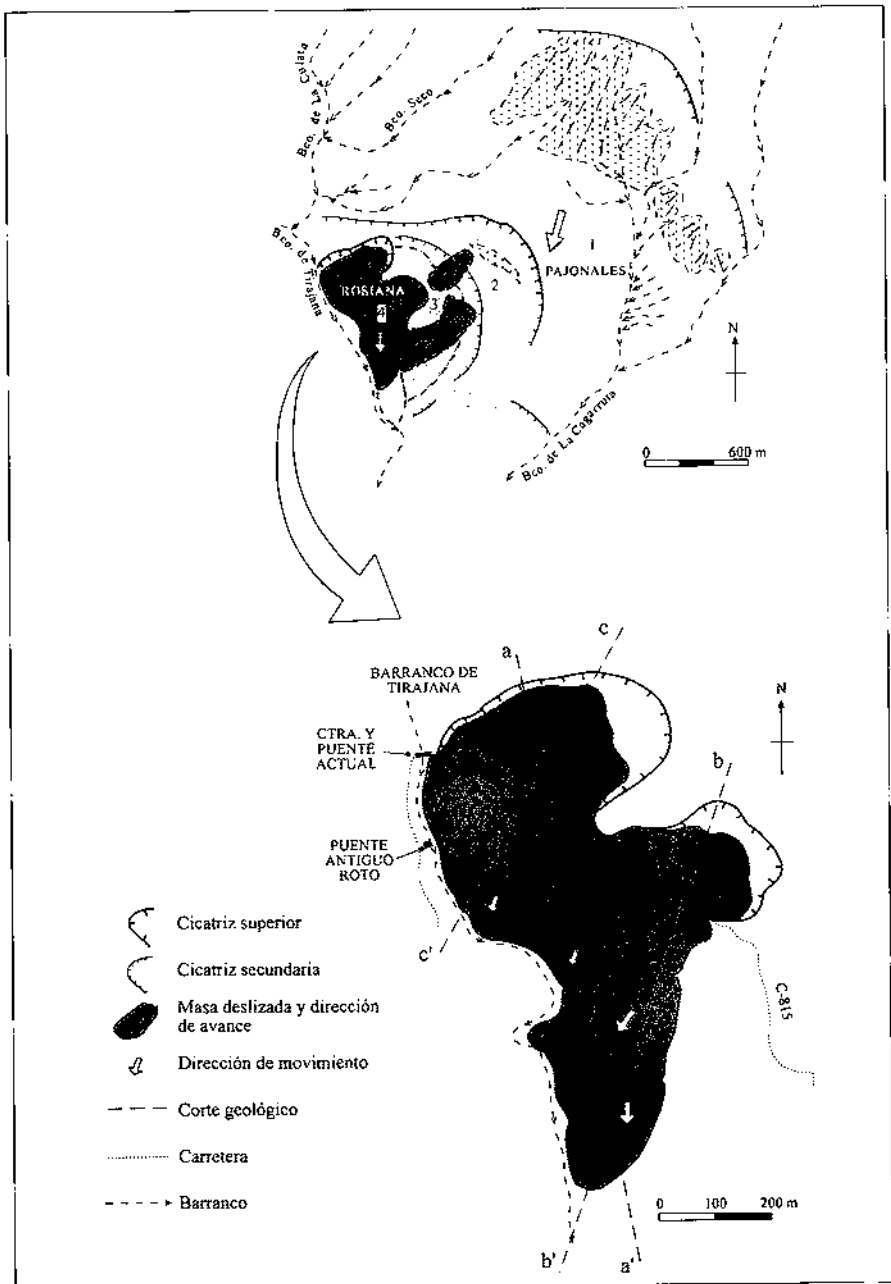


Figura 2. Esquema general de las cicatrices y cuerpos deslizados del sector de Pajonales-Rosiana. Detalle de la disposición en planta de los límites y de las formas principales del deslizamiento de Rosiana de 1956.

des bloques, incluidos en una matriz arcillo-arenosa que representa por término medio el 40% del volumen total, aunque en ciertas zonas los fragmentos de roca son casi exclusivos. En sentido amplio, se pueden considerar coluviones con una intensa meteorización mecánica y química de sus componentes; si bien se han encontrado también depósitos aluviales en el interior de las masas deslizadas. En términos geotécnicos, corresponden al tipo GC según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

La composición de los fragmentos es variada: lavas fonolíticas, ignimbritas, tobas volcánicas, lavas basálticas y brechas volcánicas, estas últimas en pequeña proporción. En conjunto las rocas originales son todas volcánicas y corresponden a formaciones de composición traquítico-riolítica y fonolítica, atribuidas al Mioceno medio-superior y al Plioceno, respectivamente.

