

# El televisor acústico: aplicación a la caracterización geométrica de la fracturación en sondeos

*The acoustic borehole televiewer: application to the geometrical characterization of fractures boreholes.*

R. Campos Egea (\*) y P. Gumiel Martínez (\*\*)

(\*) Programa de Caracterización Hidrogeoquímica de Emplazamientos. Instituto de Medio Ambiente - CIEMAT Av. Complutense 22, 28040 Madrid.

(\*\*) División de Recursos Minerales. ITGE. Ríos Rosas 23, 28003 Madrid.

## ABSTRACT

The Acoustic Borehole Televiewer (BHTLV) is an important tool for the location of fractures in boreholes. This technique shows images of oriented fracture planes which can be spatially characterized. The observed fractures have also been studied using spherical statistic, spacing distribution and fractal geometry analysis to assess fracture connectivity. Fractal spacing distribution on fractures and hydraulically active fracture zones have been established in a selected borehole belonging to the El Berrocal Test Site, which is an area that has been studied in an integrated ENRESA-CIEMAT EEC R+D Program.

**Key words:** Acoustic Borehole Televiewer, Fracturing zones, Hydraulically active zones, Fractal geometry, Connectivity.

Geogaceta, 20 (6) (1996), 1389-1392  
ISSN:0213683X

## Introducción

El televisor acústico en sondeos (Acoustic Borehole Televiewer BHTLV) es un método de testificación geofísica no convencional, que proporciona una imagen de la pared del sondeo en forma de registro continuo, a partir de la amplitud y tiempo de retorno de las ondas acústicas reflejadas en la pared del sondeo.

La interpretación de los datos de la sonda BHTLV se basa en que la cantidad de energía reflejada por la pared del sondeo depende de sus propiedades físicas. Cualquier característica de la pared del sondeo se puede registrar de forma analógica o digital y representar mediante una imagen acústica plana y desplegada dividida verticalmente por el Norte Magnético. El BHTLV permite la identificación de fracturas naturales o inducidas, diques, venas, cambios de litología en sondeos y esta información puede considerarse de gran valor para la caracterización de estas estructuras geológicas.

## Descripción de la sonda, generación de la imagen e interpretación de los registros

Las partes fundamentales del BHTLV se muestran en la Figura 1a.

La sonda BHTLV opera de forma que los pulsos sónicos son dirigidos directamente a la pared del sondeo, donde una porción de cada pulso es reflejado hacia el receptor/convertidor, éste convierte los pulsos de sonido reflejados en señales eléctricas, las cuales pueden ser utilizadas en la superficie para producir el log. La información sobre orientación se realiza de forma que el pulso sónico se envía en el momento que el receptor/convertidor apunta a la dirección del Norte

magnético, y puesto que éste rota a una velocidad uniforme, se conoce en todo momento su orientación. La información sobre la profundidad se obtiene de la longitud del cable. Finalmente, la combinación de la rotación y el continuo movimiento en la vertical de la sonda, dan como resultado una espiral continua de la pared del sondeo (Zemanek *et al.*, 1969 y 1970).

Puesto que el BHTLV, produce una imagen a partir de la amplitud y tiempo de retorno de una energía acústica reflejada, hay que tener en cuenta que esta cantidad de energía reflejada en la pared del sondeo depende de las propiedades físicas de la misma, de forma que una superficie suave y pulida refleja mejor la energía que una superficie

rugosa, y una superficie dura y compacta mejor que una blanda y disgregada. Las características planares siempre que dichas características no sean perpendiculares o paralelas al eje del sondeo, intersectan a la pared del sondeo según una elipse (Figura 1b), la cual se identifica en el registro como una curva sinusoidal.

En la figura 2, se observan algunas estructuras geológicas que pueden ser detectadas por la sonda BHTLV.

## Aplicación

La zona de El Berrocal (Toledo), se sitúa a 92 Km al suroeste de Madrid en las hojas 579 y 580

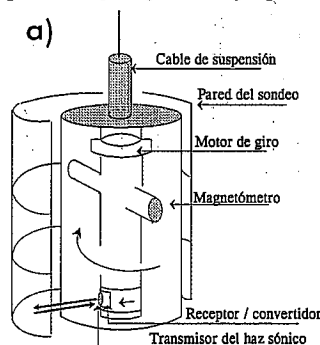


Fig. 1a.- Esquema de la sonda de Televisor acústico (BHTLV), mostrando sus componentes principales (Basado en Zemanek *et al.* 1970).

