

62780

**DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA  
CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE  
FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD  
MEDIANTE ENSAYOS HIDRÁULICOS**

**Informe final de proyecto**

**Septiembre 2004**



MINISTERIO  
DE EDUCACIÓN  
Y CIENCIA



Instituto Geológico  
y Minero de España

62780

<b>INFORME</b>	<b>Identificación: H 1.002.04</b>
	<b>Fecha: 30-9-2004</b>
<b>TÍTULO</b> <b>DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA CARACTERIZACIÓN</b> <b>HIDROGEOLÓGICA DE FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD</b> <b>MEDIANTE ENSAYOS HIDRÁULICOS</b> <b>Informe final de proyecto</b>	
<b>PROYECTO</b> <b>DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA CARACTERIZACIÓN</b> <b>HIDROGEOLÓGICA DE FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD</b> <b>MEDIANTE ENSAYOS HIDRÁULICOS</b>	
<b>RESUMEN</b>  <p>El objetivo principal del proyecto ha sido completar la aplicación de la Unidad Móvil de Hidrogeología (UMH) de formaciones de baja permeabilidad a la caracterización hidráulica de rocas plutónicas. Durante el año 2003, y para llevar a cabo este objetivo, se ha perforado un sondeo de reconocimiento localizado en el término municipal de Cadalso de los Vidrios (Madrid), a unos 3,5 km al Este de la población, concretamente en la cantera de la concesión de explotación "El Venero". El sondeo tiene 200 m de profundidad y un diámetro de 116 mm. Se han llevado a cabo dos fases de caracterización: de reconocimiento general y de detalle.</p> <p>Los resultados obtenidos han permitido caracterizar hidrogeológicamente el entorno del macizo granítico en el que se ha realizado la perforación y han servido para establecer un análisis comparativo entre los diferentes métodos de ensayo.</p> <p>Asimismo, se ha profundizado en el conocimiento estructural, petrológico y geoquímico de las rocas plutónicas del área estudiada, dado su creciente interés como aprovechamiento minero desde el punto de vista de la producción, elaboración y comercio del granito en la Comunidad Autónoma de Madrid.</p>	
<b>Revisión</b>  <b>Nombre:</b> <i>J.M. A. Lopez Pita</i> <b>Unidad:</b> <i>Hidrogeología y Aguas Subterráneas</i> <b>Fecha:</b> <i>27/9/2004</i>	<b>Autores:</b> M. Mejías Moreno, F. Bellido Mulas, M. Armendáriz Dufur  <b>Responsable:</b> Miguel Mejías Moreno

**DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA  
CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE  
FORMACIONES DE BAJA PERMEABILIDAD  
MEDIANTE ENSAYOS HIDRÁULICOS**

**Informe final de proyecto**

**M. Mejías Moreno  
F. Bellido Mulas  
M. Armendáriz Dufur**

## ÍNDICE

MOTIVACIÓN DE LOS TRABAJOS DESARROLLADOS Y OBJETIVOS....	2
ANTECEDENTES.....	4
ELECCIÓN DEL ÁREA PILOTO Y DESCRIPCIÓN DEL SONDEO DE RECONOCIMIENTO.....	5
ESTUDIO ESTRUCTURAL, PETROLÓGICO Y GEOQUÍMICO DE LOS LEUCOGRANITOS DEL SONDEO DE CADALSO DE LOS VIDRIOS Y DE LAS ZONAS DE ALTERACIÓN INTERSECTADAS.....	7
INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA.....	30
RESULTADOS.....	40
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	

### ANEXOS

Anexo I FR datos sobre la fracturación en el sondeo

Anexo II estudio petrográfico de las muestras del sondeo

Anexo III estudio por difracción de rayos x

Anexo IV fotografías de fracturación, petrografía y testigos

Anexo V identificación de muestras

## **MOTIVACIÓN DE LOS TRABAJOS DESARROLLADOS Y OBJETIVOS**

El presente trabajo se enmarca dentro de las actividades científico-técnicas del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Organismo Público de Investigación adscrito al Ministerio de Educación y Ciencia, y forma parte de los trabajos de caracterización hidráulica mediante la aplicación de la Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica de formaciones de baja permeabilidad (UMH) desarrollada por el IGME. La duración del proyecto ha sido de tres años, desde agosto 2001 a julio 2004, número SICOAN 2001062.

Los objetivos del trabajo pueden resumirse en los siguientes apartados:

- Obtener los parámetros hidráulicos de la formación estudiada, en secciones aisladas mediante obturadores, en un sondeo de reconocimiento perforado en materiales graníticos y situado en el sector oriental del Sistema Central, concretamente en la cantera de granito ornamental de la empresa Marcelino Martínez Madrid, S.L., en el término municipal de Cadalso de los Vidrios (Madrid).
- Profundizar en el conocimiento estructural, petrológico y geoquímico de las rocas plutónicas del área estudiada, dado su creciente interés como aprovechamiento minero desde el punto de vista de la producción, elaboración y comercio del granito en la Comunidad Autónoma de Madrid. Si bien el carácter metodológico y experimental de las actividades previstas en este trabajo aportan resultados puntuales, representativos tan solo del entorno próximo al punto en que son adquiridos, si supone en cambio la aportación de una información hidrogeológica y geológica que por su requerimiento instrumental y coste económico no es obtenida de forma habitual.
- Optimizar y validar la metodología general de caracterización hidrogeológica y el protocolo de actuación aplicados con la UMH, establecidos en estudios de caracterización llevados a cabo en otros materiales (rocas sedimentarias, metamórficas y volcánicas), para su utilización en rocas plutónicas.

- Desarrollar un programa de realización y comparación de los métodos de ensayo utilizados con la UMH (inyección en régimen transitorio, inyección en régimen pseudoestacionario, recuperación de presiones, slug y pulso), que permita definir el rango de conductividad hidráulica aplicable para cada método con la instrumentación desarrollada y analizar la representatividad de los valores de conductividad hidráulica obtenidos.
- Un último objetivo de este trabajo ha sido la actualización y mejora de los sistemas de control y medida (electrónicos, hidráulicos, mecánicos, etc) que componen los diversos sistemas de la UMH, procediendo a su mantenimiento o sustitución por tecnologías más avanzadas.

## **ANTECEDENTES**

En los últimos años el estudio de formaciones geológicas de baja permeabilidad ha experimentado un importante desarrollo debido a la utilidad de este tipo de materiales como barrera natural, que circunde el área de almacenamiento o vertido de diferentes tipos de residuos (urbanos, mineros e industriales), evitando que el agua pueda poner en contacto los residuos con la biosfera. Por otro lado, la creciente demanda de recursos hídricos ha llevado a considerar los medios de baja permeabilidad, y en concreto las formaciones fracturadas plutónicas, metamórficas, sedimentarias consolidadas y volcánicas, como una potencial fuente de recursos hídricos subterráneos capaces de resolver problemas de abastecimiento en pequeños núcleos urbanos o plantas industriales.

Diversos países han establecido programas de desarrollo tecnológico e investigación aplicados a mejorar las técnicas de estudio y el conocimiento de este tipo de formaciones, encaminados básicamente a su aplicación en el primero de los objetivos citados en el párrafo anterior. En España, a finales de la década de 1980, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Organismo Público de Investigación pionero en España en la investigación y aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos, estableció una primera línea de investigación sobre estado del arte y técnicas de estudio en estos materiales geológicos. Posteriormente, en 1992, el IGME y la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos

(ENRESA) firmaron un acuerdo específico para “Estudio Hidrogeológico de Medios de Baja Permeabilidad” cuyos objetivos básicos fueron la formación de especialistas en el estudio de este tipo de materiales geológicos y el diseño y construcción de una unidad móvil para su caracterización hidrogeológica a través de la adquisición de los parámetros hidráulicos de la formación mediante ensayos hidráulicos. Durante las fases de diseño y construcción de la citada Unidad se contó con el asesoramiento técnico del Swedish Nuclear Fuel and Waste Management (SKB).

Hasta el momento se habían realizado estudios de caracterización hidrogeológica en rocas sedimentarias, metamórficas y volcánicas, entre los que cabe citar: "Estudio hidrogeológico del vertedero de residuos sólidos urbanos de COGERSA, Asturias" (arcillas); "Informe sobre los ensayos de permeabilidad realizados en el entorno de la balsa de residuos mineros de la mina de Boliden-Apirsa en Aznalcóllar, Sevilla" (margas); "Estudio sobre los ensayos de permeabilidad realizados en el proyecto minero Las Cruces. Gerena, Sevilla" (margas); "Ensayos de permeabilidad realizados en dos sondeos de investigación situados respectivamente al Sur y Este de las cortas mineras de Aznalcóllar y Los Frailes en la mina de Boliden-Apirsa, Aznalcóllar, Sevilla". Fases I y II (Mejías *et al.*, 2002) (rocas metamórficas y volcánicas). La realización de estos trabajos ha supuesto la adquisición de una notable experiencia en el estudio de los medios de baja permeabilidad y ha puesto de relieve una serie de incertidumbres, tanto metodológicas como instrumentales, en las que, como uno de los objetivos de este trabajo, se ha profundizado en su resolución.

## **ELECCIÓN DEL ÁREA PILOTO Y DESCRIPCIÓN DEL SONDEO DE RECONOCIMIENTO**

La elección de la zona de estudio se basó principalmente en consideraciones de tipo litológico, estructural, hidrogeológico y logístico. Se buscaba un área granítica, poco fracturada y alterada, con escaso aprovechamiento hidrogeológico, en la que se obtuvieran los permisos necesarios para perforar un sondeo de reconocimiento y se contase con ciertas medidas de seguridad, dado el elevado valor económico de la instrumentación a utilizar.

El sondeo de reconocimiento se localiza en el término municipal de Cadalso de los Vidrios (Madrid) a unos 3,5 km al Este de la población, concretamente en la cantera de la concesión de explotación “El Venero”, número 3045-01-01, cuyo concesionario corresponde a Marcelino Martínez Madrid S.L.

Los principales datos técnicos de la perforación se resumen en la tabla 1.

Características	Sondeo Cadalso 1
Coordenada X (Proyección UTM-30T)	0381065
Coordenada Y (Proyección UTM-30T)	4463244
Altura de emboquillamiento	840 m
Profundidad de perforación	200 m
Fecha de inicio de los trabajos de perforación	11-2-2003
Fecha de finalización de los trabajos de perforación	13-3-2003
Equipo de perforación	Hydro-185 (Boart-Longyear)
Sistema de perforación	Rotación, con extracción de testigo continuo y circulación directa
Lodo de perforación	Agua
Diámetro de perforación	0-3 m 146 mm (convencional) 3-11,8 m 122 mm (wire-line) 11,8 – 200 m 116 mm (convencional)
Entubación	Sin entubación

*Tabla 1. Características técnicas del sondeo Cadalso 1.*

Con el objetivo de minimizar la alteración producida en el medio geológico durante los trabajos de perforación, se realizó el sondeo utilizando exclusivamente agua como fluido de perforación y, una vez finalizado, se llevó a cabo una limpieza con circulación de agua, mediante inyección a fondo de sondeo, durante 24 horas.

## **ESTUDIO ESTRUCTURAL, PETROLÓGICO Y GEOQUÍMICO DE LOS LEUCOGRANITOS DEL SONDEO DE CADALSO DE LOS VIDRIOS Y DE LAS ZONAS DE ALTERACIÓN INTERSECTADAS.**

### **Encuadre geológico regional y descripción del macizo granítico.**

El macizo de Cadalso de los Vidrios es un plutón granítico que se localiza en la hoja N° 580 (Méntrida) del MTN a escala 1:50.000 y toma su nombre de la población de Cadalso de los Vidrios (Díaz de Neira *et al.*, en prensa). Su afloramiento tiene una forma groseramente rectangular y unas dimensiones aproximadas de 9x12 Km.

Está relacionado con el Complejo plutónico de Las Navas del Marqués - San Martín de Valdeiglesias e intruye en los monzogranitos porfídicos de Cebreros-El Tiemblo y en los metasedimentos preordovícicos del extremo sur del macizo metamórfico de El Escorial-Villa del Prado. El contacto septentrional con los granitoides del Complejo de San Martín de Valdeiglesias está definido por una zona de fracturación frágil, de dirección E-W.

Está constituido por dos facies graníticas principales que corresponden respectivamente a monzogranitos y leucogranitos biotíticos. Los monzogranitos tienen texturas equigranulares, de grano medio-groeso, mientras que los leucogranitos tienen menor contenido en biotita, un tamaño de grano menor y una cierta inequigranularidad debido a la presencia de fenocristales globulares de cuarzo de mayor tamaño que el resto de los componentes minerales. En la figura 1 se encuentra una cartografía esquemática de la distribución de las facies graníticas en el entorno del sondeo (Gómez-Moreno *et al.*, 1995).

Este sondeo se localiza en una de las principales canteras para la extracción de granitos ornamentales y está situado en superficie sobre el afloramiento de los leucogranitos biotíticos de grano medio que se conocen comercialmente con la denominación de “granitos blanco cristal”.

Estas rocas son algo inequigranulares a la escala de muestra de mano debido a la presencia de algunos cristales de cuarzo equidimensionales y mayores que el resto de los componentes

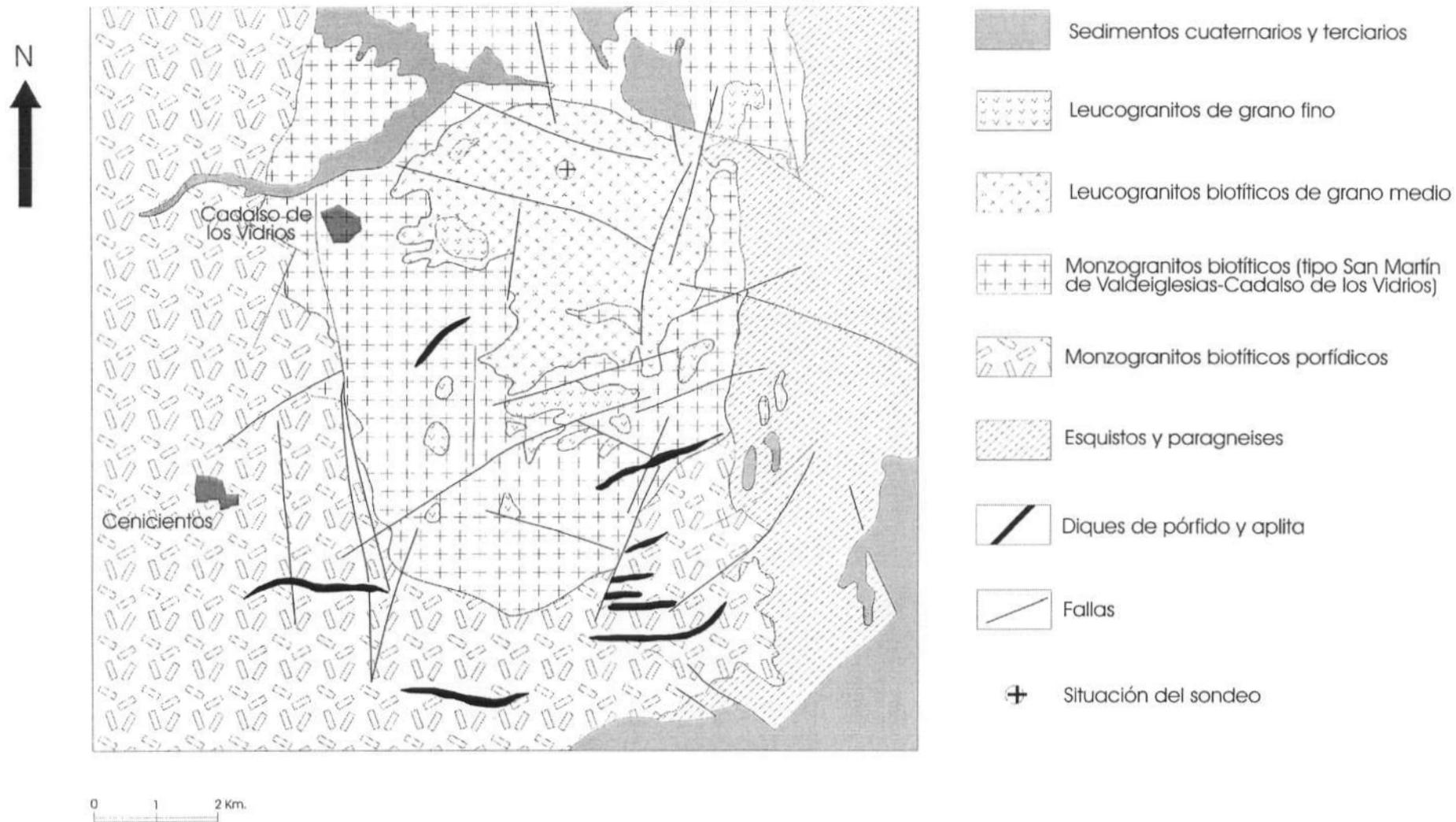


Fig. 1 Esquema geológico del entorno del macizo granítico de Cadalso de los Vidrios con la situación del sondeo estudiado ( Elaborado a partir del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 N° 580, MÉNTRIDA ).

minerales, cuyos tamaños varían entre 1 y 4 mm.. No obstante, a nivel de afloramiento se trata de granitos muy homogéneos bajo el punto de vista composicional y textural. Tienen un color blanquecino grisáceo y en ellos son muy escasas las estructuras bandeadas definidas por acumulaciones preferentes de mica (schlieren) y las venas y bolsadas aplítico-pegmatíticas; también son muy escasos los enclaves microgranudos o micáceos. En los testigos del sondeo se han encontrado algunos microenclaves biotíticos de color negruzco cuyo tamaño es inferior a 3 cm.

Su mineralogía principal consta de: cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa ácida y biotita. Los minerales accesorios más comunes son: apatito, circón y monacita, pudiendo encontrarse pequeñas proporciones de opacos y fluorita. Como minerales secundarios se encuentran: clorita, moscovita, micas amarillentas, sericita, clinozoisita, prehnita, epidota, esfena, feldespato potásico, albita, opacos, óxidos y calcita.

La textura es hipidiomórfica de grano medio, algo inequigranular debido a la presencia de fenocristales de cuarzo dispersos. Con respecto a las estructuras relacionadas con la tectónica, no se aprecia ningún tipo de orientación relacionada con las deformaciones hercínicas, tratándose de un plutón claramente postcinemático y de emplazamiento muy superficial. Se encuentran por el contrario estructuras frágiles asociadas con procesos de fracturación tardi y posthercínicos. Las más importantes en las inmediaciones de la zona corresponden a una serie de fracturas que tienen rellenos hidrotermales poco importantes y de baja temperatura (Cuarzo, clorita, epidota, carbonato cálcico, sulfuros) y a las que pueden asociarse procesos de episienitización de los granitos afectados, que se manifiestan a la escala de afloramiento en que estos granitos adquieren coloraciones rosadas más o menos intensas.

### **Fracturación regional y en el sondeo**

La fracturación en el Macizo de Cadalso de los Vidrios, particularmente en la zona estudiada, es poco importante, lo que unido a la homogeneidad de los granitoides, a la escasez de enclaves y a sus características estéticas hace que estos materiales reúnan unas excelentes condiciones para su utilización como rocas ornamentales.

Los sistemas principales de fracturación en el entorno del sondeo tienen direcciones que oscilan entre N-80°-E y N-90°-E y buzamientos de 70°-85°, estando asociados a procesos de episenitización. Los planos de fractura están tapizados por masas verdosas de grano fino de clorita, epidota, carbonatos, cuarzo y sulfuros oxidados. En estos planos pueden encontrarse estrías de falla normal con inmersiones elevadas (70°-85°), y otras con inmersiones menores (del orden de 40°) que indican la existencia de una apreciable componente de desgarre.

También se encuentran sistemas de fracturación subordinados con características análogas y direcciones similares (N-80°/100°-E) pero con menores buzamientos 36°-65° S o con distintas directrices (N-160°-E 82°-W, N-40°-E 75°SE y N-48°-E 80° SE).

En cuanto a las manifestaciones filonianas, estas son muy escasas, figura 2, y sólo se han encontrado algunas venas y filones aplíticos y felsíticos de potencias centimétricas que tienen direcciones próximas a N-70°-E y buzamientos subverticales que cortan a otras con direcciones N-150° a 160°-E, cuyos buzamientos son también elevados.

Los tipos de fracturas encontrados en el sondeo de reconocimiento de Cadalso de Los Vidrios son los siguientes:

- Roturas: corresponden a particiones del granito a favor de superficies irregulares y rugosas y son debidos al proceso de manipulación de los testigos para su extracción y acomodación en las cajas de almacenaje.
- Fracturas-diaclasas: se trata de particiones del granito a favor de superficies planas, que están condicionadas en la mayoría de los casos por el sistema de diaclasado del cuerpo granítico, y que se desarrollan en función del mecanismo de emplazamiento y enfriamiento del cuerpo plutónico, así como de la relajación por la descompresión debida a la erosión de los materiales suprayacentes o a la extracción de los granitos de los tramos superiores del sondeo.
- Fracturas-diaclasas asociadas a zonas de falla: corresponden a sistemas de partición planar asociados a zonas afectadas por fallas relacionadas con eventos de deformación frágil tardihercínicos o alpinos. Estos planos de fractura suelen tener en este caso buzamientos bastante elevados y forman ángulos bajos (<30°) con el eje del sondeo.

- Fracturas-diaclasas mineralizadas: corresponden a planos de discontinuidad generados por mecanismos equivalentes a los descritos previamente, aunque en este caso las fisuras se encuentran rellenas por minerales depositados por la circulación de fluidos ascendentes (relacionados con la evolución del cuerpo plutónico o con actividad hidrotermal posterior) o descendentes (relacionados con agua meteórica). En los rellenos se encuentra calcita, cuarzo o productos micáceos o arcillosos producidos en los procesos de alteración asociados a la circulación de los fluidos. La mayoría de los rellenos de fractura tienen un grosor inferior a 1 mm.

Toda la información sobre esta serie de fracturas, y su distribución según las profundidades y los ángulos que forman con respecto al eje del sondeo, está recogida en las tablas incluidas en el anexo FR, en el que se recogen todos los datos de fracturación tomados en el análisis de los testigos del sondeo.

El estudio de la distribución de las roturas en la columna del sondeo (anexo FR, figura 1) pone de manifiesto que hay un reparto relativamente homogéneo de las mismas, lo que indica que las causas que las han producido son de carácter aleatorio. En los tramos iniciales del sondeo, entre 3,5 y 3,8 m de profundidad, se encuentran algunas fracturas y fisuras subhorizontales en las que se aprecian oxidaciones y argilificaciones de los granitos debidas a la circulación de aguas superficiales. También se encuentran otros sistemas de fracturación subhorizontales a unos 8,25 m de profundidad con argilización y oxidación.

En el sondeo se han atravesado dos zonas de fracturación asociadas a fallas tardihercínicas o alpinas (figura 2) en las que los granitos presentan un grado de rotura y brechificación variable y están afectados por alteraciones hidrotermales debidas a la circulación de fluidos calientes mineralizados (Capote *et al.*, 1990). Estas zonas se localizan a profundidades de 66,6 m y 93 m, siendo la segunda mucho más importante y asociándose a ella una episienitización intensa y coloración rosada. En esta zona se produce además una fuerte cloritización y epidotización de la biotita y una movilización de cuarzo que se encuentra relleno algunas de las fracturas. También se observan en esta zona procesos importantes de argilización de los granitos que están posiblemente relacionados con rejuegos tardíos de la

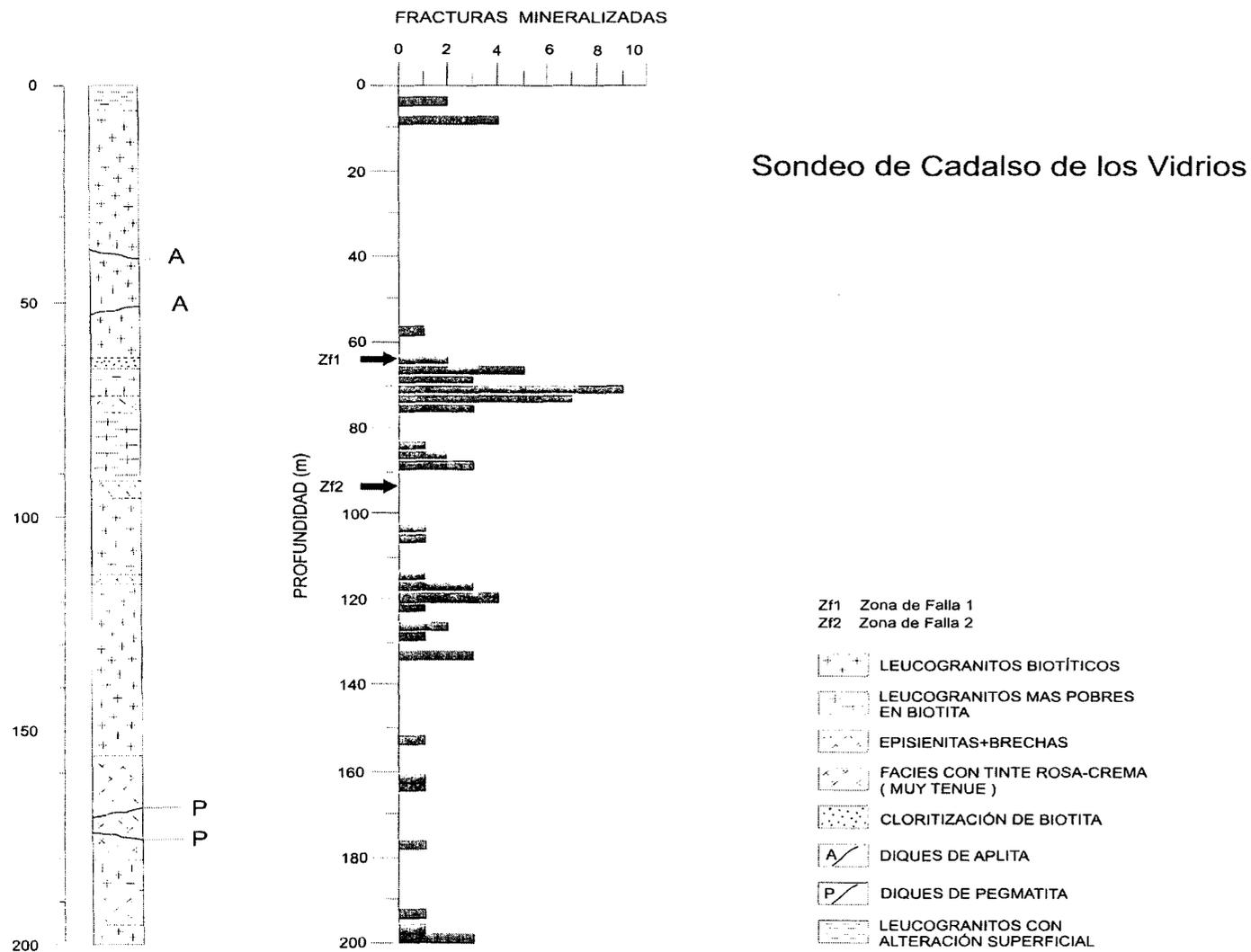


Figura 2.- Columna litológica sintética y distribución de fracturas en el sondeo Cadalso de los Vidrios

zona de fractura acompañados por alteraciones a baja temperatura asociadas a la circulaciónguas superficiales. Los testigos de esta zona corresponden a granitos muy brechificados, alterados y partidos en pequeños fragmentos. Se observan planos de fractura a  $15^{\circ}$  -  $20^{\circ}$  con el eje del sondeo y estrías de fractura bastante subverticales o con ángulos de  $45^{\circ}$  o superiores con la vertical, y que indican movimientos con una considerable componente de desgarre. En esta zona, tanto las interferencias entre distintos planos de rotura como las diferencias existentes entre el tipo de alteración de los granitos indican que ha habido superposición de al menos dos etapas de fracturación.

Fuera de estas zonas relacionadas con pequeñas fallas, los tipos de fracturas dominantes forman ángulos mayores de  $45^{\circ}$  con la vertical y se asocian principalmente a la descarga erosiva y a la relajación debida a la extracción de los granitos.

Las fracturas con ángulos menores de  $30^{\circ}$  se reparten a lo largo de toda la longitud del sondeo (anexo I FR, figura 2) pero se define un máximo en el tramo comprendido entre las dos zonas de fractura principales.

La familia de fracturas con ángulos comprendidos entre  $30^{\circ}$  y  $50^{\circ}$  presenta una concentración centrada en torno a las dos zonas de fractura principales y que abarca un tramo comprendido entre profundidades de 55 y 112 m (anexo I FR, figura 3).

Las fracturas con ángulos comprendidos entre  $50^{\circ}$  y  $70^{\circ}$  (bajos buzamientos) comienzan a manifestarse a profundidades superiores a 65 m, no encontrándose ninguna fractura de este grupo en los tramos superiores del sondeo (anexo I FR, figura 4).

Las fracturas con ángulos superiores a  $70^{\circ}$  (subhorizontales) se comienzan a manifestar principalmente a profundidades mayores de 60 m y al igual que sucede con la familia anterior, el tramo superior del sondeo se encuentra prácticamente libre de estas fracturas. En los primeros metros, a profundidades menores de 10 m, se encuentran algunas fracturas subhorizontales asociadas a los procesos relacionados con la alteración y los cambios térmicos superficiales (anexo I FR, figura 5).

Con respecto a las fracturas mineralizadas, las de ángulos menores de  $30^\circ$  con respecto a la vertical, no se encuentran hasta profundidades superiores a los 70 m, con un máximo principal a una profundidad de unos 74 m y definiéndose otro pico en torno a 133 m (anexo I FR, figura 6). Las que tienen ángulos comprendidos entre  $30^\circ$  y  $50^\circ$  son muy escasas y se concentran en las inmediaciones de la 1ª zona de fractura (anexo I FR, figura 7).

Las fracturas mineralizadas con ángulos entre  $50^\circ$  y  $70^\circ$  se concentran en el tramo de sondeo comprendido entre 65 y 130 m. Dentro de este tramo se observa que la máxima densidad de fracturas se concentra en las zonas extremas, en torno a 70 y 120 m (anexo I FR, figura 8). Por último, aquellas con ángulos superiores a  $70^\circ$  son relativamente escasas y tienen un máximo principal a una profundidad próxima a 70 m. En los tramos iniciales del sondeo, entre 3,5 y 3,8 m de profundidad, se encuentran en los testigos algunas fracturas y fisuras subhorizontales en las que se aprecian oxidaciones y argilificaciones de los granitos que son debidas a la circulación de aguas superficiales. También se encuentran otros sistemas de fracturación subhorizontales a unos 8,25 m, con caolinización y oxidación a favor de estas fracturas (anexo I FR, figura 9).

Existe un tramo superior del sondeo, comprendido entre 0 y 55 m, en el que la fracturación es muy baja. Por debajo de esta zona, la densidad de fracturación sufre un aumento considerable, apreciándose una serie de máximos y mínimos que presentan un espaciado medio entre picos del orden de 20 m. Esta configuración de distribución de fracturas es posiblemente debida al hecho de que la extracción de los testigos a partir de una determinada profundidad produce una relajación de esfuerzos brusca, con la consiguiente generación de fracturas. Por este motivo, en los tramos superficiales, en los que la carga es inferior y, por tanto, la relajación es menos importante, se registraría una menor fracturación.

Este hecho puede observarse claramente en el diagrama acumulado de fracturas totales con respecto a la profundidad del sondeo (anexo I FR, figura 10) en el que también se definen tramos con menor densidad de fracturación entre 80 y 100 m, entre 140 y 160 m y entre 180 y 200 m.

En relación a la presencia de fracturas en función de su ángulo de inclinación con respecto al eje del sondeo, se observa un fuerte predominio de las que forman ángulos superiores a 50° (bajo buzamiento), con una elevada proporción de éstas con ángulos superiores a 70°, relacionadas con los sistemas de fracturas de descompresión del macizo granítico (anexo I FR, figura 11).

Un matiz muy importante a la hora de interpretar el análisis de la fracturación consiste en el hecho de que una gran parte de las fracturas y fisuras observadas en los sondeos son debidas a la relajación de esfuerzos producida por efecto de la extracción de los testigos, al liberar a los granitos de la carga de los materiales suprayacentes. Estas fracturas son realmente de carácter virtual, ya que no están desarrolladas en los granitos en profundidad y por tanto carecen de efectividad en cuanto a la transmisividad de fluidos. Por tanto, cabe destacar que las únicas fracturas de las que existe constancia de circulación de fluidos son aquellas que tienen asociadas alteraciones o rellenos minerales de cualquier naturaleza y que, en muchos casos, estos mismos rellenos han producido su sellado e impermeabilización.

Las consideraciones precedentes determinan que el estudio de la fracturación, desde el punto de vista de su influencia en la permeabilidad de los materiales graníticos, debe centrarse principalmente en las fracturas relacionadas con zonas de falla y en las asociadas con cualquier tipo de alteración. En la figura 2 (junto a la columna del sondeo), se ha representado la distribución de estas fracturas en relación con las características de los granitoides.

Con respecto a los sistemas de fracturación regionales, el más antiguo corresponde al evento relacionado con la inyección de los diques de pórfidos graníticos que se concentra en un abanico de direcciones que oscila entre N 70°E y N 130°-E, y tiene buzamientos subverticales o muy elevados. Esta familia de fracturas está relacionada con la etapa Malagón, referida por los autores de la hoja MAGNA de San Martín de Valdeiglesias (Bellido *et al.*, 1990), que evoluciona desde procesos distensivos, con extensión N-S, a desgarres.