METODOLOGÍA

La elección del método geofísico para llevar a cabo el reconocimiento preliminar del subsuelo del deslizamiento de Rosiana ha venido condicionada por varios factores. Por un lado, los dependientes de las características de la zona, tales como las condiciones orográficas y, especialmente, las previsible geometrías de los depósitos gravitacionales. Y por otro lado han influido los factores (potencialidades y limitaciones) condicionantes relativos a los distintos métodos geofísicos aplicables en el contexto geológico de la zona. A éstos se suma el objetivo genérico de la prospección geofísica que es contribuir a obtener la máxima información a un coste reducido.

Teniendo en cuenta estos factores, se decidió emplear el método de sismica de refracción por ser el procedimiento más idóneo para alcanzar los objetivos marcados.

Generalidades del método sísmico de refracción

Son numerosos los tratados que describen las características y principios básicos del método sísmico de refracción (Griffiths & King 1965; Rodpath 1973; Dobrin 1976 y Mooney 1981).

A grandes rasgos el método consiste en producir un pequeño sismo artificial por medio, generalmente, de la detonación de una carga explosiva enterrada en el subsuelo, o bien por el golpeo de una maza sobre una placa metálica situada sobre el terreno. Las velocidades de las ondas producidas se miden a partir de los tiempos de llegada registrados por unos detectores o geófonos convenientemente situados en la superficie del terreno (figura 3). Conocida la ley de propagación de la velocidad de las ondas sísmicas en el subsuelo, en función de los tiempos y distancias medidos, se detecta la posición de los niveles o capas geofísicas en profundidad.

Las ondas producidas por la explosión se propagan en todas direcciones, y cuando cambian las condiciones del medio, es decir, cuando la onda sísmica en su recorrido

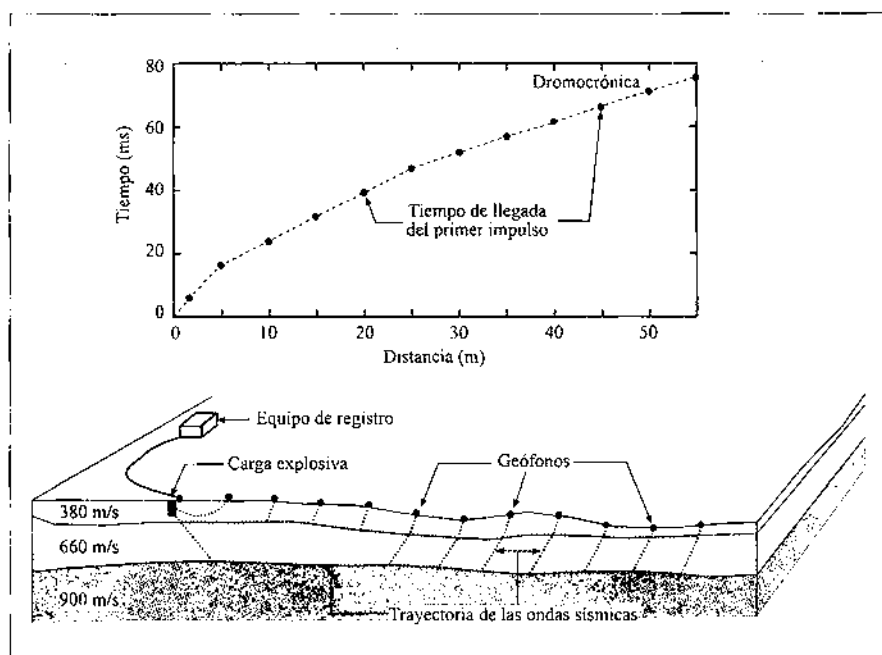


Figura 3. Esquema de la aplicación del método sísmico de la refracción y gráfica dromocrónica resultante, modificado de Redpath (1973).

en profundidad encuentra un medio de propagación distinto al anterior y de mayor resistencia, parte de la energía se refleja volviendo a la superficie y parte se refracta siguiendo su viaje bajo tierra. Dentro de la energía refractada hay una parte que experimenta refracción total, propagándose entonces a lo largo del contacto entre los diferentes medios y volviendo asimismo a la superficie.

El método sísmico de refracción se basa en la medida, desde la superficie del terreno, de los tiempos de llegada de las ondas de compresión (P) que sufren la refracción total o crítica, según la ley de Snell y el principio de Huygens.