Fig. 1a.- Scheme of the Acoustic Borehole Televiewer (BHTLV) (after Zemanek *et al.* 1970).

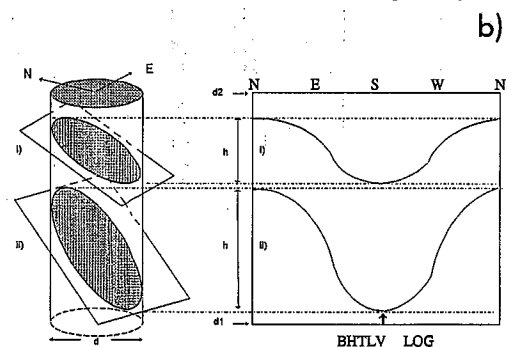


Fig. 1b.- Plano de fractura intersectando el sondeo. i) con un ángulo moderado de buzamiento ii) con un fuerte ángulo de buzamiento y su respuesta en el registro BHTLV.

Fig. 1b.- Fracture traces crosscutting a borehole. i) Low angle and ii) high angle fracture traces and their corresponding registered logs.

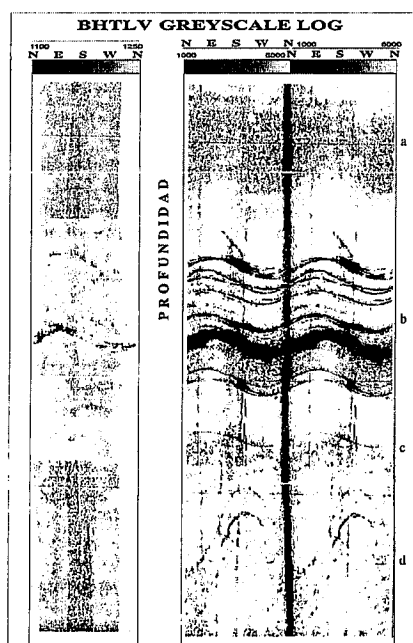


Fig. 2.- Ejemplos de registros BHTLV cortando diferentes características litológicas o estructurales. a) Cambio litológico gradual. b) Zona de alta densidad de fracturación con fracturas subparalelas y una respuesta fuerte en el registro. c) Pequeña diaclasa aislada con buzamiento suave y una respuesta débil en el registro. d) Dique de cuarzo con fuerte buzamiento.

Fig. 2.- Four types of geological structures registered in the BHTLV log. a) Lithological graded change. b) High fracture density zone showing subparallel fractures and a strong response in the log. c) Isolated small low angle joint and a smooth response in the log. d) High angle quartz dyke.

del MTN escala 1/50.000. Se trata de un plutón granítico de unos 22Km<sup>2</sup>, encuadrado geológicamente en la parte central de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Hespérico (Julivert *et al* 1972), que intruye en granitos adamellíticos porfídicos (Varea e Iglesias 1981).

La caracterización cinemática y geométrica de la red de fracturación de El Berrocal (Campos y Marín 1995; Campos *et al* 1995a y b), ha sido realizada a varias escalas, desde la cartografía geológica, tanto en superficie (Perez del Villar *et al* 1993), como en la galería de la mina (Prospección e Ingeniería 1991), hasta el análisis de Imágenes Landsat TM y Spot, junto con estudios de fotointerpretación (Marín 1991) en determinadas áreas, así como testificación geofísica de los sondeos mediante sondas convencionales (CGS 1992) y no convencionales (BGS 1992 y 1994).

Desde un punto de vista hidrogeológico, los datos obtenidos de la testificación de los sondeos mediante la sonda BHTLV (BGS, 1992, 1994) tienen una gran importancia, y el análisis de éstos ha sido, en el caso de El Berrocal, exhaustivo con el objetivo de elaborar un modelo geológico donde se reflejaron las características geométricas de las redes de percolación de fluidos.

El análisis de la fracturación en sondeos se

ha centrado en primer lugar, en la definición de las principales zonas de fracturación en profundidad. En segundo lugar, en la caracterización geométrica de estas zonas (direcciones principales, densidad, espaciado) y en el establecimiento de posibles correspondencias geométricas entre sondeos, en base a las principales estructuras de fracturación definidas. Finalmente, se han definido las redes de percolación principales y secundarias, derivadas de estas correspondencias geométricas.

