

## **APLICACIÓN DEL PROBLEMA INVERSO EN LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y EL TRANSPORTE DE SOLUTOS EN MODELOS DISCRETOS DE FRACTURAS**

**Luis Vives<sup>1,2</sup>, Xavier Sánchez-Vila<sup>2</sup>, Eduardo Ruiz<sup>3</sup>, Jesús Carrera<sup>2</sup>;  
Francisco Javier Elorza<sup>4</sup>; Carmen Bajos<sup>5</sup>; Antonio Vela Guzmán<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, Provincia de Buenos Aires,  
República de Italia 780, 7300 Azul, Argentina  
e-mail: lvives@faa.unicen.edu.ar, web page: <http://www.ihlla.com.ar>

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona

<sup>3</sup> Enviro, Valldoreix, Barcelona

<sup>4</sup> Dpto. Matemática Aplicada y Métodos Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid

<sup>5</sup> ENRESA, Empresa Nacional de Residuos, S. A., Madrid

<sup>6</sup> CSN, Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid

**Palabras claves.** hidrogeología, medios fracturados de poca permeabilidad, simulación de flujo y transporte, problema inverso, modelos discretos de fracturas.

**Resumen.** *El presente trabajo presenta las implementaciones del problema inverso en las simulaciones de flujo de aguas subterráneas y del transporte de solutos en modelos de fracturas discretas (MDF). Este desarrollo se realizó dentro del Marco de los proyectos HIDROBAP (Hidrogeología en medios de baja permeabilidad), financiado conjuntamente por la Empresa de Residuos Radiactivos (ENRESA) y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), ambos de España. Estos proyectos tienen como objetivo el desarrollar y evaluar una metodología de simulación hidrogeológica en este tipo de medios destinados a ser utilizado en el análisis de seguridad de almacenamientos geológicos profundos en rocas fracturadas. Esta investigación se ha llevado a cabo utilizando los ensayos hidráulicos de interferencia y de trazadores realizados en el batolito de El Berrocal (Toledo, España).*

## 1 INTRODUCCIÓN

A la hora del establecimiento de un almacenamiento subterráneo de residuos radiactivos, las rocas duras presentan, en general, un buen comportamiento mecánico, térmico y geoquímico. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes, como la presencia de discontinuidades estructurales/fracturas (fallas, diaclasas y juntas), que interconectadas pueden crear caminos preferenciales para el flujo del agua y el transporte de radionucleidos desde el repositorio hacia la biosfera. Además, el carácter discreto, pero presente a múltiples escalas, de estas singularidades estructurales puede dificultar considerablemente la caracterización del medio que alojase el citado almacenamiento de residuos.

El enfoque de considerar los macizos fracturados como bloques de roca separados por discontinuidades, conducen a la idea que los modelos de fracturas discretas (MFD) son una aproximación muy atractiva para representarlos. Estos modelos permiten tener en consideración que las discontinuidades tienen lugar en una gran variedad de escalas y que sus geometrías y propiedades hidráulicas pueden variar con su localización y con su dirección. Como, además, el conocimiento de las características hidrogeológicas individuales de cada fractura in situ será muy limitado, al igual que sus características geométricas, este problema suele normalmente abordarse mediante modelos estocásticos, basados en representaciones probabilísticas de sus propiedades geométricas e hidráulicas.

Los modelos de fracturas discretas tienen su fundamento en la hipótesis de que el comportamiento del flujo hidrogeológico del medio a una cierta escala, puede deducirse del conocimiento de la geometría de las fracturas y de la información acerca de la transmisividad de cada una. La directriz consiste en que los estadísticos espaciales asociados a la red de fracturas, además de su transmisividad, pueden ser estimados, y posteriormente utilizados para realizar generaciones estocásticas de la red de fracturas, con las mismas propiedades estadísticas espaciales. Estos métodos de simulación requieren la elección de una serie de distribuciones estocásticas para: ubicar las fracturas, definir su orientación y longitud y determinar su conductividad hidráulica, con objeto de que se acomoden a lo observado en la realidad. Además, este tipo de modelos considera que el flujo de agua a través de la matriz rocosa es despreciable comparado con el flujo que fluye por las fracturas, basada en esta hipótesis parece razonable representar únicamente las fracturas y analizar el flujo en las mismas. En este enfoque la principal dificultad se encuentra en la definición adecuada de la geometría de la red de fracturas.