A partir del conocimiento de los tiempos de la primera llegada de la onda P a cada uno de los geófonos y de las distancias que les separan del punto de disparo (gráfico tiempo-distancia conocido como dromocrónica), los diferentes modelos sísmicos permiten calcular las profundidades y velocidades de cada uno de los refractores o niveles sísmicos que componen la sección estudiada. Estos modelos de cálculo se basan en los principios básicos de la propagación de las ondas compresivas (P), anteriormente citados.

Al igual que sucede con los métodos geofísicos eléctricos de tipo resistivo y electromagnético, los métodos sísmicos han sido muy utilizados en la investigación de movimientos de ladera. Son numerosos los ejemplos que aparecen

documentados en la literatura especializada. Los presentados por Trantina (1963), Carroll et al. (1972) y Brooke (1973) abarcan contextos geológicos diversos.

Los métodos sísmicos clasifican el terreno según la velocidad de propagación de las ondas elásticas, la cual se relaciona con las propiedades elásticas y con la densidad del material. La aplicación del método de prospección geofísica de sísmica de refracción al estudio de masas inestabilizadas se basa en el hecho de que los terrenos desplazados, rotos o fragmentados, presentan velocidades de propagación más bajas que los mismos materiales *in situ*. Las relaciones entre estados de compactación, dureza o cementación del terreno y el valor de la velocidad de propagación de las ondas han sido ampliamente aplicadas al estudio del grado de excavabilidad o ripabilidad de terrenos.

La información aportada por estas técnicas geofísicas puede, según los casos, simplificar de manera notoria los problemas de correlación litológica en zonas intensamente fracturadas por procesos gravitatorios. La velocidad de propagación de las ondas compresivas (P) que caracteriza un nivel sísmico es un valor que se obtiene del promedio de estados tensionales existentes en la sección investigada. En ocasiones estos valores promedios aportan más información que la colección de datos puntuales.

Por otro lado, puede darse el caso de que el deslizamiento cause cambios erráticos en la densidad de los materiales y en consecuencia la transmisión de las ondas tenga lugar en un medio demasiado complejo para su determinación cuantitativa.

Obtención de datos geofísicos de campo

Las mediciones geofísicas se han realizado con un sismógrafo multicanal tipo EG&G-1225 GEOMETRICS.

Se han investigado en total nueve secciones o perfiles. El dispositivo utilizado ha sido el mismo en todas ellas (figura 4). Su longitud total es de 55 m, con una implantación de geófonos equidistantes 2,5 m en las zonas más próximas a los puntos de disparo y de 5 m para el resto de la línea sísmica. Aparte de los puntos de disparo directo (a), inverso (b) e intermedio (c), y siempre que los registros obtenidos lo han permitido (relaciones señal/ruido adecuadas), se han realizado disparos lejanos (e) y (d) situados a 27,5 m de los tiros directo e inverso, respectivamente.

La distribución de cada uno de los perfiles o secciones geofísicas es consecuencia, principalmente, del análisis preliminar efectuado de los datos geológicos y geomorfológicos disponibles (figura 5).

Los sismogramas obtenidos se han interpretado a partir de procedimientos basados en el análisis de las primeras señales de onda. En concreto se ha utilizado el método recíproco generalizado y el de tiempos de retardo, con la ayuda de los programas GREMIX y SESVIEW.

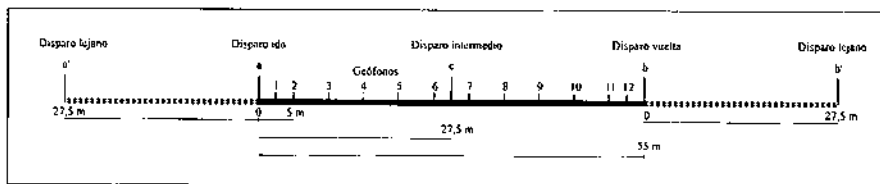


Figura 4. Dispositivo de medida utilizado en las secciones sísmicas de tiros múltiples.