La inyección de los diques de cuarzo, lampróvido y sienita presenta unas directrices regionales con dirección Norte que fluctúan principalmente entre N 30°E y N 160°E, también con

buzamientos verticalizados, asociados, según los autores de la hoja MAGNA anteriormente referida, a la etapa Hiendelaencina (Vicente *et al.*, 1986).

Los sistemas de fracturas asociados a los procesos de episienitización en el Sistema Central presentan unas directrices medias principales próximas a E-W, encontrándose otros de menor importancia con dirección N-S. Estos procesos de episienitización han tenido lugar, según los datos radiométricos de Caballero *et al.* (1992), en un intervalo de tiempo comprendido entre 258,6 +/- 7 y 223,7 +/- 5.1 millones de años (Pérmico-Triásico).

Otros sistemas de fracturas son los relacionados con venas y filones de fluorita y baritina que se concentran en dos haces principales con direcciones N 60°/70°E y N 110°/125°E que, según datos geocronológicos corresponden a un evento de mineralización comprendido entre 152+/-4 y 156+/-6 millones de años (Jurásico tardío) (Galindo *et al.*, 1994).

### **Descripción de los materiales atravesados por el sondeo**

En los primeros metros del sondeo, los granitos presentan unas pequeñas aureolas de alteración de color ocre, en torno a cristales de biotita, que son debidas a procesos de oxidación de este mineral en relación con los procesos de meteorización y alteración por infiltración de aguas superficiales. También en estos primeros tramos se observa que las diaclasas y fisuras de descompresión de los granitos presentan alteraciones y tinciones por óxidos de hierro asociados a los mismos procesos. En estas zonas los granitos son algo más deleznable y están débilmente afectados por procesos de argilificación.

En la mayor parte del resto del sondeo los granitos presentan unas características bastante homogéneas en cuanto a su composición, textura y coloración, siendo muy escasas las heterogeneidades.

Ocasionalmente se encuentra alguna vena o masa pegmatítica, con cuarzo, albita, feldespato potásico y algo de biotita y turmalina, cuyas dimensiones mayores son de escasos centímetros. En algún caso, la masa pegmatítica puede tener una cavidad central en la que los

cristales de cuarzo desarrollan caras cristalinas libres. También se ha encontrado alguna pequeña cavidad rellena por cuarzo y clorita.

Los enclaves son muy escasos y de pequeño tamaño (su dimensión mayor no suele superar los 3 cm) y corresponden casi exclusivamente a tipos muy ricos en biotita, de color negruzco y de formas irregulares.

No se ha localizado en los testigos del sondeo ningún enclave de tipo microgranudo (gabarros). Únicamente se encuentran pequeños cúmulos policristalinos constituidos por cristales de biotita, plagioclasa y algo de cuarzo, que tienen tamaños comprendidos entre 5 y 8 mm y bordes difusos. Este tipo de agregados minerales es relativamente frecuente pero difícil de apreciar si no es mediante observación detallada.

Las manifestaciones filonianas son muy escasas y de pequeña entidad; solo se han interceptado en el sondeo un par de diques de aplita que tienen potencias reducidas (40 y 18 cm). Tienen bordes netos pero engranados con los leucogranitos encajantes y corresponden a variedades de grano muy fino y de color claro. En la zona interna del dique de mayor tamaño (localizado a una profundidad de 38,5 m) se individualizan algunas heterogeneidades pegmatíticas con grandes cristales de cuarzo y de feldespatos, con algunas láminas finas de biotita y turmalina. El buzamiento de estos diques es menor de 30°.

Otro tipo de heterogeneidades corresponden a masas o bandas de granitoides muy parecidos al tipo blanco cristal, pero ligeramente más pobres en biotita. Estos granitoides más leucocráticos presentan un paso insensible a los de la facies común. También se detectan algunos tramos, entre 156 y 167 m de profundidad, en los que los granitos son algo más ricos en biotita.

En algunas zonas los granitos presentan tintes rosados muy débiles debido a cambios en la coloración del feldespato potásico; así, se observan granitos con coloración rosada a profundidades comprendidas entre 71 y 75,5 m, entre 113,5 y 116 m, entre 156,2 y 174 m y entre 176 y 181 m. Estos granitos presentan un tránsito insensible con los de color blanquecino de la facies común.

Granitos con coloración rosada más intensa se encuentran en zonas de fractura afectadas por episenitizaciones asociadas a circulación de fluidos hidrotermales. Estas fracturas suelen tener rellenos de poca importancia y de coloración verdosa, constituidos principalmente por cuarzo, calcita, clorita, epidota.

En las rocas más afectadas por fracturas pueden definirse sistemas de microbrechificación a favor de las fisuras que pueden producir hidrotermalizaciones, crecimientos de micas de grano fino, albitizaciones, carbonataciones etc.

Toda esta serie de modificaciones texturales, estructurales, de coloración y composicionales descritas, están representadas esquemáticamente en la columna litológica del sondeo, figura 2.

### **Caracterización petrográfica de los materiales**

Los materiales atravesados por el sondeo corresponden a leucogranitos biotíticos de grano medio, de color blanco-grisáceo, muy homogéneos a la escala de afloramiento, aunque la presencia de algunos fenocristales de cuarzo de mayor tamaño les confiere un aspecto algo inequigranular a escala de muestra. Su mineralogía principal consta de: cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa ácida y biotita. Los minerales accesorios más comunes son: apatito, circón y monacita, pudiendo encontrarse pequeñas proporciones de opacos y fluorita. Como minerales secundarios se encuentran: clorita, moscovita, micas amarillentas, sericita, clinozoisita, prehnita, epidota, esfena, feldespato potásico, albita, opacos, óxidos y calcita. Sus texturas son hipidiomórficas, algo inequigranulares, de grano medio.

El cuarzo forma cristales equidimensionales alotriomorfos, subredondeados o subidiomorfos frente al feldespato potásico o agregados policristalinos. Suele estar cuarteado y tiene extinción ondulante o irregular. También tiene hábitos intersticiales y en pequeña proporción se encuentra como inclusiones redondeadas, idiomorfas o irregulares en los feldespatos o formando parte de las mirmequitas.

La plagioclasa tiene hábitos idiomorfos a subidiomorfos y su composición corresponde a albita. Los cristales tienen una distribución de tamaños seriada, maclado polisintético y zonados normales u oscilatorios difusos, pudiendo incluir cuarzo y biotita. Presentan alteración preferente en los núcleos y bordes albiticos o mirmequíticos en los contactos con el feldespato potásico. En menor proporción, se encuentra como cristales alotriomorfos pequeños y como gránulos de albita en los contactos entre cristales de feldespato potásico.

El feldespato potásico es perítico, tiene hábito alotriomorfo o algo subidiomorfo, presenta maclas de Carlsbad y, ocasionalmente, parches irregulares con maclas en enrejado. Con frecuencia incluye pequeños cristales idiomorfos de plagioclasa con bordes albiticos y en menor proporción contiene inclusiones de cuarzo y biotita. También puede aparecer como cristales alotriomorfos e intersticiales. Puede estar afectado por albitizaciones en forma de parches irregulares o de crecimientos policristalinos de albita sacaroide.

La biotita aparece como cristales subidiomorfos o alotriomorfos, independientes o formando pequeños agregados policristalinos. Tiene color marrón rojizo y con frecuencia está afectada por cloritizaciones. Puede contener inclusiones de pequeño tamaño de monacita idiomorfa de color amarillento y en menor proporción de circón, que producen en torno a ellas halos pleocroicos negruzcos. También incluye algunos cristales de apatito pequeños y finos. Presenta corrosiones marginales en los contactos con el feldespato potásico y la plagioclasa. Pueden encontrarse lenticulas interfoliares de prehnita, feldespato potásico y albita en algunas de las biotitas alteradas y también en algunos casos se encuentran gránulos de epidota.

La moscovita es muy escasa, se encuentra en la mayoría de los casos como pequeños cristales alotriomorfos que crecen adosados a los bordes de los cristales de biotita, como pequeños cristales de sustitución de los feldespatos y la plagioclasa o rellenando microfisuras en los mismos.

Las aplitas tienen colores muy blanquecinos y su composición mineralógica es muy similar a la de los leucogranitos de grano medio, aunque la proporción de biotita es más reducida. Tienen texturas alotriomórficas sacaroides de grano muy fino, pudiendo definirse algunos dominios con intercrecimiento micrográfico de cuarzo, albita y feldespato potásico.

En los granitos afectados por la fracturación suele observarse que el cuarzo presenta un mayor grado de rotura y los límites entre los gránulos presentan una suturación más compleja. También en estos casos es más acusada la extinción ondulante o irregular.

El feldespato potásico puede presentar fracturaciones, microbrechificaciones a favor de grietas y enturbiamientos. Los cristales de plagioclasa pueden presentar roturas, poligonizaciones irregulares, maclado mecánico y flexiones de macla. La biotita puede presentar flexiones y kinkamientos y en general está más cloritizada que en los granitos no fracturados, pueden encontrarse grietas con crecimientos de cristales muy finos de micas blanquecinas o amarillentas y microfisuras rellenas por cuarzo y calcita.

En los granitos rosados proto-episienitizados, además de los efectos mecánicos asociados a la fracturación, se aprecian enturbiamientos y albitizaciones del feldespato potásico, encontrándose algunos cristales casi completamente sustituidos por albita. También están afectados por albitizaciones irregulares sacaroides a favor de grietas.

La plagioclasa está albitizada y pierde el zonado aunque se conserva la alteración preferencial de los núcleos. Puede estar afectada por sericitizaciones, crecimientos de micas amarillentas y por carbonataciones, apreciándose en algún caso crecimiento de cristales de calcita muy alargados sobre ella. En algunas plagioclasas alteradas se observan parches irregulares de sustitución por feldespato potásico.

La biotita se encuentra cloritizada, conservándose en ella algunos restos de inclusiones de monacita, circón y apatito fuertemente alterados. Los cristales de clorita suelen contener cristales de esfena, opacos, epidota, feldespato potásico, albita y cuarzo generados en el proceso de alteración de la biotita. También se observan algunas sustituciones por micas amarillentas de grano fino.

En las zonas episienitizadas más próximas a las fracturas principales pueden encontrarse brechas episieníticas que están constituidas por fragmentos de minerales empastados por una matriz heterogénea de grano fino procedente de la trituración e hidrotermalización del granito. Los clastos son fragmentos angulosos y heterométricos de cuarzo, feldespato potásico turbio y

plagioclasa silicificada o albitizada. En estas brechas se definen sistemas anastomosados de fracturas en los que los minerales presentan un mayor grado de trituración. En algunos casos se observa una desaparición total de la biotita y de buena parte de la plagioclasa.

El cuarzo puede tener grietas con microtrituración o poligonización muy fina, se encuentra formando parte de la matriz de grano fino o microbrechoide. Con frecuencia, los fragmentos de mayor tamaño están transformados en un mosaico de gránulos con formas y límites irregulares y con extinción ondulante direccional o irregular.

Los fragmentos mayores de feldespato potásico presentan poligonización irregular, han perdido en parte la pertitización y tienen extinción irregular, maclado mecánico y enturbiamientos. Puede presentar albitizaciones a favor de microfisuras.

La plagioclasa puede desaparecer en gran parte en algunas de las brechas, en las que está sustituida por masas microcristalinas silíceas. La biotita está totalmente triturada y transformada a gránulos muy finos de micas blancas y amarillentas. En las brechas más transformadas se observa una desaparición total de la biotita y de la clorita. Se encuentran también microfracturas limpias o rellenas por prehnita, micas amarillentas, cuarzo, albita y carbonato. Estas fisuras pueden formar sistemas subparalelos irregulares. También a favor de algunas microfracturas se producen brechificaciones que pueden estar acompañadas por silicificaciones, sericitizaciones, albitizaciones, carbonataciones y alteraciones diversas.

**TABLA 2**

Composición de los granitos, rocas alteradas y de fractura y rellenos hidrotermales estudiados en el sondeo realizado en el macizo de Cadalso de Los Vidrios

Nº	3	4	39	81	16	41	411	42	28	29	40
<b>Tipo</b>	<i>gra</i>	<i>gra</i>	<i>gra</i>	<i>gra</i>	<i>apli</i>	<i>gropi</i>	<i>brech</i>	<i>brech</i>	<i>rell</i>	<i>rell</i>	<i>rell</i>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	76.99	76.77	77.36	76.61	76.97	75.66	75.32	75.67	17.61	80.65	46.06
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.08	0.08	0.06	0.08	0.03	0.07	0.04	0.06	0.01	0.01	0.07
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	12.33	12.73	12.17	12.47	12.56	11.94	9.43	10.82	3.77	2.82	4.71
<b>FeO<sub>t</sub></b>	0.97	0.90	0.86	0.99	0.78	0.99	0.47	0.55	4.18	0.52	0.40
<b>MnO</b>	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.04	0.06	0.10	0.35	0.14	0.55
<b>MgO</b>	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.34	0.18	1.45	0.62	1.12
<b>CaO</b>	0.74	0.87	0.73	0.75	0.77	0.43	2.64	2.85	34.48	7.70	24.16
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3.48	3.48	3.52	3.54	3.96	3.29	3.30	0.66	0.15	0.08	0.38
<b>K<sub>2</sub>O</b>	4.80	4.67	4.75	4.93	4.58	5.34	3.28	4.44	0.63	0.67	1.15
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.13
<b>LOI</b>	0.46	0.31	0.36	0.40	0.21	0.89	5.03	4.60	28.52	6.73	21.23
<b>Tot</b>	99.90	99.84	99.85	99.83	99.92	98.66	99.92	99.93	91.16	99.95	99.95
<b>Li</b>	115.0	128.0	59.0	45.0	131.0	21.0	29.0	33.0	61.0	33.0	19.0
<b>Rb</b>	215.0	218.0	212.0	220.0	237.0	207.0	148.0	177.0	na	na	na
<b>Sr</b>	23.0	23.0	22.0	24.0	16.0	21.0	29.0	20.0	30.0	12.0	152.0
<b>Ba</b>	61.0	61.0	57.0	69.0	9.0	65.0	66.0	70.0	22.0	52.0	32.0
<b>Y</b>	69.1	55.6	43.7	46.5	44.7	39.5	24.2	28.1	227.0	50.4	371.0
<b>Zr</b>	79.0	75.0	71.0	70.0	73.0	72.0	53.0	54.0	na	na	na
<b>Th</b>	25.0	22.5	21.3	22.6	25.6	24.1	16.2	18.5	2.1	1.1	22.1
<b>La</b>	16.0	14.7	16.6	18.4	13.3	18.1	13.0	7.9	199.0	9.9	137.0
<b>Ce</b>	40.1	36.3	39.4	44.6	34.2	45.3	29.0	19.3	428.0	20.4	234.0
<b>Pr</b>	5.4	4.9	5.5	6.4	4.9	6.4	4.1	3.0	52.0	2.8	30.9
<b>Nd</b>	21.8	19.8	22.7	26.7	20.3	26.7	16.2	12.9	254.2	12.6	115.8
<b>Sm</b>	7.3	6.5	7.3	9.0	6.7	8.0	4.7	4.7	69.1	5.5	34.5
<b>Eu</b>	0.44	0.36	0.43	0.49	0.31	0.47	0.51	0.48	2.3	0.4	5.5
<b>Gd</b>	8.3	7.4	7.7	10.2	6.6	7.8	4.9	5.5	51.6	8.4	53.9
<b>Tb</b>	1.8	1.5	1.5	2.1	1.2	1.5	0.97	1.1	7.4	1.7	12.1
<b>Dy</b>	11.2	9.9	9.6	13.9	7.7	9.6	6.2	7.3	38.4	11.2	85.9
<b>Ho</b>	2.4	2.1	2.0	2.9	1.7	2.1	1.3	1.5	8.0	2.3	18.0
<b>Er</b>	7.3	6.3	6.0	8.6	5.0	6.3	4.0	4.5	22.1	6.7	52.4
<b>Tm</b>	1.2	1.0	0.96	1.4	0.84	1.0	0.66	0.74	2.9	1.0	7.8
<b>LU</b>	1.10	1.0	0.98	1.4	0.87	1.1	0.72	0.77	2.5	0.96	7.0
<b>Σfree</b>	90.6	82.2	91.5	105.1	79.40	104.5	67.0	47.8	1002.3	51.2	552.2
<b>Σhree</b>	33.3	29.20	28.74	40.50	23.91	29.4	18.75	21.41	132.9	32.26	237.10
<b>Σree</b>	124.34	111.76	120.67	146.09	103.62	134.37	86.26	69.69	1137.5	83.86	794.80

### **Caracterización geoquímica de los granitos y zonas de alteración cortados en el sondeo**

Los leucogranitos correspondientes a la facies común (muestras número 3, 4, 39 y 81), tienen una composición química muy homogénea, coherente con su composición petrológica y mineralógica y que corresponde a tipos muy ácidos y evolucionados (tabla 2). Son muy ricos en SiO<sub>2</sub> y moderadamente ricos en álcalis (Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O), con escasos contenidos de TiO<sub>2</sub>, FeO<sub>t</sub>, MgO y CaO. Sus relaciones Mg/(Mg+Fe) son muy bajas y propias de granitos muy diferenciados.

En el caso de la muestra más superficial (número 3), a pesar de observarse una ligera oxidación de la biotita a nivel macroscópico, su composición mayoritaria es muy similar a la de los granitos frescos descritos, no apreciándose ninguna diferencia significativa que sea atribuible a procesos de alteración.

El estudio de las composiciones normativas de estos leucogranitos (tabla 2), pone de manifiesto que se trata de tipos muy diferenciados (ID>93) y muy débilmente peraluminosos o meta-aluminosos (con contenidos muy bajos de C o Di). Estas características son atípicas para granitoides de tipo S muy evolucionados, que generalmente son bastante más peraluminosos y se corresponden con los tipos PI definidos por Villaseca *et al.*, (1998) en el Sistema Central, que en este sector están representados por los granitoides del complejo plutónico de Las Navas del Marqués-San Martín de Valdeiglesias con los que probablemente están ligados desde el punto de vista genético.

En cuanto a los elementos traza, su quimismo es también muy homogéneo, presentando bajos contenidos de Ba, Sr y Zr y relativamente altos de Rb, que también son propios de granitos muy diferenciados.

Los contenidos en los elementos del grupo de las REE son relativamente bajos ( $\Sigma$ REE medio=125.73 ppm) y muy similares en todos estos leucogranitos, que tienen unos espectros normalizados al condrito prácticamente iguales. Estos espectros presentan una configuración muy plana, con una relación La<sub>n</sub>/Lu<sub>n</sub>= 1,5 y una fuerte anomalía negativa de Eu

( $Eu_n/Eu'_n = 0,15$ ). Los símbolos correspondientes a los distintos tipos de muestras se encuentran en la figura 3.

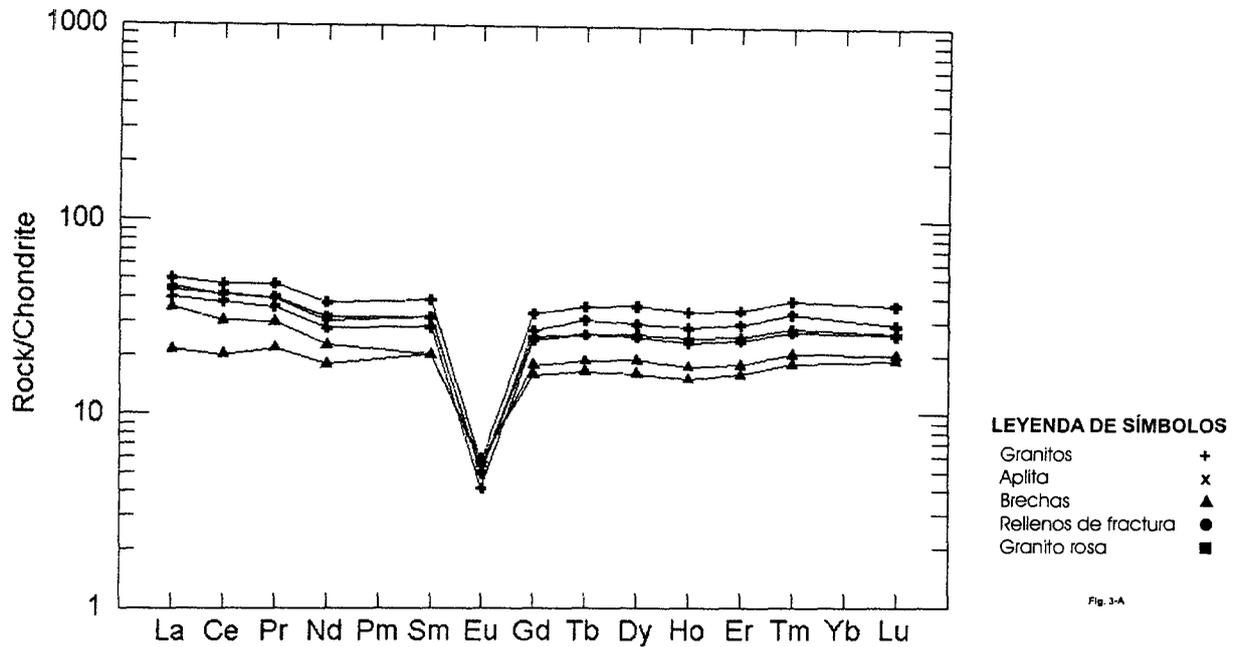


Fig. 3.- Espectros de REE de granitos y brechas episieníticas ( normalizados al condrito )

La aplita cortada en el sondeo (muestra N° 16) tiene una composición muy similar a la de los leucogranitos de la facies común, detectándose únicamente una bajada sensible del contenido en  $TiO_2$  y  $FeO_t$  y un ligero aumento del  $Na_2O$ . Desde el punto de vista normativo, se trata de una roca subaluminosa, con una pequeña proporción de Di. También los elementos traza presentan gran similitud con los leucogranitos de la facies común, apreciándose únicamente unos contenidos de Li y Rb algo superiores y un notable empobrecimiento en Ba y algo menor en Sr, que ponen en evidencia un grado de diferenciación más elevado.

Los contenidos totales de REE de esta aplita son ligeramente inferiores a los de los leucogranitos ( $\sum REE=103,62$ ), pero la configuración de su espectro (figura 4) es idéntica.

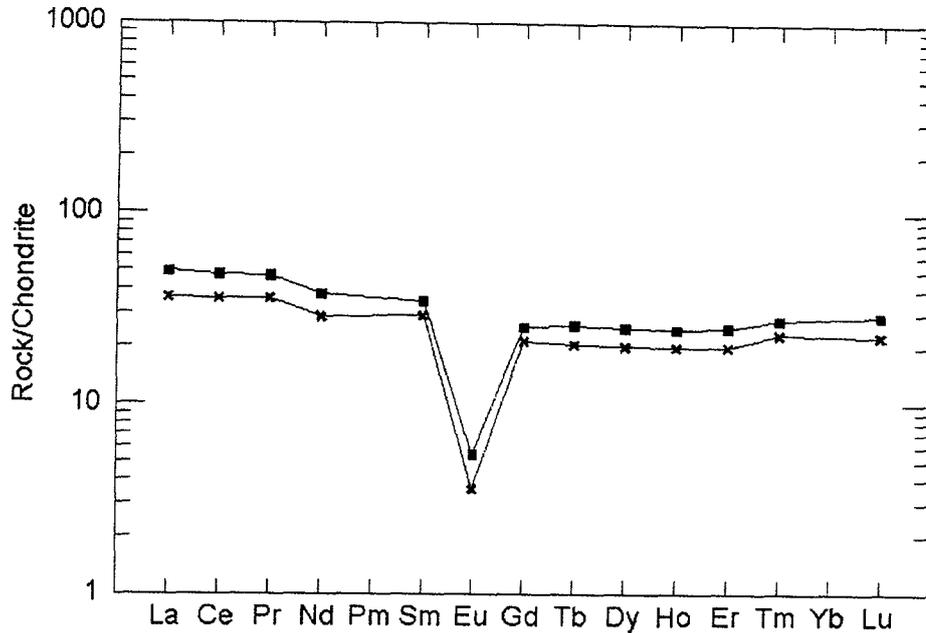


Fig. 4.- Espectros de REE del granito rosa y de la aplita ( normalizados al condrito )

El granito de color rosado con episenitización incipiente (muestra N° 41), tiene también una composición química prácticamente igual que la de los leucogranitos de la facies común, tanto en lo que respecta a los elementos mayores como a los elementos traza. Solamente se aprecia una pequeña disminución del contenido en SiO<sub>2</sub>, CaO y Rb y un aumento del contenido en K<sub>2</sub>O y de componentes volátiles (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O). Su espectro de REE (figura 4), es muy similar al de los leucogranitos, aunque en el se aprecia un empobrecimiento relativo de las HREE con respecto a las LREE que posiblemente indica que se ha producido una ligera movilización y fraccionamiento de las mismas.

En las muestras correspondientes a las brechas episeníticas (muestras N°411 y 42), se observan ligeras pérdidas de SiO<sub>2</sub> (1%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,5-2%) y FeO<sub>t</sub>. Así mismo, se aprecia un fuerte empobrecimiento en Na<sub>2</sub>O en la segunda y algo menos importante en K<sub>2</sub>O en la primera (Caballero *et al.*, 1993). Estas pérdidas son compensadas por un aumento de los contenidos de CaO y de componentes volátiles (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O), que están relacionados con los procesos de carbonatación y alteración. En cuanto a los elementos traza se observan pérdidas considerables de Y, Rb, Pb y algo menores de Li y Zr. También se aprecian empobrecimientos moderados pero generales en las REE, que a pesar de ello, tienen unos espectros con configuraciones análogas a las de los leucogranitos no alterados (figura 3). En la muestra número 411, se observa un sensible enriquecimiento en Cr, Co y Ni.

Los materiales que constituyen los rellenos de las fracturas estudiadas tienen unas composiciones marcadamente diferentes entre sí (ver tabla 2), que son el reflejo de sus distintas composiciones mineralógicas que, según los casos, son más ricas en cuarzo, calcita, clorita, feldespatos, epidota u otras fases minoritarias, generadas en los procesos de alteración hidrotermal.

Dos de estos rellenos (muestras 28 y 40) tienen unos contenidos bastante bajos de  $\text{SiO}_2$  y elevados de  $\text{CaO}$ , que son debidos a la presencia de proporciones considerables de calcita (61,57% y 43,14% respectivamente). También tienen bajos contenidos de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  que indican que la proporción de feldespatos es escasa. En el relleno correspondiente a la muestra número 28 se aprecian contenidos relativamente altos de  $\text{FeO}$  y  $\text{MgO}$  que son el reflejo de una considerable proporción de clorita.

El de la muestra 40 tiene una proporción considerable de cuarzo y menor cantidad de clorita, así como algo más de feldespato potásico que el primero, lo que se traduce en contenidos más elevados de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , y más bajos de  $\text{FeO}$ . En este último relleno es en la única de las muestras analizadas del sondeo en la que se encuentra  $\text{P}_2\text{O}_5$  por encima de los límites de detección.

En cuanto a la composición en elementos traza de estos rellenos hidrotermales se observa que los contenidos de Ba son bastante bajos, mientras que se encuentran proporciones considerables de Y, REE y As con respecto a los leucogranitos.

Los elementos del grupo de las REE pueden llegar a presentar concentraciones 10 veces superiores a las de aquellos y los espectros normalizados al condrito de estos materiales son bastante diferentes entre sí (figura 5). La muestra número 28 tiene un espectro con fraccionamiento moderado de las LREE y las HREE, con una pronunciada anomalía negativa de Eu, mientras que en la muestra 40 se aprecia un fraccionamiento débil pero irregular de las LREE, una plataforma plana sin fraccionamiento de las HREE y una débil anomalía negativa de Eu.

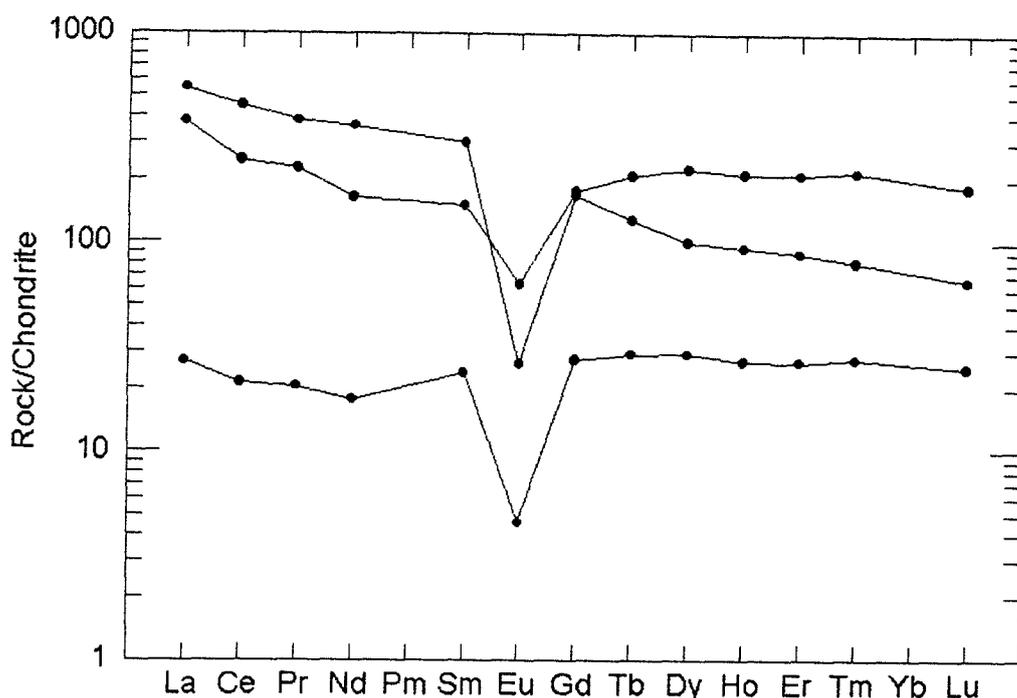


Fig. 5

El relleno de fractura silíceo (muestra N° 29), presenta a nivel de los elementos mayores un enriquecimiento significativo en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  y componentes volátiles ( $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ), acompañados por apreciables empobrecimientos en  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ . También se aprecia, aunque en menor grado, un ligero enriquecimiento en  $\text{MgO}$  y  $\text{MnO}$  y un empobrecimiento en  $\text{FeO}_t$ .

Este relleno es muy rico en cuarzo, tiene una proporción moderada de calcita (13,75%) y pequeñas cantidades de clorita, feldespato potásico y epidota.

Con respecto a los elementos traza se observa un menor contenido en Li y Sr que en los leucogranitos. Los contenidos en REE son muy parecidos a los de aquellos y también su espectro es muy similar (figura 5), apreciándose como única distinción un pequeño empobrecimiento en los contenidos de Ce, Pr y Nd.

Las variaciones que han sufrido los elementos del grupo de las REE en los granitos afectados por los procesos de episenitización y brechificación pueden observarse en la figura 6 en la que se han representado los espectros de REE de estos materiales normalizados a la composición media de los granitos inalterados cortados en el sondeo.