En el presente trabajo se describe la implementación del Problema Inverso [1], también llamado Calibración Automática de Parámetros, en los modelos de fracturas discretas y los resultados de su aplicación en el proyecto HIDROBAP. Se comienza con la descripción del proyecto HIDROBAP y su relación con los desarrollos que se presentan en este trabajo, posteriormente se continuo con las simulaciones numéricas realizadas, con un pequeño análisis de las necesidades de condicionar las generaciones de red de fracturas para reducir las incertidumbres.

## 2 PROYECTO HIDROBAP

El objetivo principal de los proyectos HIDROBAP I y II es desarrollar, aplicar y evaluar una metodología basada en modelos MFD para la caracterización y simulación de los procesos de flujo y transporte en medios geológicos fracturados. Esta metodología debe ser apropiada para la evaluación de la eficacia de depósitos subterráneos de residuos nucleares. La metodología integra información obtenida desde diferentes disciplinas (geología estructural, tectónica, petrología, geoquímica, geometría estocástica e hidrogeología).

El desarrollo de la metodología y su aplicación ha seguido las siguientes fases: Caracterización (muestreo y análisis de los datos geológicos, geoquímicos, petrológicos e hidrogeológicos); Análisis geométrico y simulación de la red de fracturas (construcción y condicionamiento de los modelos de fracturas discretas a los datos disponibles); Simulación estocástica de flujo y transporte (acoplamiento del modelo de generación estocástica de fracturas y del modelo de flujo y transporte); Análisis de incertidumbre y comparación de los distintos modelos; y Redefinición y extensión de los datos de partida, añadiendo toda la información disponible en el área de estudio.

La mayoría de los datos de campo utilizados para desarrollar, calibrar y verificar la metodología de este proyecto fueron obtenidos por ENRESA y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) en el emplazamiento experimental de el macizo granítico de El Berrocal (Nombela, Toledo) [2]. El área de trabajo (Figura 1) es una antigua mina de uranio, que fue estudiada en el proyecto europeo El Berrocal (NI F12W/CT9110080), coordinado por CIEMAT. La información generada por dicho proyecto ha sido posteriormente completada con campañas de recogida en campo de datos tectónicos, petrológicos y emanométricos a la escala del batolito.

Para el empleo de los MDF es necesario disponer de un modelo de la red de fracturas. La construcción de esta red de fracturas puede abordarse desde un marco determinista y identificar una por una todas las fracturas que se estén contemplando. Ahora, en este proyecto se emplea la opción más difundida de tratarla dentro de un marco estocástico, reconociendo una cierta población de fracturas no por sus individuos sino por algunos de sus estadísticos más interesantes. En esta fase de análisis geométrico estocástico se determinó la distribución geométrica estadística de cada familia de fracturas, necesaria para el desarrollo del MFD, específicamente: (a) Ubicación de las fracturas observadas tanto en sondeos como en lineamientos de afloramientos o galerías; (b) Orientación de las fracturas registradas en sondeos, logs, testigos, afloramientos, zanjas o galerías; (c) Longitud de las fracturas medibles en afloramientos o galerías, (d) Tipos de relleno de las fracturas, presencia de agua, evento tectónico asociado, etc.; (e) Porcentaje de fracturas que terminan en otras y tipología de las intersecciones de fracturas, registrado en afloramientos y galerías; (f) Soporte o estructura de la fracturación; y (g) Estimaciones de las transmisividades de las fracturas individuales a partir de ensayos hidráulicos.

