

# Contribuciones al estudio de la rotura de la balsa de lodos de Aznalcóllar

Coordinador: E. Custodio<sup>(1 y 3)</sup>

Autores: J. Gómez de las Heras<sup>(1)</sup>, P. Gumiel<sup>(1)</sup>, J. Grima<sup>(2)</sup> y E. Custodio<sup>(1 y 3)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Madrid

(2) Instituto Geológico y Minero de España. Oficina de Proyectos de Valencia

(3) Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona

## RESUMEN

En este capítulo se incluyen datos sobre algunas características de la balsa y de ciertos ensayos realizados por el IGME para apoyo a los estudios de los peritos judiciales sobre los mecanismos que dieron lugar a la ruptura. Se trata de un estudio de las deformaciones del deslizamiento y de una serie de ensayos de permeabilidad en sondeos en las margas sobre las que se apoya la balsa.

Palabras clave: Balsa de lodos mineros, Permeabilidad, Margas, Deslizamiento, Aznalcóllar.

## ***Contributions to the study of the Aznalcóllar tailings mud basin failure***

### ABSTRACT

*This chapter contains data on the tailings pond characteristics, and some tests carried out by the IGME to support the studies of the Court's specialists on the mechanisms leading to the failure are contributed. They consist of a study of the land deformation associated to the sliding and a series a permeability tests carried out in boreholes drilled in the marls on which the tailings pond rests.*

*Key words: Mine tailingsdam, Permeability, Marls, Sliding, Aznalcóllar.*

## INTRODUCCIÓN

*E. Custodio*

La ruptura de la propia balsa, aparte de las implicaciones de responsabilidades y daños legales, que son objeto de otras instancias, presenta aspectos de estudio y conocimiento de gran interés en cuanto a las causas y mecanismos de dicha ruptura, en cuanto a la mejor forma de clausura y sellado, y en cuanto a la prevención de futuros accidentes en balsas de lodos mineros de gran tamaño.

La caracterización de detalle de las condiciones previas de lo sucedido y de la evolución posterior es el resultado de un complejo conjunto de estudios, observaciones, mediciones y cálculos, engarzados por unas hipótesis fundamentadas

en principios geotécnicos básicos, teniendo en cuenta situaciones que en ocasiones son extremas, por las cargas impuestas, por la rapidez de las variaciones de las presiones intersticiales y por la naturaleza de los materiales de soporte. Esto es lo que han hecho los diversos expertos que han emitido sus informes y dictámenes. Como algunos de ellos aún se encuentran bajo secreto de sumario judicial, y por lo tanto no son conocidos, no se entra aquí en ninguna valoración del proceso de ruptura. El contenido de este capítulo se limita a comentar algunos estudios puntuales del IGME como apoyo a los trabajos que han realizado los peritos judiciales, en sus aspectos científico-técnicos.

El subcapítulo 12.1 expone, de forma muy general, aspectos concernientes a la ubicación geológica de la balsa de lodos accidentada, datos rela-

tivos a su superficie, configuración y finalmente una somera descripción de los elementos constructivos del dique.

El subcapítulo 12.2 trata aspectos geométricos y cinemáticos de las estructuras de deformación observadas en calicatas efectuadas en la porción deslizada del dique de la balsa.

El subcapítulo 12.3 aporta los resultados de ensayos de permeabilidad realizados en sondeos en las margas sobre las que se apoya la balsa de Aznalcóllar, directamente o a través de terrazas aluviales del Guadiamar.

Además de los problemas que la balsa ha ocasionado por su rotura están los debidos a filtraciones de aguas ácidas, que afectan a las terrazas aluviales del río Agrio y al propio río. Aunque la existencia de estas filtraciones es conocida, no se dispone de estudios específicos de detalle sobre las mismas ni de previsiones de su evolución tras la clausura. Por esta razón no se incluye un subcapítulo sobre este tema, aunque estuvo inicialmente previsto. Para la captación de las fugas de aguas ácidas se disponía de una serie de pozos de bombeo en las terrazas fluviales sobre las que se apoya en parte. Su situación era a lo largo del lado de la balsa contiguo al río Agrio. En la actualidad se ha instalado una pantalla periférica de cemento-bentonita, desde el nivel freático en aguas altas hasta penetrar en las margas subyacentes. Para solucionar problemas de alteración por aguas que pueden llegar a tener un pH 3, se ha añadido una geomembrana de polietileno de alta densidad. Los pozos antes mencionados extraen el agua retenida y la envían a la estación de tratamiento. Tras el cierre de las actividades mineras en el proyecto de clausura de la Propiedad se menciona la posible instalación de un tratamiento pasivo mediante barreras reactivas en brechas en la pantalla, aunque no se dispone ni de ensayos, ni de cálculos, ni de diseño, y su viabilidad es problemática.

### 12.1. El depósito de lodos de Aznalcóllar

*J. Gómez de las Heras*

El complejo industrial de la empresa Boliden Apirsa S.L., en Aznalcóllar, se ubica al sur de la

actual explotación "Corta Los Frailes", junto a la carretera comarcal que une los núcleos urbanos de Aznalcóllar y Gerena. Este complejo lo constituyen básicamente las dependencias técnico-administrativas de la mina, la planta de tratamiento del mineral, la planta de tratamiento y neutralización de aguas, y finalmente el depósito de lodos (fig. 12.1).

Según datos de un catálogo de 1979 de Andalucía de Piritas (APIRSA), las instalaciones son comunes a los dos tipos de minerales existentes (pirita compleja con Cu, Pb, Zn, y piroclasto cuprífero con Cu y Zn), mientras que las de molienda y flotación son líneas independientes. Para liberar las especies a recuperar se requería moler la pirita compleja a  $K_{80} = 20 \mu\text{m}$  y el piroclasto cuprífero a  $K_{80} = 150 \mu\text{m}$  y luego llevar las especies metálicas separadas a  $K_{80} = 20 \mu\text{m}$ , de acuerdo con que la gama de tamaños de grano más abundantes en el conjunto de los sulfuros es de 15 a 20  $\mu\text{m}$  (Cazorla, 1991).