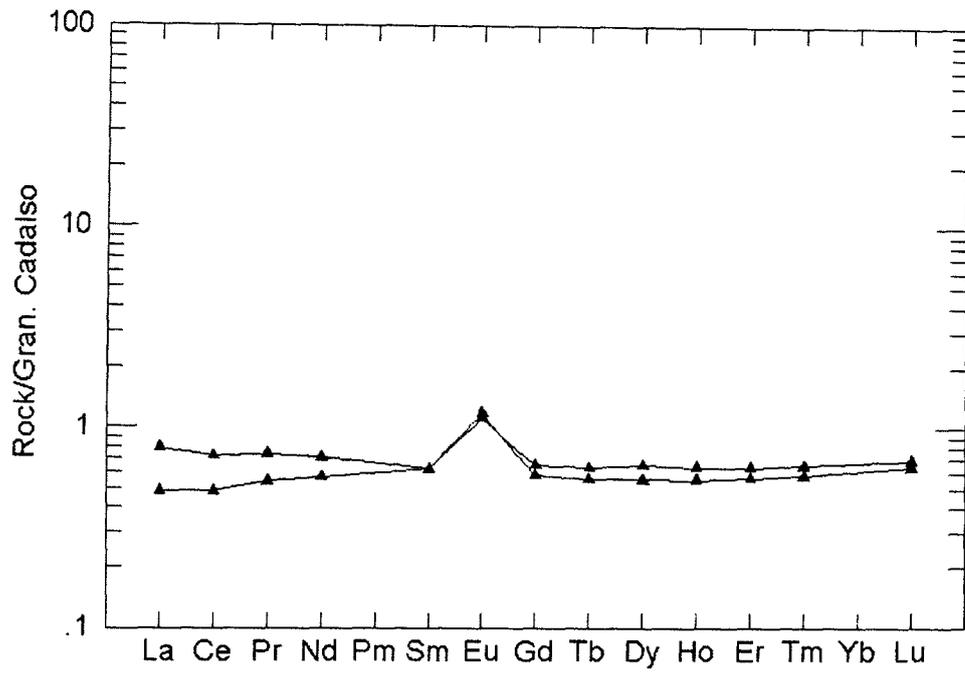


Fig. 6

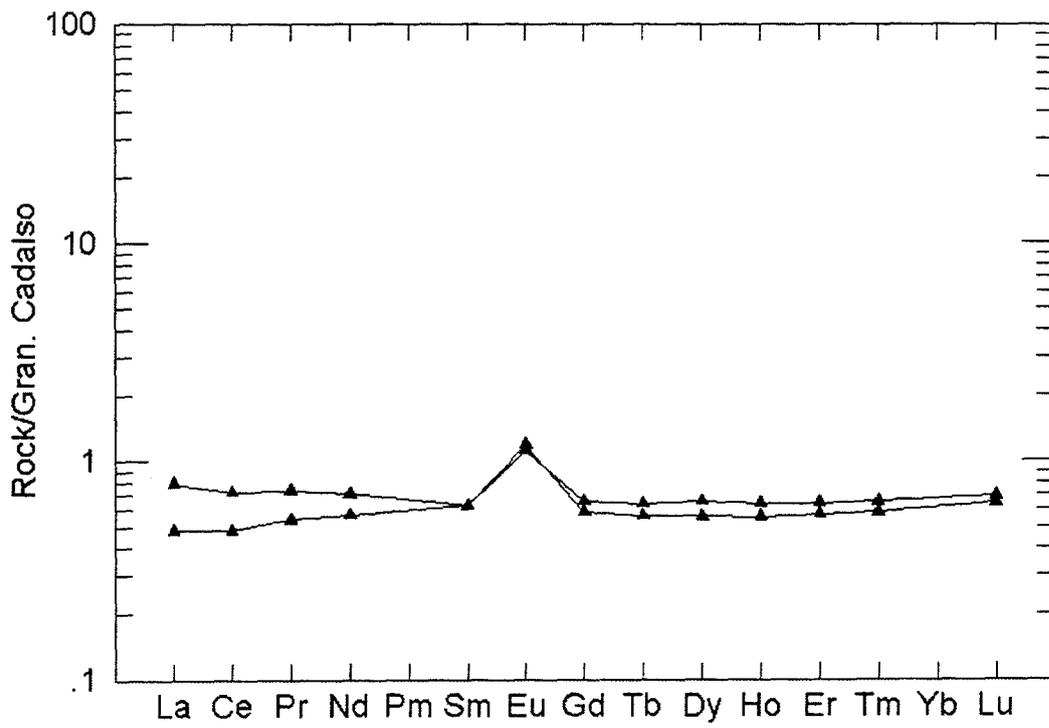


Fig. 7

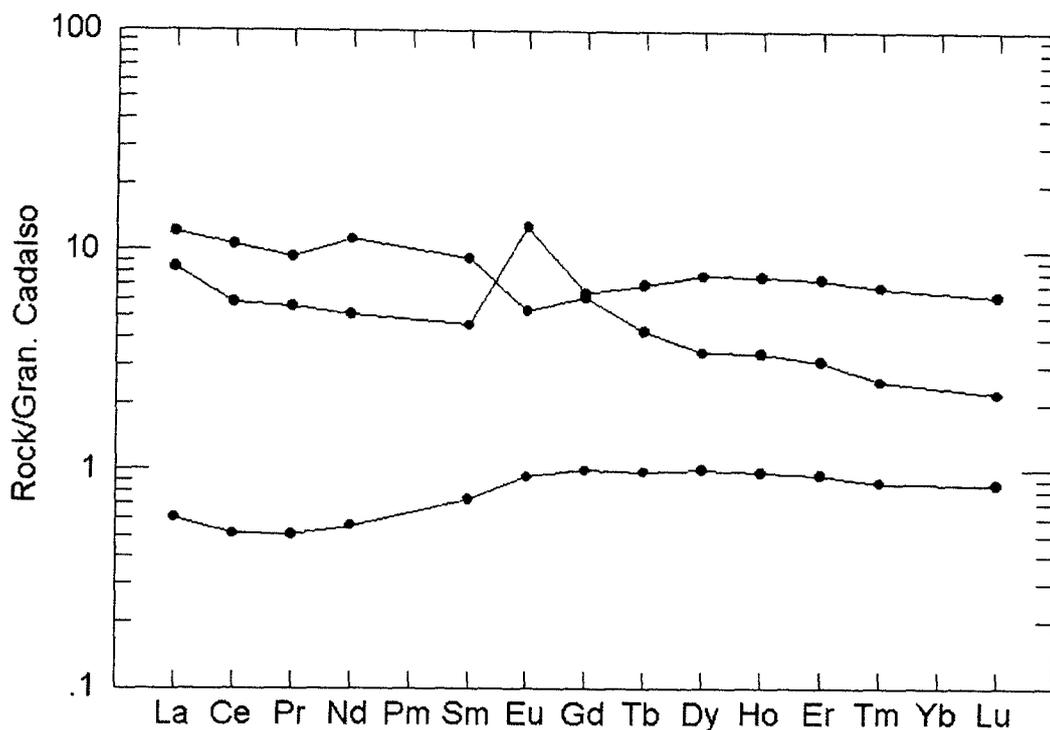


Fig. 8

El leucogranito rosado con episienitización incipiente (muestra N° 41) presenta un espectro muy plano y con relaciones muy próximas a la unidad para todos los elementos considerados (figura 7), apreciándose únicamente un enriquecimiento relativo muy débil para el grupo de las LREE con respecto a las HREE.

En las brechas episieníticas (figura 6) se observan empobrecimientos débiles a moderados para la gran mayoría de las REE con la excepción del Eu, que presenta en ambas muestras pequeños enriquecimientos con respecto a los leucogranitos.

En una de estas brechas (muestra número 42) se aprecia un mayor empobrecimiento de las LREE, así como un fraccionamiento de las mismas, con mayores pérdidas de los elementos más ligeros. Esta muestra es por el contrario la menos empobrecida en HREE.

En cuanto a los rellenos de fractura (figura 8), puede observarse que los más ricos en calcita (muestras N° 28 y 40), tienen unos contenidos de REE muy superiores a los de los granitos. El primero de ellos presenta un espectro con un fraccionamiento moderado, con una pendiente

relativamente continua y un enriquecimiento de 12,11 para el La y 2,23 para el Lu. El espectro de la segunda muestra tiene una configuración más plana y las LREE en su conjunto están algo empobrecidas con respecto a las HREE, presentando el Lu un enriquecimiento de 6,25 con respecto a los granitos. También en esta muestra se observa un apreciable enriquecimiento diferencial en Eu, que presenta una anomalía positiva considerable.

El relleno de fractura más rico en cuarzo (muestra 29) tiene por el contrario unos contenidos en REE bastante similares a los de los granitos (figura 8), sobre todo en el caso de las HREE, mientras que en las LREE se aprecian empobrecimientos que, en los casos del Ce y del Pr, son próximos a 0,50.

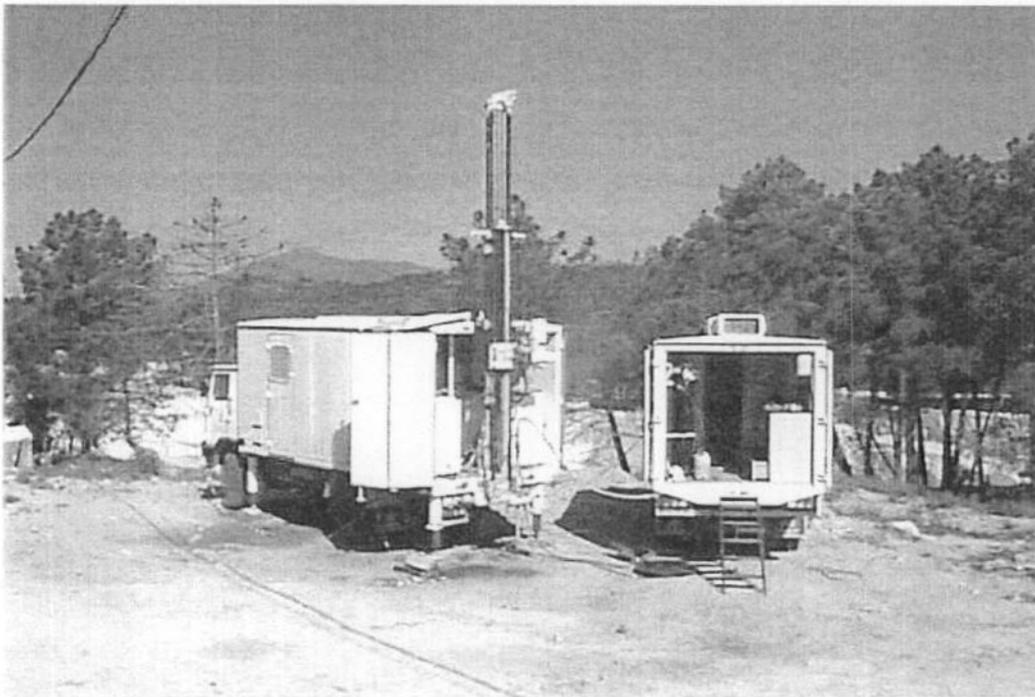
## **INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA**

Se pueden definir los medios de baja permeabilidad como aquellas formaciones geológicas que no almacenan agua en cantidad apreciable o que solamente son capaces de transmitirla muy lentamente. Esto supone, en principio, la idea de una difícil o nula utilización del agua presente en la formación. Sin embargo, el escaso aprovechamiento como fuente de recursos hídricos de este tipo de medios tiene como contrapartida su utilidad como barrera geológica natural.

Las formaciones de baja permeabilidad, en función de su valor de conductividad hidráulica, se pueden subdividir en (Mejías y López-Geta, 2003): formaciones de muy baja permeabilidad, con valores de conductividad hidráulica ( $k$ ) menores de  $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ ; formaciones de baja permeabilidad, con valores de conductividad hidráulica comprendidos entre  $1 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$  y  $1 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ ; formaciones poco permeables, con valores superiores a  $1 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$  e inferiores a  $1 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  y, por último, formaciones algo permeables con valores de conductividad hidráulica comprendidos entre  $1 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  y  $1 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

Los trabajos de caracterización hidráulica de la formación granítica descrita se han llevado a cabo por medio de la Unidad Móvil de Hidrogeología (UMH), constituida por dos camiones

tototerreno (Mejías *et al.*, 1998). El primero, denominado Vehículo Base, incluye el sistema de adquisición e interpretación de datos, el de inflado de los obturadores, el de control de flujo de inyección y el equipo de profundidad, así como un área destinada a montaje y mantenimiento de los elementos de la UMH. El segundo, Vehículo de Descenso, tiene como misión el descenso del equipo de profundidad, la ubicación de los carretes del cable de señales y la línea de inflado de los obturadores y el transporte del varillaje (figura 9).



*Figura 9. Unidad Móvil Caracterización Hidrogeológica operando en campo*

### **Ensayos hidráulicos y metodología de caracterización**

Un ensayo hidráulico es un método de análisis utilizado para determinar las propiedades hidráulicas, las condiciones de borde y las relaciones con el medio físico de una determinada formación geológica que, en general, puede ser considerada como acuífero, o de una sección aislada en ésta mediante obturadores.

Su análisis se basa en determinadas fórmulas que implican ciertos supuestos y generalizaciones. Para llevar a cabo una correcta interpretación es preciso prestar especial consideración a las condiciones y limitaciones que llevan consigo los diferentes métodos de análisis.

De forma general, un ensayo hidráulico consiste en aplicar una perturbación controlada en el acuífero o en la sección de la formación a ensayar. Esta perturbación normalmente se basa en el bombeo o inyección de agua en o desde la zona de ensayo. El sondeo donde se realiza esta acción se denomina sondeo activo. El efecto de la perturbación se registra mediante la toma de valores de presión y/o variaciones de caudal.

Las características físicas de los medios de baja y media permeabilidad han llevado al desarrollo de instrumentación específica para la aplicación de ensayos hidráulicos que permita la estimación de los parámetros hidráulicos, ya que las técnicas aplicadas tradicionalmente en hidrogeología (ensayos de bombeo) producen un agotamiento demasiado rápido de la capacidad máxima del pozo para poder hacer las suficientes medidas con la precisión necesaria, presentan complicaciones técnicas para la regulación de caudales muy bajos y se ven dificultados por tiempos de estabilización de nivel muy dilatados.

Por este motivo, se utilizan en su lugar ensayos hidráulicos que conllevan la aplicación de pequeños volúmenes de agua y que pueden realizarse en períodos de tiempo relativamente cortos.

Antes de ejecutar los ensayos que se van a describir a continuación, y especialmente en aquellos en que se produce una respuesta transitoria de presión durante la realización del ensayo, resulta imprescindible llevar a cabo una fase de estabilización lo suficientemente larga para que el nivel recuperado en la sección de ensayo, después de la perturbación sufrida por la introducción de la instrumentación y el inflado de los obturadores, sea lo más aproximado posible al de la presión de la formación.

Los principios teóricos básicos de los métodos de ensayo aplicados en el presente trabajo son:

### Ensayos de inyección a nivel constante

Consiste en la introducción de agua presurizada en la sección de ensayo hasta conseguir un incremento de presión estable, en torno a 20-40 m de columna de agua por encima del nivel inicial, y registrando las variaciones de caudal para mantener constante la presión. Cuando un sondeo (sección) se ensaya a nivel constante no ocurren efectos de almacenamiento en el sondeo, dado que la presión no varía con el tiempo. Sin embargo, la recuperación subsiguiente puede ser afectada de forma importante por los efectos de almacenamiento en pozo.

La solución de la ecuación de la difusividad para el caso de nivel constante fue presentada por Van Everdingen y Hurst (1949) y Jacob y Lohman (1952). Si se representan los valores obtenidos en campo en un gráfico semilogarítmico, inverso del caudal en función del logaritmo del tiempo, se puede realizar su ajuste a una línea recta. La conductividad hidráulica puede ser calculada a partir de la pendiente de la recta mediante la expresión:

$$k = \frac{0,183}{HoL\Delta(1/Q_{(t)})}$$

donde:

$K$  = conductividad hidráulica ( $LT^{-1}$ )

$\Delta(1/Q_{(t)})$  = incremento del inverso del caudal para un ciclo logarítmico ( $TL^{-3}$ )

$Ho$  = presión ( $L$ )

$L$  = longitud de la sección de ensayo ( $L$ )

### Ensayo de inyección en estado estacionario

El estado estacionario supone que el flujo de agua es constante en magnitud y dirección en todos los puntos del acuífero y que no cambia con el tiempo. Esta situación se presenta muy raras veces en la práctica. En el mejor de los casos puede conseguirse un flujo pseudoestacionario durante un periodo limitado de tiempo. Para ello se inyecta agua presurizada en la sección de ensayo y se varía el caudal y la presión hasta obtener unas condiciones estacionarias para un período breve de tiempo, 15 a 30 minutos.

La solución en estado estacionario para una inyección en una sección confinada del pozo activo puede expresarse por (Almen *et al.*, 1986):

$$K = \frac{Q}{\Delta H L} C$$

donde:

- $K$  = conductividad hidráulica ( $LT^{-1}$ )
- $Q$  = Caudal en estado pseudoestacionario ( $L^3 T^{-1}$ )
- $\Delta H$  = Incremento de presión ( $L$ )
- $L$  = Longitud de la sección de ensayo ( $L$ )
- $C$  = Factor de forma adimensional en función de los efectos de flujo.

$$C = \frac{1 + \ln(L / 2r_w)}{2\pi}$$

donde:

- $r_w$  = radio del sondeo ( $L$ )
- $L$  = Longitud de la sección del ensayo ( $L$ )

Se han propuesto diferentes factores ( $C$ ) de forma semiempírica para el análisis de medios porosos. Sin embargo, la diferencia entre ellos no es mayor del 30 % y la aplicabilidad de los mismos a medios fracturados, donde el flujo se realiza a través de una red de fracturas, tiene un empleo limitado, por lo que la idoneidad de cada factor no está demostrada (Almen *et al.*, 1986). Para los ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario llevados a cabo en este trabajo el factor  $C$  tiene un valor de 0,9689, para una longitud de sección de ensayo de 18,79 m, correspondiente a los ensayos realizados en la primera fase.

Este tipo de ensayo resulta especialmente útil para obtener un primer perfil de conductividad hidráulica a lo largo del sondeo en secciones aisladas mediante obturadores.

### Ensayos tipo pulso

Un ensayo de pulso es la respuesta a la inyección (o extracción) instantánea de un volumen de agua conocido que provoca una sobrepresión (o depresión) en la sección a estudiar. Los fundamentos teóricos tanto para el caso de inyección como para el de extracción son similares. La formulación básica fue establecida por Bredehoeft y Papadopulos (1980) al modificar la de Cooper *et al.* (1967) para ensayos de cuchareo en pozos abiertos. Las hipótesis de partida se fundamentan en considerar el medio homogéneo e isótropo. La sección a testificar actúa a modo de acuífero confinado, el pozo se supone totalmente penetrante y el flujo radial.

Se considera un volumen  $V_w$  de sondeo, aislado del resto mediante obturadores, y el medio físico en condiciones de régimen estacionario. Si en estas condiciones se inyecta instantáneamente un volumen de agua se provoca un aumento de presión en el acuífero igual a (Bredehoeft y Papadopulos, 1980):

$$S_0 = \frac{V}{S_w} = \frac{V}{V_w \rho_w g C_{bw}}$$

donde:

$S_0$  = incremento de presión ( $L$ )

$V$  = volumen de extracción/inyección ( $L^3$ )

$S_w$  = coeficiente de almacenamiento del sondeo ( $L^2$ )

$V_w$  = volumen de la sección de ensayo ( $L^3$ )

$g$  = aceleración de la gravedad ( $LT^{-2}$ )

$\rho_w$  = densidad del agua ( $ML^{-3}$ )

$C_{bw}$  = compresibilidad del agua ( $LT^2M^{-1}$ )

En el coeficiente de almacenamiento del sondeo debe tenerse en consideración el término relacionado con la deformabilidad del equipo ( $S_{we}$ ) (Neuzil, 1982). Por lo que, para analizar los ensayos de pulso, es preciso conocer la deformabilidad del equipo usado en su ejecución, ya que un error en su estimación repercute directamente en el cálculo de la transmisividad y del coeficiente de almacenamiento de la formación.  $S_{we}$  debe determinarse experimentalmente

y es variable según la instrumentación y configuración elegidas. Para los ensayos de pulso realizados en esta caracterización, con la configuración del equipo de testificación utilizado y para una longitud de sección de ensayo en la fase de reconocimiento general de 18,79 m, se obtuvo un valor de  $S_{we}$  de  $5,41 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ , para un valor experimental de compresibilidad efectiva de  $2,78 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$  (Martínez Navarrete *et al.*, 1995).

La solución de Bredehoeft y Papadopulos (1980) viene dada por:

$$H = s_0 F(\alpha, \beta)$$

siendo F una función integral tabulada para diferentes valores de  $\alpha$  en función de  $\beta$ .

$\alpha$  y  $\beta$  se definen por las expresiones:

$$\alpha = \frac{\pi r_w^2 S}{V_w C_{bw} \rho_w g + S_{we}} = \frac{\pi r_w^2 S}{S_w}; \quad \beta = \frac{\pi T t}{V_w C_{bw} \rho_w g + S_{we}} = \frac{\pi T t}{S_w}$$

donde:

$r_w$  = radio del sondeo en la sección de ensayo ( $L$ )

$S$  = coeficiente de almacenamiento

$T$  = Transmisividad ( $L^2 T^{-1}$ )

$t$  = tiempo ( $T$ )

$S_{we}$  = deformabilidad del equipo ( $L^2$ )

$\alpha$  se puede interpretar como un coeficiente de almacenamiento adimensional (relación entre el almacenamiento del acuífero y el del sondeo) y  $\beta$  como un tiempo adimensional.

Con este tipo de ensayos se pueden obtener valores de conductividad hidráulica de hasta  $N \times 10^{-14} \text{ m s}^{-1}$ , si bien está sujeto a diversos condicionantes (modo de ejecución, compresibilidad del equipo, efecto piel, período de estabilización, efectos termales, sellado de los obturadores, etc) que pueden hacer que su interpretación resulte muy delicada, dando lugar a errores de

interpretación de hasta 2 órdenes de magnitud, que, en general, se reducen a 1 orden de magnitud o menos si se utilizan valores reales de compresibilidad del equipo al realizar su interpretación.

### Ensayo tipo slug

La formulación y fundamentos son muy similares a los de pulso, variando básicamente en el coeficiente de almacenamiento del sondeo ( $S_w$ ). En un pulso dicho almacenamiento está relacionado con la compresibilidad del equipo y la del agua en la zona de ensayo, mientras que en un slug depende de la sección de la tubería de acceso y viene dado por la expresión  $S_w = \pi r_v^2$ , donde  $r_v$  corresponde al radio del varillaje donde se produce el cambio de nivel. Al permanecer el intervalo abierto durante la recuperación, las variaciones de volumen de agua inyectada/extraída son proporcionales a dicha sección. Tanto la evolución de niveles durante el ensayo, como las condiciones de contorno en las cuales ésta se resuelve son similares a las de un ensayo de pulso.

La solución viene dada por Cooper *et al.*, 1967:

$$\frac{H}{H_0} = F(\alpha, \beta)$$

donde,

$$\beta = \frac{Tt}{r_v^2} \qquad T = \frac{r_v^2}{t} \beta$$

$$\Rightarrow$$

$$\alpha = \frac{r_w^2 S}{r_v^2} \qquad S = \frac{r_v^2}{r_w^2} \alpha$$

La determinación de T y S se realiza por comparación con curvas tipo, bien de manera analítica o mediante códigos de interpretación. En la Unidad Móvil de Hidrogeología el código de interpretación utilizado es Aquifer Test (Waterloo Hydrogeologic, 2002).

La metodología de caracterización a aplicar para el reconocimiento hidrogeológico de un sondeo de reconocimiento en rocas fracturadas consta de dos fases: de reconocimiento general y de reconocimiento detallado (Mejías y López-Geta, 2003).

La fase de reconocimiento general consistirá básicamente en la realización de ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario, en secciones de una longitud en torno a un 10% de la profundidad del sondeo, con dispositivo doble obturador, y con una duración suficiente para conseguir un estado pseudoestacionario. La duración de la fase de inyección de cada uno de los ensayos estará en torno a 30-40 minutos, seguidos de una recuperación del mismo orden. Los valores obtenidos de conductividad hidráulica no tienen la precisión que los obtenidos mediante los otros tipos de ensayos, pudiendo variar hasta un orden de magnitud respecto a los ensayos de inyección en régimen transitorio, pero se obtiene una estimación bastante precisa del comportamiento de la formación en las proximidades del área ensayada y la distribución de permeabilidades en el sondeo, utilizando tiempos de testificación relativamente cortos.

En el presente trabajo, y con el objetivo de realizar un estudio comparativo de los diferentes métodos de ensayo lo más amplio posible, se ha realizado también en esta primera fase un ensayo de inyección en régimen transitorio a nivel constante en cada una de las secciones de ensayo previstas.

En esta fase también resulta de interés la realización de un ensayo de inyección en régimen transitorio o ensayos tipo pulso o slug a columna completa, con dispositivo de un solo obturador, que aporte una información general de la permeabilidad del sondeo y que sirva como valor de referencia con los resultados obtenidos en cada una de las secciones. Obtenida una primera distribución de conductividad hidráulica y junto con la información recabada de los testigos de perforación y la testificación geofísica relativa a orientación, densidad, longitud, apertura, rugosidad y relleno de las discontinuidades y fracturas, se procede a establecer las secciones de ensayo a testificar en la segunda fase.

En la fase de reconocimiento detallado la longitud de la sección de ensayo será mucho menor que en la fase anterior, habitualmente se emplearán longitudes de ensayo entre 1 y 6 m,

estando la longitud de la sección influenciada por el tamaño del área de la discontinuidad a caracterizar y por las limitaciones debidas al estado de las paredes del sondeo para obtener un correcto sellado de los obturadores. Deberá, por tanto, conseguirse un equilibrio entre ambas limitaciones que implique la realización del mayor número posible de ensayos con una misma longitud de sección, consiguiendo de esta manera evitar en lo posible reiteradas fases de instrumentación/desinstrumentación del sondeo para modificar la longitud de la sección de ensayo. La testificación se realizará con dispositivo doble obturador, con control de la presión en las secciones infrayacente y suprayacente a la sección de ensayo.

La secuencia general de ensayo para una sección dada comienza con un ensayo de inyección a nivel constante o caudal constante, en la mayoría de los casos es preferible utilizar el primero debido a que no existen efectos de almacenamiento en el sondeo y la deformación en el equipo se puede considerar despreciable desde el inicio de la medida de variación de caudal, una vez estabilizada la presión. También, a efectos prácticos, resulta más fácil llevar a cabo variaciones muy pequeñas de caudal para mantener constante la presión.

La duración mínima del período de inyección debe estar en torno a 3 horas, de manera que afecte a un volumen mayor de roca y no sólo al área más próxima como ocurre en los ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario o en régimen transitorio con tiempos de inyección más cortos. El volumen de roca afectado dependerá de la duración del ensayo y de los parámetros hidráulicos de la formación. Al incrementar el volumen de roca afectado, el valor de conductividad hidráulica se aproxima más a un valor medio representativo del macizo rocoso ensayado. Si se continúa aumentando el volumen de roca ensayado llega un momento, variable dependiendo de las características hidráulicas de la formación, en que los parámetros hidráulicos no varían de forma significativa; debiendo valorarse, en función de los objetivos del estudio, el punto de equilibrio entre duración del ensayo y representatividad de los valores, pudiendo llegarse a ensayos de larga duración para analizar conectividad de fracturas y condiciones de borde.

Finalizada la fase de inyección se deberá registrar una fase de recuperación con una duración aproximadamente del mismo orden de magnitud que la fase de inyección. El análisis de la fase de recuperación servirá para comparar los valores de conductividad hidráulica obtenidos

en ambas fases y suele aportar información sobre el grado de conexión del sondeo con la formación. También es interesante para verificar el correcto funcionamiento del registro automático de niveles y la detección de posibles fugas en la sarta.

El límite inferior teórico de conductividad hidráulica para aplicación de los ensayos de inyección con la instrumentación descrita es de  $N \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ , si bien, debido, entre otros, a efectos termales y de cierre de los obturadores, el límite inferior de conductividad hidráulica que se puede considerar más fiable para este tipo de ensayos viene a ser un orden de magnitud mayor. Por tanto, en las secciones en que se obtengan valores de conductividad hidráulica inferiores a  $N \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$  en los ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario, y valores de conductividad hidráulica inferiores a  $N \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$  en los ensayos de inyección en régimen transitorio, y, en general, como valor de comparación en determinados casos en que se obtengan valores de conductividad hidráulica en torno a los órdenes de magnitud citados, puede resultar conveniente realizar un ensayo de pulso.

## **RESULTADOS**

Entre las dos fases descritas en el epígrafe anterior se han realizado 32 ensayos hidráulicos: 10 ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario, 11 ensayos de inyección en régimen transitorio a nivel constante, 3 de recuperación, 2 tipo Slug y 6 ensayos de Pulso. Los valores obtenidos de conductividad hidráulica en cada intervalo, para cada tipo de ensayo, así como el nivel piezométrico de cada sección, se resumen en la Tabla 3.

Sección (m)	Inyección pseudoeestacionario K (m.s <sup>-1</sup> )	Inyección nivel constante K (m.s <sup>-1</sup> )	Recuperación K (m.s <sup>-1</sup> )	Slug K (m.s <sup>-1</sup> )	Pulso K (m.s <sup>-1</sup> )	Nivel Piezométrico (ms.n.m.)
<b>FASE 1</b>						
13,00 - 31,79	3,24 x 10 <sup>-7</sup>			9,42 x 10 <sup>-8</sup>	2,67 x 10 <sup>-9</sup>	831,84
31,21 - 50,00	2,74 x 10 <sup>-8</sup>	3,05 x 10 <sup>-9</sup>				831,29
54,71 - 73,50	5,8 x 10 <sup>-11</sup>	1,15 x 10 <sup>-11</sup>	1,17 x 10 <sup>-11</sup>			835,15
77,31 - 96,10	2,5 x 10 <sup>-9</sup>	6,88 x 10 <sup>-10</sup>				831,63
97,36 - 116,15	1,36 x 10 <sup>-11</sup>	8,2 x 10 <sup>-13</sup>			8,97 x 10 <sup>-9</sup>	831,61
121,50 - 140,29	3,25 x 10 <sup>-10</sup>	4,6 x 10 <sup>-12</sup>				834,25
141,29 - 160,08	8,2 x 10 <sup>-10</sup>	1,76 x 10 <sup>-11</sup>				831,52
161,00 - 179,80	9,3 x 10 <sup>-10</sup>	3,12 x 10 <sup>-11</sup>	7,12 x 10 <sup>-11</sup>			831,50
177,00 - 195,79	9,31 x 10 <sup>-10</sup>				9,82 x 10 <sup>-10</sup>	833,30
15,68 - 200,00		2,9 x 10 <sup>-10</sup>	3,5 x 10 <sup>-9</sup>			831,55
<b>FASE 2</b>						
32,00 - 37,83		2,63 x 10 <sup>-9</sup>		1,8 x 10 <sup>-9</sup>	2,71 x 10 <sup>-10</sup>	830,73
63,15 - 68,98		5,96 x 10 <sup>-11</sup>			7,25 x 10 <sup>-10</sup>	834,10
91,50 - 97,33	3,14 x 10 <sup>-10</sup>	4,68 x 10 <sup>-11</sup>			8,9 x 10 <sup>-9</sup>	833,96

Tabla 3. Valores de conductividad hidráulica y nivel piezométrico obtenidos en los ensayos hidráulicos.

Desde el punto de vista de la instrumentación, la realización de los ensayos no ha tenido incidencias reseñables, la perfecta estabilidad y uniformidad de las paredes del sondeo ha permitido la introducción y extracción del equipo de profundidad sin ninguna incidencia.

Los obturadores se han inflado con Nitrógeno a presiones comprendidas entre 10 y 50 bar, en función de la posición del intervalo a ensayar, la profundidad del nivel piezométrico y la presión de inyección. Se ha controlado la evolución de la presión en los intervalos supra e infrayacente a la sección de ensayo sin que se haya producido en ningún caso un incremento anómalo de presión en las mismas. En la figura 10 se representa la distribución de la conductividad hidráulica en función de la profundidad del sondeo de reconocimiento incluyendo los ensayos realizados en las dos fases. Los valores representados para cada

intervalo ensayado corresponden en su mayoría al obtenido en ensayos de inyección en régimen transitorio a nivel constante, más representativo, en principio, que los obtenidos por otros métodos, a excepción de la sección más superior, 13-31,79 m, en que se ha tomado el valor de conductividad hidráulica del ensayo de inyección en régimen pseudoestacionario, y la sección mas profunda, 177-195,79 m, en que el valor representado corresponde al obtenido mediante un ensayo tipo Pulso.

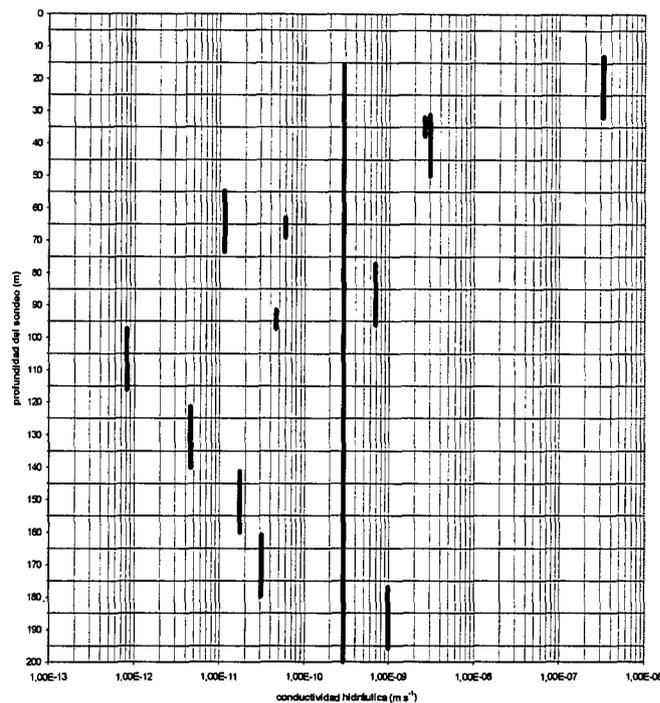


Fig.10. Distribución de la conductividad hidráulica en función de la profundidad

La mayoría de los ensayos aportan un valor de conductividad hidráulica comprendido entre  $N \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$  y  $N \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ , lo que corresponde a un medio físico que podríamos clasificar como de baja permeabilidad, sólo el intervalo más superficial, 13-31,79 m, presenta un valor más alto, del orden de  $N \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  y el intervalo 97,36-116,15 m que presenta el valor más bajo de conductividad hidráulica,  $8,2 \times 10^{-13} \text{ m s}^{-1}$ , que puede clasificarse como un tramo de muy baja permeabilidad. La distribución de conductividad hidráulica en función de la profundidad presenta un primer tramo en que se produce una disminución desde el intervalo más superficial,  $3,24 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  ( ensayo de inyección en régimen pseudoestacionario), hasta

una profundidad comprendida entre 97,36-116,15 m en que se obtiene el anteriormente reseñado valor más bajo de conductividad hidráulica,  $8,2 \times 10^{-13} \text{ m s}^{-1}$  (ensayo de inyección en régimen transitorio a nivel constante). A partir de esta última profundidad se produce un incremento de la conductividad hidráulica hasta situarse, en el tramo 177-195,79 m, en  $9,82 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ .

En la primera fase se incluye la realización de un ensayo de inyección en régimen transitorio a nivel constante a columna completa, en este caso el intervalo estudiado fue entre 15,68 y 200 m. El valor de conductividad hidráulica obtenido fue de  $2,9 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$  que, como cabía esperar, corresponde a un valor intermedio entre los valores obtenidos para las diferentes secciones. Este dato sirve, por una parte, como valor de referencia respecto a los valores obtenidos en cada una de las secciones estudiadas y, por otra parte, aporta una información general del comportamiento hidráulico del sondeo en los casos en que no se lleve a cabo una testificación más detallada.