En HIDROBAP estas tareas se llevaron a cabo combinando toda la información disponible: información de superficie (1: 10.000 y 1: 2.000) e información de profundidad (S-11, S-12, S-13, S-15, S-16 y la galería de mina). Además, para caracterizar el medio geológico desde un

punto de vista geométrico se asumieron varias hipótesis:

- Se presentan cinco familias de fracturas, que están asociadas con varios eventos tectónicos y, por ello, con diferentes tensores de esfuerzo.
- Las fracturas se consideran como discos pero se simulan como polígonos regulares en 3D.
- Se asume un comportamiento fractal de la red de fracturas, con las consiguientes implicaciones que esto conlleva sobre el patrón de fracturación y la densidad de fracturación. Uno de los resultados del análisis preliminar de la fracturación (realizado a las escalas: 1:2.000, 1: 10.000, 1: 500.000, 1: 1.000.000 y 1: 4.000.000) demostró que existe un modelo de auto-similitud en la representación morfológica de los sistemas fracturados de la Península Ibérica [3].

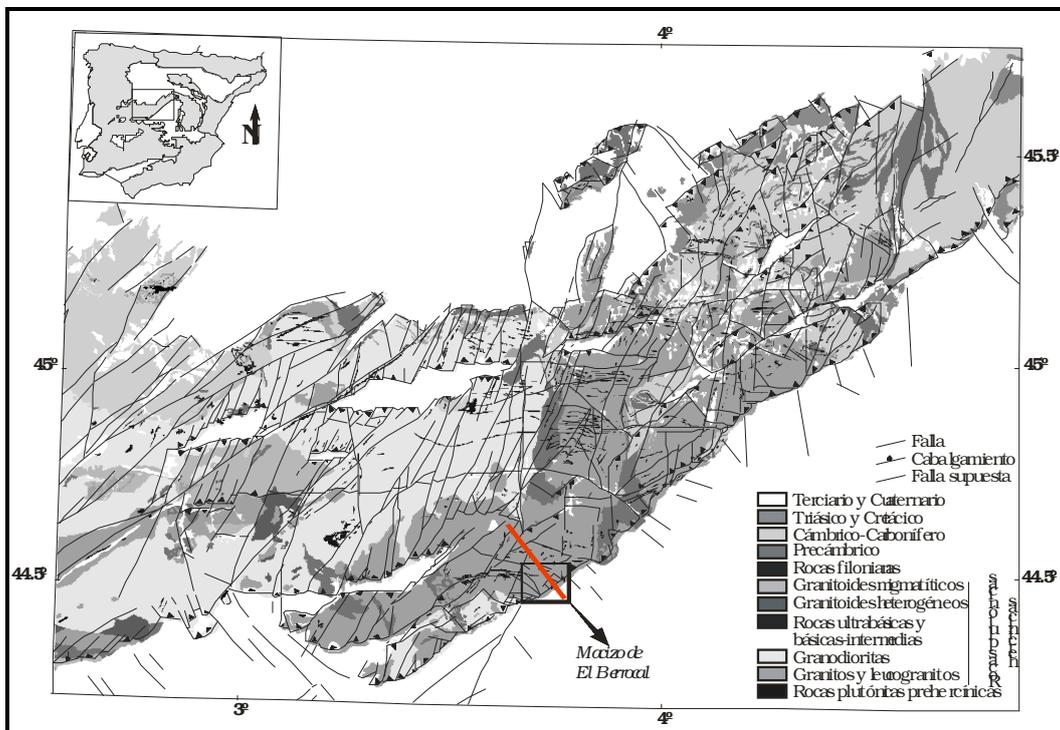


Figura 1. Area de trabajo: El stock granítico de El Berrocal. Síntesis geológica del Sistema.

### 3 SIMULACIÓN DEL FLUJO

El programa MDF empleado como base es el FRACAS [4] que simula el flujo subterráneo con redes de fracturas discretas, ha sido desarrollado en la École Nationale des Mines de París. En general estos modelos intentan describir el medio fracturado a partir de cada una de las fracturas conductivas. Esto lleva consigo tres pasos: (a) generación de fracturas, implica la necesidad de una definición de las características de dichas fracturas (localización, orientación, buzamiento, densidad de fracturación, propiedades hidráulicas, etc.); (b) de tipo geométrico, se corresponde con la construcción de la red de fracturación (seleccionando sólo las fracturas conductivas); y (c) de tipo numérico, se refiere a la solución de las ecuaciones de flujo y transporte en dichas fracturas.