Para realizar este análisis se han seleccionado tres sondeos (S14, S16 y S18) de los realizados en la zona de estudio, los cuales, por sus características peculiares y su proximidad, son un ejemplo representativo de lo que puede ser la red de fracturación del Macizo.

El S14 (Figura 3), es un sondeo de 250 metros con recuperación de testigo, que muestra una densidad de fracturación en el testigo de 2.7 fr/m, con un total de 677 fracturas medidas. De éstas, las fracturas abiertas son 456, lo que representa un 67.3 % del total, la media de fracturas abiertas por metro es 1.8. De todas estas fracturas, la sonda BHTLV registra 112 en 226 metros medidos, de los 250 totales que tiene el sondeo. Estas 112 fracturas arrojan una densidad de fracturación de 0.49 fr/m, que pueden considerarse como las de mayor entidad, ya que son registradas por la sonda y representan un 18 % del total y un 26% de las fracturas abiertas.

Las orientaciones principales de fracturación representadas en el diagrama de rosa de datos totales (Figura 4), se agrupan según las siguientes direcciones medias más probables N10-20E, N80-90E, N100-110E y N160-170E, formando así un espectro de direcciones muy amplio, que se agrupa en torno a dos sistemas principales ortogonales de direcciones próximas a N-S y E-W.

El estereograma (Figura 4) de todas las fracturas (112) registradas por la sonda BHTLV muestra una gran dispersión de datos. Los autovalores (E1=0.472, E2=0.427 y E3=0.102) hacen que  $r_1 < r_2$  y  $K=0.07$  lo que corresponde a una distribución de tipo uniforme, pero con una cierta tendencia a formar una guirnalda. Tanto la varianza esférica (0.59) como la resultante R normalizada entre 0 y 1 (0.40) confirman el tipo de distribución.

En el Sondeo 14 además del análisis de la fracturación, también se ha realizado una testificación geofísica convencional de la que destacan los registros gamma, resistividad, potencial espontáneo y permeabilidad, y ocupan la 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> y 4<sup>a</sup> columna de la figura 4 respectivamente. La interpretación combinada de estos registros, señalan las siguientes zonas de fracturación (Fig.3): Zona 1 (16-38m), Zona 2 (62-78m), Zona 3 (94-160) y Zona 4 (210-246). En términos generales, estas zonas presentan alta densidad de fracturación con respecto a las supra o infrayacentes. En estas zonas se observan variaciones notables en los registros gamma y potencial espontáneo y mínimos marcados en el registro de resistividad. En algunos casos se observan variaciones en el registro de la permeabilidad (Columna 4, en figura 3), lo que permite definir lo que hemos denominado zonas de fracturación hidráulicamente activas. Estas zonas están siempre en relación

con zonas de alta densidad de fracturación y/o alta permeabilidad, y muestran peculiares características en los registros geofísicos siendo capaces a priori, de permitir la circulación de fluidos a través de ellas. En el caso del Sondeo 14 son cinco: Zona A (21.5-37m), Zona B (62-75), Zona C (93-97), Zona D (116-125) y Zona E (208-220) (Fig.3).

La discriminación de las diferentes orientaciones de fracturación en estas zonas hidráulicamente activas son las que se representan en la figura 4.

La Zona C, por ejemplo, es una zona de 4m de potencia con una dirección de fracturación única y principal N100-120E, con una única dirección posible de flujo de fluidos. Sin embargo en la Zona D intervienen tres direcciones de fracturación que complican geoméricamente mucho más el esquema hidráulico.

### Redes de conexiones del sistema de fracturación geometría fractal de los espaciados

El mismo análisis se ha realizado para los sondeos 16 y 18, determinando las zonas de fracturación, las zonas hidráulicamente activas, así como la geometría de la fracturación en cada zona. En la Tabla 1 se resumen las zonas hidráulicamente activas definidas.

En la figura 5 queda reflejado el análisis geométrico de la fracturación en los tres sondeos y se han señalado las posibles zonas de conexión más importantes desde el punto de vista hidráulico.

