

## Cuantificación mediante estudio estereológico del sistema microfisural del granito de El Berrocal (Sistema Central, Toledo, España).

A. Álvarez-Calleja (\*), A. Rodríguez-Rey (\*), M. Montoto (\*), B. Menéndez (\*) y C. Dubois (\*\*)

(\*) Departamento de Geología, Grupo de Petrofísica, Universidad de Oviedo, Oviedo, España.

(\*\*) Laboratoire de Microanalyses Nucléaires, Université de Franche-Comté, Besançon, Francia.

### RESUMEN

Este trabajo describe un ejemplo de aplicación de técnicas estereológicas para la cuantificación de algunas características del sistema microfisural de materiales rocosos. En este caso se ha cuantificado la densidad de microfisuración (expresada en forma de la distribución de frecuencia de la superficie específica microfisural en función de las aperturas microfisurales) y la frecuencia relativa de las aperturas de las microfisuras del granito de El Berrocal (Sistema Central, Toledo, España). Se han utilizado imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido para poder cuantificar las microfisuras con aperturas aparentes superiores a  $0,1 \mu\text{m}$ . Se describe el procedimiento de preparación y orientación de las denominadas secciones verticales que aseguran un desmuestre correcto. Además de los datos globales del granito, se desglosan las características de las microfisuras en función de las principales fases minerales a las que están asociadas, cuarzo, feldespatos y micas. En este granito, se observa un predominio de las microfisuras de pequeña apertura (por debajo de  $1 \mu\text{m}$ ), así como una mayor importancia de las microfisuras asociadas a los cuarzoes, y sobre todo a los feldespatos (que representan un 60,5 % de la microfisuración de la roca), frente a las asociadas a las micas. Al considerar separadamente la densidad de microfisuración de cada mineral, teniendo en cuenta la composición mineralógica de la roca, se constata que el feldespato es asimismo el mineral más microfisurado. Sin embargo, las distribuciones de frecuencia de la superficie específica microfisural en función de la apertura de las microfisuras son muy parecidas en cualquiera de los tres minerales. Con este trabajo se intenta poner de manifiesto la utilidad de la Estereología que, mediante procedimientos sencillos, rápidos y económicos, suministra información cuantitativa de la microfisuración de materiales rocosos, que puede resultar de utilidad en estudios geológicos diversos.

**Palabras Clave:** fractografía, microfisuras, cuantificación, granito, El Berrocal, estereología, petrología.

### ABSTRACT

This paper describes an example of the use of stereological techniques for the quantification of some characteristics of the microcrack network of rocks, in this case the El Berrocal granite (Sistema Central, Toledo, Spain). From data measured in sections, therefore 2-D, 3-D characteristics of the microcrack network have been obtained. The quantified characteristics are the microcrack density (in terms of the frequency distribution of the specific surface of microcracks in relation to their apertures) and the relative frequency of the microcrack aperture. These procedures have been applied to images under scanning electron microscopy, so microcracks with apparent apertures over  $0,1 \mu\text{m}$  have been measured. The so called "vertical sections" have been prepared to assure a correct sampling. From the measurement of the apparent apertures of microcracks and applying stereological procedures, the real apertures and the specific surface of each class of microcracks are obtained. Besides of the characteristics of the microcrack network of the rock as a whole, data of the microcracks associated to each of the main minerals (quartz, feldspars and micas) are presented separately, allowing the interpretation of the contribution of each mineral to the microfractography of the rock. In El Berrocal granite, the microcracks with a real aperture less than  $1 \mu\text{m}$  are the most abundant. The microcracks are more important in quartz and, above all, in feldspars (with more than 60% of the total network of the rock), than in micas. When considering the microcrack density of each mineral, and taking into account the mineral composition of the rock too, the feldspar is also the more cracked mineral in the rock. Nevertheless, the frequency distribution of the specific surface in relation to the microcrack aperture is quite similar in any of the three minerals. It is intended with this paper to show the possibilities of the stereology that, using simple, fast and economic procedures, provides quantitative information about the characteristics of the microcrack network of rocks that can be very useful in many geological studies.