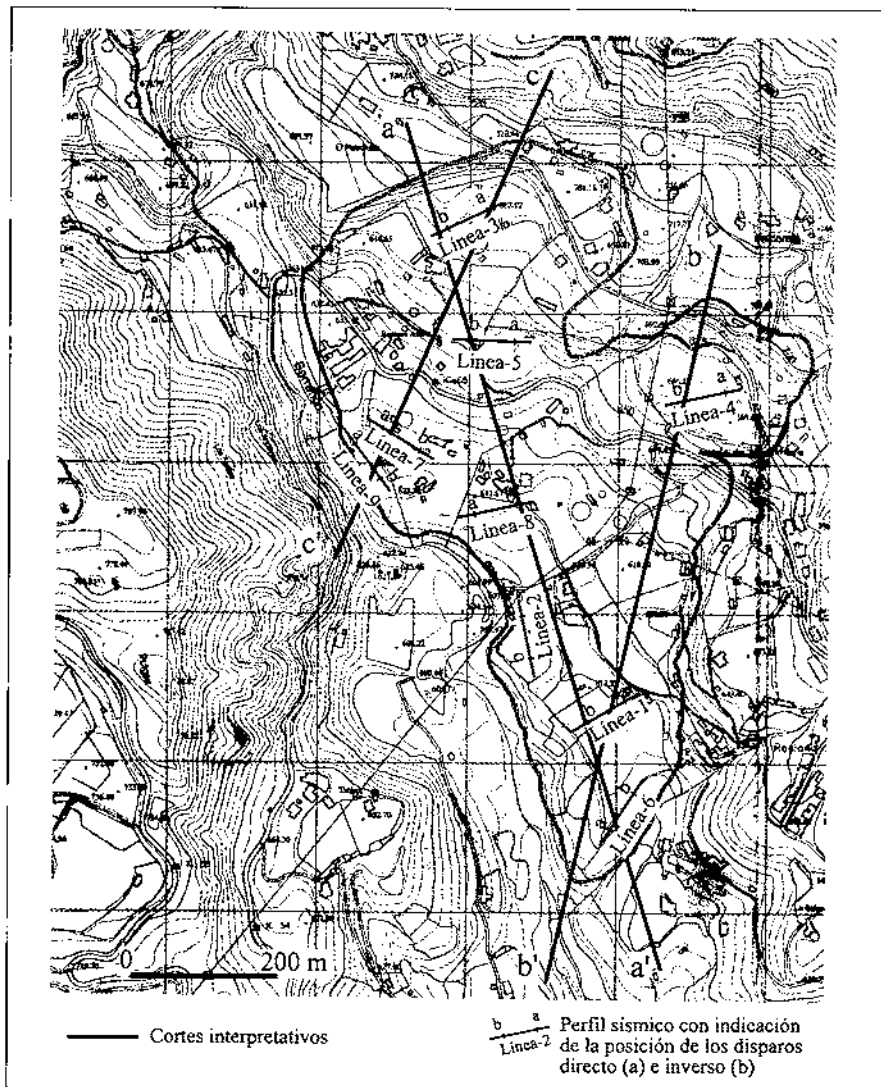


Figura 5. Situación de las secciones sísmicas y de los cortes interpretativos de las figuras 7, 8 y 9.