El depósito (balsa) de lodos de Aznalcóllar, proyectado en 1978, comenzó a ser utilizado en el año 1979. Tiene una superficie de unas 200 ha, forma groseramente rectangular (2000 m x 1000 m; en realidad es un exágono irregular) y una capacidad final proyectada de 32,6 hm<sup>3</sup>. Su vaso está dividido en dos grandes subdepósitos por un espigón de dirección Este-Oeste, 750 m de longitud y entre 25 y 30 m de anchura. En el subdepósito situado más al Norte (de lodos de piroclastos: 1250 m x 1000 m) se depositaban los residuos resultantes del tratamiento de la zona de piroclastos cupríferos, explotada a techo del yacimiento. En el otro (de lodos de piritas: 650 m x 600 m), situado al Sur del anterior y separado del mismo por el citado espigón, los residuos depositados procedían de la molienda y flotación de sulfuros masivos.

El depósito está cerrado al Norte, Sur y Este por un dique de forma trapezoidal, y al Oeste por una ladera natural. Se asienta sobre una terraza fluvial de la margen derecha del río Agrio y una formación margosa de edad Tortoniense, conocida como "margas azules del Guadalquivir" (ver el capítulo 3). Geológicamente el depósito se ubica en una zona erosionada en las margas y cubierta por formaciones Cuaternarias. Las margas cons-

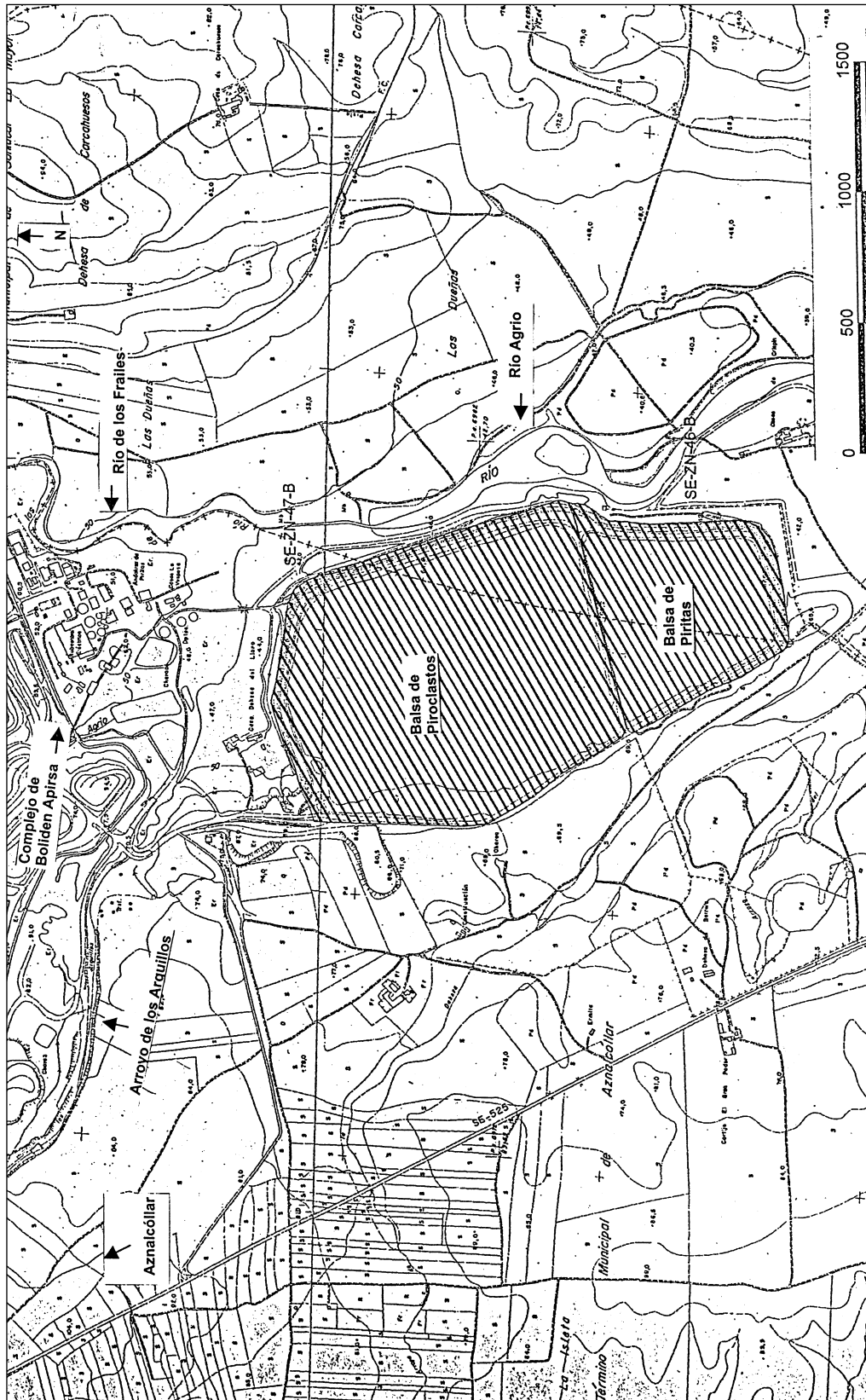


Figura 12.1.- Complejo minero de Boliden-Apirsa S.L. y balsa de lodos mineros.

tituyen parte de la Depresión Terciaria marina del valle del Guadalquivir, localizada entre el zócalo Hercínico del Macizo Ibérico (Sierra Morena) al Norte, y las Cordilleras Béticas al Sur.

Las margas azules, con baja a muy baja permeabilidad, son arcillas fuertemente preconsolidadas, ricas en carbonatos, fisuradas y de elevada plasticidad. Presentan un diaclasado subvertical sistemático y textura laminar asociada a la estratificación. Las formaciones Cuaternarias, de espesores métricos, discontinuas y depositadas a diferentes cotas, son el resultado del encajonamiento progresivo de la red hidrográfica en la cuenca sedimentaria Terciaria (ver el capítulo 3).

La construcción del depósito se llevó a cabo en diferentes etapas de recrecimiento del dique a lo largo de los veinte últimos años (1978-1997), según las necesidades operativas de la explotación, y su llenado fue paralelo al recrecimiento. En el momento de la rotura el dique tenía una altura máxima de 27 m y su anchura en coronación variaba entre 10 y 30 m (Botín y Ramírez Oyanguren, 1999).