Una vez finalizada la fase de reconocimiento general, y en función de los resultados obtenidos en ésta y en el estudio litológico estructural, se eligieron tres intervalos, con una longitud de sección bastante menor que la utilizada en la primera fase, para su caracterización en la fase de reconocimiento detallado, correspondientes a aquellas zonas con una relativamente mayor fracturación. Estos intervalos fueron referidos a las profundidades siguientes: 32-37,83 m; 63,15-68,98 m y 91,5-97,33 m. No se tuvo en cuenta el tramo más superficial, a pesar de que había aportado los valores de conductividad hidráulica más altos en la fase de reconocimiento general, ya que debido a posibles factores de alteración superficial así como a la afección sufrida por la explotación de uno de los frentes de la cantera, situado a unos 40 m del sondeo, no se consideró representativo del macizo granítico.

En el primero de los intervalos analizados en detalle el valor de conductividad hidráulica obtenido fue de  $2,63 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$  muy similar al resultado de la sección de la primera fase en que se encuentra incluido, 31,21-50 m, que fue de  $3,05 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ .

El segundo intervalo, 63,15 – 68,98 m, presentó un valor de  $5,96 \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ , muy próximo también al de la sección de la primera fase que lo incluía, 54,71 – 73,5 m, en que se obtuvo un resultado de  $1,15 \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ .

Por último, el intervalo 91,5-97,33 m dio un valor de conductividad hidráulica de  $4,68 \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ , en el ensayo de inyección a nivel constante, y de  $3,14 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ , en el ensayo de inyección en régimen pseudoestacionario. La sección de la primera fase más próxima a ésta, 77,31-96,1 m, presentó un valor de  $6,88 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$  en el ensayo de inyección a nivel constante.

Mientras que en las dos primeras secciones no parece haber ninguna diferencia significativa que indique mayor conductividad hidráulica de la zona más fracturada estudiada en detalle, en el tercer intervalo no sólo no se produce esta circunstancia sino que además esta zona más fracturada presenta una conductividad hidráulica ligeramente menor que la porción de macizo rocoso de su proximidad.

Por último, para cada una de las secciones estudiadas se obtuvo el nivel piezométrico correspondiente. En la figura 11 se presenta esta distribución. El nivel del sondeo completo fue de 831,55 m s.n.m, obteniéndose para la mayoría de las secciones un valor muy próximo al mismo, con diferencias centimétricas debidas a la propia fluctuación de nivel durante los dos meses aproximadamente que duró la realización de los trabajos.

Tan sólo en 4 secciones se produce un incremento de nivel reseñable con respecto al nivel general del sondeo. Los intervalos con un incremento más significativo son: 54,71-73,5 m, 91,5-97,33 m y 121,5-140,29 m, con 3,6 m, 2,4 m y 2,7 m respectivamente. Los dos primeros coinciden con las zonas de falla descritas en el epígrafe correspondiente y corresponden a secciones con valores de conductividad hidráulica de  $1,15 \times 10^{-11}$ ,  $4,68 \times 10^{-11}$  y  $4,6 \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$  respectivamente, sin que a partir únicamente de estos valores se puede establecer conclusiones respecto a la distribución del flujo del agua subterránea en la zona de estudio.

Sondeo Cadalso de los Vidrios. Niveles piezométricos.

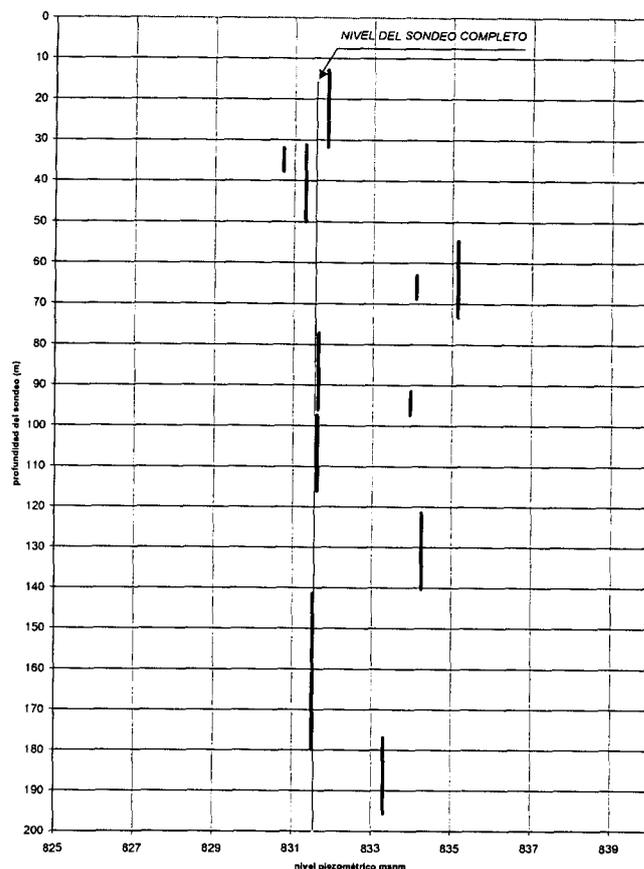


Fig. 11. Distribución del nivel piezométrico en función de la profundidad

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Desde el punto de vista estructural, petrológico y geoquímico se pueden establecer las siguientes conclusiones:

Las características petrológicas y geoquímicas de los leucogranitos del macizo de Cadalso de los Vidrios ponen de manifiesto que corresponden a tipos muy evolucionados, débilmente peraluminosos o subaluminosos, correlacionables con los granitoides de tipo PI del Sistema Central Español. Se han formado por la consolidación en niveles muy superficiales de un magma cuya composición es próxima a la de un magma granítico residual muy empobrecido en elementos de significado básico con relación a estos sistemas ígneos (Ti, Fe, Mg, Ca, P, Sr, Ba, Zr, Cr y REE). Por el contrario, presentan un apreciable contenido en Rb y una relación  $K/Rb=184$ , propia de granitoides muy diferenciados.

Los espectros de REE son muy planos, sin prácticamente fraccionamiento entre las LREE y las HREE y con pronunciadas anomalías negativas de Eu que indican que el fraccionamiento de plagioclasa ha desempeñado un papel importante en los procesos de diferenciación que han dado lugar a estos magmas leucograníticos.

El tramo del plutón interceptado en el sondeo es muy homogéneo desde el punto de vista petrológico y geoquímico, y los granitoides son identificables con la facies común de los leucogranitos “Blanco Cristal”.

Las manifestaciones filonianas (diques de aplitas y pegmatitas) son muy escasas y de pequeñas dimensiones. Los enclaves son muy escasos y de tamaño muy pequeño y las heterogeneidades primarias (estructuras de flujo, schlieren y bandas micáceas) son prácticamente testimoniales.

Se aprecian episienitizaciones y retrogradaciones de bajo grado en relación con algunas de las fracturas principales interceptadas en el sondeo, que afectan a un volumen poco importante de granitos (potencias centimétricas a decimétricas en torno a las fracturas). Están asociadas a la circulación de fluidos hidrotermales y las transformaciones producidas en los granitos se traducen según su intensidad en un enrojecimiento de los granitos y en pequeñas modificaciones químicas que son algo más importantes en los materiales más afectados (brechas episieníticas).

En las fracturas asociadas a circulación hidrotermal se encuentran generalmente depósitos minerales de relleno, asociados a los mismos eventos hidrotermales o a procesos posteriores de circulación de fluidos. La composición de estos depósitos y las relaciones observadas en las relaciones entre los elementos traza más significativos (REE) parece indicar que en buena parte proceden de la alteración de los minerales primarios de los granitos, consistiendo los aportes externos principales de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. Los procesos de circulación hidrotermal producen el sellado de buena parte de las fracturas asociadas, dificultando la posterior circulación de fluidos.

La inyección de los diques de cuarzo, lamprófidio y sienita presenta unas directrices regionales de dirección Norte que fluctúan entre N 30°E y N 160°E, también con buzamientos verticalizados y asociados a la etapa Hiendelaencina.

-Los procesos de episienitización en el Sistema Central Español están asociados a sistemas de fracturas con unas directrices principales E-W, encontrándose otros de menor importancia con directrices N-S. Estos procesos de episienitización han tenido lugar según los datos radiométricos de Caballero et al (1992) en un intervalo de tiempo comprendido entre 258,6 +/- 7 y 223,7 +/- 5,1 millones de años (Pérmico-Triásico).

Con respecto a la caracterización hidráulica se establecen las siguientes consideraciones:

Como se describió en el epígrafe correspondiente, los objetivos del presente trabajo se centran en profundizar en el conocimiento hidrogeológico y estructural de la zona de estudio, en obtener los valores de conductividad hidráulica en secciones aisladas mediante obturadores en un sondeo de reconocimiento, en la comparación de los resultados obtenidos por diferentes tipos de ensayos en una misma sección y, por último, en la optimización de la instrumentación que compone la Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica de formaciones de baja permeabilidad.

Los ensayos hidráulicos más utilizados han sido los de inyección en régimen transitorio a nivel constante y los de inyección en régimen pseudoestacionario, completados en determinadas secciones con ensayos de recuperación, Slug y Pulso.

Se han llevado a cabo 32 ensayos hidráulicos, distribuidos en 12 secciones. En cada sección se han realizado entre dos y tres ensayos diferentes dependiendo de la disponibilidad de tiempo y, en ocasiones, de la prioridad de no entorpecer las labores de explotación minera. Así mismo, se han tenido en cuenta, para el análisis comparativo entre métodos de ensayo, los resultados obtenidos en los ensayos hidráulicos llevados a cabo en los estudios hidrogeológicos citados en el epígrafe de antecedentes del presente artículo.

En función de los objetivos del estudio se ha ejecutado una primera fase de interpretación analítica básica de los resultados de campo obtenidos en los ensayos con el objetivo de obtener un valor representativo de conductividad hidráulica para cada una de las secciones ensayadas y establecer una comparación con los datos aportados por el estudio litológico y estructural. No se ha profundizado por tanto en esta primera etapa de interpretación en aspectos relacionados con modelos geométricos de flujo, efectos de almacenamiento, efecto “piel”, doble porosidad, establecimiento de límites hidráulicos, interacción adicional sobre fracturas, etc.

La interpretación de los ensayos de inyección en régimen transitorio a nivel constante se ha realizado de forma analítica (Jacob y Lohman, 1952). En general, se ha obtenido un razonable alineamiento de los datos de campo, permitiendo un buen ajuste de la línea de interpretación. No obstante, cabe señalar algunas peculiaridades en determinados ensayos:

- En ocasiones se produce en el tramo final de los valores de campo una tendencia a un alineamiento vertical, es decir, una sensible disminución del caudal inyectado a partir de tiempos de inyección en torno a 100 minutos. En la figura 12 se observa la interpretación gráfica del ensayo de inyección correspondiente a la sección 31,21-50 m. Esta situación parece corresponder a una disminución de la conductividad de las fracturas, posiblemente por cerramiento de las mismas o disminución de la conexión entre discontinuidades en zonas relativamente más alejadas del sondeo. Este efecto se produce en cuatro de los 11 ensayos de inyección a nivel constante llevados a cabo.

Ensayo inyección transitorio a presión constante (CVF15NC)

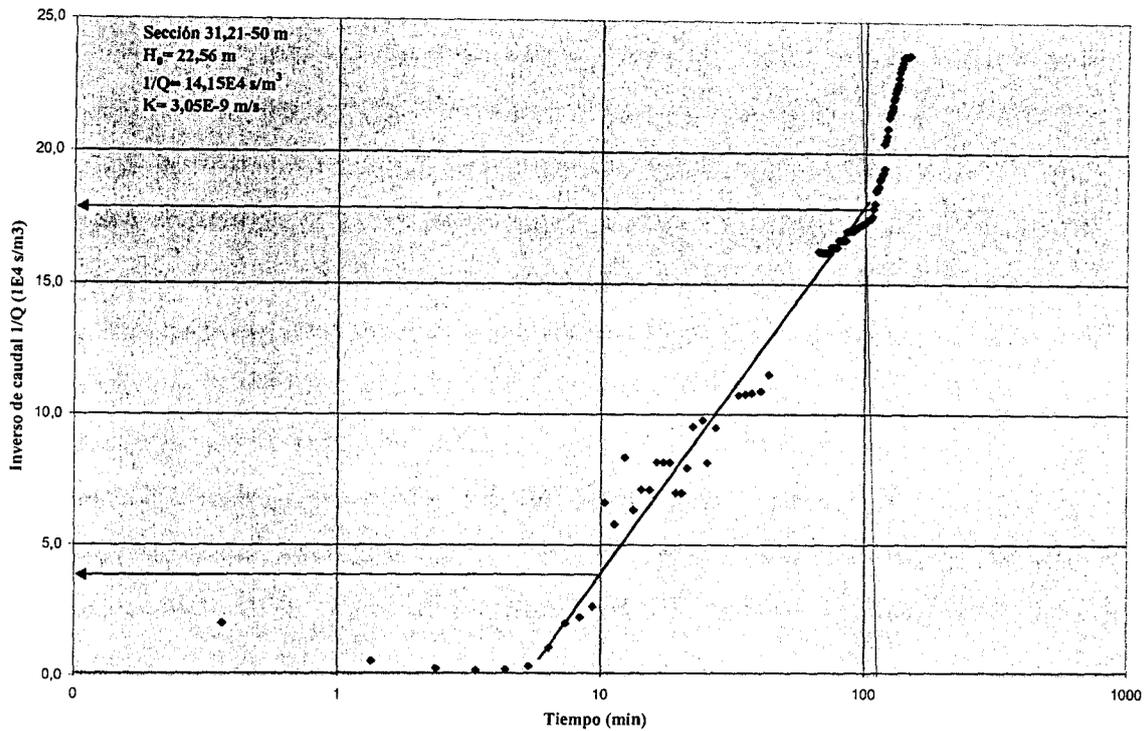


Fig.12. Interpretación analítica de un ensayo de inyección a nivel constante, sección 31,21-50 m

- Otra incidencia es la aparición de una cierta dispersión en los valores de los pares tiempo-inverso de caudal, con tendencia a la formación de intervalos horizontales paralelos, cuando la magnitud de caudal medido está próximo al límite inferior de medida del caudalímetro pequeño, figura 13. Este límite inferior teórico es de  $0,0005$  L min<sup>-1</sup>, si bien el efecto citado se produce cuando se miden caudales inferiores a  $0,003$  L min<sup>-1</sup>. La tendencia al alineamiento horizontal de los valores medidos se produce sólo en el tramo final, cuando el caudal registrado alcanza valores muy pequeños.

Ensayo inyección transitorio a presión constante (CVF229NC)

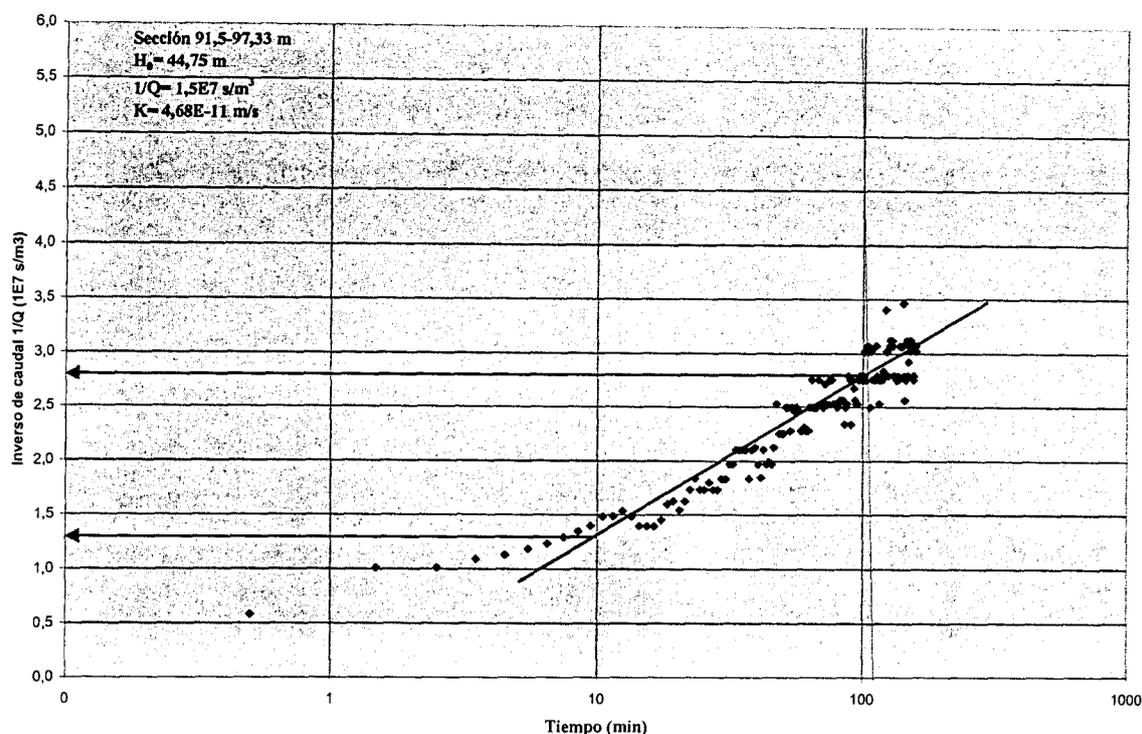


Fig. 13. Interpretación analítica ensayo de inyección a nivel constante, sección 91,5-97,33 m

En los ensayos de calibración del sistema de control de flujo se estimó que el error máximo en la medida de caudal para valores inferiores a  $0,001 \text{ L min}^{-1}$  era de 10,2 % (Mejías *et al.*, 1995) lo que supone un error aceptable con respecto al valor final de conductividad hidráulica obtenido para este rango de caudales.

- En el ensayo de inyección a nivel constante correspondiente al tramo 121,5 – 140,29 m se pueden ajustar dos rectas con distinta pendiente, figura 14, la primera para tiempos de inyección hasta 30 minutos, a continuación se produce un incremento significativo del caudal de inyección, que pasa de valores en torno a  $10 \text{ ml min}^{-1}$  hasta valores de  $40 \text{ ml min}^{-1}$  para, posteriormente, producirse una rápida disminución del caudal inyectado a partir del minuto noventa de inyección hasta el final del ensayo, con valores en torno a  $4 \text{ ml min}^{-1}$ . En la figura 10 se pueden observar ambas rectas con diferentes pendiente y el resultado obtenido.

Ensayo inyección transitorio a presión constante (CVF122NC)

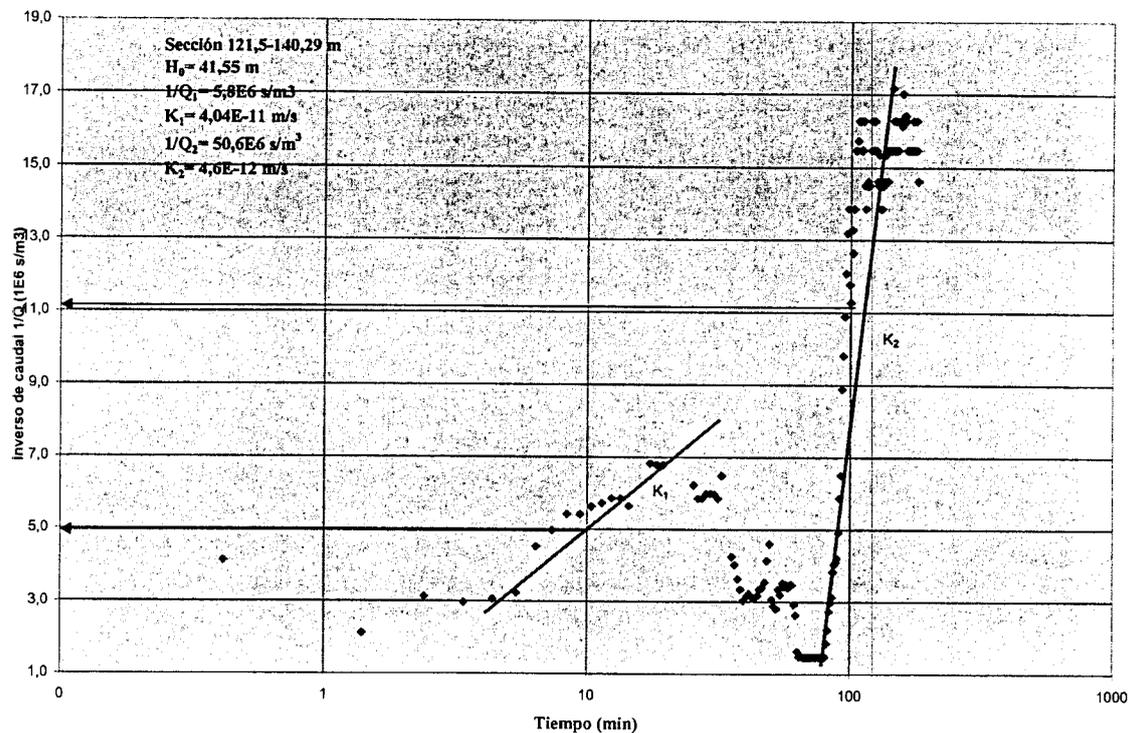


Fig. 14. Interpretación analítica ensayo de inyección a nivel constante, sección 121,5-140,29 m

La interpretación de esta respuesta correspondería al comportamiento de una sección con una zona próxima al sondeo en que existe una mayor conductividad hidráulica de las fracturas, dando lugar a un aumento del caudal de inyección, para, posteriormente, producirse una disminución de caudal en zonas relativamente más alejadas del sondeo por cierre de las fracturas o menor grado de conexión entre las mismas. La diferencia entre los dos valores de conductividad hidráulica obtenidos es de prácticamente un orden de magnitud.

- Por último, se producen en ocasiones desplazamientos laterales de la recta de ajuste a los datos de campo, pero manteniendo la misma pendiente, que se corresponden con variaciones de la instrumentación utilizada, bien por cambio en el control de medidas del caudal del caudalímetro grande al pequeño, o bien por cambio de válvula de regulación cuando se producen variaciones de caudal en los límites inferiores de regulación de éstas.

En cuanto a los ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario se han realizado 10 tests cuya ejecución no ha presentado ningún problema reseñable, en dos casos se han obtenido valores de conductividad hidráulica de  $N \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$  lo que supone el límite inferior práctico de fiabilidad para este tipo ensayos. La interpretación se ha realizado mediante la aplicación de las ecuaciones para condiciones estacionarias, utilizando como datos de caudal y presión los valores obtenidos durante el tramo final del ensayo.

Finalmente, los ensayos tipo slug y pulso han presentado más incertidumbres, tanto en su ejecución como en su interpretación.

Del primero se han realizado sólo dos ensayos, ya que los valores de conductividad hidráulica obtenidos en la fase de reconocimiento general quedaban fuera del rango de aplicación de este tipo de ensayos, no así los ensayos de Pulso, para los que los valores obtenidos en las restantes pruebas los enmarcaban en un intervalo idóneo de aplicación.

Los ensayos slug y de pulso proporcionaron una estimación de la conductividad hidráulica en un entorno muy próximo al del sondeo, pudiendo estar afectados, entre otros, por las labores de perforación, si bien en el sondeo de reconocimiento de este estudio se disminuyeron al máximo estas incertidumbres.

La interpretación de estos ensayos se ha realizado de forma automática mediante el código Aquifer Test Pro (Waterloo Hydrogeologic, 2002) por ajuste de los datos de campo a las curvas patrón (Cooper *et al.*, 1967).

En ambos tipos de ensayos el ajuste de los datos de campo a las curvas patrón no ha sido bueno en términos generales, resultando mejor en los dos ensayos tipo Slug y más deficiente en los 6 ensayos de pulso, especialmente en los valores de los primeros tiempos de registro.

Tanto en la ejecución como en la interpretación de los ensayos de Pulso existen una serie de incertidumbres que dificultan la obtención de un valor representativo de conductividad hidráulica, y que, en la práctica son complicados de controlar. A continuación se enumeran los principales factores que pueden afectar a la interpretación y ejecución de los ensayos de

Pulso y las prevenciones tomadas en este trabajo para paliar en lo posible estas incertidumbres.

- Magnitud de la compresibilidad efectiva del equipo utilizado: cuando se realiza un ensayo de pulso, la compresibilidad del agua debe ser tomada en cuenta para evaluar el cambio en el almacenamiento en la sección de ensayo, pero la compresibilidad de la instrumentación aplicada suele ser mayor que la del agua (Neuzil, 1982), resultando necesario obtener la compresibilidad efectiva para una configuración de equipo determinada. Para la interpretación de los ensayos de Pulso se ha utilizado el valor de compresibilidad efectiva obtenido experimentalmente para el dispositivo estándar del equipo de profundidad:  $2,78 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$  (Martínez Navarrete *et al.*, 1995).
- Efecto piel: en un ensayo de pulso sólo se produce una variación de volumen de agua muy pequeña en la sección de ensayo para que se produzca un significativo incremento o descenso de presión. Este volumen podría ser fácilmente disipado en una piel de espesor finito con un cierto almacenamiento, por lo que los datos obtenidos podrían reflejar las propiedades hidráulicas de esta piel que recubriera el sondeo, especialmente en los primeros tiempos de ensayo (Moench and Hsieh, 1985). En esta primera etapa de interpretación no se han aplicado los métodos de análisis de pulso que incluyen el efecto piel (Ramey *et al.*, 1975) (Moench and Hsieh, 1985), presuponiendo que la forma de operación durante la perforación ha minimizado la posibilidad de que se produzca este efecto. No obstante, el propio proceso de perforación puede producir un incremento de la permeabilidad en el espacio anular más próximo al sondeo, o el depósito de una delgada película en las paredes del sondeo procedente del propio material perforado. Por lo que en una segunda etapa de interpretación más elaborada se aplicará este tipo de análisis.
- Estabilización del nivel de agua: resulta imprescindible obtener un nivel estable antes de comenzar el ensayo para que se cumplan las premisas supuestas al realizar el análisis. De lo contrario se debería interpretar el ensayo suponiendo desconocido el nivel estático, lo que complica notablemente la interpretación. Una vez finalizado el inflado de los obturadores se ha procedido al cierre de la válvula de ensayo, aislando la sección de ensayo de la sarta, lo que permite una estabilización más rápida de la presión en la sección

de ensayo y reduce el almacenamiento. El tiempo de estabilización ha sido de al menos 24 horas, y en alguno de los ensayos se ha llegado a varios días desde el cierre de la válvula de ensayo hasta la ejecución del test.

- Efectos termales: Durante todo el desarrollo del Pulso se han tomado los valores de temperatura en la sección de ensayo. El sistema de adquisición de datos permite obtener una precisión en la medida de temperatura de 1° C. En ninguno de los ensayos de Pulso realizados se ha observado cambios en el registro de temperatura durante la ejecución de los mismos. No obstante, dado los bajos valores de conductividad hidráulica obtenidos en las secciones en que se han aplicado ensayos de Pulso y, por tanto, el escaso volumen de agua introducido en la sección de ensayo, con valores comprendidos entre 0,023 l y 0,0045 l, podría haber sido aconsejable un control de temperatura más preciso pero que, por otra parte, conllevaría una importante complicación instrumental.
- Sellado de los obturadores: con respecto al volumen del agua desplazado durante el inflado de los obturadores se obtuvo experimentalmente, para el mismo tipo de obturadores utilizados en los ensayos, para una presión de inflado de 20 bar y con una longitud de sección de ensayo de 1,965 m, que a los 15 minutos desde el inicio del inflado el caudal de agua desplazado era de 0,0004 l min<sup>-1</sup>, por lo que, en principio, debe considerarse como no detectable el posible caudal de agua desplazado transcurridos tiempos largos de estabilización del nivel tras el inflado de los obturadores.
- Apertura/cierre de la válvula de ensayo: uno de los factores claves en la realización de un pulso es la duración del proceso de apertura/cierre de la válvula de ensayo. Así, se puede distinguir entre pulso “sensu stricto” o de inyección instantánea y pulso de duración finita. En este caso, la válvula de ensayo utilizada se ha operado neumáticamente para profundidades de ensayo menores de 100 m e hidráulicamente para profundidades mayores. El proceso de apertura en sentido estricto de la válvula se ha considerado como instantáneo, y como tal se ha llevado a cabo la interpretación (Connell, 1994). No obstante, transcurre un tiempo desde que se acciona en superficie el dispositivo de apertura/cierre hasta que éste se trasmite en profundidad. En el caso de la operación neumática transcurren unos 20 segundos, mientras que la operación hidráulica está en

torno a 30 segundos. Este tiempo de espera, junto con la pequeña inercia en el tiempo de respuesta del Sistema de Adquisición de Datos, puede dar lugar a una cierta descoordinación de los valores de presión registrados en los primeros segundos, que desaparece cuando se espacia la toma de datos a cada 3 ó 5 segundos.

A pesar de las precauciones citadas para cada una de las incertidumbres anteriores, la suma de todas ellas, o la posible afección en según que casos de unas sobre otras, explicaría el deficiente ajuste entre los datos de campo y las curvas patrón comentado para los ensayos de pulso. La adición de estas incertidumbres puede llegar a producir un error en la estimación de la conductividad hidráulica por medio de ensayos de pulso de hasta dos órdenes de magnitud, que suele reducirse a un orden de magnitud cuando se utilizan valores reales de compresibilidad efectiva.

Con respecto al análisis comparativo entre ensayos en una misma sección se pueden obtener las conclusiones siguientes:

- En general se ha producido un acuerdo muy bueno entre los valores de conductividad hidráulica obtenidos por los diferentes tipos de ensayos empleados en una misma sección, tabla 3.
- En la gran mayoría de los ensayos se produce un razonable ajuste de los datos pese a la compleja respuesta propia de las rocas fracturadas. No obstante, en los ensayos de pulso el ajuste resulta bastante más pobre que en los restantes tipos de ensayo, atribuible básicamente a las incertidumbres anteriormente mencionadas, así como a posibles perturbaciones en los valores de presión debido a las características de las rocas fracturadas.
- Los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario aportan siempre valores de conductividad hidráulica más altos que los obtenidos en ensayos de inyección a nivel constante, si bien, salvo algunas excepciones, la diferencia no supera un orden de magnitud. Estos ensayos resultan relativamente fáciles de ejecutar e interpretar y son muy apropiados para la fase de reconocimiento general,

estando su límite inferior óptimo de aplicación hasta valores de conductividad hidráulica de  $N \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ , pudiendo alcanzarse, con menor precisión, valores de permeabilidad de hasta un orden de magnitud menor.

- Los ensayos de inyección a nivel constante aportan valores muy fiables de conductividad hidráulica hasta un límite inferior de  $N \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ . Incluso para valores de un orden de magnitud menor, donde la precisión de la medida de caudales muy bajos puede tener un error en torno a un 10 %, aporta información más fiable que la obtenida por otros métodos, ya que el continuo control de los valores de caudal, presión y temperatura en un sistema absolutamente estanco permite evaluar en todo momento la correcta ejecución del ensayo. Con respecto al límite superior es básicamente función de la instrumentación desarrollada, resultando para la aplicada en este trabajo un valor máximo de conductividad hidráulica de  $N \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .

Para valores de permeabilidad de  $N \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$  e inferiores estaría indicado el ensayo de pulso. En los ensayos de este tipo llevados a cabo no se ha obtenido una buena correspondencia con los valores de los ensayos de inyección a nivel constante, produciéndose en los ensayos de pulso diferencias de más de un orden de magnitud con respecto al valor de conductividad hidráulica obtenido por los otros métodos. El límite superior de aplicación de estos ensayos se correspondería con un valor de conductividad hidráulica de  $N \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ , ya que para valores superiores el tiempo de recuperación es demasiado corto como para alcanzar una adecuada precisión en las medidas.

- Los ensayos tipo Slug, realizados en las dos secciones con valores de conductividad hidráulica más altos, tienen una buena correspondencia con el valor obtenido en los ensayos de inyección. El intervalo de aplicación óptimo de este tipo de ensayo estaría comprendido para valores de conductividad hidráulica entre  $N \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  y  $N \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ , para valores inferiores a este último los tiempos de recuperación de presión resultan excesivamente elevados.
- De los tres ensayos de recuperación analizados, dos de ellos tienen un valor muy próximo de conductividad hidráulica al obtenido en el ensayo de inyección a nivel constante,

habiéndose registrado en ambos una recuperación en torno al 75%. El tercer ensayo corresponde al análisis del sondeo a columna completa y aporta un valor de conductividad hidráulica un orden de magnitud mayor que el aportado por el ensayo de inyección a nivel constante, pero esto es debido a que en este caso se tuvo que detener el registro de recuperación en solo un 6% por incidencias en las labores de explotación minera.

Finalmente, respecto a la distribución de la conductividad hidráulica en función de la profundidad y la fracturación se pueden establecer las consideraciones siguientes:

- Se observa una disminución progresiva de la conductividad hidráulica desde los 13 m de profundidad hasta 73,5 m, interpretable como una disminución de la apertura de las fracturas y diaclasas con la profundidad, debido al aumento progresivo de la presión litostática.
- En el tramo comprendido entre 63 y 97 m se registra un ligero aumento de la conductividad hidráulica relacionado con las dos zonas de falla interceptadas por el sondeo (a 66,6 m y 93 m). El escaso incremento del valor de la conductividad hidráulica es debido a que la actividad hidrotermal asociada a estas fracturas ha producido un sellado parcial de las mismas por precipitación de depósitos.
- A partir de la sección 97,36 - 116,15 m, en que se obtiene el valor mínimo de conductividad hidráulica, y hasta el final del sondeo se registra un aumento progresivo de la permeabilidad debido posiblemente al acercamiento a una zona de fractura que cortaría a bajo ángulo al sondeo a una profundidad algo superior a los 200 m. Al ir aumentando la profundidad, el sondeo se aproximaría más a la zona de fractura en la que las fisuras latentes de descompresión se encontrarían más abiertas, con el consiguiente aumento de la conductividad hidráulica. Se observa un aumento en la fracturación a profundidades próximas a los 180 m, que sobre todo se manifiesta en las fracturas que tienen ángulos > 70° con el eje del sondeo.