Por ejemplo, la zona B14 (62-75m) en la que se detecta la fractura N°14.8 a una profundidad de 69.71m, corta a los sondeos S16 y S18 a profundidades de 38.75m y 74.83 respectivamente, conectando las zonas B14, D18 y B16, conexiones que constituyen parte de la red de percolación principal. La red secundaria lógicamente es mucho más compleja, y en ella se puede ver como conectan estas zonas con las zonas C14, E18, D16 etc., a través de las intersecciones entre las fracturas principales.

Además se ha realizado un estudio de la distribución de espaciados interfuradas, con objeto de comprobar si dicha distribución era fractal. Los resultados obtenidos en el análisis de los espaciados interfuradas del sondeo 14 pueden verse en la figura 6. Se han obtenido las dimensiones de distribución de espaciado (Ds) y de información (Di). La dimensión de información se considera que es la que proporciona una información mas completa de la geometría de las fracturas, pues tiene en cuenta tanto las fracturas como los espaciados, (ver desarrollo del método en Gumiel *et al* 1995).

La distribución de espaciado se ajusta bien a una distribución log-normal (Fig.6.2) e hiperbólica (fractal - Fig. 6.4). Las estimaciones de Ds dependen del intervalo considerado; para un rango comprendido entre 0.2 y 3m, Ds=0.58, lo que sugiere un moderado grado de agrupamiento. Por encima de 3m, los espaciados muestran una verticalización de las pendientes de las rectas de regresión. Básicamente, para intervalos de longitud superior a 10m, la distribución de venas es de tendencia más uniforme, en el sentido de