**Key Words:** rock microfractography, microfissures, quantification, granite, El Berrocal, stereology, quantitative petrography.

## INTRODUCCION.

El estudio de las propiedades físicas de los materiales rocosos, a escala de la denominada "roca matriz" o "intact rock", es importante en muchas ramas de las Ciencias de la Tierra (Petrología, Petrología aplicada, Mecánica de Rocas, Ingeniería Geológica, Geofísica...). La interpretación petrográfica de dichas propiedades se enmarca en una reciente aplicación de la Petrología, llamada Petrofísica (Montoto, 1983). Los estudios petrofísicos tienen aplicación en campos tan dispares como el estudio de la durabilidad y conservación de rocas monumentales (Esbert y Marcos, 1983; Esbert y Montoto, 1990), o la llamada "solución geológica" al problema del almacenamiento definitivo de residuos radiactivos de alta actividad (Montoto, 1981).

En dichos estudios petrofísicos, es imprescindible la cuantificación de los componentes petrográficos. Estos componentes ejercen una influencia distinta en cada circunstancia petrofísica pero, en general, puede indicarse un orden relativo: vacíos (poros y fisuras), textura y minerales. Así, algunos autores llegan a afirmar que cuando se realiza un estudio mineralógico de aplicación ingenieril, debe tenerse presente que poros, vacíos y microfisuras son, probablemente, los "minerales" más importantes de la roca (Franklin, 1974).

Para la cuantificación de estos vacíos existen numerosos métodos: absorción de agua, isotermas de adsorción de gas, inyección de mercurio, etc. En este trabajo se han utilizado los procedimientos estereológicos. La Estereología se puede definir como una parte de los métodos matemáticos que relacionan parámetros tridimensionales con medidas bidimensionales obtenidas en secciones (Weibel, 1979); es decir, permite obtener información cuantitativa de carácter geométrico-estadístico de un objeto, a partir de secciones del mismo (Cruz-Orive, 1987).

Utilizando estos procedimientos estereológicos, rápidos, sencillos y económicos, se ha cuantificado el sistema microfisural del granito del macizo de El Berrocal, Toledo. En este macizo se ubica una antigua mina de uranio en la que se estudia la migración de radionúclidos en la naturaleza; se considera dicho ámbito geológico como un "análogo natural" con el que poder interpretar fenómenos de migración y retención de radionúclidos por parte de la roca matriz en otros macizos utilizados como futuros repositorios; esta circunstancia comparativa la convierte en objeto de estudio en numerosos proyectos de investigación. Es evidente que existe un interés creciente, en los últimos años, en el tema de la seguridad

en el almacenamiento de residuos radioactivos de alta actividad en rocas cristalinas; por eso, es de extrema utilidad práctica, que sea la propia roca la que actúe como última barrera retrasando y reteniendo la migración de radionúclidos a la biosfera en el caso de que se produzca su hipotética fuga. En estas circunstancias se plantea cual puede ser el papel de retención ejercido por la roca matriz contigua a las fracturas hidrológicamente activas y cual el volumen de roca matriz, que a partir de dichas fracturas, puede realizar tareas de retención (Heath et al., 1992). Como se viene demostrando, las propiedades petrofísicas de la roca matriz van a condicionar la efectividad o no de estos fenómenos y entre ellas resultará fundamental la configuración del sistema microfisural, razón por la cual se cuantifica en este estudio.

En medios rocosos como el que nos ocupa, se pueden cuantificar mediante Estereología, entre otros, la densidad de microfisuración, superficie específica de las microfisuras, su anchura, ramificación, orientación, grado de relleno, rugosidad de las paredes, dimensión fractal o curvatura; además, la estereología presenta la ventaja de permitir relacionar las características de la red microfractográfica con los minerales por los que discurre. En este trabajo se han cuantificado, con métodos estereológicos, la distribución de frecuencia de la superficie específica microfisural en función de las aperturas microfisurales y las frecuencias relativas de dichas aperturas.