Por último, cabe señalar que las propiedades hidráulicas de discontinuidades individuales es, a mayor extensión, determinada por su grado de conexión con otras fracturas, como en parte ha puesto de manifiesto la comparación de los resultados obtenidos en la fases 1 y 2, y esto no es posible determinarlo solo en base a las características litológicas y estructurales observadas en los testigos de la perforación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almen, K.E., Andersson, J.E., Carlsson, L., Hansson, K. and Larsson, N.A. 1986. Hydraulic testing in crystalline rock. A comparative study of single-hole test methods. Technical Report 86-27 SKB, Uppsala, 183 pp.

Bellido, F., Casillas, R., Martín Parra, L.M., del Olmo, A., de Pablo, J.G., Peinado, M. y Villaseca, C. (1990). Mapa Geológico de España a e. 1:50.000, hoja N° 557 (San Martín de Valdeiglesias). I.G.M.E.; Madrid.

Bredehoeft, J.D. and Papadopulos, I.S. 1980. A method for determining the hydraulic properties of Tight formations. *Water Resources Research*, 16(1), 233-238.

Caballero, J.M., Casquet, C., Galindo, C., González-Casado, J.M., Snelling, N. & Tornos, F. (1992). Dating of Hydrothermal events in the Sierra del Guadarrama, Iberian Hercynian Belt. Spain. *Geogaceta*, 11, (18-22).

Caballero, J.M., Casquet, C., Galindo, C. & Tornos, F. (1993). The behaviour of REE in episyenites (dequartzified and alkanizad granites) from the Sierra del Guadarrama. Spanish Central System. In: *Current Research in Geology Applied to Ore Deposits*. Fenoll Hach-Alí, Torres-Ruiz & Gervilla (eds), (609-612).

Capote, R., de Vicente, G. y González-Casado, J.M. (1990). Evolución de las deformaciones alpinas en el Sistema Central Español. *Geogaceta*, 7, (20-22).

Connell, L.D. 1994. The importance of pulse duration in pulse test analysis. *Water Resources Research*, 30(8), 2403-2411.

Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D. and Papadopoulos, I.S. 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research*, 3(1), 263-269.

Díaz de Neira, J. A., López Olmedo, F., Solé Pont, J., Hernaiz, P.P. y Calvo Sorando, J.P. (en prensa). Mapa Geológico de España a E 1:50.000, Hoja N° 580 (Méntrida). I.G.M.E., Madrid.

Galindo, C., Tornos, F., Darbyshire, D.P.F. & Casquet, C. (1994). The age and origin of the barite-fluorite (Pb-Zn) veins of the Sierra del Guadarrama (Spanish Central System, Spain): a radiogenic (Nd-Sr) and stable isotope study. *Chem. Geol.*, 112, (351-364).

Gómez-Moreno, G., Lombardero, M., Moreno, T. Y Regueiro, M. 1995. Estudio de los granitos de la Comunidad Autónoma De Madrid. Informe inédito. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, fondo documental del IGME, doc. n° 11.391.

Jacob, C.E. and Lohman, S. 1952. Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. *Transactions American Geophysical Union*, 33(4), 559-569.

Martínez-Navarrete, C., Grima, J., Mejías, M. y Gómez, J.A. 1995. Celda de presión para ensayo de componentes de un equipo de testificación hidráulica. Especificaciones técnicas y ensayos. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XIX, 209-222.

Mejías, M. y López-Geta, J. A., 2003. Instrumentation and methodology for the hydraulic characterization of fractured rocks. *International Conference on groundwater in fractured rocks*, Praga, IHP-VI, series on groundwater, 7, 275-276.

Mejías, M., López-Geta, J.A. y Segura, D. 2002. Caracterización de formaciones de baja permeabilidad mediante ensayos hidráulicos: aplicación a dos sondeos de reconocimiento situados respectivamente al Sur y Este de las cortas mineras de Aznalcóllar y Los Frailes en la mina Boliden-Apirsa, S.L. (Aznalcóllar, Sevilla). *Boletín Geológico y Minero*, 113(1), 45-55.

Mejías, M., Grima, J., Gómez, J.A. y Martínez-Navarrete, C. 1998. Unidad Móvil de caracterización hidrogeológica de formaciones de baja permeabilidad. Ensayos de calibración. X Congreso Internacional de Minería y Metalurgia, Valencia, 1, 199-218.

Mejías, M., Grima, J., Martínez-Navarrete, C. y Gómez, J.A. 1995. Sistema de control de flujo para la realización de ensayos hidráulicos de inyección. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, XIX, 223-236.

Moench, A. F. and Hsieh P. A. 1985. Analysis of slug test data in a well with finite thickness skin. Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Congress of IAH, Tucson, Arizona. Memoires XVII (1), 17-29.

Neuzil, C.E. 1982. On conducting the modified slug test in tight formations. Water Resources Research 18(2), 439-441.

Ramey, H. J., Agarwal, R.G. and Martin, I. 1975. Analysis of slug test or DST flow period data. Journal Canadian Petroleum Technology, 14, 37-47.

Van Everdingen, A.F. and Hurst, W. 1949. The Application of the Laplace Transformation to flows problems in reservoirs. Transactions, AIME 186, 305-324.

Vicente de, G., Martínez, J., Capote, R. y Lunar, R. (1986). Determinación de los elipsoides de esfuerzo y deformación asociados a la mineralización argentífera de Hiendalaencina (Sistema Central). Estud. Geol., 42, (23-31).

Villaseca, C., Barbero, L, y Herreros, V. (1998). A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 89, (113-119).

Waterloo hydrogeologic 2002. Aquifer Test Pro. User's Manual. Graphical Analysis and Reporting of Pumping Test and Slug Test Data. Waterloo, Ontario (Canada), 267 pp.

ANEXO I FR  
DATOS SOBRE LA FRACTURACIÓN EN EL  
SONDEO

## Sondeo Cadalso de Los Vidrios

N° Caja	Techo (m)	Muro (m)	Potencia (m)	Prof. (m)	Tipos de fracturas											Fracturas (límpias+mineralizadas)						Frac. totales	Frac.+ Fallas+ Fisur.
					Roturas	F. asociadas a falla	Fracturas límpias				Fracturas mineralizadas				Fisuras								
							< 30°	30°-50°	50°-70°	> 70°	< 30°	30°-50°	50°-70°	> 70°		< 30°	30°-50°	50°-70°	> 70°	<50°	>50°		
1	3,00	5,15	2,15	4,075	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	2	2	2
2	5,15	7,35	2,2	6,25	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	7,35	9,70	2,35	8,525	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	4	0	4	4	5
4	9,70	12,15	2,45	10,925	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	12,15	14,50	2,35	13,325	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	14,50	16,70	2,2	15,6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	16,70	19,15	2,45	17,925	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	19,15	21,40	2,25	20,275	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	21,40	23,55	2,15	22,475	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	23,55	25,75	2,2	24,65	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	25,75	27,70	1,95	26,725	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	27,70	30,50	2,8	29,1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1
13	30,50	32,00	1,5	31,25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	32,00	34,45	2,45	33,225	8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1
15	34,45	36,60	2,15	35,525	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	36,60	38,85	2,25	37,725	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	38,85	40,85	2	39,85	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	40,85	43,00	2,15	41,925	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	43,00	45,20	2,2	44,1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	45,20	47,40	2,2	46,3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	47,40	49,80	2,4	48,6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	49,80	52,00	2,2	50,9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	52,00	54,25	2,25	53,125	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	54,25	56,55	2,3	55,4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
25	56,55	58,45	1,9	57,5	2	0	3	3	0	0	0	1	0	0	1	3	4	0	0	7	0	7	8
26	58,45	60,75	2,3	59,6	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0	2	2
27	60,75	63,15	2,4	61,95	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	3	3
28	63,15	65,40	2,25	64,275	0	8	0	1	0	2	1	0	0	1	2	1	1	0	3	2	3	5	15
29	65,40	67,85	2,45	66,625	0	4	0	1	7	1	0	2	1	2	2	0	3	8	3	3	11	14	20
30	67,85	70,05	2,2	68,95	0	0	0	0	4	4	0	0	2	1	0	0	0	6	5	0	11	11	11

Nº Caja	Techo (m)	Muro (m)	Potencia (m)	Prof. (m)	Tipos de fracturas											Fracturas (limpias+mineralizadas)						Frac. totales	Frac.+ Fallas+ Fisur.
					Roturas	F. asociadas a falla	Fracturas limpias				Fracturas mineralizadas				Fisuras								
							< 30°	30°-50°	50°-70°	> 70°	< 30°	30°-50°	50°-70°	> 70°		< 30°	30°-50°	50°-70°	> 70°	<50°	>50°		
31	70,05	72,25	2,2	71,15	0	0	1	0	0	1	0	0	1	8	3	1	0	1	9	1	10	11	14
32	72,25	74,20	1,95	73,225	1	0	0	0	1	2	4	0	0	3	1	4	0	1	5	4	6	10	11
33	74,20	76,30	2,1	75,25	0	0	0	1	0	5	2	0	1	0	0	2	1	1	5	3	6	9	9
34	76,30	78,70	2,4	77,5	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	2	2	3
35	78,70	80,80	2,1	79,75	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	80,80	83,20	2,4	82	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	83,20	85,50	2,3	84,35	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1
38	85,50	87,75	2,25	86,625	0	0	0	1	0	3	0	0	0	2	2	0	1	0	5	1	5	6	8
39	87,75	89,80	2,05	88,775	2	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	1	0	2	1	1	3	4	4
40	89,80	92,10	2,3	90,95	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6
41	92,10	94,00	1,9	93,05	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
42	94,00	96,10	2,1	95,05	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
43	96,10	98,00	1,9	97,05	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	2	2
44	98,00	100,05	2,05	99,025	1	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	5	5	5
45	100,05	102,30	2,25	101,175	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	1	0	0	8	0	0	8	8	9
46	102,30	104,65	2,35	103,475	1	0	0	1	8	0	0	0	1	0	2	0	1	9	0	1	9	10	12
47	104,65	106,90	2,25	105,775	2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	2	2	2
48	106,90	109,15	2,25	108,025	3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	2	2
49	109,15	111,45	2,3	110,3	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	3	3
50	111,45	113,55	2,1	112,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	113,55	115,85	2,3	114,7	2	0	0	0	5	2	1	0	0	0	0	0	0	5	2	1	7	8	8
52	115,85	118,20	2,35	117,025	0	0	0	0	3	4	0	0	3	0	0	0	6	4	0	10	10	10	
53	118,20	120,60	2,4	119,4	0	0	0	0	0	1	0	0	1	3	0	0	1	4	0	5	5	5	
54	120,60	122,90	2,3	121,75	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1
55	122,90	125,20	2,3	124,05	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	2	2	2
56	125,20	127,60	2,4	126,4	3	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	3	3	3	3
57	127,60	129,70	2,1	128,65	2	0	0	0	4	4	0	0	1	0	0	0	5	4	0	9	9	9	9
58	129,70	131,95	2,25	130,825	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	131,95	134,25	2,3	133,1	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	3	3
60	134,25	136,45	2,2	135,35	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	9	9	9

N° Caja	Techo (m)	Muro (m)	Potencia (m)	Prof. (m)	Tipos de fracturas											Fracturas (limpias+mineralizadas)						Frac. totales	Frac.+ Fallas+ Fisur.
					Roturas	F. asociadas a falla	Fracturas limpias				Fracturas mineralizadas				Fisuras								
							< 30°	30°-50°	50°-70°	> 70°	< 30°	30°-50°	50°-70°	> 70°		< 30°	30°-50°	50°-70°	> 70°	<50°	>50°		
61	136,45	138,60	2,15	137,525	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	8	8	8
62	138,60	140,40	1,8	139,5	2	0	3	0	8	0	0	0	0	0	0	3	0	8	0	3	8	11	11
63	140,40	142,85	2,45	141,625	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	7	7	7
64	142,85	144,90	2,05	143,875	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	2
65	144,90	147,25	2,35	146,075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	147,25	149,65	2,4	148,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
67	149,65	151,85	2,2	150,75	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
68	151,85	154,10	2,25	152,975	2	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	1	0	0	3	1	3	4	4
69	154,10	156,40	2,3	155,25	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	2
70	156,40	158,70	2,3	157,55	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
71	158,70	161,10	2,4	159,9	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	3	3
72	161,10	163,25	2,15	162,175	3	0	0	0	6	4	1	0	0	0	0	1	0	6	4	1	10	11	11
73	163,25	164,95	1,7	164,1	3	0	2	0	2	3	1	0	0	0	0	3	0	2	3	3	5	8	8
74	164,95	167,15	2,2	166,05	3	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	3	3	3
75	167,15	169,45	2,3	168,3	5	0	1	0	2	4	0	0	0	0	0	1	0	2	4	1	6	7	7
76	169,45	171,70	2,25	170,575	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
77	171,70	174,00	2,3	172,85	2	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	5	5
78	174,00	176,25	2,25	175,125	2	0	1	0	8	5	0	0	0	0	0	1	0	8	5	1	13	14	14
79	176,25	178,40	2,15	177,325	3	0	0	0	0	5	1	0	0	0	0	1	0	0	5	1	5	6	6
80	178,40	180,75	2,35	179,575	1	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8	8	8
81	180,75	182,75	2	181,75	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	2
82	182,75	185,10	2,35	183,925	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	2
83	185,10	187,40	2,3	186,25	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
84	187,40	189,80	2,4	188,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
85	189,80	191,90	2,1	190,85	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
86	191,90	194,20	2,3	193,05	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
87	194,20	196,45	2,25	195,325	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1
88	196,45	198,25	1,8	197,35	2	0	0	1	2	6	1	0	0	0	0	1	1	2	6	2	8	10	10
89	198,25	200,00	1,75	199,125	0	0	0	0	2	5	1	0	0	2	1	1	0	2	7	1	9	10	11
Total			197		134	52	15	14	105	105	19	3	17	29	7	34	17	122	134	51	256	307	366