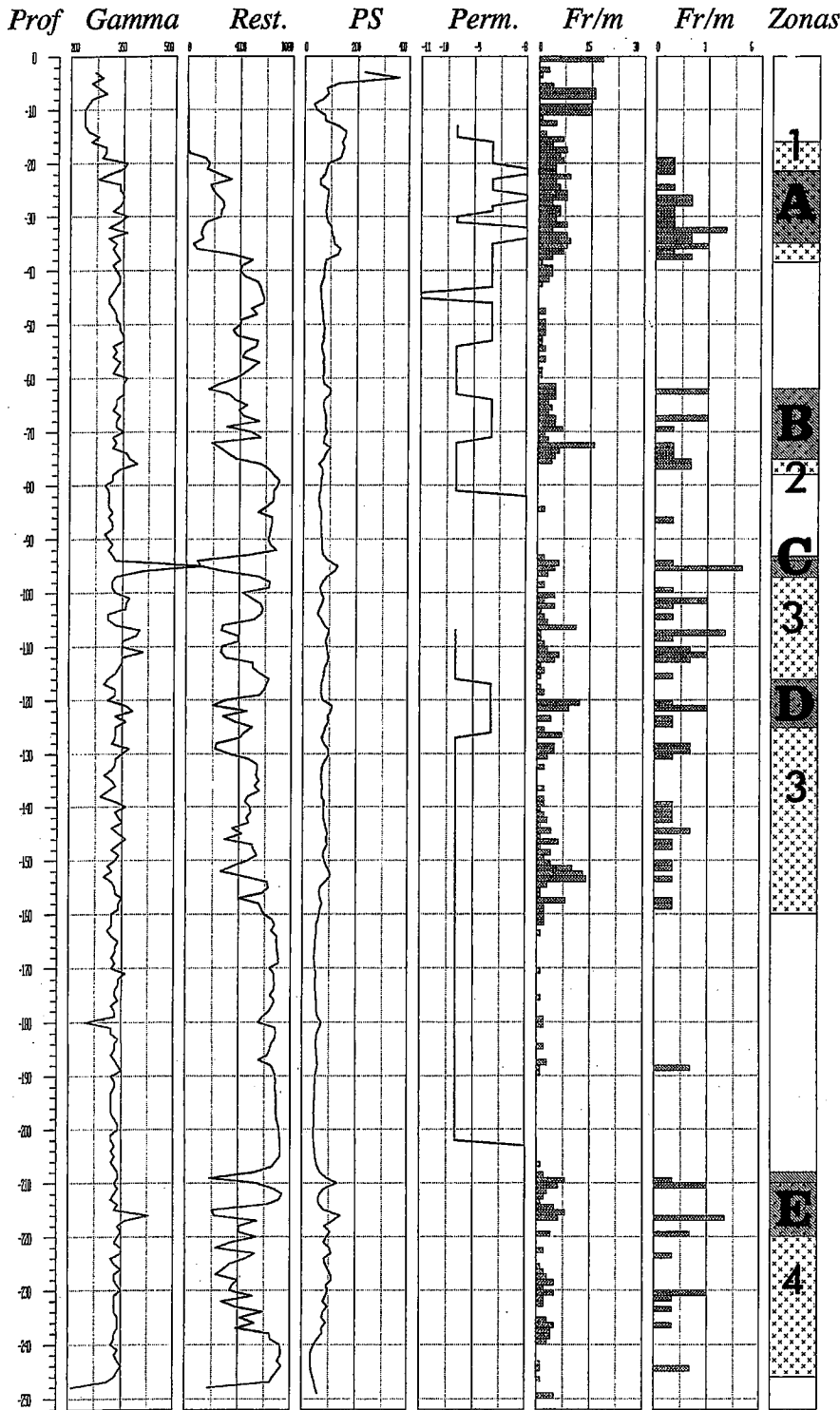


Fig. 3.- Registro compuesto para el sondeo 14 (El Berrocal-CIEMAT 1994). Gamma Natural (cps), Resistividad (ohm/m), Potencial Expontaneo (mv), Permeabilidad (e^m/s), Fracturas/m (sondeo), Fracturas/m (TLV) y zonas definidas.

Fig. 3.- Composite log for the Borehole 14 (El Berrocal-CIEMAT 1994). Gamma (cps), Resistivity (ohm/m), Spontaneous Potential (mv), Permeability (e^m/s), Fractures/m (borehole), Fractures/m (TLV) and selected zones.

que intervalos de esa longitud siempre van a contener fracturas. En intervalos comprendidos entre 0.3 y 10m la distribución es fractal y por otra parte, la distribución de fracturas en grupos se corrobora por el valor de la  $D_i < 1$ , ( $D_i=0.91$ , Fig.6).

De estos resultados, se puede interpretar que la distribución espacial de las fracturas en

el Sondeo 14, o es típicamente fractal, o bien es en parte fractal, a la que se suma una cierta componente aleatoria en los espaciados (espaciados con distribuciones lognormales).

El grado de conectividad de un sistema de fracturas puede predecirse a partir de la densidad de fracturas, de su distribución, de la longitud de las trazas de las mismas y del espectro de dimen-

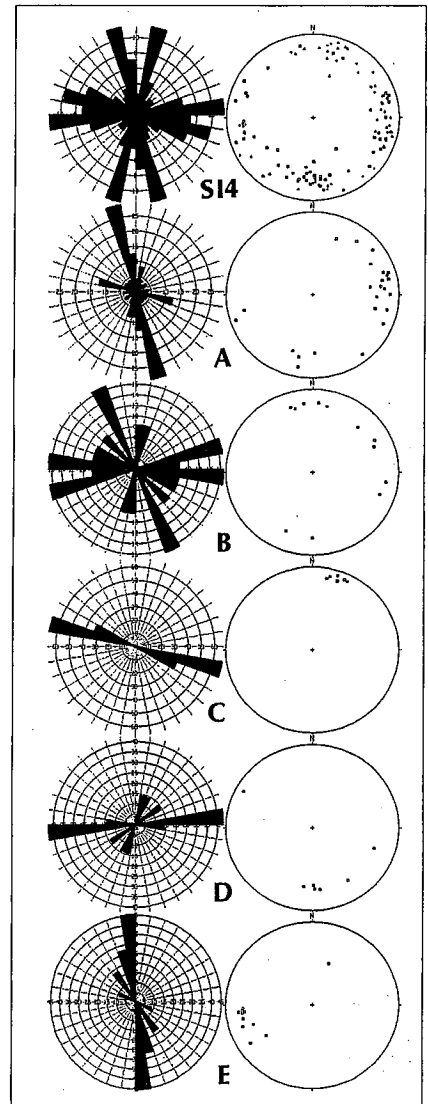


Fig. 4.- Caracterización de las direcciones de fracturación para el sondeo 14 y las zonas hidráulicamente activas definidas: Zona A (21.5-37); Zona B (62-75); Zona C (93-97); Zona D (116-125) y Zona E (208-220).

Nº Total de datos:112; Densidad de fracturación=0.49 fr/m; E1=0.472; E2=0.427; E3=0.102; K=0.07; R=0.40; VS=0.59.