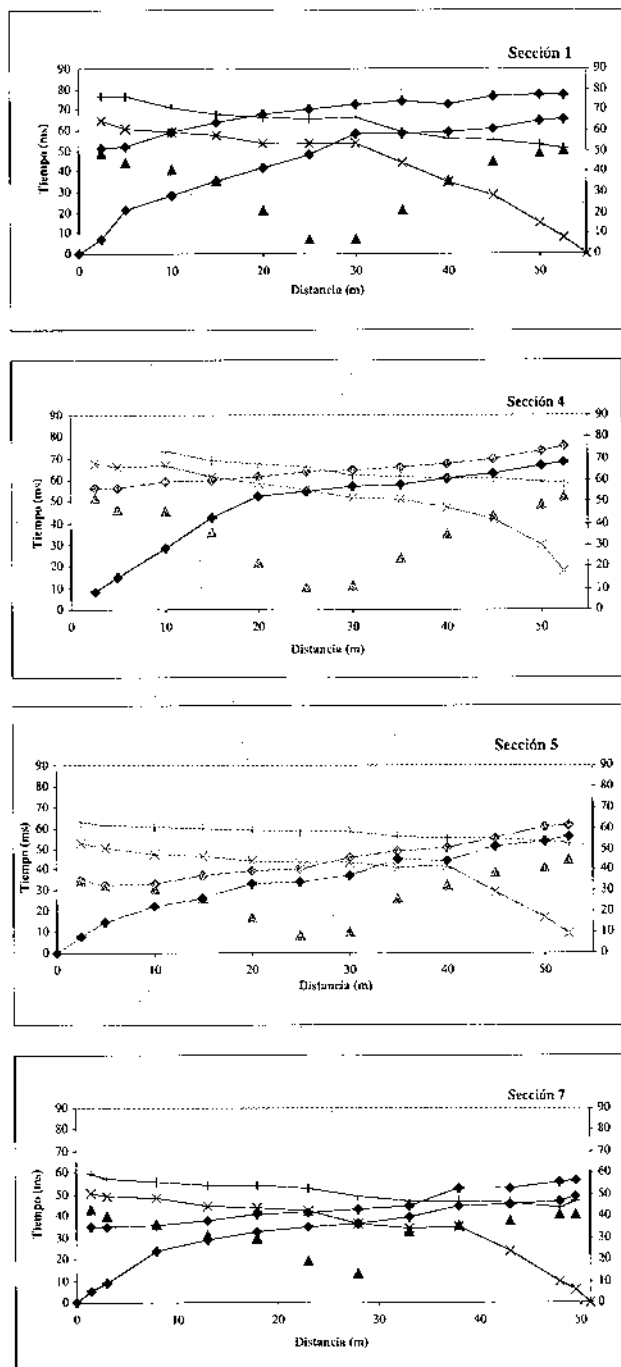


Figura 6. Ejemplos de domocronicas correspondientes a modelos sísmicos de 1 y de 2 refractores. Las secciones 7 y 4 se asocian a modelos sísmicos de 2 capas (1 refractor); las secciones 1 y 5 se han interpretado como modelos de 3 capas.

RESULTADOS

Se presenta a continuación la información obtenida, diferenciando, para ello, entre los datos geofísicos y su posterior interpretación.

Mediciones geofísicas

Las dromocrónicas obtenidas ponen de manifiesto la existencia de modelos sísmicos de 2 y de 3 refractores (figura 6).

En todas las secciones sísmicas se detecta la presencia de un refractor basal caracterizado por velocidades altas que oscilan entre 1.999 m/s y 3.363 m/s. Éste se identifica a profundidades que oscilan entre los 4 m y los 11 m; en los tramos de cabecera del movimiento presenta velocidades más bajas próximas a 2.200 m/s, a la vez muy constantes (líneas o secciones nº 3, 4 y 5). En el resto de las secciones las velocidades que se obtienen varían entre los 3.363 m/s y los 2.185 m/s; se observa una cierta gradación de las velocidades de manera que hacia zonas distales del deslizamiento este refractor basal experimenta una progresiva disminución de velocidad.

Por encima de este nivel sísmico basal, se identifican, por lo general, otros dos niveles con velocidades notoriamente más bajas: del orden de unos 300 m/s a 400 m/s en el caso del más superficial, y entre unos 600 m/s a 850 m/s en el caso del intermedio. Este último nivel también muestra una cierta tendencia a disminuir de velocidad hacia zonas distales del deslizamiento.

Una primera valoración del conjunto de los datos sísmicos obtenidos nos lleva a proponer una distinción de dos zonas o áreas principales dentro de la masa inestabilizada. El trazado de la carretera local GC-815 coincide aproximadamente con el límite entre ambas zonas.

Integración de las medidas geofísicas con los datos geomorfológicos disponibles

Las asociaciones realizadas entre niveles sísmicos y tipos de litologías permiten diferenciar las principales masas inestabilizadas de Rosiana (figuras 7, 8 y 9).

Los niveles sísmicos más superficiales, caracterizados por presentar velocidades inferiores a los 850 m/s y profundidades menores de los 11 m, se asocian a suelos en el sentido geotécnico del término. Aquí, se incluyen los depósitos coluviales que recubren gran parte de la zona de cabecera del movimiento y las masas deslizadas de la parte frontal del mismo. En general, los primeros se conforman como un único nivel sísmico de baja velocidad (inferior a los 350 m/s) y espesores variables comprendidos entre unos 4 y 8 m. Por su parte, los materiales inestabilizados se relacionan con dos niveles sísmicos superpuestos que presentan velocidades, crecientes en profundidad, comprendidas entre unos 300 m/s y 850 m/s. La progresiva disminución de velocidad que experimentan lateralmente estas masas deslizadas, hacia partes distales del movimiento, es indicativa de su génesis gravitacional (figura 7). De acuerdo con los parámetros físicos del terreno que condicionan la velocidad de propagación de las ondas P, parece lógico pensar que un mayor grado de fracturación y