Por otro lado, el código TRANSIN [5] permite resolver y estimar los parámetros de las ecuaciones de flujo subterráneo y transporte de solutos. El programa emplea el método de los elementos finitos para la solución de la ecuación. Estos elementos pueden ser segmentos, triángulos, rectángulos, tetraedros y prismas de base triangular. Es decir, el programa puede trabajar en dominios espaciales unidimensionales, bidimensionales, cuasi-tridimensionales (simetría radial y multicapas) y tridimensionales. El régimen puede ser estacionario, transitorio o estacionario para flujo y transitorio de transporte. La estimación de los parámetros del modelo se hace a través de la minimización de una función objetivo derivada de la Teoría de Máxima Verosimilitud que permite incluir información previa sobre el valor de los parámetros [1]. El programa permite estimar los parámetros de flujo y/o transporte.

El acoplamiento de estos dos códigos se realizó por la necesidad de realizar calibraciones automáticas de parámetros de flujo y transporte en los modelos de redes de fracturas discretas. Por un lado se disponía del código FRACAS que genera redes de fracturas discretas pero no resuelve el Problema Inverso y por otro el código TRANSIN que calibra automáticamente pero no puede generar redes de fracturas. Este acoplamiento se mejoró al implementar: diferentes tipos de condiciones de contorno (por ejemplo, condición de goteo), el régimen transitorio, los puntos de observaciones para incluir medidas observadas necesarias en el proceso de calibración automática de parámetros y la zonificación de las familias de fracturas para poder calibrar por separado cada una de las zonas o familias de fracturas.

### **3.1 Simulación del flujo hidrogeológico**

El código FRACAS simula el flujo subterráneo en régimen estacionario dentro de una red de fracturas discretas. Calcula el flujo entre dos fracturas conductivas interconectadas entre sí, del centro de una fractura al centro de la otra. Otra forma de simular el sistema de fracturas interconectadas será considerar las mismas como un sistema de tubos. Esta modificación en la representación de la red de flujo implica la partición de cada una de las conexiones entre fracturas (tratadas como elementos unidimensionales dentro de TRANSIN) en dos tubos, según se muestra en la Figura 2; esta solución aumenta el número de conexiones y duplica el número de elementos pero permite recuperar el concepto de zonificación de fracturas con el fin de poder asignar propiedades diferentes a cada una de ellas. Este nuevo enfoque ha sido implementado en código TRANSIN [6].

Estas implementaciones han sido comprobadas con algunos ejemplos sintéticos, tanto para la escala local como para la escala regional. Los pasos que se dan para estas comprobaciones consisten básicamente de la siguiente secuencia: a) generación de la red de fracturas, b) análisis de la red conexa y c) simulación del flujo.

Además, en la metodología HIDROBAP los parámetros hidráulicos se calibran; en concreto, el programa TRANSIN estima las transmisividades y los coeficientes de almacenamiento para cada una de las familias direccionales determinadas en la caracterización previa del macizo. De esta forma se asegurara que el modelo consiga reproducir la respuesta observada del acuífero y que además los parámetros estimados sean coherentes con la información previa de los mismos.

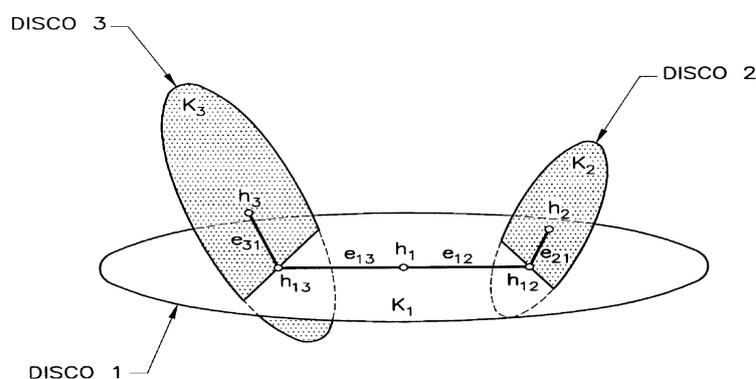


Figura 2: Red conductiva interfracturas propuesta en HIDROBAP

### 3.2 Ejemplo de verificación de la simulación del flujo

El ejemplo empleado para la verificación es un ensayo hidráulico de interferencia entre dos sondeos verticales S14 (250 m) y S18 (233.1 m) separados 14.8 m de distancia. En ambos sondeos se han aislados diferentes tramos de fracturación y se han registrado las variaciones de nivel durante el bombeo en el tramo superior del sondeo S14.