Fig. 4.- Characterization of fracture sets at the borehole 14 and hydraulically active zones: Zone A (21.5-37); Zone B (62-75); Zone C (93-97); Zone D (116-125) and Zone E (208-220).

Nº Total data:112; Fracture density=0.49 fr/m; E1=0.472; E2=0.427; E3=0.102; K=0.07; R=0.40; VS=0.59.

siones fractales (Zhang y Sanderson 1994, Guimiel y Hernandez 1996).

Por último, este ensayo de conectividad de fracturas llevado a cabo en el entorno de El Berrocal supone una nueva metodología que puede tener gran importancia en los estudios de redes de percolación y trayectorias de flujo hidráulico en fracturas. La resolución del complejo problema geométrico de las conexiones locales en 2D y 3D, necesariamente debe

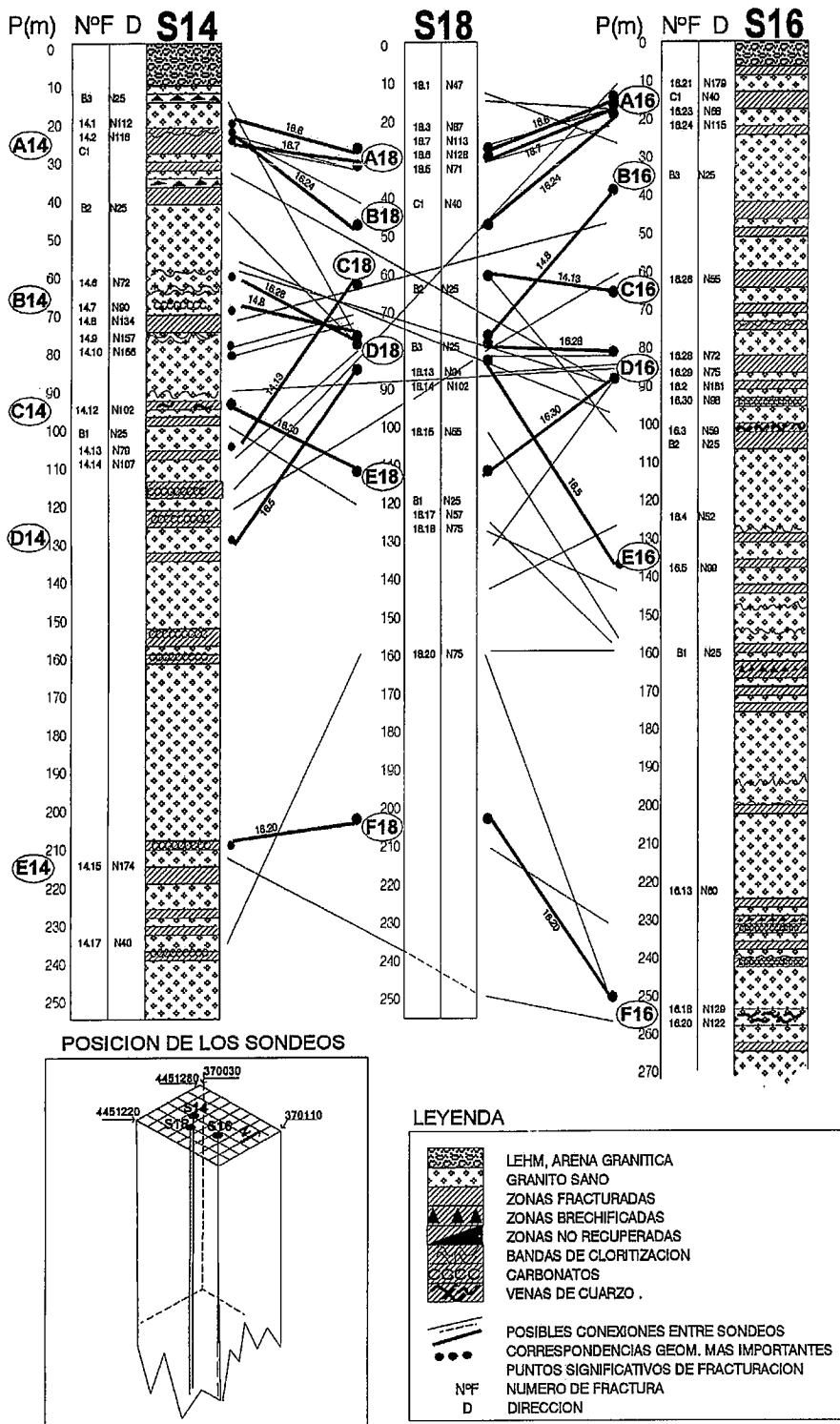


Fig. 5.- Correspondencias geométricas y conectividad de fracturas en los sondeos S14, S16 y S18