Sus elementos constructivos se describen a continuación. El espaldón, que está compuesto por materiales estériles sin clasificación ("todo uno") procedentes del desmonte de la Corta Aznalcóllar (esquistos paleozoicos). En el lado interior el espaldón se recubría con una pantalla impermeable de raña roja (coluvión impermeable). Entre ambos, espaldón y raña roja, existía un filtro de arena. El último elemento lo conformaba una

pantalla perimetral de bentonita-cemento bajo el dique, que atravesaba la formación aluvial y penetraba 1,5 m en la formación de margas azules. Su finalidad era la de prevenir las filtraciones de aguas ácidas hacia el exterior (fig. 12.2).

La figura 12.3 muestra el aspecto general de la ruptura del dique de la balsa y su salida hacia el cauce del río Agrio. La figura 12.4 es un detalle de la ruptura.

### 12.2. Aspectos geométricos y cinemáticos de las estructuras de deformación observadas en las calicatas en el área de la rotura de la balsa de lodos de Aznalcóllar.

*P. Gumiel*

El análisis detallado de las calicatas que se realizaron cerca de la zona de rotura de la balsa de lodos de Aznalcóllar (e.g. calicatas CATA 1 y CATA 3, figura 12.5, A) ha puesto de manifiesto la existencia de una serie de estructuras de deformación compresivas y extensivas. Estas estructuras son el resultado del desplazamiento de un tramo del muro del sector suroriental de la balsa de 700 m de longitud, interviniendo el substrato margoso (Tortonense-Mioceno Superior) en dicho desplazamiento, y cuya magnitud fue de hasta 60 m en la horizontal (Botín y Ramírez Oyanguren, 1999).

La toma sistemática de datos estructurales en las calicatas se ha realizado mediante la observación

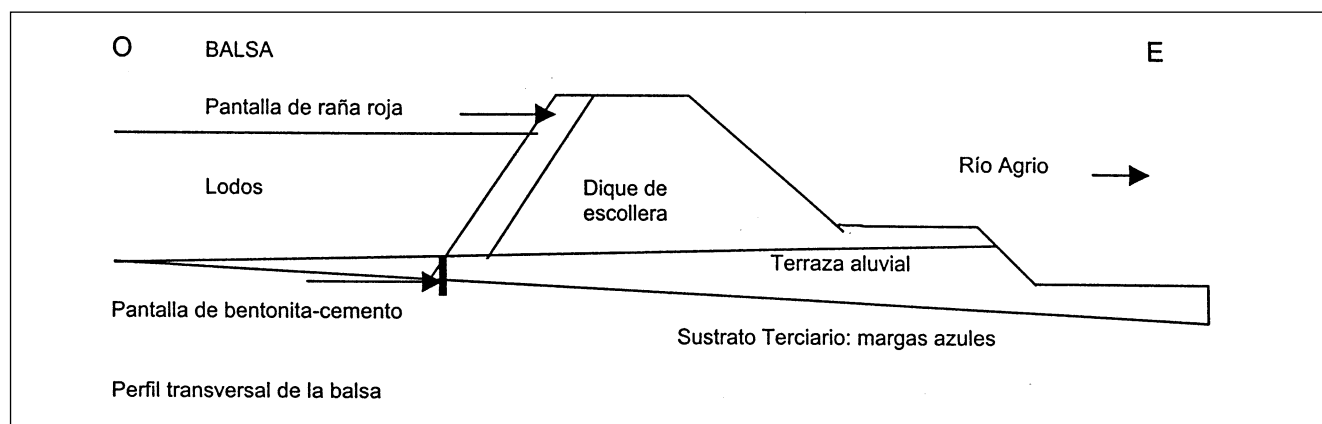


Figura 12.2.- Esquema constructivo de la balsa de lodos mineros.



Figura 12.3.- Vista aérea de la ruptura del dique de la balsa y de los materiales vertidos hacia el cauce del río Agrio. Se aprecia el espigón de separación entre la balsa de piroclastos (lado izquierdo) y la de sulfuros (lado derecho).



Figura 12.4.- Detalle de la zona de ruptura del dique de la balsa de lodos.

detallada de las paredes de las mismas, con la ayuda de fotografías seriadas (figura 12.5, B). Se han utilizado técnicas de representación estereográfica de elementos estructurales (orientación espacial de fracturas y cabalgamientos; figura 12.6), junto con el registro de parámetros geométricos, tales como aperturas de las fracturas y espaciados interfracturas. El análisis de las distribuciones de estos parámetros se ha realizado mediante procedimientos de estadística esférica. Además se reconocieron las distintas unidades litológicas que afloraban en las calicatas, incluidas las margas gris-azuladas.

Las estructuras compresivas que se reconocieron son fallas inversas y cabalgamientos de bajo ángulo, de orientación principal N-S (figuras 12.5, B y 12.6, A / B), y que sitúan a las margas infra-yacentes del aluvial por encima de las gravas del mismo en varias zonas. Los planos de cabalgamiento son principalmente subhorizontales; a veces se presentan paralelos a los planos de estratificación ("flats"), o cortándolos con buzamientos hacia el Oeste ("ramps"). Estos planos se verticalizan según progresan hacia el Este, dando lugar a escamas imbricadas, estructuras en duplex compresionales y rampas frontales de mayor ángulo (figura 12.5, B). Acompañando a estas estructuras se observan pliegues de propagación, con un sentido de desplazamiento (vergencia) hacia el Este (figura 12.5, B -CATA 3-).

Las estructuras extensivas se presentan como grietas de extensión o como fallas de extensión con desplazamientos centimétricos. Se discriminan muy bien fracturas de orientaciones principales NNO-SSE y fallas normales, generalmente conjugadas, con buzamientos verticalizados hacia el NE y hacia el SO (figura 12.6, C / D).

La distribución de los planos de estratificación (en "guirnaldas") refleja que están plegados, mostrando una complicada geometría que obedece a los pliegues de propagación, relacionados con los frentes de cabalgamientos (desarrollo de "stacks antiformales", figura 12.5, B -CATA 3-). La complejidad geométrica se manifiesta también por la rotación de bloques, la verticalización de los planos de estratificación y los cambios en el sentido de buzamiento de los mismos (e.g. CATA 3, figura 12.5, B).