# Sondeo Cadalso de Los Vidrios

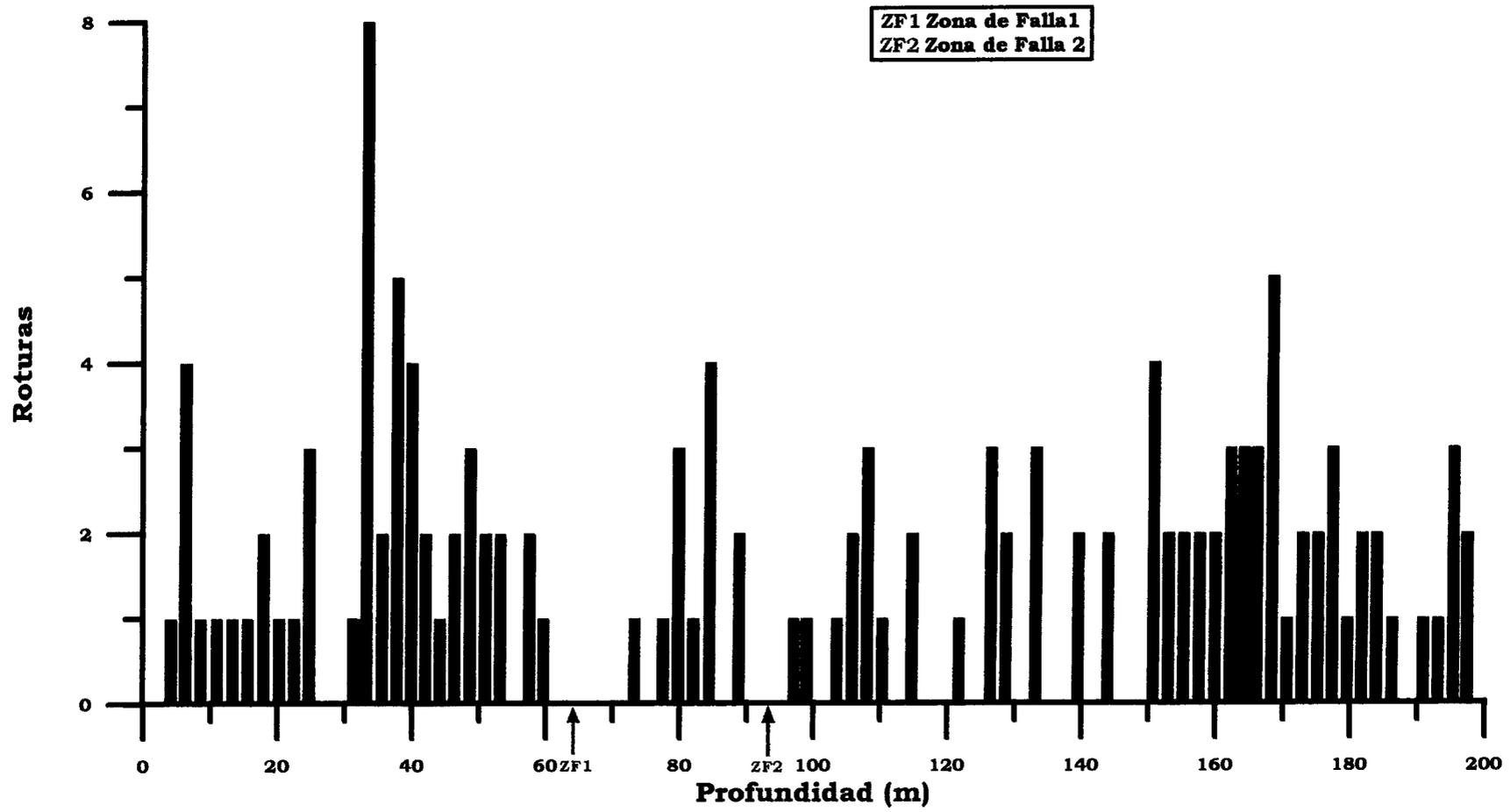


FIGURA 1

# Sondeo Cadalso de Los Vidrios

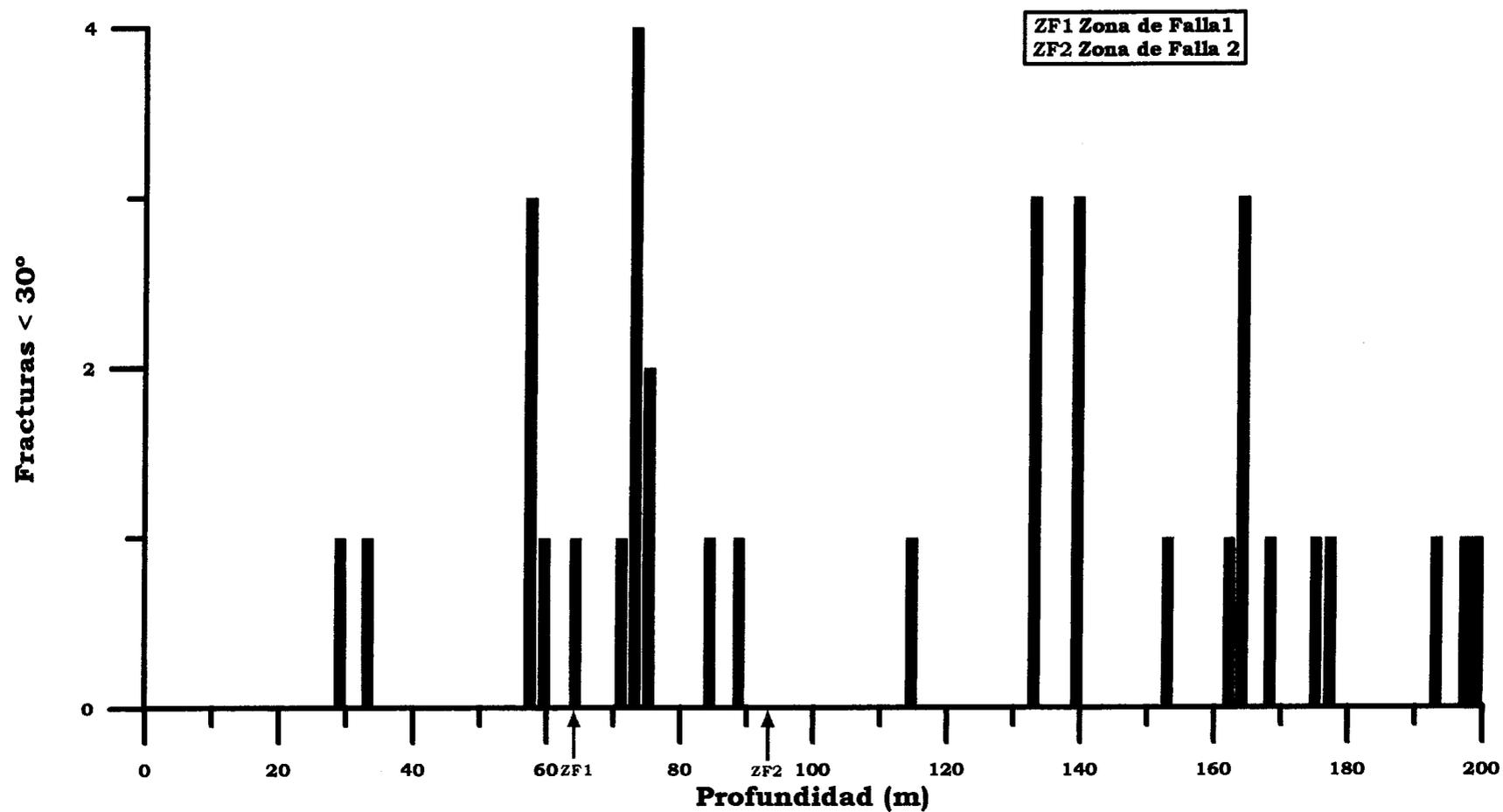


FIGURA 2

# Sondeo Cadalso de Los Vidrios

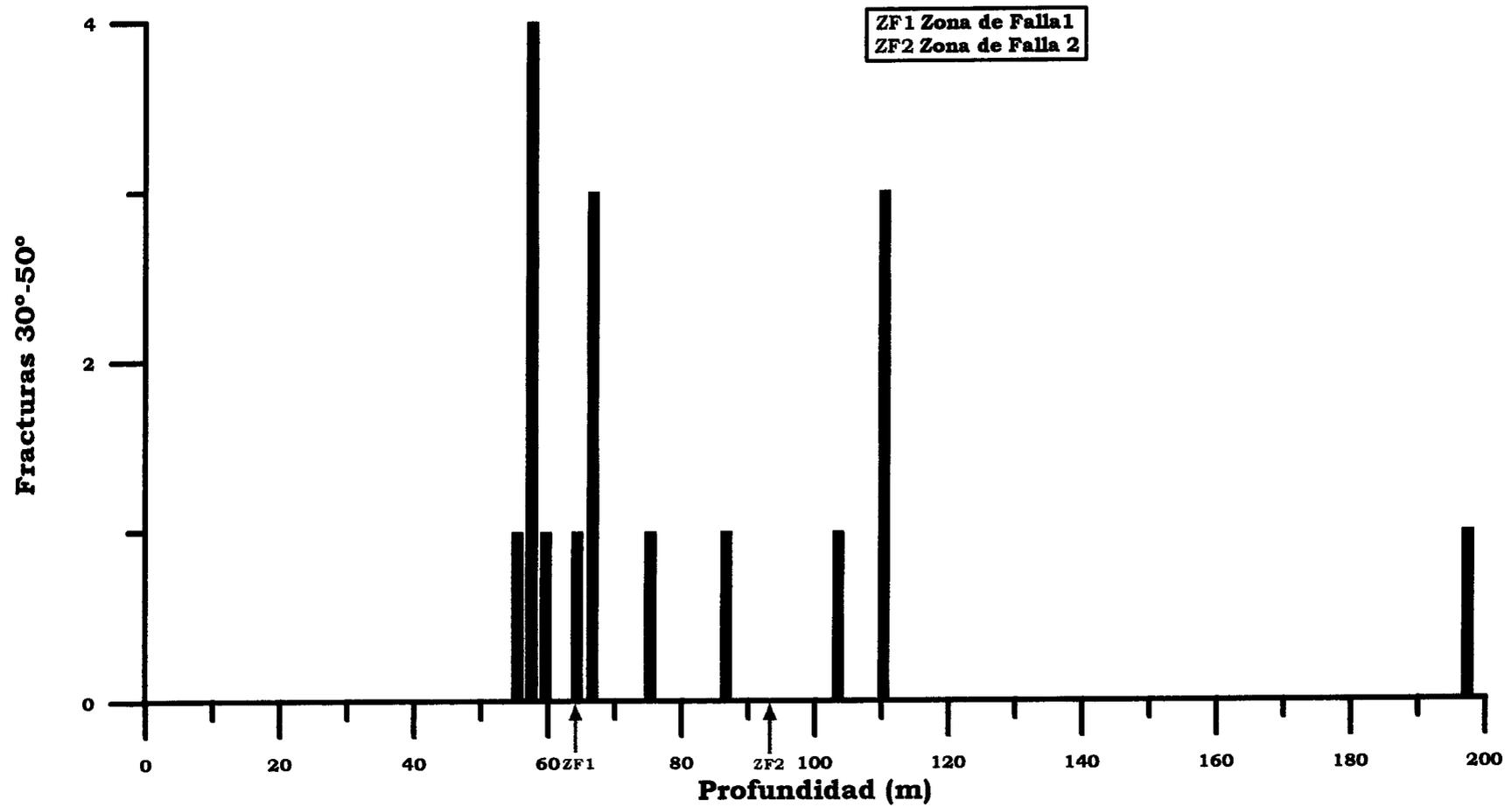


FIGURA 3

# Sondeo Cadalso de Los Vidrios

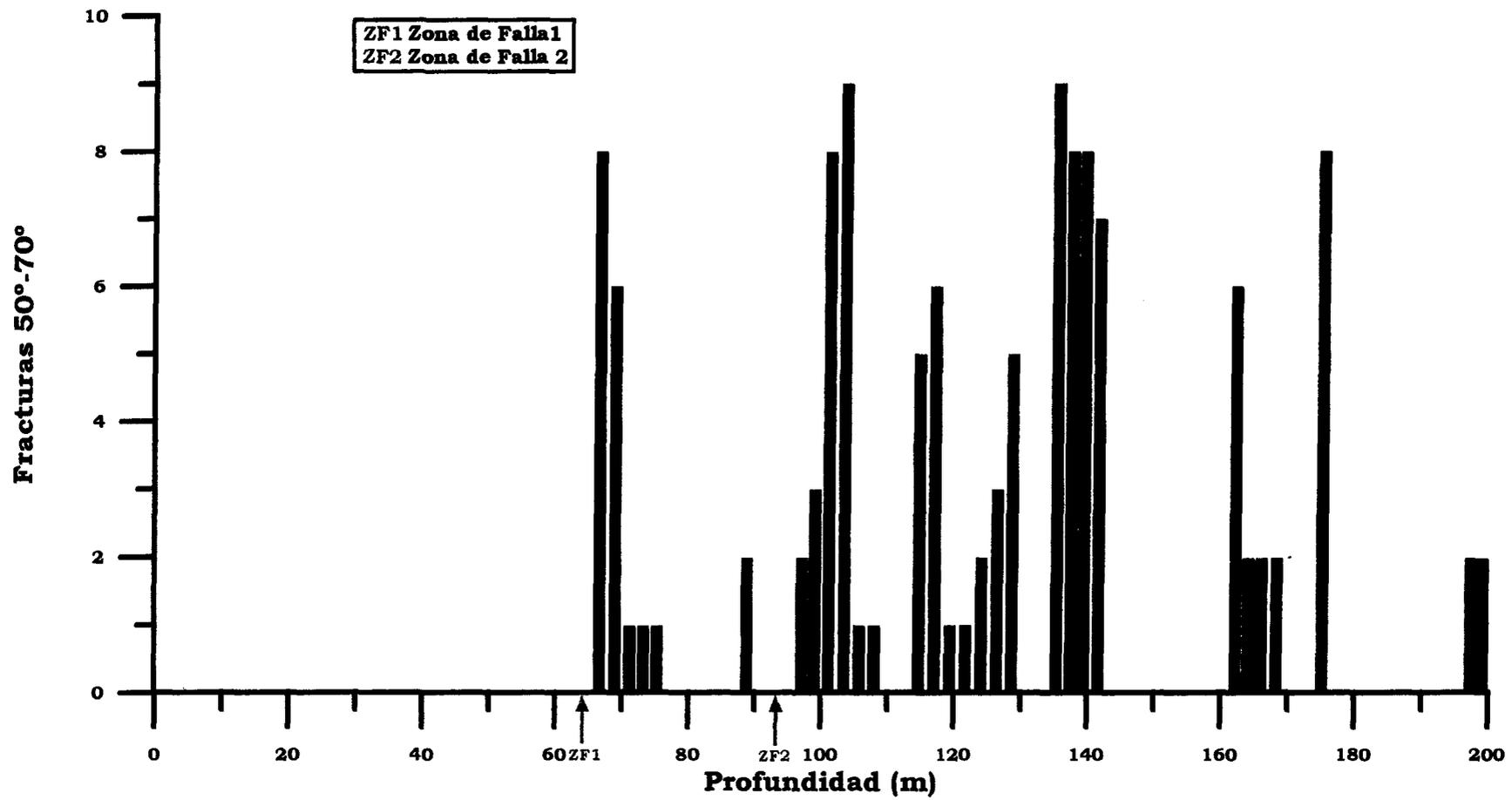


FIGURA 4

# Sondeo Cadalso de Los Vidrios

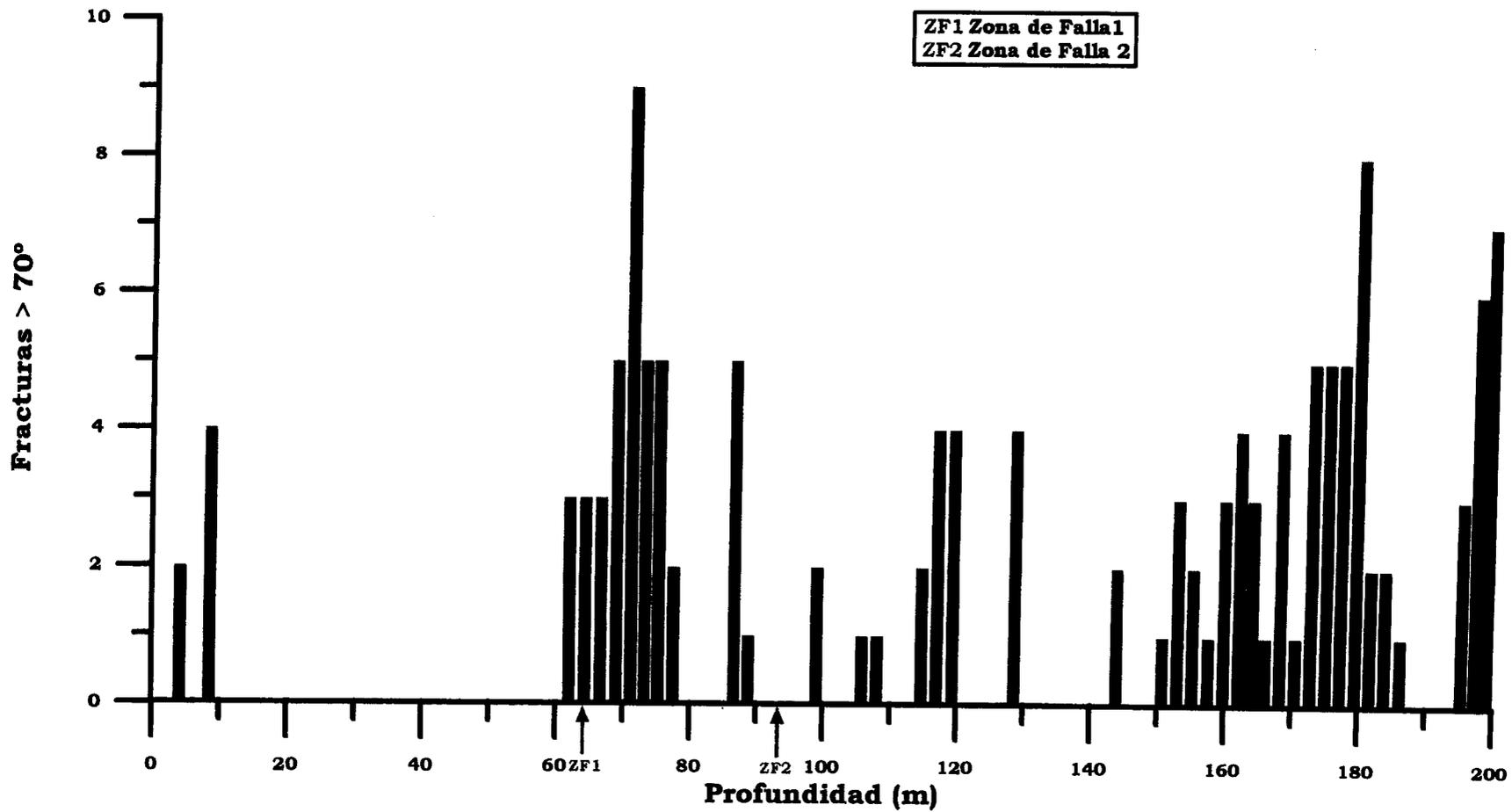


FIGURA 5

# Sondeo Cadalso de Los Vidrios

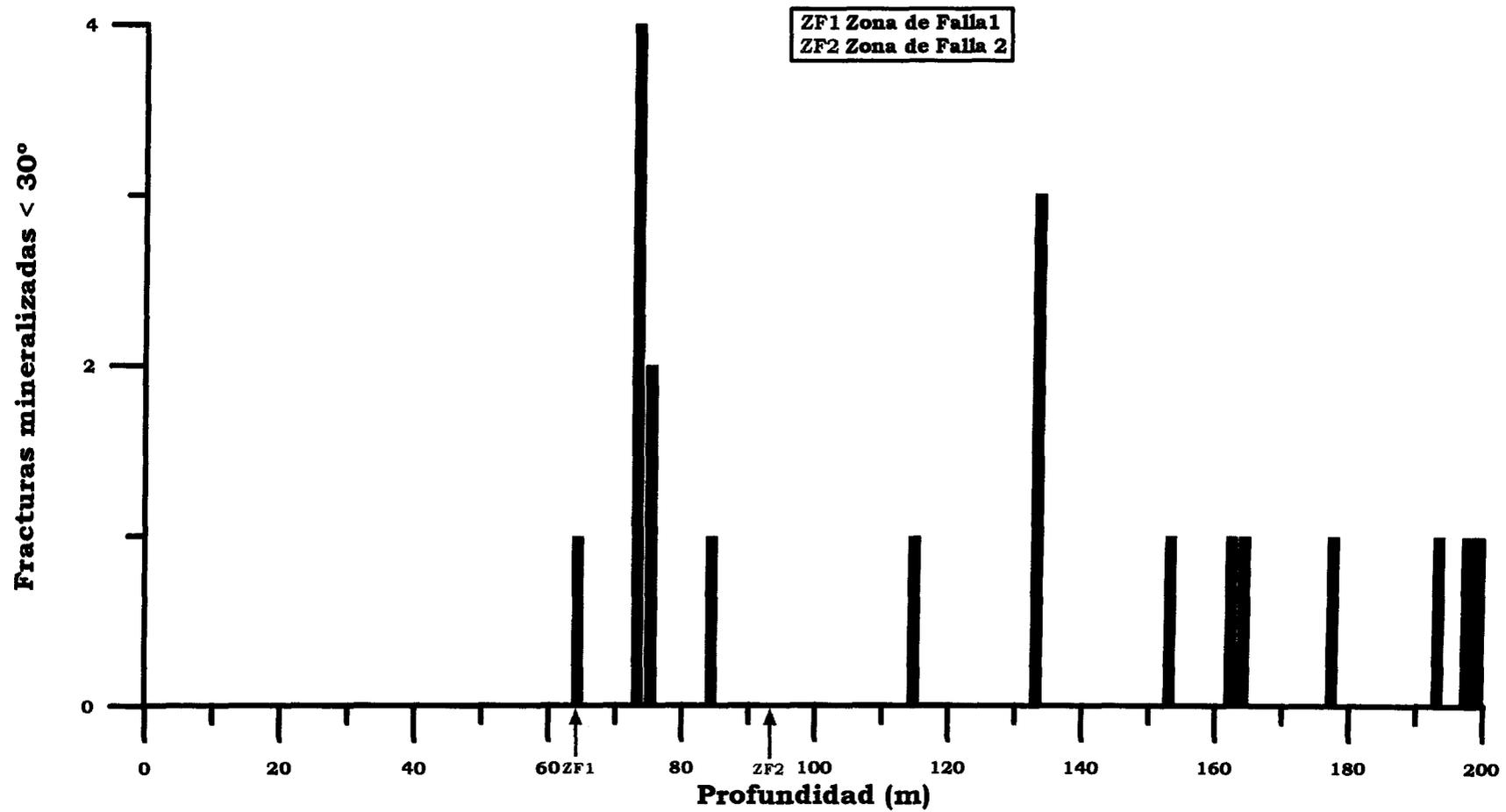


FIGURA 6

# Sondeo Cadalso de Los Vidrios

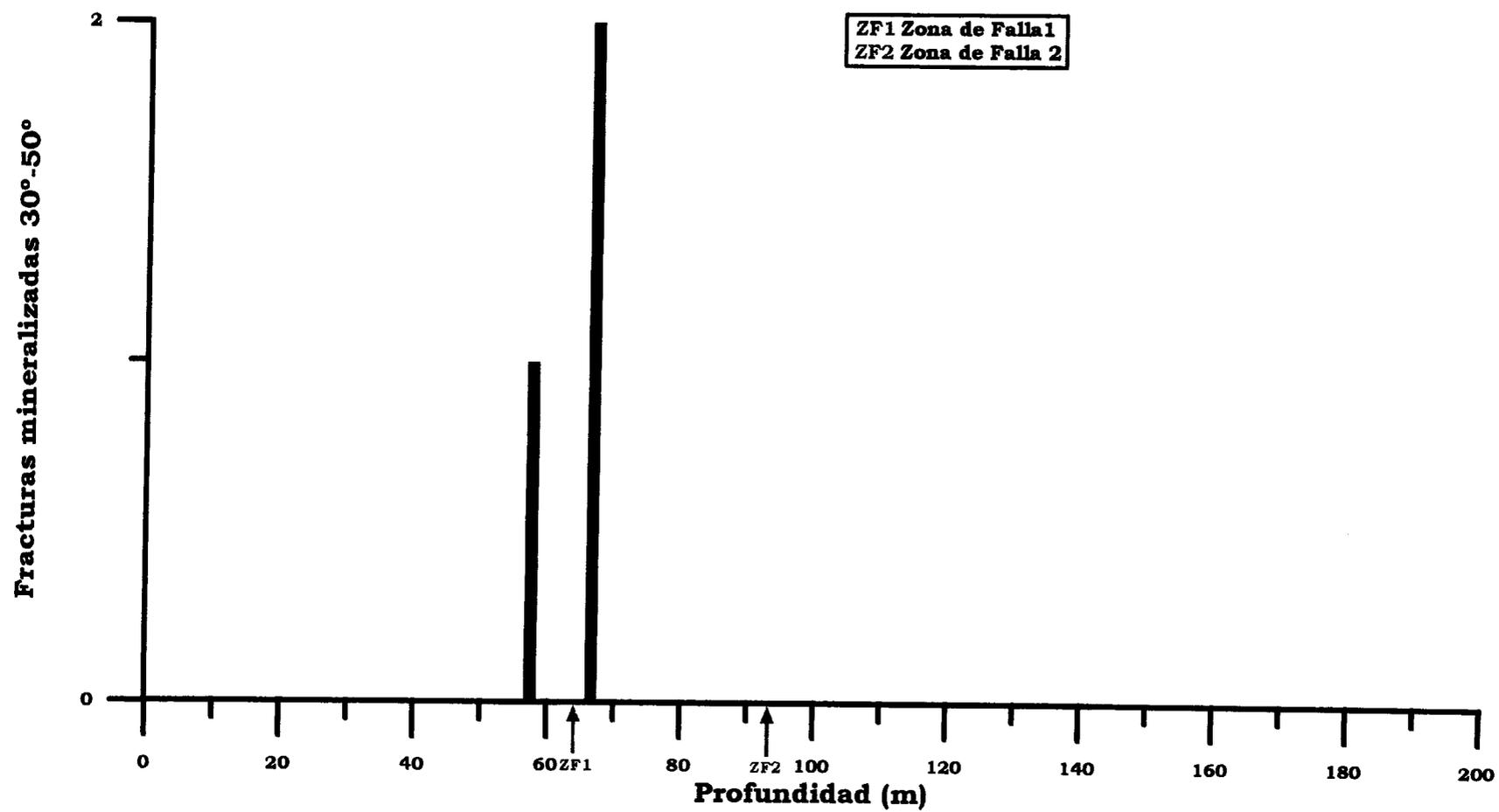


FIGURA 7

# Sondeo Cadalso de Los Vidrios

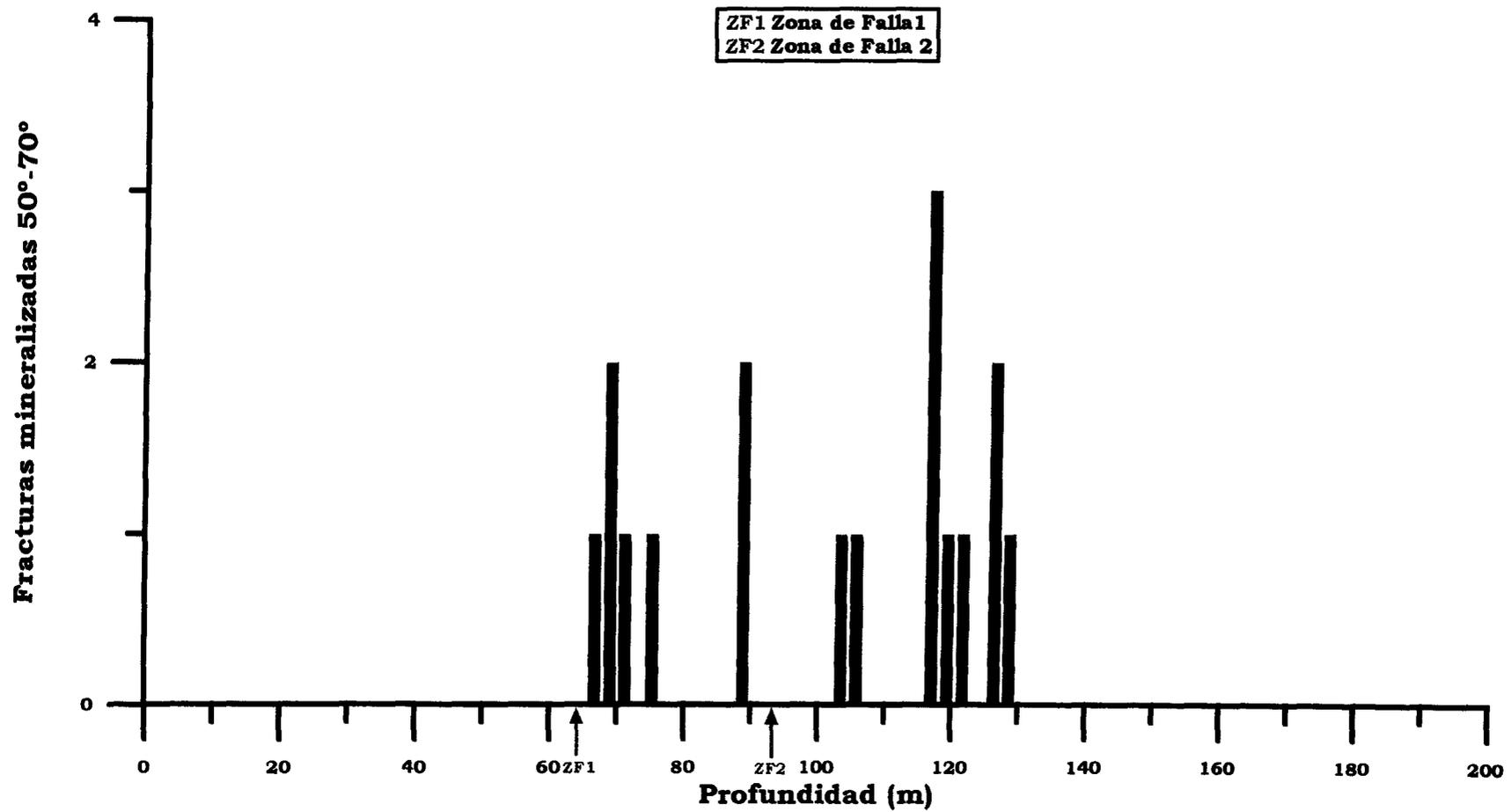


FIGURA 8

# Sondeo Cadalso de Los Vidrios

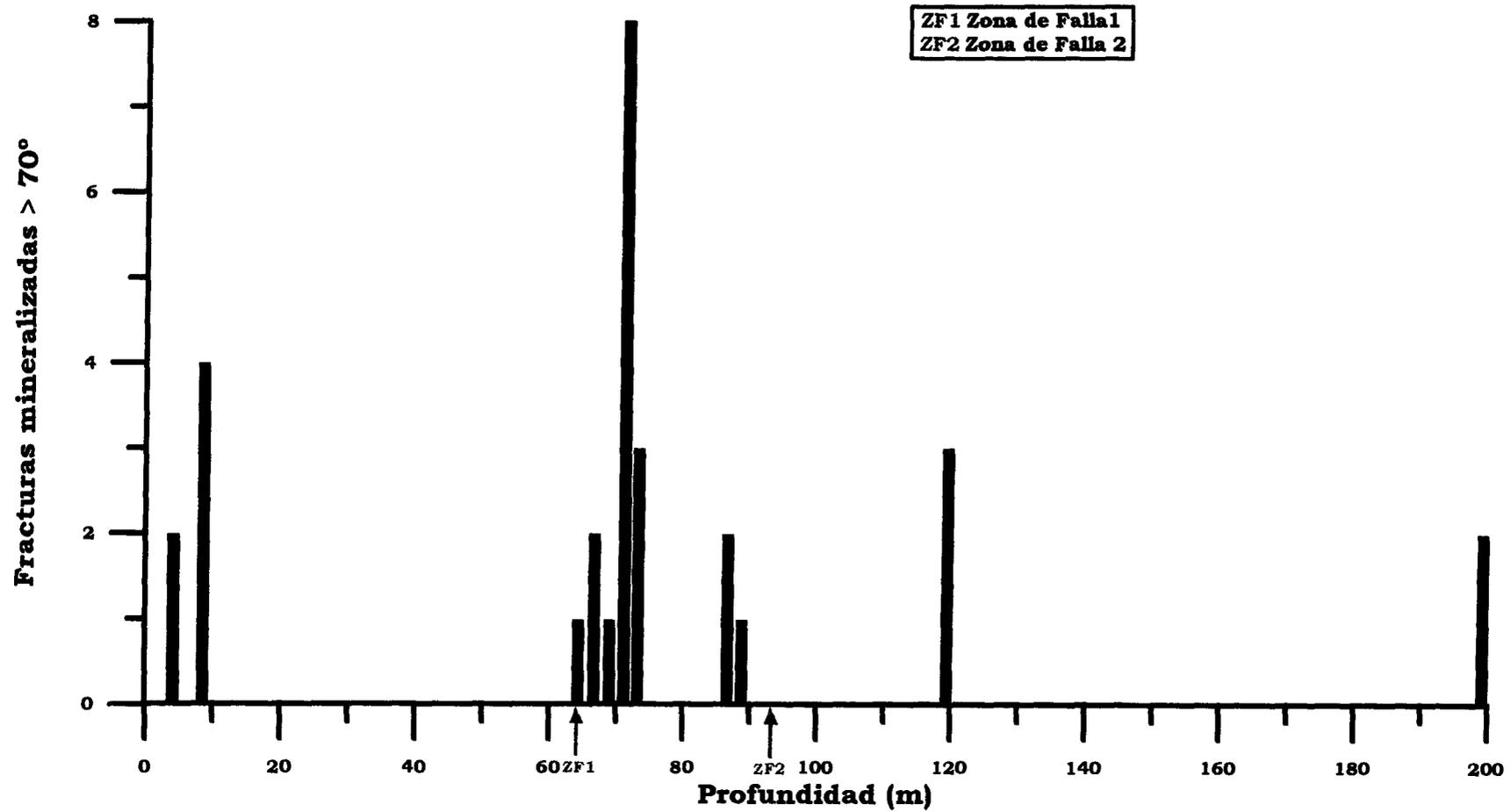


FIGURA 9

## Sondeo Cadalso de Los Vidrios

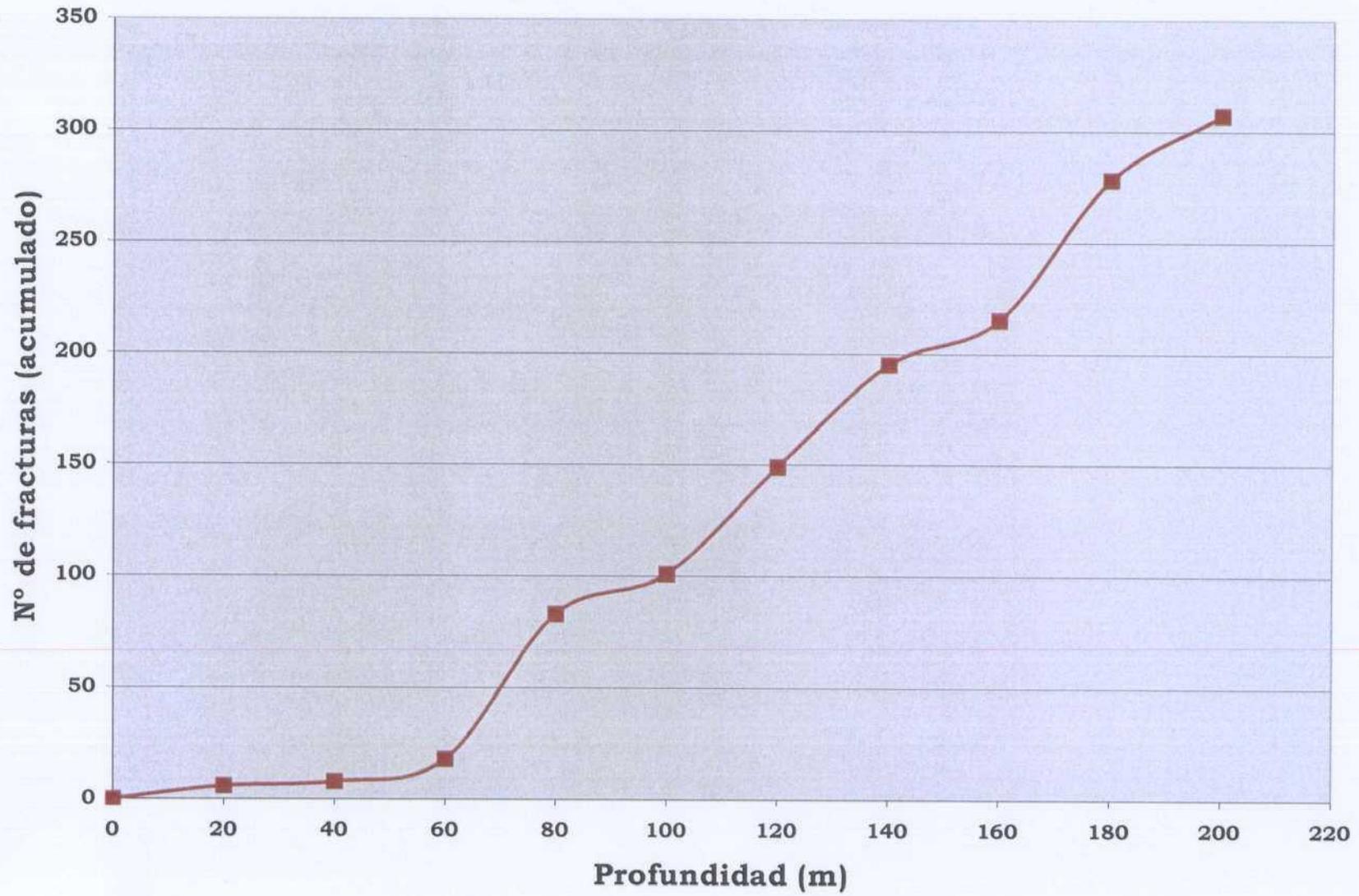


FIGURA 10

## Sondeo Cadalso de Los Vidrios

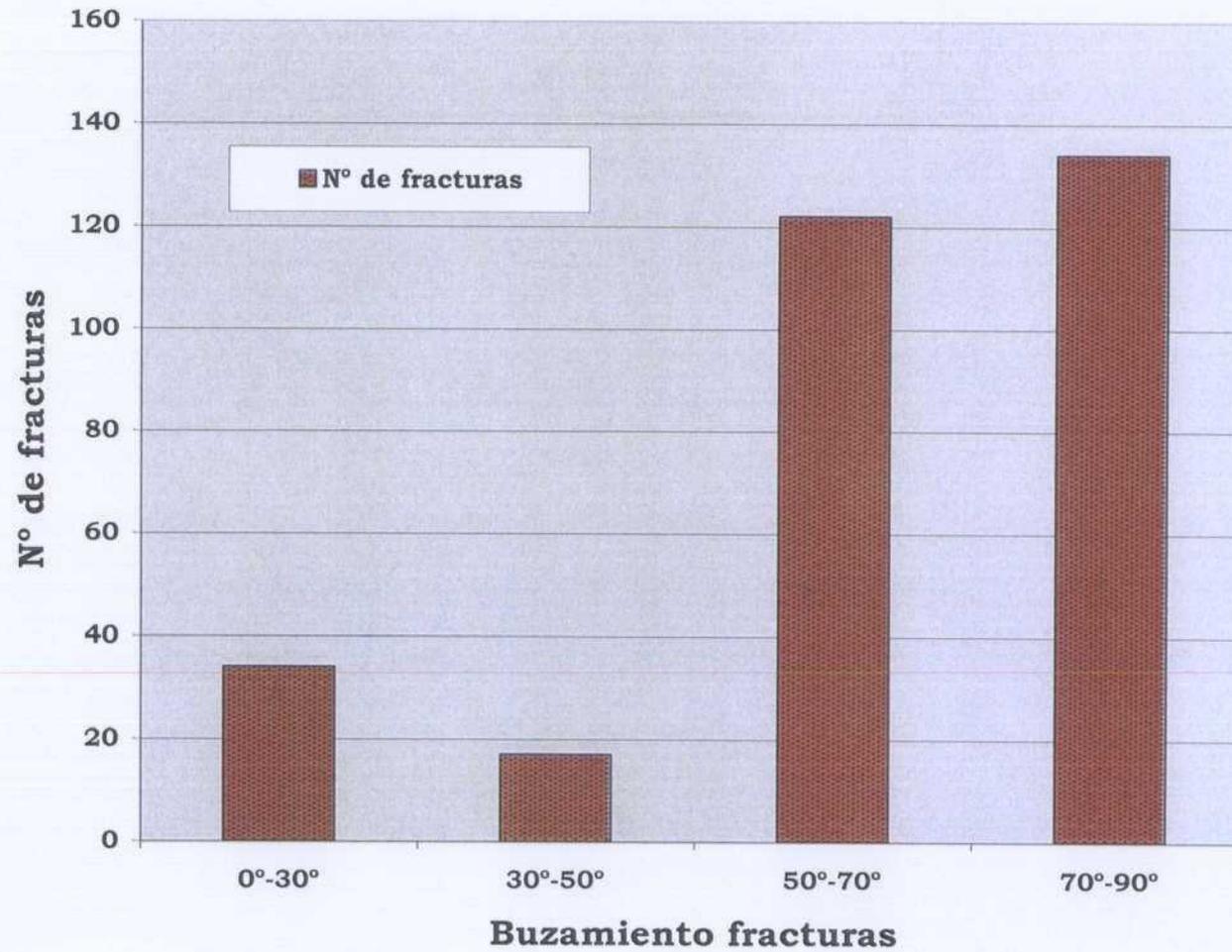


FIGURA 11

ANEXO II  
ESTUDIO PETROGRÁFICO DE LAS  
MUESTRAS DEL SONDEO

## ESTUDIO PETROGRÁFICO DE LAS MUESTRAS DEL SONDEO EN LAS CANTERAS DE CADALSO DE LOS VIDRIOS.

3-L-1 Leucogranito de grano medio con ligera alteración superficial y oxidación de la biotita.

Minerales principales: Q, FK, PG, BI

Minerales accesorios: ZR, AP, MZ

Minerales secundarios: CL, SC, OP, EP, MS, PRH, TI

Textura: hipidiomórfica heterogranular; grano medio.

### Observaciones:

El cuarzo se encuentra como cristales que tienen límites subidiomorfos o idiomorfos frente al feldespato potásico.

El feldespato potásico forma cristales alotriomorfos peritéticos que pueden tener maclas de Carlsbad o en enrejado, definidas irregularmente. En algunos cristales se observan inclusiones de plagioclasa con disposición zonal concéntrica. Puede estar algo enturbiado por alteración.

La plagioclasa forma cristales subidiomorfos o alotriomorfos que tienen maclado polisintético y bordes ácidos o mirmequíticos en los contactos con el feldespato potásico. Su composición corresponde a albita-oligoclasa ácida. También se puede encontrar como cordones de gránulos gruesos alotriomorfos de albita en los contactos entre cristales de feldespato potásico o formando parte de albitizaciones irregulares sacaroides sobre feldespato potásico o plagioclasa.

La biotita se encuentra como cristales equidimensionales pequeños, subidiomorfos o alotriomorfos y de color castaño rojizo oscuro que suelen estar sucios a causa de la oxidación superficial. Puede estar afectada por cloritizaciones y epidotizaciones irregulares. Contiene inclusiones puntiformes de circón y monacita, rodeadas por halos pleocróicos negruzcos. Puede contener inclusiones irregulares de esfena, generada en los procesos de alteración.

Se observan algunas fisuras muy finas rellenas por prehnita y microfisuras irregulares sucias y con tinciones por óxidos.

4-L-1 Leucogranito de grano medio de facies común.

Minerales principales: Q, FK, PG, BI

Minerales accesorios: ZR, AP, MZ

Minerales secundarios: MS, CL, SC, TI, FK

Textura: hipidiomórfica heterogranular; grano medio.

Observaciones:

El cuarzo forma cristales equidimensionales que suelen estar cuarteados o grupos policristalinos. Sus hábitos varían de subidiomorfos a alotriomorfos aunque puede presentar límites idiomorfos frente al feldespato potásico.

El feldespato potásico forma cristales alotriomorfos peritéticos que pueden incluir pequeños cristales idiomorfos de plagioclasa. En los contactos con la plagioclasa o con otros cristales de feldespato potásico suelen encontrarse cordones de gránulos alotriomorfos de albita.

La plagioclasa forma cristales subidiomorfos con zonados continuos u oscilatorios difusos que pueden tener sericitizaciones irregulares en los núcleos. Suelen tener bordes ácidos o mirmequíticos en los contactos con el feldespato potásico.

La biotita se encuentra como pequeños cristales equidimensionales subidiomorfos o alotriomorfos, de color marrón rojizo oscuro. Contiene inclusiones de circón y de monacita que en general son de pequeño tamaño y están rodeadas por halos pleocróicos negruzcos; también puede contener inclusiones de apatito. Puede formar grupos policristalinos de escasos individuos. Puede estar afectada por cloritizaciones parciales y en algunos casos se observan sobre ella crecimientos marginales de moscovita.

La moscovita se encuentra como pequeños cristales de cristalización postmagmática que pueden crecer en los bordes de la biotita. También puede aparecer como rellenos policristalinos en grietas en el feldespato potásico. Tiene tonalidades amarillentas.

El circón y la monacita incluidos en la biotita se encuentran alterados con frecuencia.

Se observan sistemas de fisuras finísimas que forman sistemas subparalelos y que pueden atravesar múltiples cristales.

16-L-1 Aplita de grano muy fino.

Minerales principales: Q, FK, PG, BI

Minerales accesorios: AP, MZ

Minerales secundarios: MS, CL, SC

Textura: Panalotriomórfica sacaróide de grano fino. Puede tener dominios con texturas micrográficas o simplectitoides.

Observaciones:

El cuarzo forma cristales alotriomorfos con extinción algo ondulante.

El feldespato potásico se encuentra como cristales alotriomorfos finamente pertíticos que tienen poca tendencia al maclado. Suelen encontrarse pequeños gránulos de albita en los contactos entre distintos cristales de este mineral. Tiene poca tendencia al maclado. Puede participar en intercrecimientos micrográficos con el cuarzo y con la plagioclasa.

La plagioclasa forma cristales alotriomorfos o algo subidiomorfos con maclado polisintético o de Carlsbad, que pueden tener alteración irregular o preferente en los núcleos. Puede tener zonado difuso o carecer de zonación. Puede constituir algunos crecimientos micrográficos con el cuarzo y pueden encontrarse gránulos mirmequíticos en contacto con el feldespato potásico. Es de composición albítica.

La biotita es muy escasa y aparece como pequeños cristales laminares muy finos que suelen estar parcialmente alterados; tiene color marrón oscuro. Puede tener bordes corroídos en los contactos con el feldespato potásico y sustituciones marginales por moscovita. Puede contener inclusiones de circón y monacita pero son muy escasas.

La fisuración es muy escasa.

28-L-1 Granito equigranular de grano medio, de color blanco, afectado por fracturas ¿silicificadas?

Minerales principales: Q, FK, PG, BI

Minerales accesorios: AP, MZ

Minerales secundarios: CL, SC, FK, AB, Q, CC, OP, micas amarillentas.

Textura: Hipidiomórfica de grano medio con venulación por fracturas albitizadas-silicificadas.

Observaciones:

El cuarzo forma cristales equidimensionales que pueden estar cuarteados y que pueden tener límites idiomorfos frente al feldespato potásico. Tiene extinción irregular.

El feldespato potásico aparece como cristales alotriomorfos o algo subidiomorfos, pertíticos que pueden tener maclas de Carlsbad. Contiene inclusiones de biotita, plagioclasa y cuarzo. Puede estar algo turbio debido a la alteración.

La plagioclasa forma cristales subidiomorfos con maclado polisintético o de la periclina o mecánico en algún caso. Presenta bordes ácidos en contacto con el feldespato potásico y puede formar grupos policristalinos. Puede estar algo poligonizada o tener flexiones de las maclas y está muy picoteada por cristales muy finos de minerales secundarios (sericita o epidota).

La biotita se encuentra totalmente cloritizada y a veces se observan crecimientos vermiformes de mica amarillenta sobre ella. Suele contener inclusiones irregulares de opacos, esfena, epidota y feldespato potásico generados en los procesos de alteración.

Se encuentran grietas en los cristales de feldespato potásico y plagioclasa, rellenas de pequeños cristales de micas amarillentas que pueden estar acompañados por carbonatos y cuarzo. También se encuentran grietas en los feldespatos rellenas por agregados policristalinos de albita y cuarzo.

En algunos cristales de cuarzo se observan microfisuras en las que se aprecia una trituración muy fina.

29-L-1 Granito equigranular de grano medio, afectado por fracturas.

Minerales principales: Q, FK, PG, BI

Minerales accesorios: AP, MZ, ZR, OP

Minerales secundarios: CL, SC, FK, CC,

Textura: Hipidiomórfica de grano medio con venulación por fracturas albitizadas-silicificadas.

Observaciones:

El cuarzo aparece como cristales equidimensionales cuarteados que tienen extinción ondulante y que pueden tener límites suturados entre subgránulos. Puede tener límites idiomorfos o redondeados frente al feldespato potásico.

El feldespato potásico forma cristales alotriomorfos o subidiomorfos pertíticos que pueden contener inclusiones de plagioclasa, biotita y cuarzo. Pueden tener maclas de Carlsbad y se encuentran cordones de pequeños gránulos de albita en los contactos entre distintos cristales de este mineral.

La plagioclasa forma cristales subidiomorfos o alotriomorfos, bien maclados y con zonado concéntrico oscilatorio, neto o difuso y presentan bordes albiticos en los contactos con el feldespato potásico. Tiene alteración preferente en las zonas internas, apreciándose picoteado por crecimiento de finos cristales de minerales secundarios, entre los que se encuentran carbonatos. Puede estar afectada por cuarteamientos o flexiones de maclas.

La biotita forma pequeños cristales subidiomorfos o alotriomorfos, de color marrón rojizo que pueden estar bastante cloritizados y que pueden tener inclusiones irregulares de feldespato potásico, opacos y esfena. Tiene pequeñas y escasas inclusiones idiomorfas o subidiomorfas de circón y monacita alterados; también contiene inclusiones de apatito y opacos. Puede estar afectada por flexiones.

No se aprecian fisuras transcristalinas.

39-L-1 Granito equigranular de grano medio.

Minerales principales: Q, FK, PG, BI

Minerales accesorios: AP, MZ, ZR

Minerales secundarios: CL, SC, FK, CC, PRH, FL

Textura: Hipidiomórfica algo heterogranular, de grano medio.

Observaciones:

El cuarzo forma cristales equidimensionales alotriomorfos o algo idiomorfos en los contactos con el feldespato potásico. Los cristales pueden estar cuarteados y presentan extinción irregular. Pueden tener algunos límites suturados entre los subgránulos.

El feldespato potásico forma cristales alotriomorfos peritéticos que pueden tener maclas de Carlsbad. Puede contener inclusiones de plagioclasa, biotita y cuarzo e inclusiones de cuarzo de tipo net. Suelen encontrarse cordones de gránulos de albita en los contactos entre distintos cristales de este mineral o en pequeñas fisuras de los mismos.

La plagioclasa aparece como cristales subidiomorfos con zonados continuos u oscilatorios difusos que tienen bordes ácidos, a veces mirmequíticos en los contactos con el feldespato potásico. Puede tener núcleos anubarrados o sericitizados. Tiene maclado polisintético o según la ley de la periclina. Puede formar pequeños agregados policristalinos.

La biotita se encuentra como cristales subidiomorfos o alotriomorfos de color marrón rojizo oscuro y con inclusiones muy pequeñas de monacita o de circón parcialmente alterados y rodeadas por halos pleocróicos negruzcos; también puede incluir prismas finos de apatito. Está variablemente afectada por la cloritización y puede presentar bordes corroídos o simplectitoides en los contactos con el feldespato potásico. Puede tener flexiones o kinkamientos débiles.

Se encuentran algunas microfisuras que afectan al cuarzo y a los feldespatos que pueden estar rellenas por prehnita.

40-L-1 Granito equigranular de grano medio, color rosa, parcialmente episienitizado.

Minerales principales: Q, FK, PG, BI (cloritizada)

Minerales accesorios: AP, MZ, ZR

Minerales secundarios: CL, SC, AB, CC, MS, EPI

Textura: Hipidiomórfica algo heterogranular, de grano medio.

Observaciones:

El cuarzo forma cristales equidimensionales, subidiomorfos o alotriomorfos, cuarteados y con extinción ondulante irregular. Tiene límites idiomorfos o subredondeados frente al feldespato potásico. También se encuentran algunos cristales irregulares de cuarzo como inclusiones interfoliare en las biotitas cloritizadas.