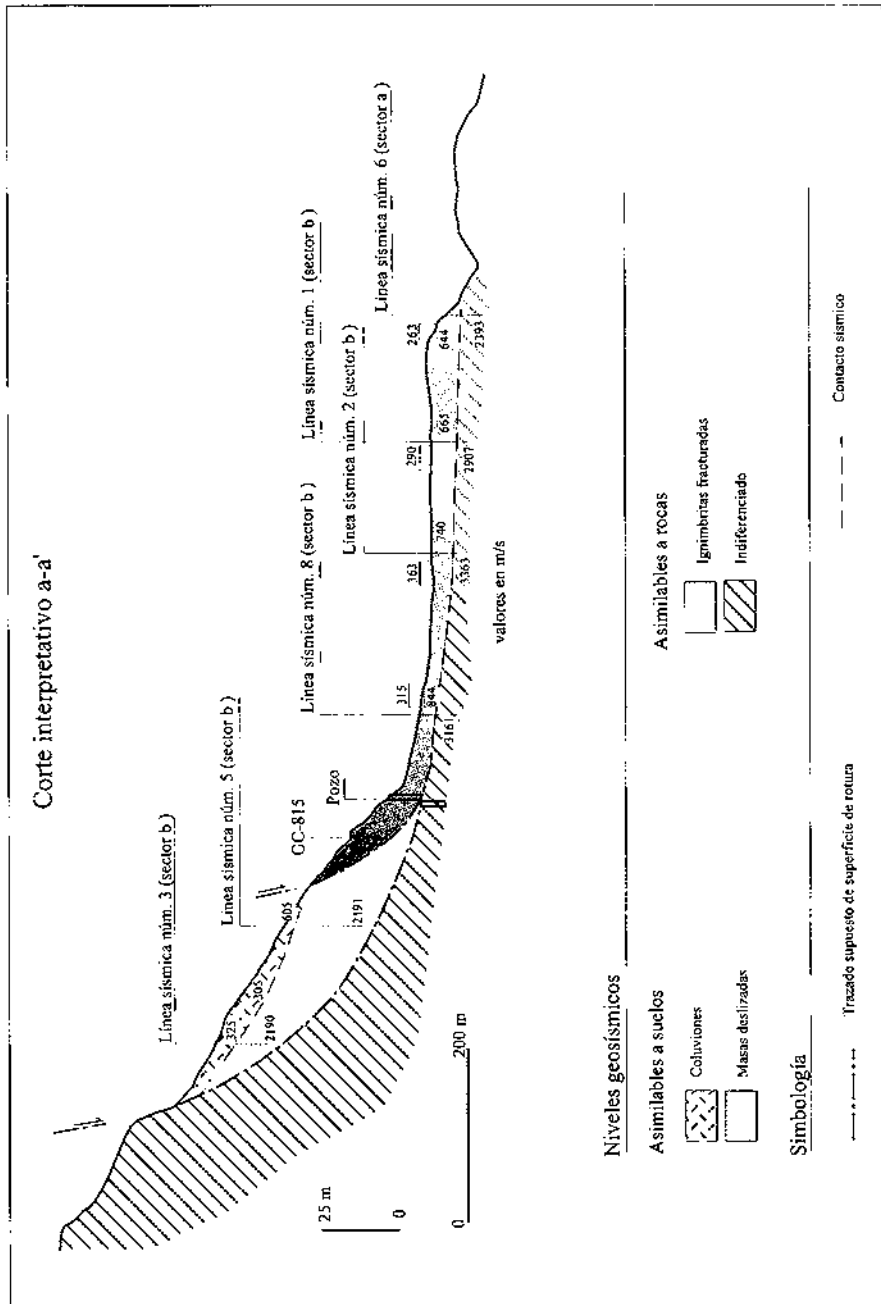


Figura 7. Corte interpretativo a-a'.