Por otra parte, en las margas del Tortonense se han reconocido algunas cizallas de bajo ángulo y sus conjugadas. Se trata de cizallas subhorizontales, con orientaciones próximas a N-S y planos de buzamiento hacia el Este y Oeste. El ángulo agudo que forma la intersección de estos planos de cizalla indica un sentido de acortamiento ( $\sigma$ , horizontal) de dirección aproximada O-E.

En el estudio geométrico de los sistemas de fractura intersectados en las calicatas se han empleado

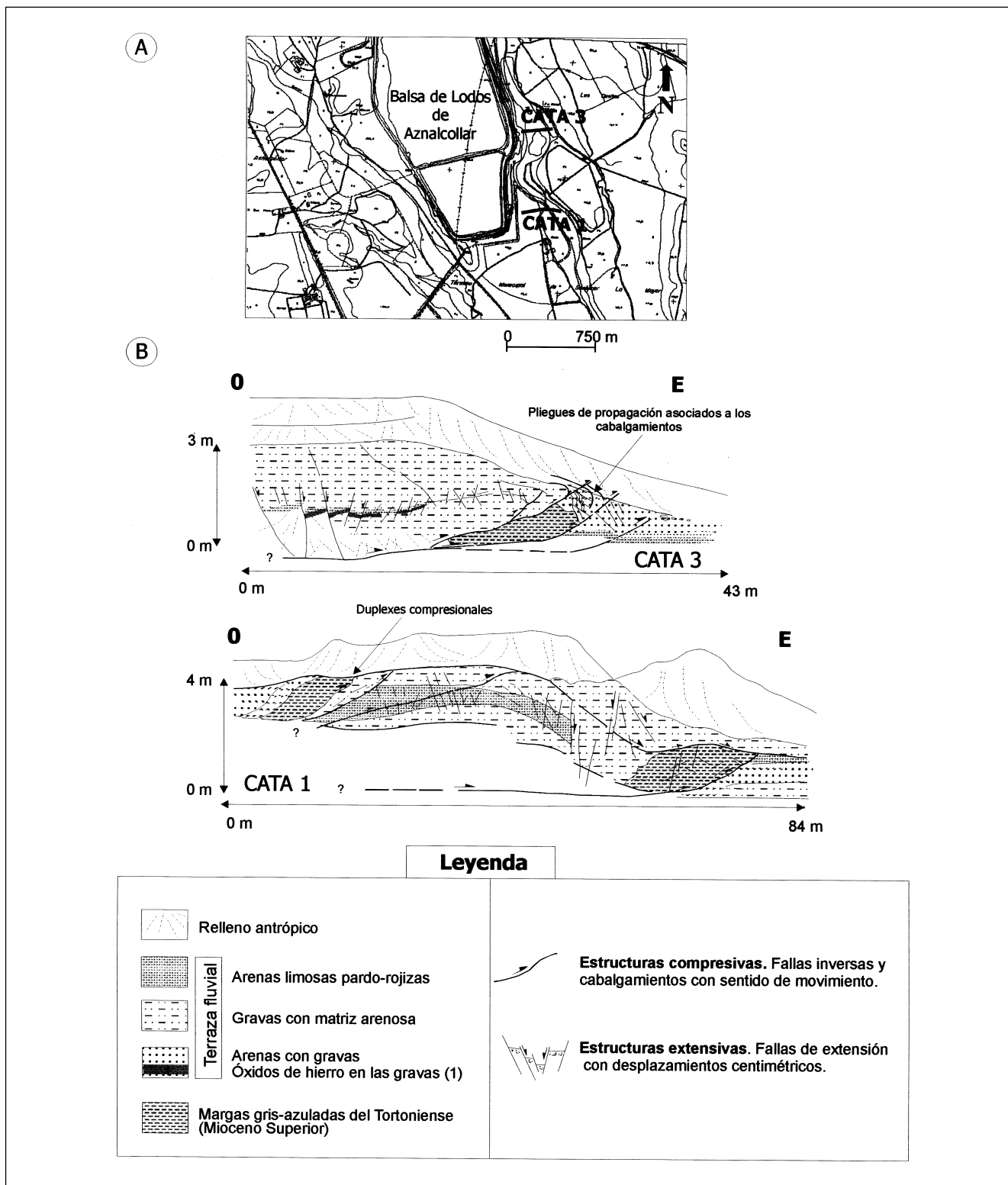


Figura 12.5.- A) Situación de las calicatas (CATA 1 y CATA 3) exteriores a la zona de rotura de la balsa de lodos de la Mina de Aznalcóllar. B) Levantamiento geológico-estructural de ambas calicatas, con indicación de las estructuras de deformación compresivas y extensivas observadas.