## MATERIAL ESTUDIADO. PREPARACION DE MUESTRAS.

El granito del macizo de El Berrocal es un granito de feldespato alcalino, según la nomenclatura de la IUGS (Le Maitre, 1989). Su composición media, según Pérez del Villar y de la Cruz Cantero (1989) es: cuarzo 43%, feldespato potásico 17%, plagioclasa (albita) 29%, moscovita y sericita 9%, biotita 2%.

Texturalmente, se trata de un granito alotriomórfico, heterogranular, mediana a groseramente granudo y en algunas zonas casi porfídico debido a los grandes cristales de feldespato potásico. Su red microfractográfica es de tipo transgranular (en ocasiones intergranular). También existen abundantes vacíos intragranulares identificables mediante microscopía electrónica de barrido (MEB); éstos son preferentemente poros y microfisuras netos en los cuarzoes, mientras que están preferentemente ligados a los planos de exfoliación en las micas. En los feldespatos, los espacios vacíos son de dos tipos: unos están, como en el caso de las micas, asociados a los planos de ex-

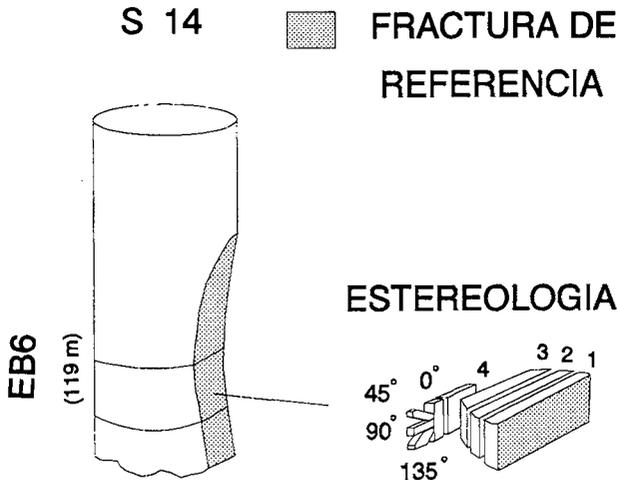


Figura 1. Esquema del proceso de desmuestra.

Figure 1. Scheme of the sampling procedure.

foliación; otros son originados por la pérdida de material resultante de los procesos de alteración.

La muestra estudiada procede de un testigo de sondeo que ha cortado a una fractura hidrológicamente activa; concretamente es una muestra del sondeo 14 (S14) denominada El Berrocal 6 (EB6). Esta muestra EB6 es contigua a una fractura hidrológicamente activa subvertical situada a 119 m de profundidad respecto a la superficie topográfica. Para estudiar la variación de las propiedades físicas de esta muestra en relación con la distancia a la fractura de referencia, se la ha seccionado según planos de corte paralelos a dicha fractura y separados entre sí 10 mm. Se han individualizado de este modo 5 lajas paralelas en las que se han realizado diferentes ensayos, aplicando diferentes técnicas, con el fin de determinar sus propiedades físicas y caracterizarla petrofísicamente. O sea, se ha realizado un perfil petrofísico de 54 mm desde la fractura hacia el interior de la roca matriz (Figura 1).

El análisis estereológico se ha realizado en la laja 4 de esta muestra EB6. Se han obtenido cuatro secciones perpendiculares a la fractura de referencia, secciones verticales, (Baddeley et al., 1986) de la citada laja, que permiten el estudio de la región situada entre 33 y 43 mm de distancia a la fractura de referencia. Estas secciones han sido tomadas con diferencias de orientación de 45°. Las secciones han sido realizadas con una sierra de baja velocidad de corte (120 r.p.m) y baja deformación, para no introducir artefactos de tipo microfractográfico. Posteriormente han sido desbastadas a mano con CSi-600 y