El feldespato potásico aparece como cristales alotriomorfos o algo subidiomorfos que pueden contener inclusiones de plagioclasa, biotita y cuarzo. Son peritéticos y pueden tener maclas de Carlsbad y alguna macla mecánica. Se encuentran cordones de gránulos de albita en los contactos entre distintos cristales de feldespato y puede estar afectado por albitizaciones irregulares policristalinas y por enturbiamientos.

La plagioclasa forma cristales idiomorfos o subidiomorfos con maclas polisintéticas, de albita-Carlsbad y de la periclina. Ha perdido la zonación composicional pero tiene alteración preferencial en los núcleos, con crecimientos de micas vermiculares amarillentas y de carbonatos aciculares sobre ellas. También pueden encontrarse gránulos de epidota sobre las plagioclasas alteradas y algunos núcleos están completamente carbonatados. Se detectan restos de zonados, puestos en evidencia por alteración diferencial.

La biotita está casi totalmente cloritizada y contiene inclusiones de circón y de monacita muy alteradas, conservándose los restos de halos pleocróicos negruzcos. Tienen un aspecto sucio debido a las abundantes inclusiones de minerales secundarios que proceden de su degradación (opacos, epidota, esfena). Pueden encontrarse inclusiones interfoliare de feldespato potásico y de carbonato.

Se observan fisuras en el feldespato potásico que pueden estar albitizadas.

40-L-2 Granito equigranular de grano medio, color blanco, facies común.

Minerales principales: Q, FK, PG, BI

Minerales accesorios: AP, MZ, ZR, OP

Minerales secundarios: FL, CL, SC, CC, EP, TI, FK

Textura: Hipidiomórfica algo heterogranular, de grano medio.

Observaciones:

El cuarzo forma cristales alotriomorfos o subidiomorfos, cuarteados y con extinción irregular u ondulante. Los límites entre los subgránulos pueden ser dentados. También puede encontrarse como inclusiones goticulares o de tipo net en el feldespato potásico.

El feldespato potásico tiene hábitos alotriomorfos o subidiomorfos, es pertítico y puede tener maclas de Carlsbad. Puede formar cristales poiquilíticos con inclusiones de pequeñas plagioclasas idiomorfas. Puede tener albitizaciones marginales o a favor de fisuras. Suelen encontrarse cordones de pequeños gránulos de albita en los contactos entre distintos cristales de feldespato.

La plagioclasa se encuentra como cristales subidiomorfos con los núcleos sucios y alterados con crecimientos de sericita, calcita, epidota y fluorita. Tiene maclado polisintético y puede tener zonados continuos u oscilatorios difusos, así como bordes ácidos o mirmequíticos en los contactos con el feldespato potásico. Puede formar algunos pequeños agregados microgranudos junto con la biotita.

La biotita aparece como cristales subidiomorfos o alotriomorfos de color marrón rojizo oscuro que contienen algunas inclusiones de circón y monacita con halos negruzcos y prismas finos de apatito. Puede estar parcialmente cloritizada. Puede tener algunos bordes irregulares-corroídos en los contactos con el feldespato potásico. Puede contener inclusiones interfoliares irregulares de cuarzo, feldespato potásico y esfena, relacionadas con los procesos de cloritización.

Tiene escasas fisuras muy finas en los cristales de feldespato potásico y de plagioclasa que pueden estar albitizadas.

41-L-1 Granito equigranular de grano medio episienitizado, de color rosa.

Minerales principales: Q, FK, PG, BI (cloritizada)

Minerales accesorios: AP, MZ, ZR, (alterados)

Minerales secundarios: CL, SC, CC, EP- CZT, TI, RU, CC, MS

Textura: Hipidiomórfica algo heterogranular, de grano medio con fisuras y granulación frágil..

Observaciones:

El cuarzo forma cristales equidimensionales, cuarteados, con límites serrados y extinción irregular.

El feldespato potásico forma cristales alotriomorfos-intersticiales o algo subidiomorfos. Pueden tener maclas de Carlsbad y son algo pertíticos y están enturbiados. Algunos cristales pueden estar bastante albitizados y también pueden encontrarse algunas coronas de feldespato en torno a cristales de plagioclasa.

La plagioclasa tiene hábitos subidiomorfos o alotriomorfos, muy picoteados por cristalitos de minerales neoformados en los procesos de alteración. Los cristales han perdido el zonado y tienen maclas polisintéticas y de la periclina. Pueden tener crecimientos irregulares de carbonatos y micas vermiformes amarillentas sobre ellos y algunos núcleos pueden estar muy transformados. Solo ocasionalmente se conservan vestigios de los bordes albiticos. Hay agregados policristalinos de albita de grano fino, generados en los procesos de transformación secundaria. Algunas plagioclasas pueden estar parcialmente sustituidas por cuarzo.

La biotita forma cristales alotriomorfos o subidiomorfos, totalmente cloritizados, con restos de inclusiones de circón y monacita alteradas y rodeadas por halos pleocróicos negruzcos. Tiene inclusiones de opacos, esfena, cuarzo y feldespato potásico generadas en los procesos de cloritización.

Se encuentran grietas y trituraciones en los cristales de cuarzo feldespato potásico y plagioclasa que pueden tener rellenos de micas de grano fino, cuarzo y albita. También hay fisuras rellenas por microbrechas de minerales triturados y por productos secundarios hidrotermales.

42-L-1 Brecha granítica episienitizada de color rosa.

Minerales principales: Q, FK

Minerales accesorios: PG (albita), OP.

Minerales secundarios: CL, SC, CC, OP, EP

Textura: Brechoide-porfidoclástica heterogénea con trama direccional grosera y matriz de grano fino.

Observaciones:

El cuarzo se encuentra como fragmentos angulosos de tamaños heterogéneos que constituyen porfidoclastos y también forman parte de la matriz. Tiene cuarteamiento y poligonización irregular y extinción ondulante. Puede tener maclas mecánicas y grietas con poligonización sacaroide muy fina.

El feldespato potásico presenta poligonización y rotura heterogénea, pudiendo constituir mosaicos irregulares de subgránulos con extinción ondulante y agregados policristalinos de individuos cuneiformes o poligonales. Ha perdido en buena parte la peritización y los fragmentos presentan enturbiamiento irregular. Puede tener fisuras alteradas y carbonatadas.

La plagioclasa está en parte triturada y forma parte de la matriz de grano fino. También se encuentra como porfidoclastos angulosos totalmente sustituidos por masas de sílice microcristalina o escasos fragmentos sin maclas y de composición albitica.

Los cristales originales de biotita han desaparecido y están totalmente triturados y transformados a micas finas de color amarillento o blanquecino que forman parte de la matriz. En buena parte ha desaparecido debido a los procesos de alteración.

La matriz es de grano fino-microbrechoide y está afectada por alteraciones y carbonataciones asociadas al proceso de episienitización.

Hay bandas cataclásticas direccionales anastomosadas.

La roca presenta una importantísima rotura-brechificación anastomosada-reticular con posterior cementación hidrotermal.

42-L-2 Granito de grano medio episienitizado.

Minerales principales: Q, FK, PG, BI (cloritizada)

Minerales accesorios: ZR, MZ, AP (alterados)

Minerales secundarios: CL, SC, CC, FK, OP, EP, TI, PRH, CZT, MS

Textura: Hipidiomórfica de grano medio con alguna fisura hidrotermalizada.

#### Observaciones:

El cuarzo forma cristales alotriomorfos-subidiomorfos, equidimensionales y de tamaños variados. Están afectados por cuarteamientos y tienen límites serrados entre los subgránulos. Tienen extinción irregular-ondulante. Con frecuencia tiene límites subidiomorfos o redondeados frente al feldespató potásico. También se encuentra en escasas proporciones como inclusiones irregulares o de tipo net en el feldespató potásico.

El feldespató potásico presenta en general hábitos alotriomorfos o intersticiales. Es pertítico, pero las pertitas están algo difuminadas. Tiene maclas de Carlsbad y algunos parches irregulares con maclas en enrejado. Se encuentran cordones de gránulos de albita en los contactos entre distintos cristales y también puede estar afectado por albitizaciones irregulares.

La plagioclasa forma cristales subidiomorfos-alotriomorfos, picoteados por gránulos finos de minerales de alteración (sericita, clinzoisita, calcita y prehnita). Ha perdido el zonado y está descalcificada. Presenta maclas polisintéticas, de albita-Carlsbad, de la periclina y en algunos casos mecánicas. Puede tener parches de sustitución de feldespató potásico y tiene crecimientos irregulares de sericita y mica amarillenta sobre ella. En algunos cristales se observan bordes albiticos menos alterados y más limpios. También puede encontrarse como pequeños cristales idiomorfos incluidos en el feldespató potásico.

La biotita se encuentra como cristales subidiomorfos o alotriomorfos completamente cloritizados y con inclusiones secundarias de opacos, titanita y epidota. También puede tener inclusiones irregulares interfoliares de feldespató potásico, albita, cuarzo y micas amarillentas. Contiene inclusiones de circón y monacita alteradas y rodeadas por halos negruzcos. También hay inclusiones de apatito.

Hay fisuras con microgranulación de cuarzo, feldespató potásico, albita, micas amarillentas o prehnita. También se encuentran fisuras con rellenos microbrechoides o de productos hidrotermales de grano muy fino.

81-L-1 Granito equigranular de grano medio, color blanco, facies común.

Minerales principales: Q, FK, PG, BI

Minerales accesorios: AP, MZ, ZR, OP, MS?

Minerales secundarios: FL, CL, SC, CC, EP, TI, FK, PRH, Q

Textura: Hipidiomórfica algo heterogranular, de grano medio.

Observaciones:

El cuarzo forma cristales equidimensionales cuarteados que tienen límites idiomorfos o redondeados con el feldespato potásico. También se encuentra cuarzo reticular incluido en el feldespato potásico.

El feldespato potásico tiene hábitos alotriomorfos, poiquilíticos, intersticiales o algo subidiomorfos en algunos casos. Es pertítico y presenta maclas de Carlsbad. Tiene cordones de gránulos de albita en los contactos entre distintos cristales de este mineral. Las inclusiones más frecuentes corresponden a pequeños cristales de plagioclasa.

La plagioclasa forma cristales subidiomorfos o alotriomorfos con zonados continuos concéntricos u oscilatorios difusos; tiene maclas polisintéticas y de la periclina. Tiene núcleos grandes anubarrados o picoteados por inclusiones de minerales secundarios. Puede formar algunos glómérulos en sinneusis y tiene bordes albíticos o mirmequíticos en los contactos con el feldespato potásico. Pueden crecer sobre ella algunos parches de feldespato potásico.

La biotita aparece como cristales alotriomorfos o subidiomorfos de color marrón rojizo. Contiene inclusiones de monacita que pueden ser relativamente gruesas y en algún caso se encuentran finas inclusiones de apatito con disposición zonal. Puede formar pequeños grupos policristalinos. Puede presentar bordes corroídos-dentados en contacto con el feldespato potásico y la plagioclasa. Puede estar parcialmente cloritizada y contener inclusiones interfoliares secundarias de prehnita, de feldespato potásico y ocasionalmente de fluorita.

Se encuentra algún pequeño cristal intersticial de moscovita verdosa.

Pueden encontrarse algunas microfisuras rellenas por micas de grano muy fino en los feldespatos potásicos o fisuras con albitizaciones pero son muy escasas.

**ANEXO III**  
**ESTUDIO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE**  
**LAS MUESTRAS DEL SONDEO**

## **ESTUDIO DE MUESTRAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA LA DETECCIÓN DE PRODUCTOS DE ALTERACIÓN Y DE RELLENO DE FRACTURAS.**

**3-RX:** Caja N°3. Fracturas con ¿argilización?- oxidación. La muestra corresponde a granito alterado junto a un plano de diaclasa-levante con un ángulo de 80°-90° con el eje del sondeo. Profundidad 8.52m.

Se detecta la presencia de cuarzo como mineral principal, así como la de albita, microclina, moscovita (sericita) y biotita.

No se detectan productos de alteración, aunque pudiera haber trazas de epidota.

**28-RX:** Caja N°28. La muestra corresponde a un relleno verdoso en una fisura que pertenece a un sistema con ángulos comprendidos entre 10° y 25° con el eje del sondeo. En apariencia ha habido circulación hidrotermal a favor del sistema de fractura que se localiza a una profundidad de 64.23m y que intercepta a fisuras con ángulos de 50° a 60° con el eje del sondeo. No se aprecia episenitización.

El mineral principal que se detecta es calcita. También se detecta la presencia de cuarzo, pirita, albita, microclina, moscovita y esmectita (posiblemente clorita). No se detecta epidota.

**29-RX:** Caja N°29. Relleno de ¿cuarzo y epidota? en fisura de aspecto taquilitoide. El granito de caja es de color blanco. Es una zona de fractura con fisuras que se localiza a 66.29m de profundidad y que forma ángulos de 15° con el eje del sondeo. (En 1ª zona de fractura).

El mineral principal de los rellenos es cuarzo, encontrándose también calcita y moscovita en proporciones accesorias y trazas de microclina.

**39-RX:** Caja N°39. Costras blanquecino verdosas que rellenan fisuras con ángulos a 65° con el eje del sondeo y a una profundidad de 87.93m en granitos blanco-grisáceos de facies común.

El relleno principal es de cuarzo y calcita, encontrándose en proporciones subordinadas albita, esmectita (clorita) y microclina.

**40-RX:** Caja N°40. Relleno en fracturas con ángulos de 15° a 30° con el eje del sondeo, a una profundidad de 92m en granitos episienitizados. (En 2ª zona de fractura).

Los componentes principales son el cuarzo y la calcita, encontrándose menores proporciones de microclina, albita y caolín.

**41-RX:** Caja N°41. Brecha frágil en granitos episienitizados. El tramo brechificado se encuentra a 92.5 m de profundidad. Hay argilificaciones y alteración de bajo grado.

La masa principal del puré de falla consta de cuarzo y microclina con menores proporciones de albita, calcita, esmectita (clorita o productos de degradación de la biotita) y caolín.

**42-RX:** Caja N°42. Brecha en granitos episienitizados a 94.30m de profundidad.

Los componentes principales de la masa de la brecha son cuarzo y microclina con proporciones menores de calcita, albita, moscovita (sericita) y caolín.

**47-RX:** Caja N°47. La muestra corresponde a una costra de color blanquecino que rellena una fisura en granito de color blanco grisáceo con ángulo de 60° con el eje del sondeo, a 105.20m de profundidad.

El relleno está constituido por calcita y cuarzo como componentes principales, con albita y microclina, proporciones accesorias de esmectita (clorita y productos de alteración de biotita) y trazas de moscovita (sericita).

**89-RX:** Caja N°89. Costra en fractura a 199.94m de profundidad y con ángulo a 70° con el eje del sondeo. La costra es blanquecina y hay unos pequeños márgenes de episienitización en la fractura.

La muestra está compuesta principalmente por calcita y cuarzo, con albita, microclina y trazas de esmectita (clorita y productos micáceos secundarios) y caolín. Se detectan posibles trazas de ¿crisoberilo?, aunque este extremo es problemático.

ANEXO IV  
FOTOGRAFÍAS DE FRACTURACIÓN,  
PETROGRAFÍA Y TESTIGOS

FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 1 Plano rugoso de fractura con estrías; detalle (Plano E-W, 85°-87°S).



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 2 Otro aspecto del plano de fractura, con estrías E-W, 67°W.



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 3 Detalle de costras con carbonato en plano de fractura



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 4 Estrías en plano irregular de fractura



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 5 Plano de fractura. Detalle de irregularidades y restos de espejos de fractura



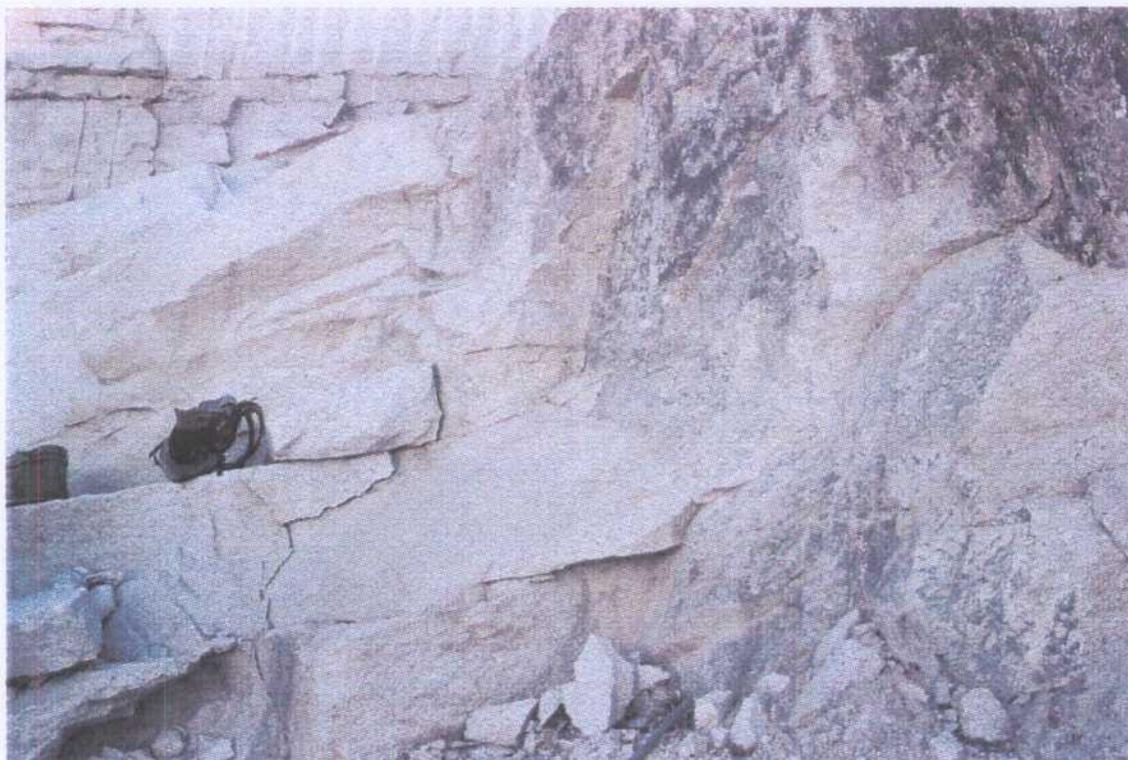
FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 6 - Plano de fractura con depósitos de clorita, epidota, óxidos y carbonatos



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 7 Detalles de planos de fractura alabeados con espejos de color oscuro.



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS. FOTO 8 Detalle de planos subhorizontales de fisuración (levantes) afectados por alteración superficial.



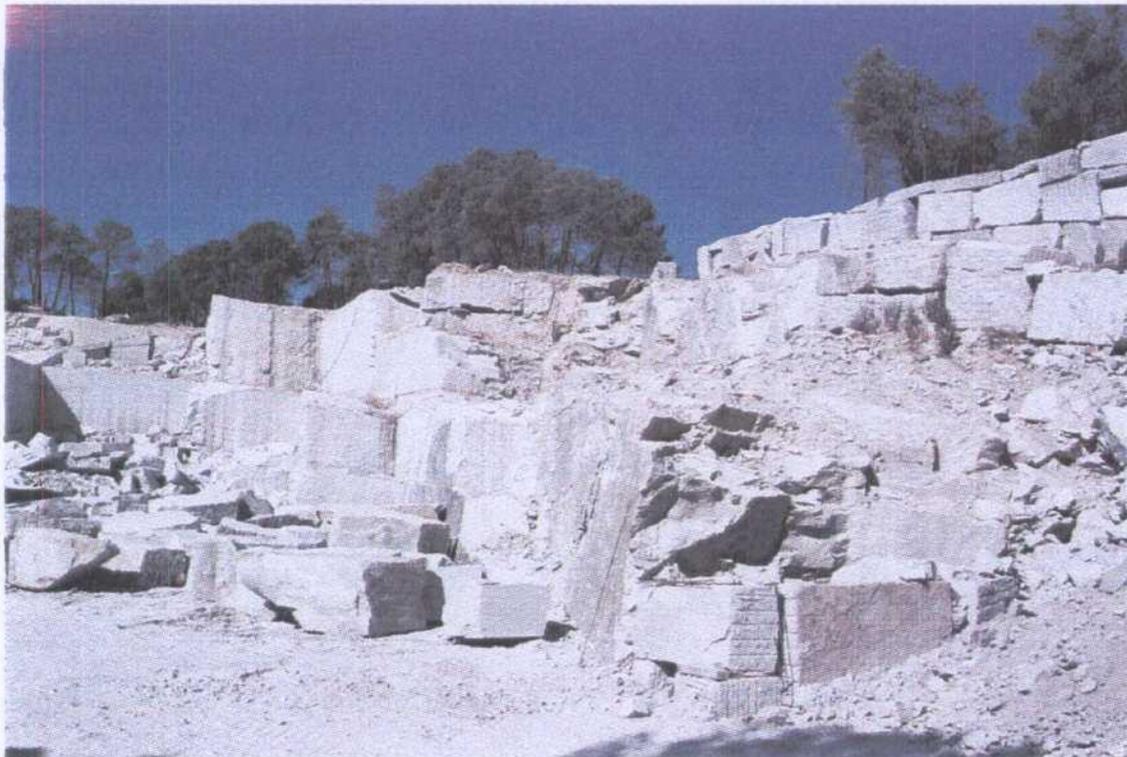
FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 9 Detalle de fisura de descompresión con bajo buzamiento. (Señalada por la base  
del bolígrafo).



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 10 Plano de fractura E-W, 75°S con espejo oscuro, en frente de cantera.



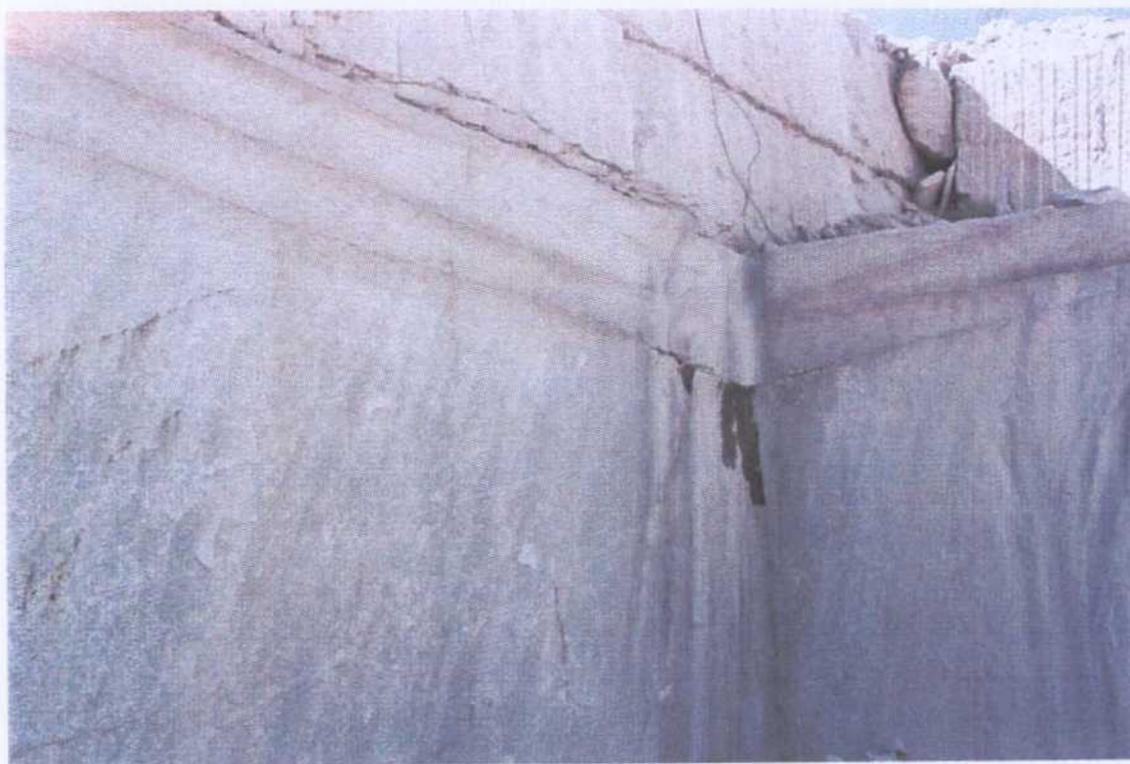
FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 11 Placas de carbonato sobre espejo de fractura de color oscuro. (Plano E-W,  
80°S).



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 12 Filtración de agua a favor de planos de fractura subhorizontales (levantes).



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 13 alteraciones asociadas a planos de fisuras y levantes. (Alteraciones de color rosáceo).



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 14 Venas cruzadas de aplitas en el suelo de la cantera.



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 15 Venas cruzadas de apilitas en el suelo de la cantera (N-70°-E y N-150°-E,  
subverticales).

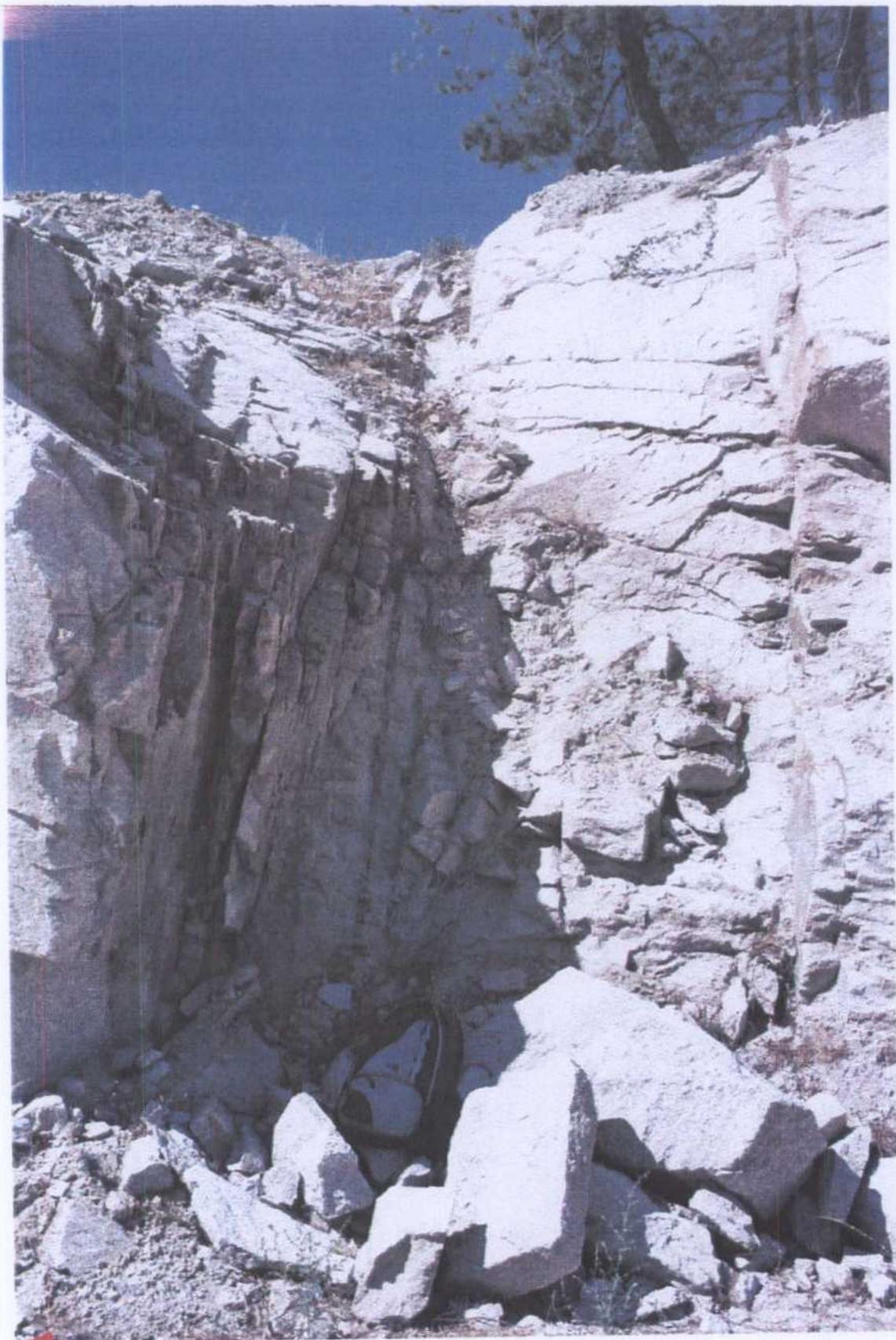


FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 16 Venas de aplita con pérdida de continuidad aparente. En granito de facies común, 'Blanco Cristal'.

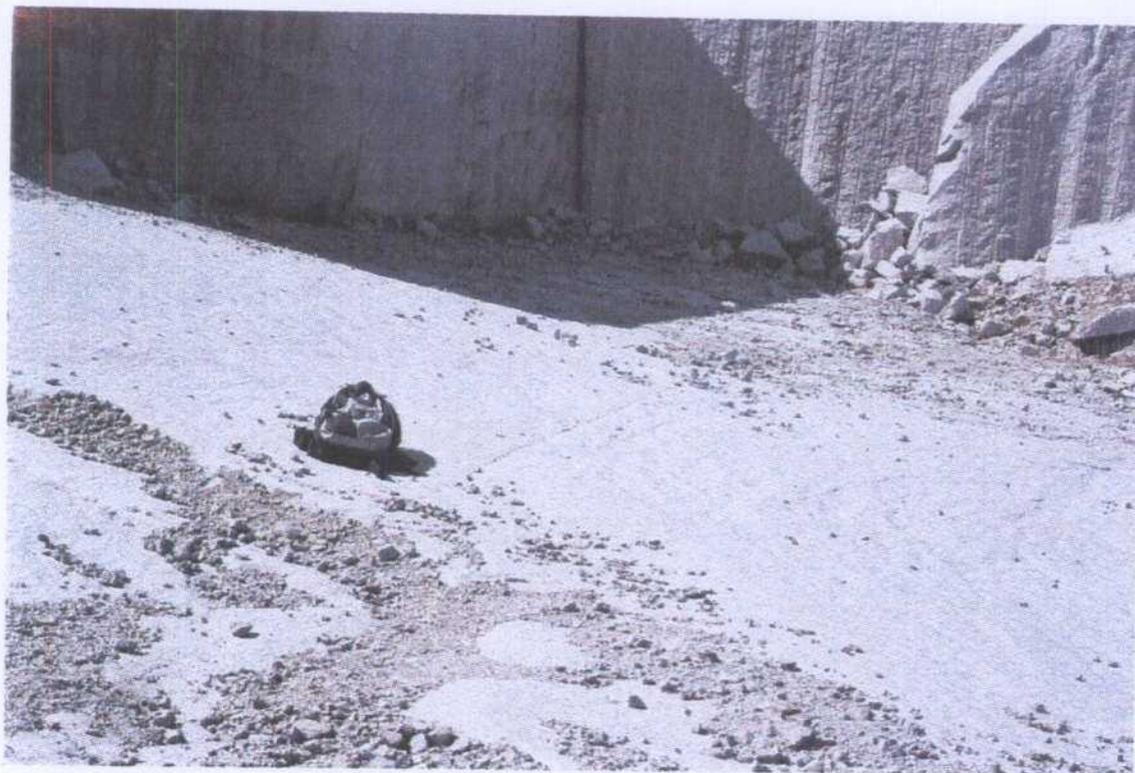


FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS  
FOTO 17 Zona de fractura con rellenos parciales de cuarzo. (E-W, 80°S).



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 18 Fisura con pérdida de continuidad en el suelo de la cantera.



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 19 Costras de epidota y carbonatos en planos de fractura con espejo (N-92°-E,  
80°S).



FOTOGRAFÍAS EN ESTACIONES DE ESTUDIO DE FRACTURAS EN LA  
CANTERA DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

FOTO 20 Plano de fractura E-W, 80°S con costra silícea y grumos de sulfuros oxidados.



MICROFOTOGRAFÍAS DE LAS LÁMINAS DELGADAS DE LAS MUESTRAS  
DEL SONDEO

FOTO 1- (42-L-1). Brecha episienitizada. Plagioclasa incluida en feldespato potásico,  
sustituida por agregados de grano fino con sílice y carbonatos (NCx25).



FOTO 2 (42-L-1). Brecha episienitizada. Matriz microbrechoide

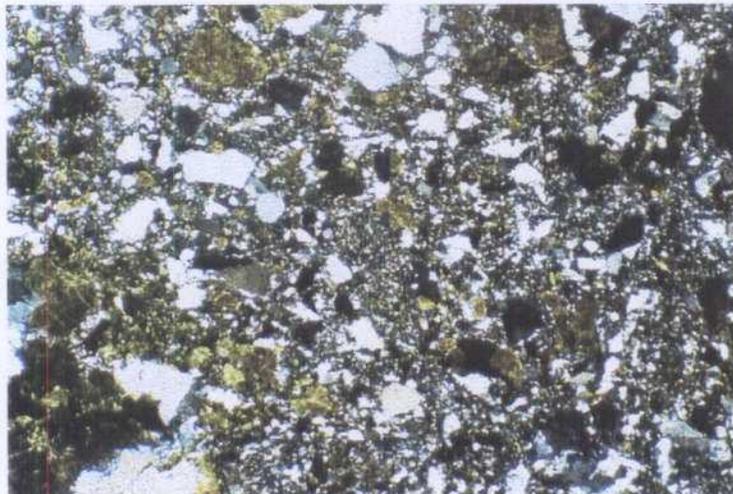


FOTO 3 (42-L-1). Brecha episenitizada. Feldespato potásico turbio, fracturado y exfoliado. Las grietas están rellenas de albita y sílice microcristalina (NCx6.25).