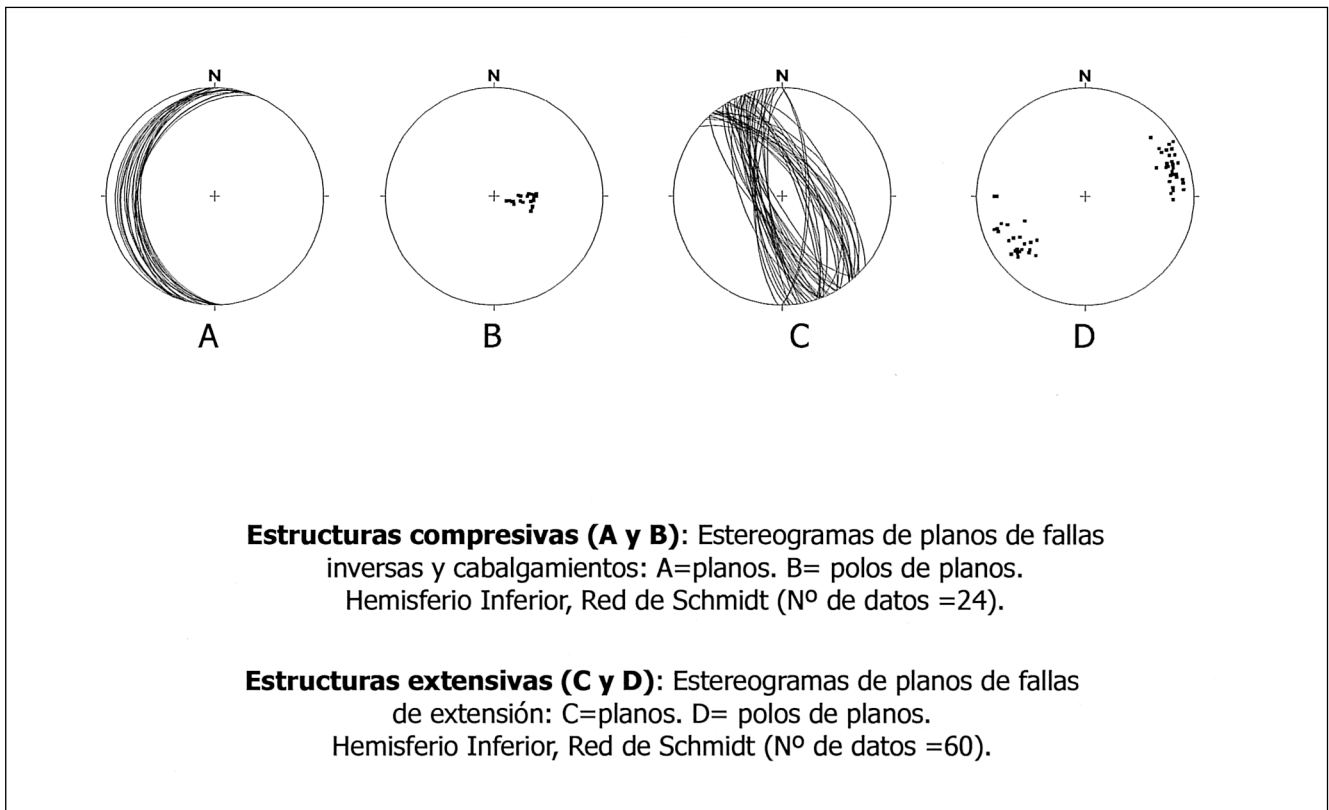


Figura 12.6.- Diagramas estructurales: representación estereográfica de estructuras compresivas y extensivas.

técnicas de análisis fractal, siguiendo los trabajos de Gumiel et al. (1992), Sanderson et al. (1994), Gumiel et al. (1995), Roberts et al. (1999). Se han medido sistemáticamente las aperturas de todas las fracturas observadas en cada calicata, así como su orientación y la longitud del espaciado interfracturas.

Se ha comprobado que en muchos sistemas de fracturas naturales la apertura de las mismas sigue distribuciones hiperbólicas, que pueden ser interpretadas en términos de escalado fractal autoafín, según la siguiente ecuación:  $N_t \propto C t^{-D}$ , donde  $N_t$  es el número de fracturas con apertura  $\geq t$ ,  $C$  representa la frecuencia de fracturas en que la apertura  $\geq 1$ mm, y el exponente  $D$  es la dimensión fractal de la distribución.  $D$  se obtiene mediante ajuste de la ecuación anterior a los datos experimentales. Se han generado diagramas

mas  $\log(N) - \log(\text{apertura})$  (figura 12.7, 1) y  $\log(N) - \log(\text{espaciado})$  (figura 12.7, 2), siendo  $N$  la frecuencia acumulada del número de fracturas. También se han realizado diagramas de frecuencia acumulada de aperturas (%) versus apertura (figura 12.7, 3), para ver a qué tipo de distribuciones se ajustan las aperturas y espaciados interfracturas en las calicatas.

A su vez la figura 12.7, 3 consta de 4 diagramas. Los diagramas [a] y [b] representan la proyección de la frecuencia acumulada de las aperturas (en %), en una escala normal, versus la apertura en mm [a], y el log-apertura [b]; se debe producir una línea recta de ajuste si la distribución es normal [a] o lognormal [b], respectivamente. Si se proyectan estos mismos datos, pero con la frecuencia acumulada en escala logarítmica, frente a la apertura, en una escala lineal [c] o logarít-