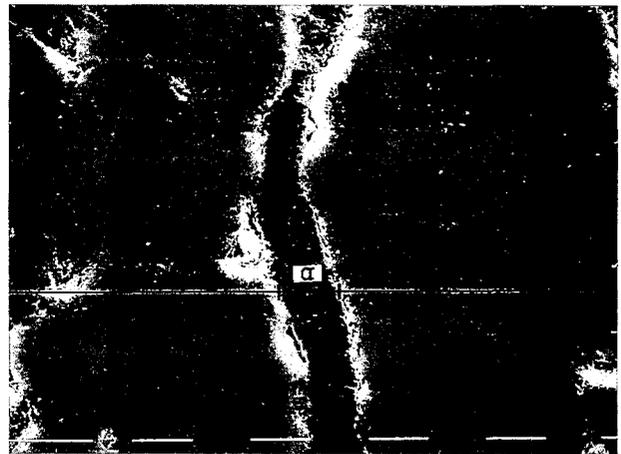


Figura 2. Ilustración del procedimiento de medida de las aperturas aparentes ( $\alpha$ ) de las microfisuras, sobre imágenes de microscopía electrónica de barrido con detector de electrones secundarios. La red microfisural del ejemplo ha sido impregnada con una resina fluorescente para poder ser estudiada también con microscopía de fluorescencia. (Un marcador = 10  $\mu$ m).

Figure 2. Procedure for measuring the apparent aperture ( $\alpha$ ) of microcracks on images under scanning electron microscopy (secondary electrons). The microcrack network has been filled with a fluorescent resin for studies under fluorescence microscopy. (A scale bar = 10  $\mu$ m).

pulidas con CSi-1000 y pasta de diamante de 9 y 1  $\mu$ m para su observación al MEB, previa metalización con oro.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

En este trabajo se han aplicado las técnicas estereológicas para estimar la distribución de frecuencia de la superficie específica microfisural, en función de las aperturas microfisurales, y las frecuencias relativas de dichas aperturas.

Algunos autores han descrito algoritmos para estimar estas distribuciones: por ejemplo, Cruz-Orive, 1980, describe un procedimiento de aplicación general y Wong et al., 1989 hacen lo propio para el caso concreto de microfisuras en rocas y su relación con propiedades físicas de las mismas tales como la compresibilidad. Este último método es el seguido en el presente trabajo.

El primer paso consiste en la medida de las aperturas de las microfisuras. Para ello, sobre la imagen microscópica de una sección de la roca estudiada, se coloca una plantilla de líneas paralelas (líneas de test) orientada al azar y se miden las longitudes de las intersecciones entre las líneas de test y las trazas de las microfisuras (Figura 2).

Tabla 1. Frecuencias absolutas de las aperturas microfisurales medidas correspondientes al total de las muestras, y las asociadas a cada uno de los minerales esenciales.

Table 1.- Absolute frequencies of measured microcrack apertures corresponding to the global value of the samples, and those associated with each of the essential minerals.

APERTURA ( $\mu\text{m}$ )	Nº INTERSECC. ROCA	Nº INTERSECC. CUARZO	Nº INTERSECC. FELDESPATO	Nº INTERSECC. MICA
< 0,5	2925	1013	1760	151
0,5 - 1	470	170	285	15
1 - 1,5	140	46	92	2
1,5 - 2	77	29	47	1
2 - 2,5	31	11	20	0
2,5 - 3	28	13	15	0
3 - 3,5	15	6	9	0
3,5 - 4	21	10	11	0
4 - 4,5	0	0	0	0
4,5 - 5	16	6	10	0
5 - 5,5	13	6	7	0
> 5,5	98	35	63	0
TOTAL	3834	1345	2319	169

Como la sección no es forzosamente perpendicular a las paredes de las microfisuras, ni las líneas de test tienen por qué cortar ortogonalmente a las trazas de las paredes microfisurales, las intersecciones medidas son aperturas aparentes  $\alpha$  de las microfisuras. A partir de la frecuencia relativa  $N_L(\infty)$  de las aperturas microfisurales aparentes  $\alpha$ , se calcula la frecuencia relativa  $\Phi_{(i)}$  de las aperturas reales  $i$ , utilizando la siguiente relación:

$$\Phi_{(i)} = \frac{2}{\pi i^2} \frac{d}{di} \int_0^i \frac{\alpha^3 N_L(\alpha)}{(\alpha^2 - i^2)^{1/2}} d\alpha$$