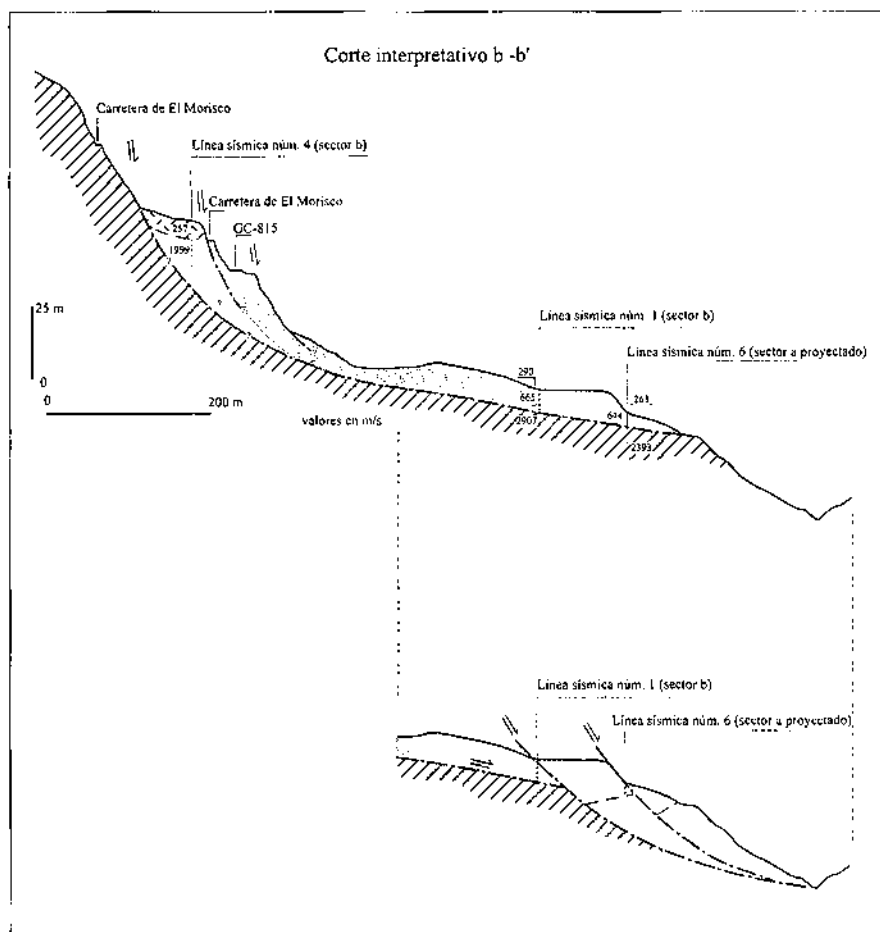


Figura 8. Corte interpretativo b-b' y posible modelo alternativo. Leyenda en figura 7.

dislocación interna del material se traduzca en una disminución de la velocidad de propagación. De esta forma, si el incremento del grado de cuarteamiento de la masa inestabilizada es progresivo hacia partes distales del movimiento, la disminución de la velocidad también lo será en ese mismo sentido.

El contraste entre estos niveles geosísmicos descritos y los refractores basales es muy marcado. En la zona de cabecera del movimiento se obtienen contrastes de velocidades superiores a 1.500 m/s, y en algunos puntos de la zona media y baja del deslizamiento se llegan a superar los 2.700 m/s. En conjunto estos niveles geosísmicos se asocian a rocas, en el sentido geotécnico del término.

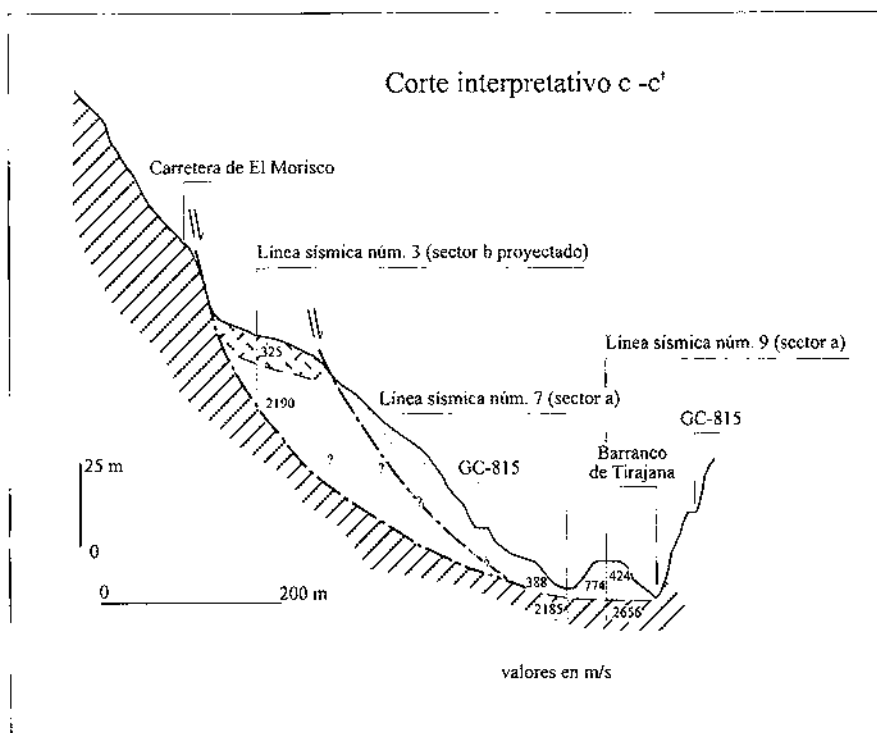


Figura 9. Corte interpretativo b-b' y posible modelo alternativo. Leyenda en figura 7.