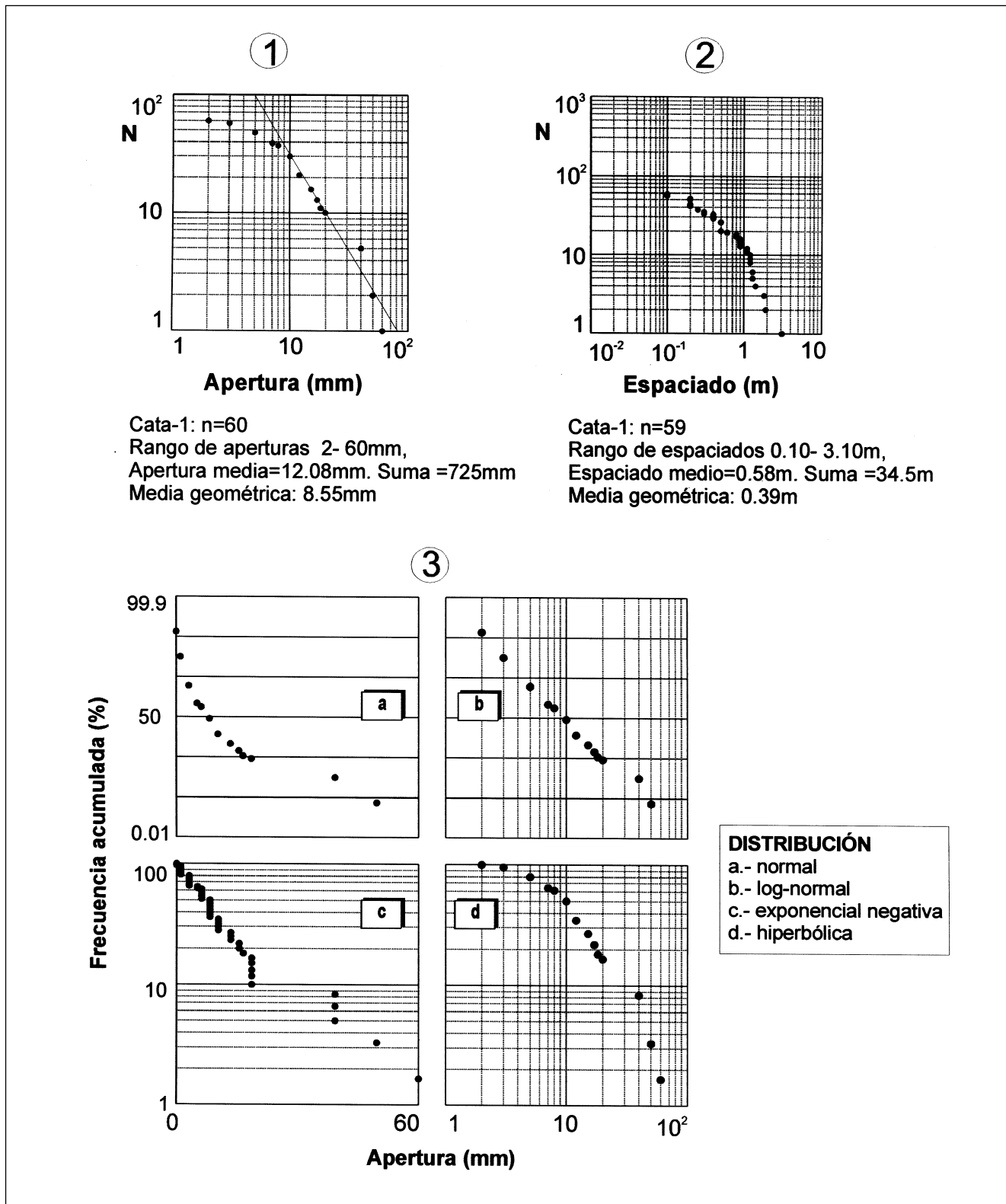


Figura 12.7.- Diagramas en distribución de aperturas, espaciados y frecuencia acumulada de aperturas (en %) versus apertura, de las fracturas de extensión medidas en la CATA 1 (véase la explicación en el texto).



mica [d], se producirá una línea recta si la distribución es exponencial negativa [c] o hiperbólica-fractal- [d], sujeto a efectos de truncación, lo que generalmente se traduce en la falta de datos de aquellas aperturas muy pequeñas. Este efecto suele suceder por debajo de 5 mm en la CATA 1. La longitud finita de las transversales introduce otro efecto de límite superior ("supresión") en aquellos valores grandes (aperturas grandes) cuya probabilidad de muestreo es baja. Los efectos de supresión y truncación han sido corregidos utilizando los métodos desarrollados por Pickering et al. (1995).

Como resultado del análisis llevado a cabo se ha puesto de manifiesto que las distribuciones de espaciados interfracturas son de tendencia exponencial negativa, lo que probablemente implica una componente aleatoria en las propiedades de escalado debidas al espaciado. Por el contrario, la distribución de aperturas de fracturas parece que es lognormal (figura 12.7, 3b), lo que implicaría que una determinada apertura interviene mayoritariamente en las propiedades de escalado (coincide con la media geométrica, que vale 8,55 mm), o bien es fractal (invariante al cambio de escala) en un rango comprendido entre 8 y 50 mm (figura 12.7,1). Estos resultados son similares a los obtenidos en sistemas naturales de fracturas (Roberts et al., 1999). Por otra parte la invarianza al cambio de escala en la distribución de las fracturas proporciona información muy útil, a partir de una determinada escala (escala mesoscópica en las calicatas), que puede ser correlacionable con lo que sucede a mayor escala (escala macroscópica en toda la balsa).

Para comparar el grado de deformación de las margas del Tortoniense en el área próxima a la zona de rotura de la balsa, con otra zona lejos de la misma, se analizó un afloramiento de dichas margas situado en el río Agrío. En las margas no deformadas se han reconocido algunas estrías de cizallas de bajo ángulo en los planos de estratificación, con buzamientos comprendidos entre 2° y 10° en direcciones N-S y NE-SO. El interés de estas estructuras es que son análogas a las que se han encontrado en las margas en la zona de rotura, lo que significa que en algunas zonas los planos de estratificación han actuado como zonas de debilidad que se reactivan con mayor facilidad. Ante una determinada carga se puede

producir la rotura y el consiguiente deslizamiento a favor de estos planos.

Por otra parte, el estudio sistemático de los sistemas de diaclasado que presentan las margas del Tortoniense en el río Agrío muestra que hay un grupo dominante de diaclasas sistemáticas y planares, con una orientación principal NE-SO (dirección media 28,45°) y buzamiento subvertical, cuya distribución de aperturas es de tipo lognormal, al igual que sucede con la distribución de aperturas de las fracturas observadas en la CATA 1 (figura 12.7,3). Hay otros grupos de menor importancia, de orientación ortogonal a la anterior, a los que pertenecen otras diaclasas de geometría curvada y no sistemáticas. El grupo mayoritario de diaclasas pudo jugar un papel importante en la superficie de rotura, por una parte favoreciendo la meteorización que penetra hasta profundidades de 10-15 m, y por otra, a causa de la conexión de estos planos con otros de debilidad, como son los mencionados planos de estratificación.

En conclusión, los datos obtenidos a partir de las observaciones realizadas sobre las estructuras de deformación existentes en las calicatas apuntan a considerar el siguiente modelo sobre el mecanismo de funcionamiento del deslizamiento. Es posible que la rotura se iniciara como consecuencia del deslizamiento de la pared de la balsa a favor de una zona de fallas de extensión, originada por el debilitamiento producido por la interacción de las diaclasas subverticales, algún plano de estratificación y las margas alteradas. La propagación de la rotura se produjo según múltiples zonas de debilidad, como por ejemplo los planos de estratificación en formaciones con marcado contraste litológico, y provocando un importante desplazamiento de materiales a favor de una zona de despegue subhorizontal ("detachment"). La deformación se fue acomodando de forma progresiva a través de desplazamientos de tipo tangencial, según cabalgamientos subhorizontales ("flats") y rampas frontales más verticalizadas. El arrastre de los materiales condujo a la formación de pliegues de propagación que se fueron disipando hasta amortiguarse la deformación.