El desarrollo de esta ecuación conduce a relacionar  $N_L(\infty)$  y  $\Phi_{(i)}$  por medio de una matriz diagonal inferior. Este desarrollo aparece enteramente documentado en Cruz-Orive, 1980 y en Wong et al., 1989.

A partir de  $\Phi_{(i)}$ , es posible estimar la distribución de frecuencia de la superficie específica microfisural en función de las aperturas microfisurales reales. Esta distribución, a la que se llamará  $S_v(i)$ , está relacionada con  $\Phi_{(i)}$  de la forma siguiente:

$$S_v(i) = S_v \int_0^\infty \Phi_{(i)} di$$

$S_v$  es la superficie específica correspondiente a todas las microfisuras medidas. Su cálculo, a partir del número de intersecciones medido por unidad de longitud de línea

de test IL, se realiza siguiendo la fórmula propuesta por Saltykov, 1945:

$$S_v = 2 I_L$$

A partir de la superficie específica atribuida a cada intervalo de apertura real, sería posible estimar la distribución de frecuencia del volumen poroso microfisural según las mismas clases de apertura real. Bastaría multiplicar la superficie específica perteneciente a cada intervalo, por su marca de clase. Los problemas que se presentan vienen derivados del importante error que se comete cuando las clases tienen un tamaño grande. Al separarse mucho la marca de clase de los límites de la misma, se atribuye a microfisuras de muy diferentes aperturas, una apertura que puede distar mucho de la real.

Al trabajar sobre la pantalla del MEB, la simulación de la superposición de la plantilla de test orientada al azar, se ha conseguido: orientando al azar la muestra en el portamuestras, colocando una línea de test horizontal en la pantalla del MEB y desplazando la muestra según el eje de las X. Se han realizado barridos sistemáticos separados entre sí 5 mm, hasta alcanzar los 30 mm de muestra barridos, linealmente, en cada sección. En la sección 45° sólo se barrieron 23 mm.

Las cuatro secciones verticales obtenidas en la laja 4 de

Tabla 2. Frecuencias absolutas de las aperturas microfisurales calculadas correspondientes al total de las muestras, y las asociadas a cada uno de los minerales esenciales.

Table 2. Absolute frequencies of calculated microcrack apertures corresponding to the global value of the samples, and those associated with each of the essential minerals.

APERTURA ( $\mu\text{m}$ )	Nº INTERSECC. ROCA	Nº INTERSECC. CUARZO	Nº INTERSECC. FELDESPATO	Nº INTERSECC. MICA
< 0,5	3103	1072	1868	159
0,5 - 1	385	141	234	10
1 - 1,5	92	28	64	0
1,5 - 2	57	23	34	0
2 - 2,5	11	4	8	0
2,5 - 3	23	13	10	0
3 - 3,5	6	2	4	0
3,5 - 4	23	12	11	0
4 - 4,5	0	0	0	0
4,5 - 5	24	9	16	0
5 - 5,5	11	7	6	0
> 5,5	98	35	63	0
TOTAL	3834	1345	2319	169

la muestra EB6 han sido observadas con MEB en la modalidad de electrones secundarios, bajo 10.000 aumentos, lo que permite el estudio de microfisuras con aperturas aparentes mayores de 0.1  $\mu\text{m}$ .

## RESULTADOS E INTERPRETACION.

En la Tabla 1 se muestran las frecuencias absolutas de las aperturas microfisurales medidas en el total de la roca y las asociadas a cada uno de sus minerales esenciales. Se observa un predominio de las microfisuras de pequeña apertura, así como una mayor importancia de las microfisuras asociadas a los cuarzos, y sobre todo a los feldespatos, frente a las asociadas a las micas. Curiosamente, el intervalo 4 - 4,5  $\mu\text{m}$  ha quedado desierto al no encontrarse ninguna microfisura con estas aperturas entre las 3834 medidas realizadas. Se han medido todas las microfisuras con aperturas aparentes mayores de 0,1  $\mu\text{m}$ .