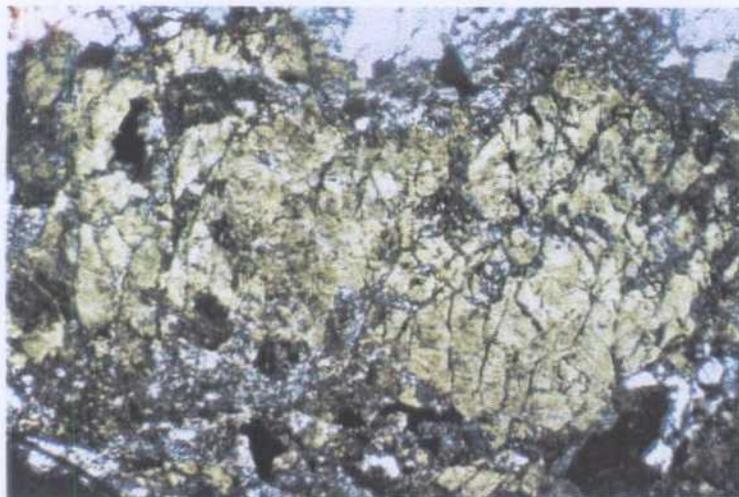


FOTO 4 (42-L-1). Brecha episenitizada. Cuarzo roto con extinción ondulante irregular. (NCx6.25).



FOTO 5 29-L-1). Granito 'Blanco Cristal'; Facies común del sondeo. Relaciones texturales entre cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa (NPx6.25).

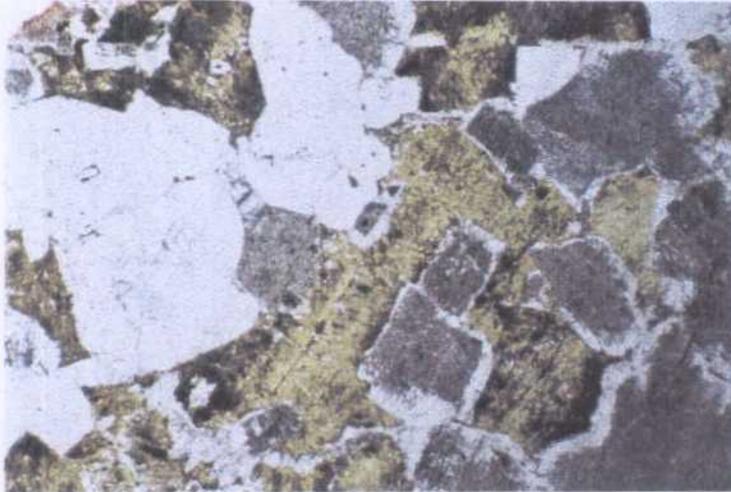


FOTO 6 Granito 'Blanco Cristal'; Facies común del sondeo. Relaciones texturales entre cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa (NCx6.25)



FOTO 7 Granito 'Blanco Cristal'; Facies común del sondeo. Biotita con inclusiones y micas blanco-amarillentas que le sustituyen marginalmente (NPx6.25).



FOTO 8 potásico y la plagioclasa (NPx6.25). MICRO8.JPG Granito 'Blanco Cristal). Biotita con inclusiones de monacita y plagioclasa y borde de clorita simplectitoide-reaccional en contacto con el feldespa



FOTO 9 Granito 'Blanco Cristal'. Feldespato potásico con inclusiones de plagioclasa y perfitas (NCx6.25).

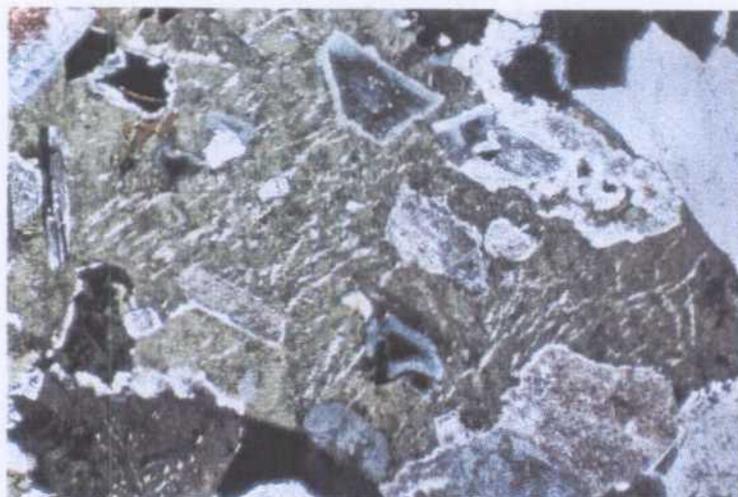


FOTO 10 Granito rosado con grietas, biotita cloritizada y feldespato potásico enturbiado (NCx6.25).



FOTO 11 Granito rosado. Sericitización y carbonatación de la plagioclasa con infiltración de feldespato potásico en grietas de la plagioclasa (NPx6.25).



FOTO 12 Granito rosado. Silicificación y carbonatación de la plagioclasa. Grietas con microbrechificación (NCx6.25).

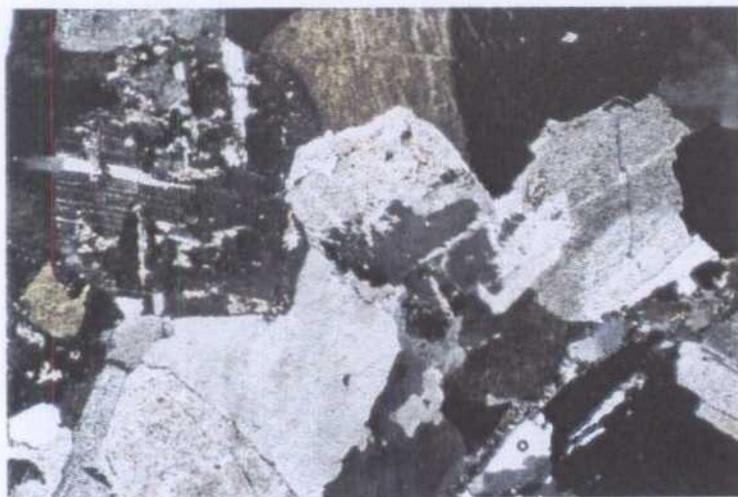


FOTO 13 Aplita. Biotita en láminas finas con secciones aciculares (NPx6.25).

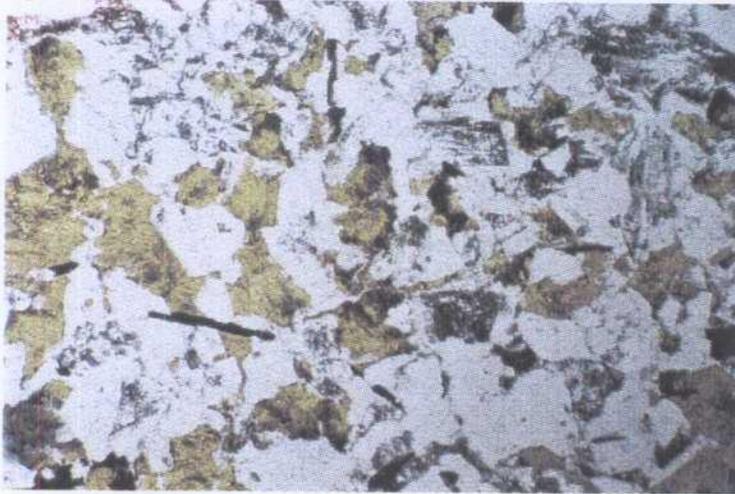


FOTO 14 Aplita. Biotita en láminas finas y texturas gráficas-simplectitoides (NCx6.25).

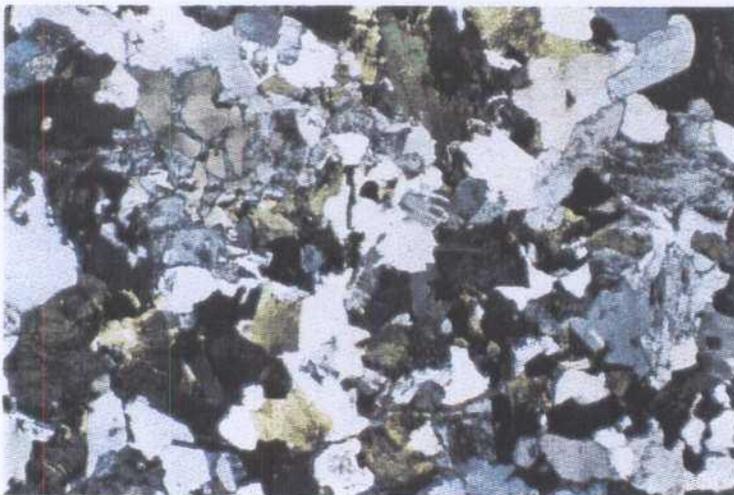


FOTO 15 Granito afectado por fractura y episienitización parcial. Albitizaciones, carbonataciones y silicificaciones a favor de fisuras (NCx6.25).

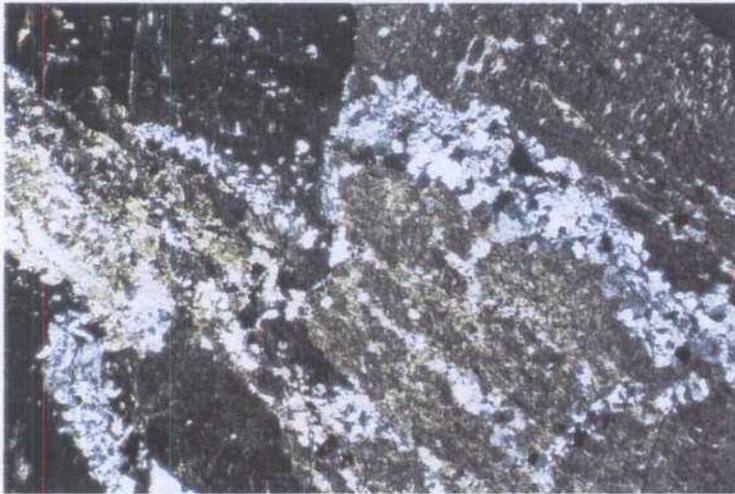
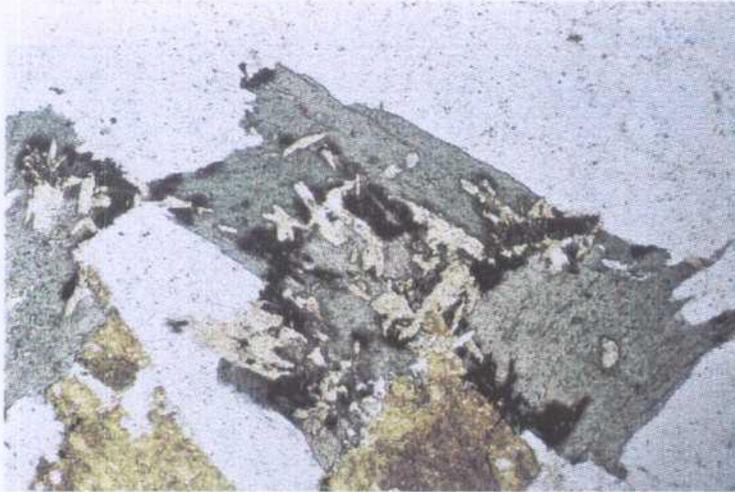


FOTO 16 Granito episienitizado. Cloritizaciones y alteraciones de la biotita (NPx6.25).



FOTO 17 Granito episienitizado. Biotita cloritizada con inclusiones alteradas (NPx12.5).



FOTOGRAFÍAS DE LOS TESTIGOS DEL SONDEO DE CADALSO DE LOS VIDRIOS

Caja 3 Aspecto general de granito con ligera alteración superficial.



Caja 4 Aspecto general. Granito de facies común 'Blanco Cristal'.



Caja 16 Aspecto de venas de aplita en granito de facies común.



Caja 23



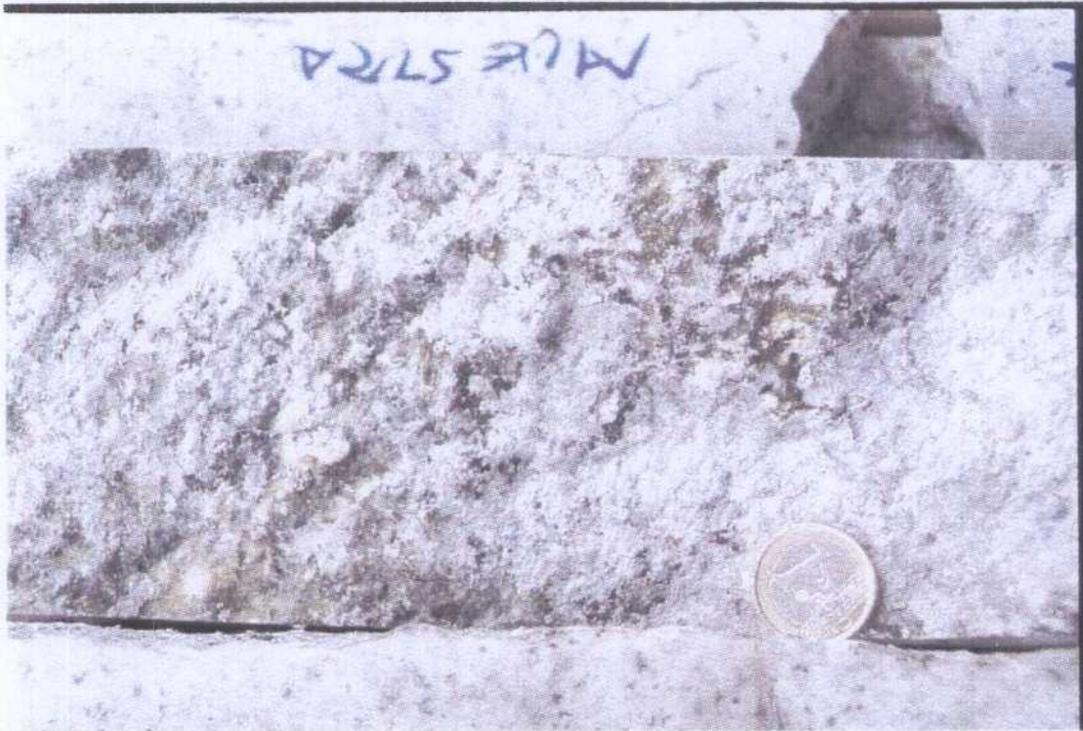
CAJA -26 Aspecto general. Granito de facies común 'Blanco Cristal'.



CAJA-28. Aspecto general. Fractura con tapiz epidotizado que parte por la mitad a algunos segmentos de los testigos.



CAJA-28 Aspecto general. Fractura epidotizada.



Caja 28c . Aspecto general. Fisuras subverticales.



Caja 28d. Pátina con epidota-clorita en fractura subvertical.



Caja 28e Pátina con clorita-epidota en fractura subvertical.



CAJA 29 Detalle de relleno de fisura; (sílice y epidota).



CAJA 29 . Aspecto general. Sistema de fisuras paralelas.



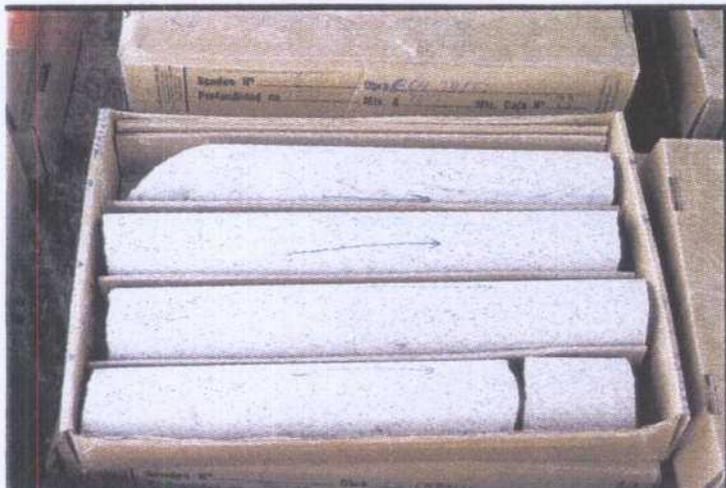
Caja 29c Aspecto general de sistema de fisuración subparalela.



Caja 32 Aspecto general. Cruce de fracturas; partición irregular con rellenos de clorita y epidota.



Caja 34 Aspecto general. Granito de facies común 'Blanco Cristal'.



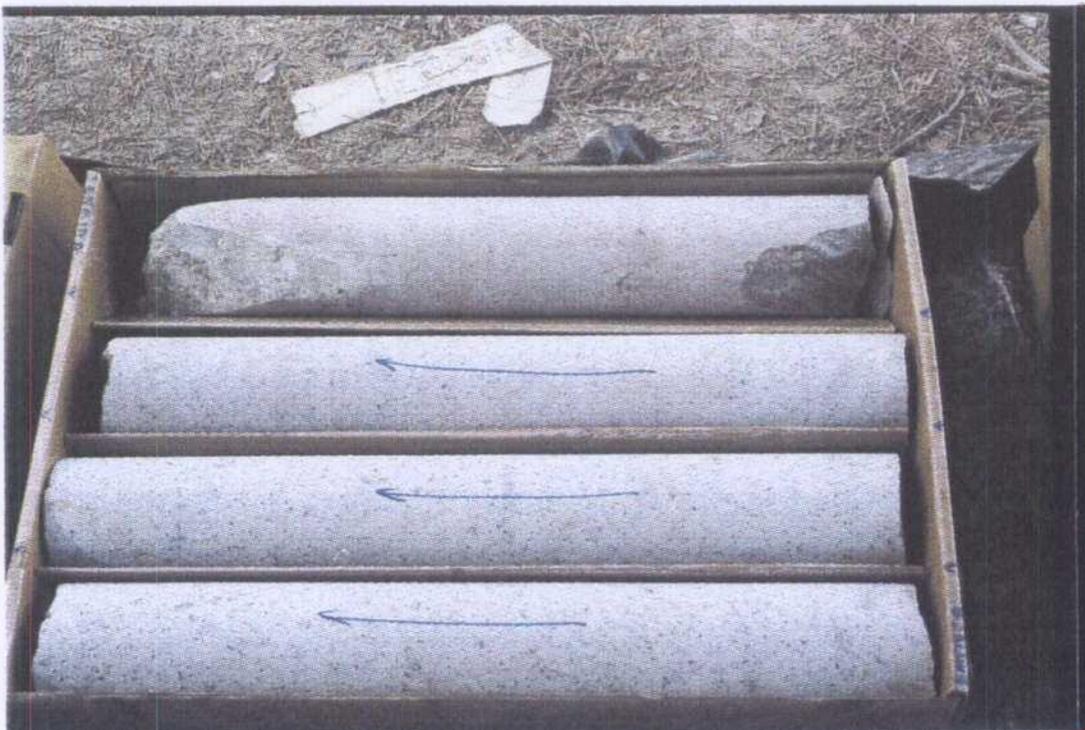
Caja 39 Aspecto de costras blanquecinas en relleno de fracturas.



Caja 39b Aspecto general. Granito de facies común 'Blanco Cristal'.



Caja 40 Aspecto general. Granito con tinte rosáceo.



Caja 40b Aspecto general de tramo de granitos episienitizados.



Caja 41 Zona de rotura; brecha de falla con epidotización y argilificación.



Caja 41 Zona de brechificación y episienitización.



Caja 41c . Aspecto de zona brechificada y episienitizada.



Caja 41d . Detalle de brechificación y fracturación frágil con episienitización.



Caja 41e . Detalle de episienitización y fracturación frágil con brechificación.



Caja 42 Zona de brechificación y episienitización del granito.



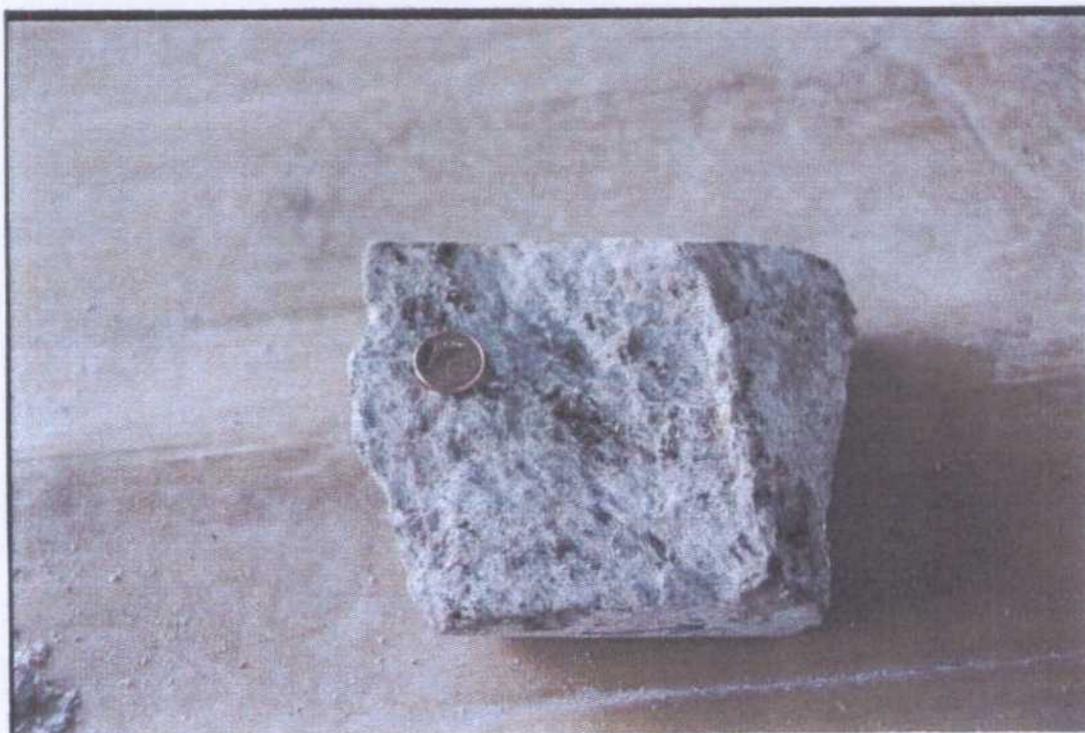
Caja 42b Aspecto de episienita brechoide. Fracturación frágil.



Caja 42c . Aspecto de episenita brechoide.



Caja 42d Aspecto de espejos de fractura episenitizada.





Caja 43 Aspecto general. Granito de facies común 'Blanco Cristal'.



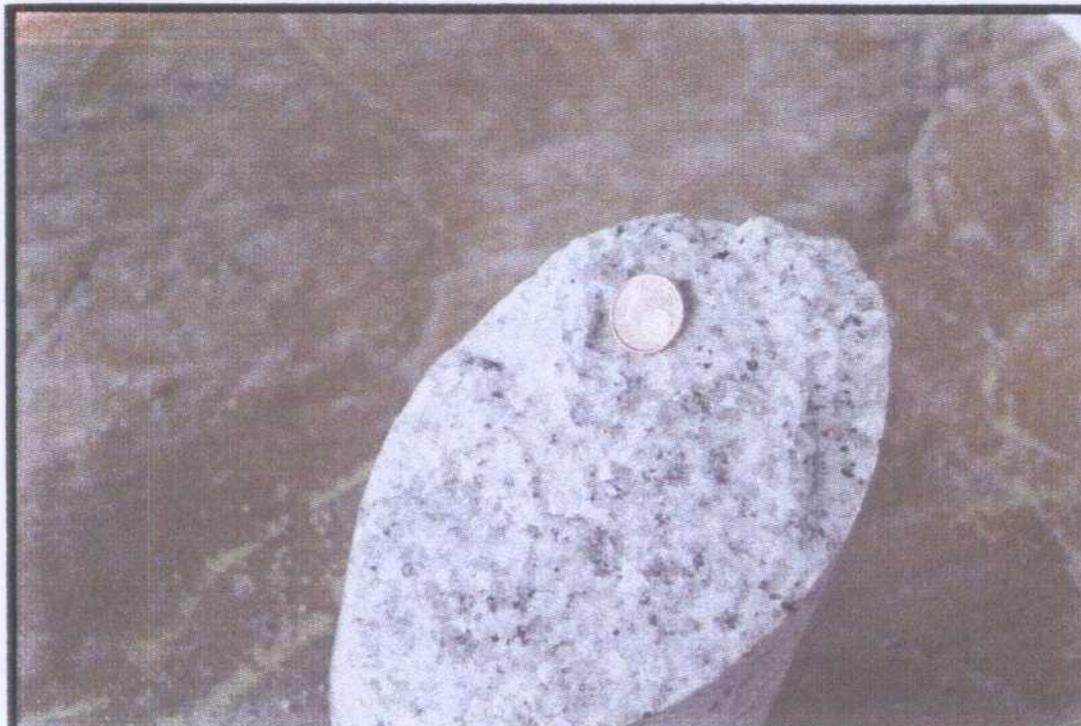
Caja 45 Sistema de fracturación paralelo a  $50^\circ$  con el eje del sondeo.



Caja 46 Sistema de fracturación paralelo a  $50^\circ$  con el eje del sondeo.



Caja 47 Costra blanquecina en fractura de testigo de sondeo.



Caja 47b Aspecto de costras de relleno de fracturas.



Caja 50 Aspecto general. Granito de facies común 'Blanco Cristal'.



Caja 51 Sistema de partición paralela a  $60^{\circ}$ - $65^{\circ}$  con el eje del sondeo.



Caja 52 Sistema de partición paralela a 60°-65° con el eje del sondeo.



Caja 56 Aspecto general. Partición irregular.



Caja 58 Aspecto general. Granito de facies común 'Blanco Cristal'.



Caja 59 Fisuras en ángulo  $<30^\circ$  con el eje del sondeo.



Caja 61 Sistema de fisuras a 60° con el eje del sondeo en granitos de facies común.



Caja 63 Sistema de fisuración subparalelo.



Caja 65 Aspecto general. Granito de facies común 'Blanco cristal.



Caja 72 Granito de facies común, algo más rico en mica y con tinte rosáceo muy tenue. Fisura a ángulo  $<30^\circ$  con el eje del sondeo.



Caja 73 Granito de facies común con tinte rosáceo muy tenue. Fisuras a ángulo  $<30^\circ$  con el eje del sondeo.



Caja 78 Aspecto general. Granitos de facies común, blanco grisáceo.



Caja 81 Aspecto general. Granito de facies común 'Blanco Cristal'.



Caja 83 Aspecto general. Granitos de facies común, blanco grisáceo.



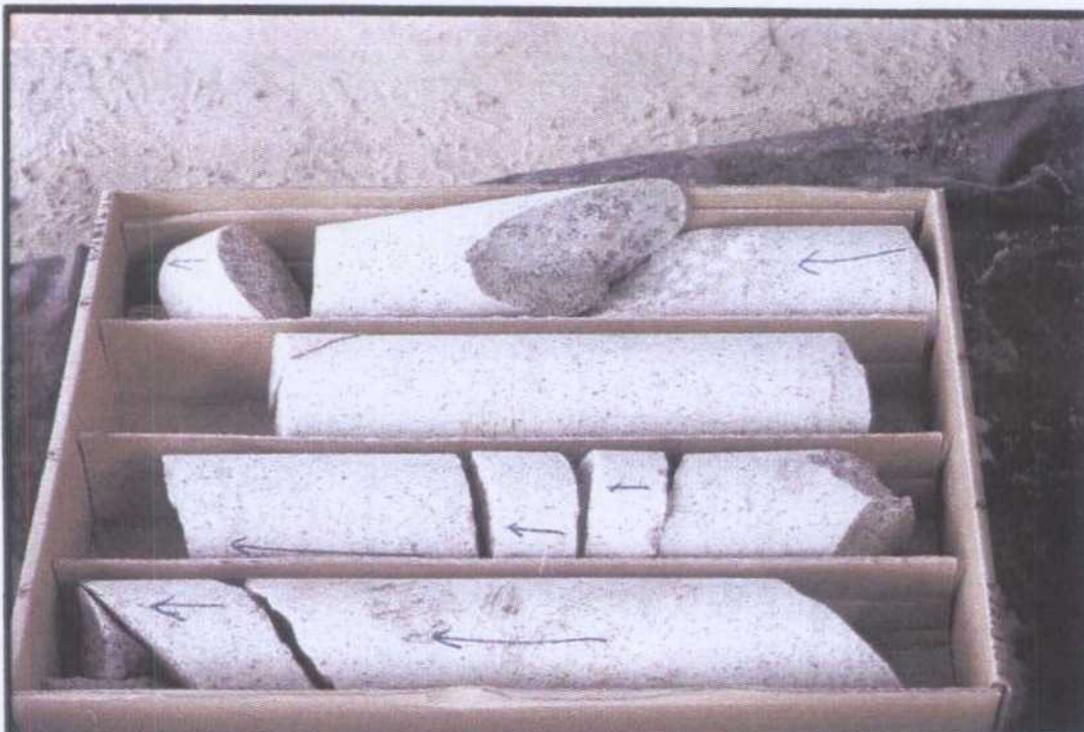
Caja 86 Granito de facies común con tinte rosa muy tenue y partición en cuña.



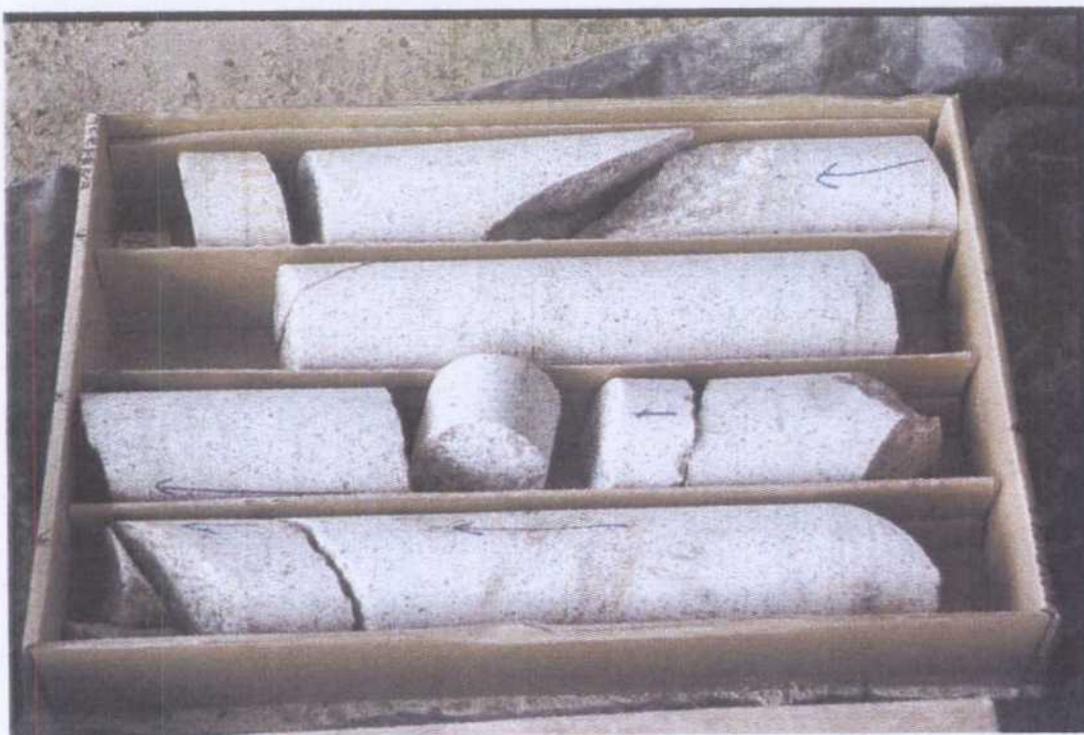
Caja 88 Granito de facies común, blanco grisáceo.



Caja 89 Granito con tinte rosa muy tenue y fisura con relleno y episienitización asociada.



Caja 89b Aspecto general.



Caja 89c Pátinas y costras en fisuras.



**ANEXO V**  
**IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS**

## IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Nº muestra	Nº caja	Litología	Nº lámina	Nº a químico	Nº DRX
3-L-1	3	granito	3-L-1		
3-RX	3	gra-alterado			3-RX
3-AQ-1	3	gra-alterado	3-L-1	3	3-RX
4-L-1	4	granito	4-L-1		
4-AQ-1	4	granito	4-L-1	4	
16-L-1	16	aplita	16-L-1		
16-AQ-1	16	aplita	16-L-1	16	
28-L-1	28	granito	28-L-1		
28-RX	28	relleno			28-RX
28-AQ-1	28	relleno		28	28-RX
29-L-1	29	granito	29-L-1		
29-RX	29	relleno			29-RX
29-AQ-1	29	relleno		29	29-RX
39-L-1	39	granito	39-L-1		
39-RX	39	relleno			39-RX
39-AQ-1	39	granito	39-L-1	39	
40-L-1	40	granito-epi	40-L-1		
40-L-2	40	granito	40-L-2		
40-RX	40	relleno			40-RX
40-AQ-1	40	relleno		40	40-R-X
41-L-1	41	granito-epi	41-L-1		
41-RX	41	brecha-epi			41-RX
41-AQ-1	41	granito-epi	41-L-1	41	
41-AQ-2	41	brecha-epi		411	41-R-X
42-L-1	42	brecha-epi	42-L-1		
42-L-2	42	granito-epi	42-L-2		
42-RX	42	brecha-epi			42-RX
42-AQ-1	42	brecha-epi		42	42-RX
47-RX	47	relleno			47-RX
81-L-1	81	granito	81-L-1		
81-AQ-1	81	granito	81-L-1	81	
89-RX	89	relleno			89-RX