La profundidad de la "zona de despegue" principal no se puede establecer con precisión tan sólo

a partir de las observaciones de las calicatas, debido a su situación y cota topográfica. No obstante, de forma aproximada se puede estimar en torno a los 15 metros, que es la profundidad que alcanza la meteorización. Las características geométricas de las estructuras de deformación observadas en las calicatas (cabalgamientos subhorizontales y fallas de extensión, figura 12.5, B) deben ser análogas a las del despegue principal, con el que probablemente conectarán en profundidad a una determinada cota. Finalmente, y aunque no es el objetivo de este trabajo, conviene mencionar que las posibles causas del deslizamiento hay que buscarlas en las sobrecargas impuestas y en la rapidez de las variaciones de las presiones intersticiales en los materiales de soporte que favorecieron la deformabilidad del conjunto y la consiguiente rotura.

### 12.3. Ensayos de permeabilidad en sondeos en la balsa de Aznalcóllar

*J. Grima*

La caracterización hidrogeológica de formaciones de baja permeabilidad precisa del desarrollo de una metodología de caracterización y una instrumentación específica acorde con las características físicas e hidráulicas de este tipo de formaciones. Para ello, en el marco de un acuerdo específico firmado con la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA), el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) realizó el diseño y construcción de la Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica (U.M.H.) de formaciones de baja permeabilidad. Su objetivo (Grima et al., 1998) es la caracterización de medios de baja permeabilidad mediante la adquisición de los parámetros hidráulicos obtenidos mediante ensayos hidráulicos, la identificación de zonas de fracturas permeables y la caracterización de las mismas, y la toma de muestras de agua en secciones aisladas.

Se han realizado ensayos de permeabilidad en tres sondeos situados en el dique de la propia balsa de lodos de Aznalcóllar. Los materiales de la formación ensayada corresponden a margas con intercalaciones arenosas, de edad miocena. Las coordenadas y la cota de la boca de los sondeos se incluyen en la tabla 12.1.

<i>Identificación</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>Profundidad (m)</i>
<i>Azp1</i>	215024,2	4154146,6	54,5	32,80
<i>Azp3</i>	215082,5	4154150,4	45,1	24,81
<i>Azp4</i>	215060,2	4154303,0	52,6	33,90

Tabla 12.1.- Localización de los tres sondeos ensayados (coordenadas UTM).

Los intervalos ensayados tienen una longitud comprendida entre 0,90 y 3,13 metros, en función de la profundidad del sondeo en el momento de la realización del ensayo y de la profundidad de la zona saturada. Los ensayos realizados son fundamentalmente de tipo "slug" (Kruseman y de Ridder, 1991), y han sido complementados con la realización de ensayos de inyección a nivel constante. El dispositivo empleado incluye un solo obturador debido a la reducida longitud de la sección de ensayo disponible en la mayoría de los casos, por lo que se ha ensayado desde la zona de ubicación del obturador hasta el fondo (López Geta et al., 1994). El dispositivo de ensayo se encuentra esquematizado en la figura 12.8.

La respuesta transitoria de presión obtenida durante la realización de cada ensayo ha sido analizada mediante la utilización de técnicas de ajuste de los datos a curvas tipo. Todos los ensayos han sido analizados utilizando las técnicas existentes y soportes lógicos de análisis de los ensayos hidráulicos (Carbonell y Carrera, 1994). El resumen de los resultados obtenidos se refleja en la tabla 12.2. En la figura 12.9 se muestra un ejemplo de ajuste de uno de los ensayos.

La testificación hidráulica proporciona valores medios de conductividad hidráulica del intervalo ensayado, incluyendo las zonas fracturadas. Los efectos de almacenamiento y skin (piel) pueden alterar la respuesta transitoria de presiones en el pozo activo durante la testificación. El efecto piel refleja todos los factores que pueden afectar a la interacción hidráulica entre el sondeo y la roca circundante, y se encuentra normalmente presente en todos los ensayos de testificación hidráulica, tanto durante el bombeo o inyección como durante la recuperación. Se caracteriza por el factor piel, que representa el área efectiva de

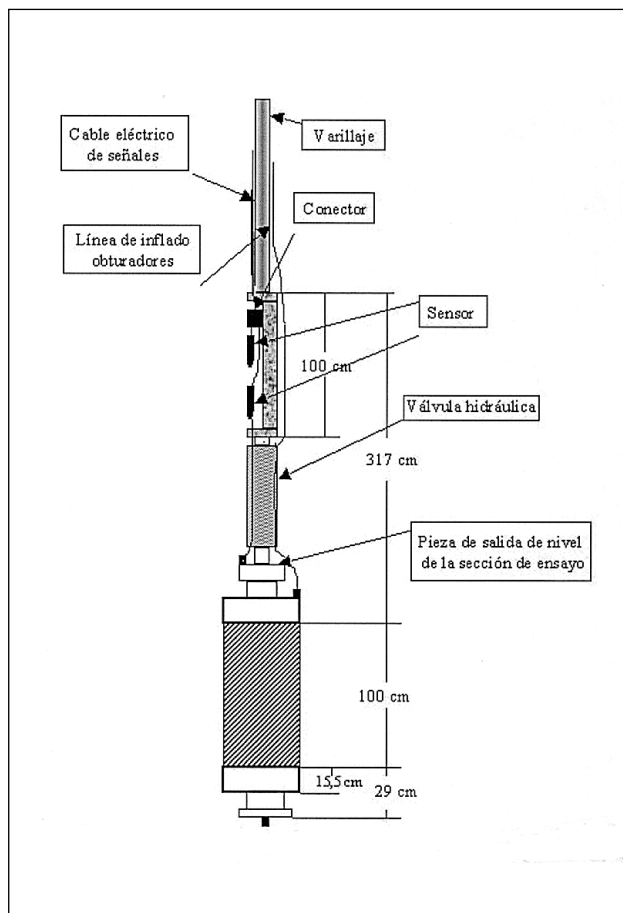


Figura 12.8.- Dispositivo de ensayo de testificación hidráulica.