Para esta aplicación se define un dominio de estudio paralelepípedo con el pozo de bombeo situado en el centro. Los tramos observados se simulan explícitamente y se supone que los descensos son casi despreciables (descensos nulos) en los contornos del dominio. El dominio de generación de la red de fracturación es un paralelepípedo rectangular de tamaño (600x600x350 m). La red de fracturación ha sido generada externamente mediante MFD, en la que se incluyeron las familias de fracturación A, B, C, D, E y H (horizontal). La red generada es de 2517 fracturas (ver Tabla 1 y figuras 3.a y 3.b).

Tabla 1. Red de fracturación generada y conductiva resultante.

Familia	Dirección de las fracturas	Nº de fracturas generadas	Nº de fracturas conductivas
A	N80-120E	1055	151
B	N40-80E	357	71
C	N120-150E	324	68
D	N150-170E	24	9
E	N170-220E	286	64
H	Horizontal	471	84

El dominio de simulación del modelo es un paralelepípedo interno de 400x400x350 m. La red conductiva calculada queda definida por 447 fracturas (ver Tabla 1 y figuras 3.c y 3.d), es decir, sólo el 17.76% de la red inicial. La malla de elementos finitos utilizada tiene 1503 nudos y 2102 elementos unidimensionales, lo que significa que las fracturas conductivas se interceptan entre ellas y con los puntos de observación 1051 veces, lo que equivale a una media de conexiones de 2.35. El ancho de banda es de 433.

La zonificación de las transmisividades para su parametrización coincide con las familias de fracturas. Las transmisividades se trataron, como valor del parámetro, la unidad, y se varían los coeficientes de elementos de acuerdo con la transmisividad asignada en la generación de las familias que, inicialmente en los parámetros, corresponde con 1.0. El condicionamiento aplicado en los niveles de los descensos son los medidos en diferentes tramos del S14 (1 y 2) y del S18 (1, 2 y 3). Las condiciones de contorno impuestas son de caudal fijo en el tramo donde se realiza el bombeo y de nivel fijo nulo (descenso nulo) en todas las fracturas que cortan las caras laterales del dominio.