La distribución en planta de los valores de velocidad de estos refractores inferiores muestra una notoria concordancia con los datos geomorfológicos. Las rocas, ignimbríticas fracturadas, involucradas en el movimiento en las zonas de cabecera, se caracterizan por presentar velocidades de propagación muy constantes del orden de unos 2.200 m/s. Por su parte, en las rocas que constituyen el refractor basal de la zona ocupada por las masas inestabilizadas del movimiento, en sus tramos medios y bajos del movimiento la velocidad suele ser más alta, 3.363 m/s como valor máximo detectado. En estos últimos sectores, la tendencia observada de progresiva disminución de la velocidad hacia partes distales del deslizamiento es interpretada, al igual que en el caso de determinados niveles sísmicos más superficiales, como consecuencia de un mayor grado de fracturación de los materiales debido a desplazamientos gravitacionales.

La continuidad en el subsuelo de las asociaciones geosísmicas propuestas puede ser resuelta según modelos geométricos diversos (figura 8). De entre los posibles se ha optado por aquél que mejor concuerda con los datos geomorfológicos disponibles.

CONSIDERACIONES FINALES

Los datos geofísicos obtenidos, una vez interpretados según la información geológica existente e integrados en los esquemas geomorfológicos propuestos, han permitido completar una primera visión de la geometría de las masas inestabilizadas de Rosiana. Estos mismos datos plantean nuevos interrogantes acerca de los posibles modelos geométricos que se pueden aplicar en la caracterización del movimiento de Rosiana, y orientan, de esta manera, futuras investigaciones geomorfológicas y/o posibles emplazamientos de sondeos de reconocimiento.

Por otro lado, la aplicación del método de prospección geofísica de sísmica de refracción al estudio de masas inestabilizadas de Rosiana ha permitido comprobar que un incremento progresivo en el grado de deformación, fragmentación o rotura de un material se traduce, generalmente, en una disminución, igualmente progresiva, de la velocidad o grado de compacidad sísmica de los terrenos. Este hecho ha sido aplicado en nuestra zona, como un criterio de correlación entre los niveles sísmicos y los principales grupos litológicos existentes.

En los terrenos esencialmente detríticos de grano medio a fino, que constituyen las masas inestabilizadas de las partes más bajas del movimiento de Rosiana, se han medido disminuciones de velocidades que alcanzan un valor máximo de unos 200 m/s. En los materiales atribuidos a rocas, en el sentido geotécnico del término, estos mismos valores se aproximan a los 1.000 m/s.

Por último, podría resultar interesante en futuras investigaciones realizar mediciones periódicas de la velocidad de propagación de las ondas compresivas en una determinada sección de la masa deslizada. Tal vez así se podrían llegar a identificar cambios en los valores de estas velocidades y esto permitiría aplicar esta técnica geofísica a la monitorización o control del inicio y de la progresión de las fracturas de tensión que acaban desencadenando un deslizamiento, de acuerdo con las técnicas propuestas por Dearman y Ouderhoven (1976).

AGRADECIMIENTOS

Este estudio, desarrollado durante el periodo comprendido entre 1998 y 2000, ha sido financiado por la Comisión Europea, contrato ENV4-CT97-05527- (RUNOUT project: *Major risk from rapid, large-volume landslides in Europe: the design and testing of new techniques for hazard assessment and mitigation*).

Referencias bibliográficas

- GRIFFITHS, D.H. & KINGS, R.F. (1965): *Applied Geophysics for engineers and geologists* (2on ed.). Oxford, England, Pergamon Press, 223 p.
- DEARMAN, W.R. & OUDERHOVEN, M.S. (1976): *Velocity-Based Method for Slope Failure Detection*. Report of Investigations 8194. Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior, 19 p.

- DOBRIN, M.B. (1976): *Introduction to geophysical prospecting* (3er ed.). New York, McGraw-Hill, 630 p.
- LOMOSCHITZ, A. & COROMINAS, J. (1996): Los depósitos de deslizamientos gravitacionales del centro-sur de Gran Canaria. *Geogaceta*, 20(6), pp. 1346-1348.
- LOMOSCHITZ, A. & COROMINAS, J. (1997a): La depresión de Tirajana, Gran Canaria. Una macroforma erosiva producida por grandes deslizamientos. *Cuaternario y Geomorfología*, 11 (3-4): 75-92.
- LOMOSCHITZ, A. & COROMINAS, J. (1997b): Actividad histórica y características de los movimientos de ladera de Rosiana, Gran Canaria. *Boletín Geológico y Minero*, Madrid, 108 (6): 553-568.
- MOONEY, H.M. (1981): *Handbook of engineering geophysics*, V.1: Seismic. Minneapolis, Bison Instruments, Inc, 220 p.
- REDPATH, B.B. (1973): *Seismic refraction exploration for engineering site investigations*. National Technical Information Service. U.S. Department of Commerce, 51 p.