En la Tabla 2 se recogen las frecuencias absolutas de las aperturas microfisurales reales, calculadas siguiendo el algoritmo de Wong et al., 1989, con los datos de la tabla anterior. La clase de más de 5,5  $\mu\text{m}$  no puede considerarse en los cálculos por no tener un tamaño igual al de las otras. Aunque algunas de las microfisuras cuya apertura aparente cae en esta clase podrían tener aperturas reales inferiores, y por lo tanto caer en clases de apertu-

ra real menor, el error cometido al no incluir esta última clase en los cálculos es mínimo.

En la Figura 3 se han representado las frecuencias relativas, de las aperturas microfisurales aparentes o medidas  $N_L(\infty)$  y de las reales o calculadas  $\Phi_{(i)}$ , correspondientes a la red microfisural de la muestra del granito del macizo de El Berrocal, que se deducen de los datos de las tablas 1 y 2, respectivamente. En esta figura, como en las siguientes, no se ha puesto límite inferior a la primera clase ni superior a la última; con ello se intenta expresar que en estas clases se han incluido todas las microfisuras con aperturas menores de 0.5 $\mu\text{m}$  y mayores de 5,5 $\mu\text{m}$ , respectivamente. El límite inferior de la primera clase está condicionado por el límite de resolución del MEB.

Como se observa, la diferencia entre las frecuencias relativas de las aperturas microfisurales aparentes y calculadas es muy pequeña. Solamente se observa un pequeño incremento de frecuencia en las clases de pequeña apertura en la curva calculada, respecto a la medida. Esto es lógico teniendo en cuenta que las aperturas reales son siempre menores o iguales que las aparentes. Wong et al., 1989 obtienen una gráfica similar para el granito de Westerly y llegan a la conclusión de que el error cometido al tomar las frecuencias medidas en vez de las calculadas, es prácticamente nulo.

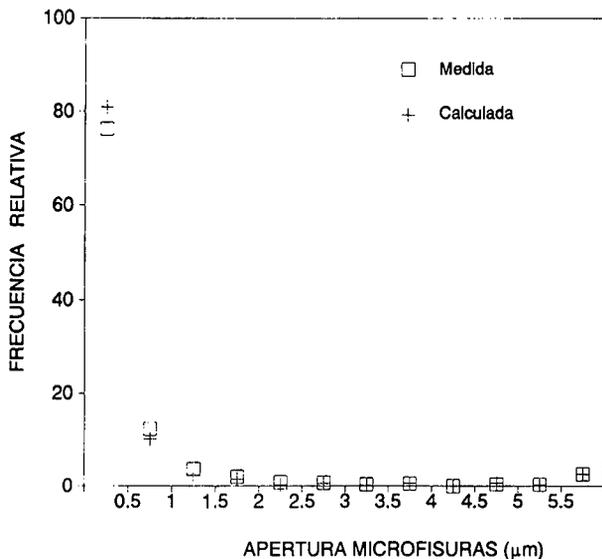


Figura 3. Comparación entre la distribución de frecuencia relativa de las aperturas microfisurales medidas  $N_L(\alpha)$  y la de las calculadas  $\Phi_{(i)}$ , de la red microfisural de las muestras del granito de El Berrocal.

Figure 3. Relative frequency distribution of measured microcrack apertures  $N_L(\alpha)$  versus that of calculated ones  $\Phi_{(i)}$ , of the microcrack network of the samples of El Berrocal granite.