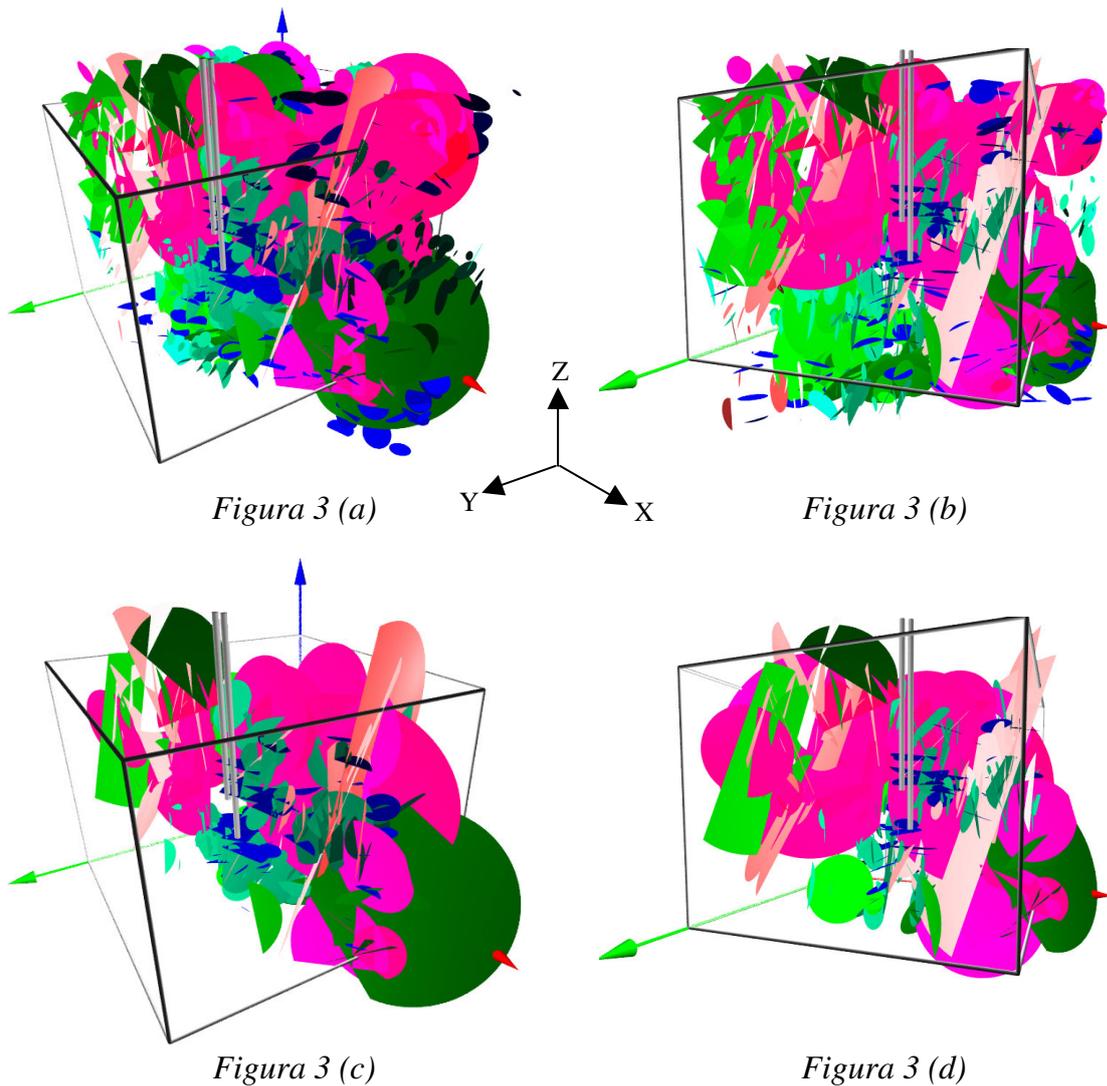


Figura 3: Generación de fracturas y la red conductiva. (a) corresponde con la red de fracturas generada e intersecada con sondeos sintéticos que representan el S-14 y el S-18; (b) la misma generación vista desde otro ángulo; (c) la red conexas obtenida, con los dos sondeos; (d) otra vista de (c). El eje X es el Norte-Sur, el Y es el Este-Oeste y el Z es el vertical.

Los ajustes de niveles calculados y medidos se pueden observar en la Figura 4, obtenidos en la última etapa de simulación; hay que señalar que los niveles calculados son comparables a los obtenidos anteriormente con un modelo de medio poroso equivalente [7]. Por otro lado, la Tabla 2 muestra las permeabilidades medias.