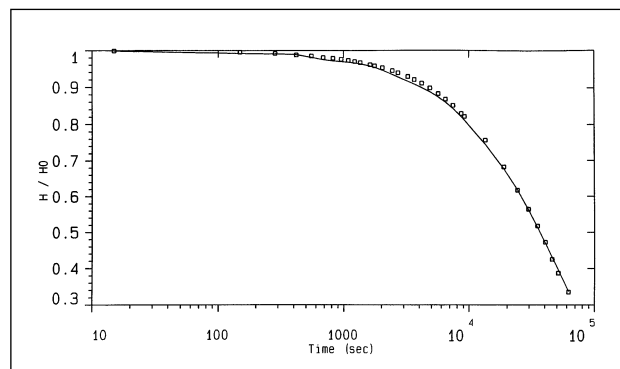


Figura 12.9.- Ejemplo de ajuste de un ensayo hidráulico. Se trata de un ensayo en margas entre 22,0 y 24,8 m de profundidad, en un sondeo de 190 mm de diámetro. La interpretación mediante el modelo de Cooper proporciona: transmisividad  $T = 1,69 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-2}$ ; conductividad hidráulica  $K = 6,04 \cdot 10^{-9}$ ; coeficiente de almacenamiento  $S = 1,72 \cdot 10^{-5}$ ; coeficiente de almacenamiento específico  $= 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ ;  $H/H_o$  representa la fracción de cambio piezométrico  $H$  respecto al pulso inicial  $H_o$ .

terreno conectada al sondeo. En general estos factores incluyen alteración de la conductividad hidráulica de la formación en las proximidades del sondeo debido a la perforación, penetración parcial, desviación del sondeo y efectos de flujo turbulento. Este hecho, sumado a que este tipo de ensayos proporciona valores de carácter puntual ya que afectan a un volumen muy pequeño de la formación, y a que las formaciones arcillo-

Sondeo	Ensayo	Intervalo ensayado (m)	Longitud de la sección de ensayo (m)	$K \text{ m s}^{-1}$	$S_s \text{ (m}^{-1}\text{)}$	Notas
AZP 1	I1	21-23	2	$4,52 \cdot 10^{-8}$	---	Buena estabilización. Estado cuasiestacionario
	S1	21-23	2	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	Datos iniciales afectados por descensos anómalos de presión. Luego se ajustan correctamente a la curva patrón
	S2	29,67-32,8	3,13	$4,79 \cdot 10^{-8}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	Oscilaciones del sistema de adquisición de datos. No afectan a la interpretación.
	S5	29,67-32,8	3,13	$3,85 \cdot 10^{-9}$	$9,58 \cdot 10^{-6}$	No se completa la recuperación; los datos deben ser tomados con precaución.
AZP 3	S3	22-24,81	2,81	$6,04 \cdot 10^{-9}$	$6,15 \cdot 10^{-6}$	Buen ajuste
AZP 4	S1	33-33,9	0,9	$2,72 \cdot 10^{-8}$	$3,46 \cdot 10^{-5}$	Buen ajuste

I = inyección      S = Slug      Ss = coef. almacen./b

Tabla 12.2.- Resumen de resultados de los ensayos hidráulicos en sondeos realizados en la balsa de lodos de Aznalcóllar.  $K$  es la permeabilidad y  $S_s$  es el coeficiente de almacenamiento específico (coeficiente de almacenamiento dividido por la longitud del tramo ensayado).

sas tienen una elevada variabilidad en sus propiedades, aconseja tomar los resultados con prudencia, por lo que los valores obtenidos deben tomarse como indicativos.

No puede establecerse una correlación sencilla entre los valores de conductividad hidráulica obtenidos mediante ensayos realizados en laboratorio sobre muestras de testigo inalterado y los ensayos de campo. Por tanto, ambos deben considerarse como una parte más del proceso mediante el cual se realiza un modelo matemático que integra los resultados obtenidos en las diferentes etapas de la investigación y que representan volúmenes diferentes de medio. Esta correlación podrá analizarse una vez que los datos del laboratorio sean públicos.

#### REFERENCIAS

- Cazorla, J.A. (1991). Beneficio del yacimiento de "Los Frailes". Simp. Los Sulfuros Complejos del Suroeste de España. Club Español de la Minería. Madrid: 153-168.
- Botín, J.A.; Ramírez Oyanguren, P. (1999): Mecanismo de rotura del depósito de estériles de la mina de Aznalcóllar. *Industria y Minería*, Madrid. 335: 25-32.
- Carbonell, J.A.; Carrera, J. (1994). Manual del usuario de María J, programa para interpretación automática de ensayos de bombeo. ETSICCP. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Grima Olmedo, J.; Mejías Moreno, M.; Martínez Navarrete, C.; Gómez López, J.A. (1998) Aplicaciones de la investigación hidrogeológica de formaciones de baja permeabilidad. *X Congreso Internacional de Minería y Metalurgia*. Valencia. 1: 219-234
- Gumiel, P.; Campos, R.; Sanderson, D.J.; Robert, S. (1995): Geometría y fractalidad de los sistemas filonianos de la mina de La Parrilla (Cáceres): conectividad y percolación. *Boletín Geológico y Minero*.106-4: 16-37.
- Gumiel, P.; Sanderson, D.J.; Roberts, S.; Campos, R. (1992): El uso del análisis fractal como discriminación de sistemas filonianos auríferos en el área de La Codosera, Extremadura (España). *Geogaceta*, 12:3-7.
- Kruseman, G.P.; de Ridder, N.A. (1991). Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). Pub. 47. Wageningen.
- López Geta, J.A.; Grima Olmedo, J.; Martínez Navarrete, C. (1994). Borehole testing and test interpretation in the San Pedro Clay Formation. International Workshop about Hydraulic and Hydrochemical Characterisation of Argillaceous Rocks. Session III: Hydraulic Testing. Nottingham, United Kingdom: 195-212
- Pickering, G.; Bull, J.M.; Sanderson, D.J. (1995). Sampling power-law distributions. *Tectonophysics*, 248: 1-20.
- Roberts, S.; Sanderson, D.J.; Gumiel, P. (1999). Fractal analysis and percolation properties of veins. En: *Fractures, Fluid, Flow and Mineralization*. MacCaffrey, K.J.W.; Lonergan, L.; Wilkinson, J.J.; Eds. *Geol. Soc. London, Spec. Pub.*, 155: 7-16
- Sanderson, D.J.; Roberts, S.; Gumiel, P. (1994). A fractal relationship between vein thickness and gold grade in drill-core from La Codosera, Spain. *Economic Geology*, 89: 168-173.