La superficie específica calculada para la red microfisural de la roca matriz del granito de El Berrocal, tomando las microfisuras con aperturas aparentes mayores de  $0,1\mu\text{m}$  y considerando una sola de sus paredes, es de  $67,9\text{ mm}^{-1}$ . Se han calculado la aportación de cada fase mineral a la superficie específica microfisural de la roca y la densidad de microfisuración de cada fase mineral. El cálculo de este último parámetro se ha realizado considerando por separado la longitud de línea de test y el número de intersecciones correspondientes a cada fase mineral (Tabla 3).

También se ha intentado ver si las distribuciones de frecuencia de la superficie específica microfisural en función de las aperturas microfisurales, de la red microfractográfica de la roca y de la de cada uno de los minerales individualizados, son diferentes. En la Figura 4 se han representado estas distribuciones.

Se observa como, a pesar de tener redes microfisurales de muy diferente densidad, los tres minerales y el granito en su conjunto, no presentan diferencias en las citadas distribuciones. Salvo las micas que presentan una mayor frecuencia de microfisuras con aperturas reales menores de  $0,5\mu\text{m}$ , el resto de las distribuciones son prácticamente idénticas.

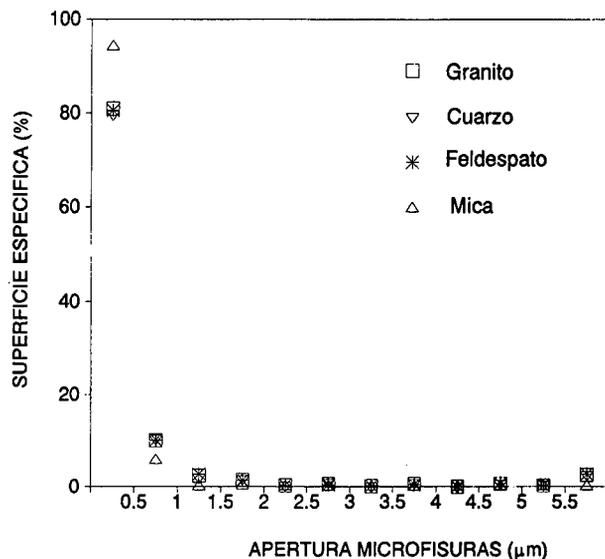


Figura 4. Distribuciones de frecuencia de la superficie específica de la red microfisural de la roca y de cada uno de los minerales esenciales, en función de la apertura real de las microfisuras.

Figure 4. Frequency distribution of microcrack surface density of the rock and of each of the essential minerals, as a function of the real microcrack aperture .

## CONCLUSIONES

Los métodos estereológicos son apropiados para cuantificar las características de los sistemas microfisurales de las rocas cristalinas, presentando importantes ventajas respecto a otros debido a su bajo coste y a su capacidad para relacionar la estructura microfisural con los demás parámetros petrográficos.

En el granito del macizo de El Berrocal se ha calculado la distribución de frecuencia de la superficie específica microfisural, en función de las aperturas microfisurales. Además se ha calculado esta distribución para cada uno de sus minerales esenciales.

Se constata que, independientemente del mineral estudiado las microfisuras de pequeña apertura (menores de  $1\mu\text{m}$ ) son mucho más abundantes y a ellas se asocia un porcentaje importante de la superficie específica.

Se ha observado que las redes microfisurales de la zona estudiada del granito del macizo de El Berrocal y de cada uno de sus minerales son muy diferentes en cuanto a su densidad pero no en cuanto a su estructura: presentan distribuciones de frecuencia de la superficie específica microfisural en función de las aperturas microfisurales casi idénticas. Solamente las micas presentan una distribución de su superficie específica un tanto particular.

Tabla 3. Densidad de microfisuración de cada fase mineral y su contribución a la superficie específica microfisural de la roca.

Table 3. Microcrack density of each mineral and their contribution to the microcrack specific surface of the whole rock.