Fig. 5.- Geometric correspondences and connectivity between fractures in boreholes S14, S16 and S18

ir acompañado del establecimiento de las correspondencias geométricas entre fracturas, de una cartografía de detalle de las trazas de las mismas a diferentes escalas, del control de puntos de intersección de fracturas y finalmente del conocimiento de la fractalidad del sistema.

**Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por CIE-MAT-ENRESA y la CEE

**Referencias**

BGS (1992). S.F. Rogers. *Inf.Int. CIEMAT*.  
 BGS (1994). S.F. Rogers. *Inf.Int. CIEMAT*.

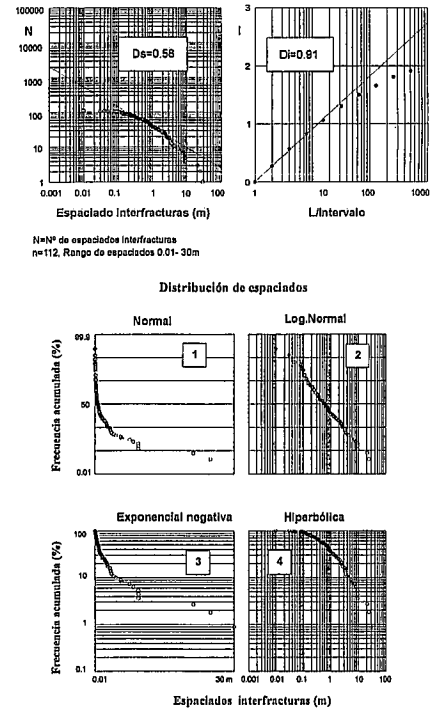


Fig. 6.- Dimensiones de distribución de espaciados interfracturas y de información en el sondeo 14.

Fig. 6.- Spacing distribution and information dimension of the fractures at the borehole 14.

	PROFUNDIDAD (m)		
	S14	S18	S16
ZONA A	21.5-37	28-32	14-20
ZONA B	62-75	48-52	35-40
ZONA C	93-97	58-61	60-65
ZONA D	116-125	73-86	75-92
ZONA E	208-220	108-111	132-138
ZONA F	-	200-205	248-252

Tabla 1.- Profundidades para las zonas hidráulicamente activas de la red primaria de percolación entre los sondeos S14, S16 y S18.

Table 1.- Depths for the hydraulically active zones of the primary percolation network between boreholes S14, S16 and S18.

Campos Egea, R & Marin Benavente, C. (1994). *EB-CIEMAT* (93)56.  
 Campos Egea, R et al. (1995a). *II Jornadas de I+D Enresa*, Madrid.  
 Campos Egea, R et al. (1995b). *Bol. Geol. Min.* Vol 106-6 pp 3-16.  
 CGS (1992). *CIEMAT (Inf Int)*, octubre 1992.  
 Gumiel, P & Hernandez, J.R: (1996). *IV Congreso Geológico de España*. Alcalá de Henares.  
 Gumiel et al. (1995). *Bol. Geo. Min.* 106-4, 316-337.  
 Julivert M et al. (1974). *Serv. Publ. Igme*. Madrid.  
 Marin, C (1991). *Red Fotogeológica de Fracturación. CIEMAT (inf.int)*.  
 Prospeccion e Ingenieria (1991a). *Contrato E/ 30034 CIEMAT*. Junio 1991. 50pp.  
 Varea R & Iglesias A (1981). *Informe 281/6 2t. ADARO-JEN*.  
 Zemanek, J et al. (1969). *Journ. of Petr. Technology*. June, pp 762-774  
 Zemanek, J et al. (1970). *Geophysics* vol 35, nº 2, pp. 254-269.  
 Zhang, X., & Sanderson, D.J. (1994). in: *Fractals and Dynamic Systems in Geoscience*, Kruhl J.H. (ed.). Springer Verlag, 37-52.