MICROFISURAS EN	% DE LA SV	mm <sup>2</sup> /(mm <sup>3</sup> de roca)	mm <sup>2</sup> /(mm <sup>3</sup> de mineral)
CUARZO	35,1	23,8	55,4
FELDESPATO	60,5	41,1	89,2
MICA	4,4	3,0	27,2

Se ha puesto en evidencia que el mineral que más contribuye a la superficie específica total de la roca es el feldespato, debido a su mayor contenido de espacios vacíos (tanto los de tipo fisural como los de tipo poro resultado de su estado de alteración), y también a su mayor abundancia en la roca. Esto debe ser considerado a la hora de estudiar el comportamiento de esta roca frente a la migración de fluidos por su seno.

#### AGRADECIMIENTOS

A la Comisión de las Comunidades Europeas por la subvención del proyecto "Rock Matrix Diffusion as a Mechanism for Radionuclide Retardation: Natural Radioelement Migration in Relation to the Microfractography and Petrophysics of Fractured Crystalline Rock" contrato nº F12W-CT91-0082.

Al CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medio-Ambientales y Tecnológicas; Madrid) por el suministro de las muestras utilizadas en este trabajo

#### BIBLIOGRAFIA.

BADDELEY,A.J; GUNDERSEN,M.J.G. y CRUZ-ORIVE,L.M., 1986: Estimation of surface area from vertical sections. *J. Microscopy*, 142(3): 259-276.

CRUZ-ORIVE,L.M., 1980: Estimation of sheet thickness distribution from linear and plane sections. *Gegenbaurs Morph. Jarrb.*, Leipzig, 126(2):175-188.

CRUZ-ORIVE,L.M., 1987: Avances recientes en estereología y su aplicación en biología celular. *Anatomisches Institut, Univ. Bern*. Documento interno.

ESBERT,R.M. y MARCOS,R.M., 1983: Las piedras de la catedral de Oviedo y su deterioración. *Publ. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias. Gráficas Summa, Oviedo*, 143 p.

ESBERT, R.M. Y MONTOTO, M., 1990: La Petrofísica y su aplicación a los estudios de las patologías en piedra. *Patología Constructiva y su Restauración. Tomo I. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Madrid*.

FRANKLIN,J.A., 1974: Rock quality in relation to the quarrying and performance of rock construction materials. *Proc. 2nd. Cong Int. Ass. Eng. Geology. IV-PC-2.1/11. Sao Paulo*.

HEATH,M.J., MONTOTO,M., RODRIGUEZ-REY,A., RUIZ DE ARGANDOÑA,V.G. y MENEDEZ,B, 1992: Rock matrix diffusion as a mechanism of radionuclide retardation: a natural study of El Berrocal granite, Spain. *Radiochimica Acta*, 58/59:379-384.

LE MAITRE,R.W. et al., 1989: A classification of igneous rocks and glossary of terms. R.W. Le Maitre, Ed. *Blackwell Scientific Publications, Oxford*.

MONTOTO,M., 1981: Almacenamiento de residuos radiactivos: planteamiento geológico. *Symp. sobre uso industrial del subsuelo. Soc. Esp. Mecánica de Rocas, Madrid*, 2:155-158.

MONTOTO,M., 1983: Petrophysics: the petrographic interpretation of the physical properties of rocks. *Proc. 5th Congr. Int. Soc. Rock Mech. Melbourne, Sect. B*, pp. 93-98.

PEREZ DEL VILLAR,L. y DE LA CRUZ CANTERO,B., 1989: Caracterización mineralógica y geoquímica del granito sano y alterado del macizo de "El Berrocal" (Sierra de Gredos, Provincia de Toledo). *Studia Geologica Salmanticensis*, 26:47-80.

SALTYKOV,S.A., 1945: *Stereometric Metallography*. State Publishing House for Metal Sciences. Moscow.

WEIBEL,E.R., 1979: *Stereological Methods. Vol.1 Practical Methods for Biological Morphometry*. Academic Press, London.

WONG,T.F.; FREDRICH,J.T. y GWANMESIO,G.D., 1989: Crack aperture statistics and pore space fractal geometry of Westerly granite and Rutland quartzite: implications for an elastic contact model of rock compressibility. *J. Geophys. Res.*, 94(38):10267-10272.