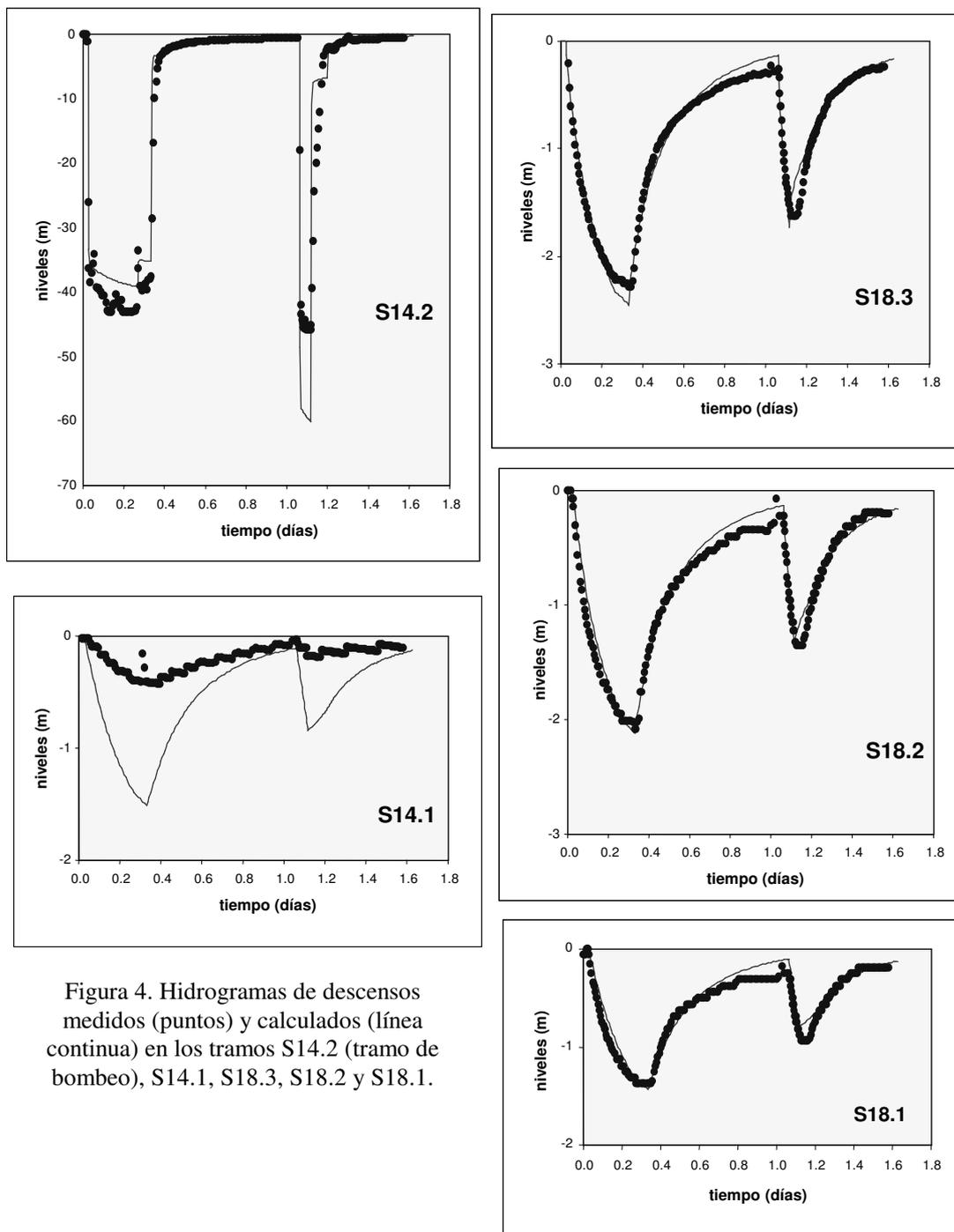


Figura 4. Hidrogramas de descensos medidos (puntos) y calculados (línea continua) en los tramos S14.2 (tramo de bombeo), S14.1, S18.3, S18.2 y S18.1.

Tabla 2. Permeabilidad media para cada familia tras la calibración.

Familia	A	B	C	D	E	H
Media (m/s)	5.9E-11	8.15E-12	2.14E-11	7.98E-13	6.91E-12	5.27E-10

Se ha observado, además, que las familias de fracturación cuyos parámetros presentan los mayores cambios, con relación al valor inicial de los parámetros de calibración, son justamente las que interceptan los diferentes tramos de observación; excepto la familia E, que tiene la particularidad de que una de sus fracturas intercepta a casi todas las fracturas horizontales que cortan los tramos de observación. Por ello, un buen ajuste de los niveles medidos con esta red de fracturación generada, depende fuertemente de los valores estimados para dicha familia. Finalmente, hay que recalcar que con estos valores de permeabilidad calibrada se obtienen valores de la permeabilidad del medio a mayor escala bastante realistas [8].

### 3.3 Discusión sobre el condicionamiento de las redes de fracturas

El concepto de calibración de redes de fractura está basado en un método de Monte Carlo. Para cada simulación será posible encontrar un conjunto de parámetros que optimice la función objetivo, es decir, que produzca el mejor ajuste a los niveles observados dado un modelo conceptual concreto. El problema que se presenta es si es posible encontrar más de un conjunto de parámetros que permita un ajuste parecido para una realización concreta de una red de fracturas. Para ello se utiliza la misma red, pero se toma la opción de condicionar el tramo de sondeo en el que se produce el bombeo para que tenga una familia de fracturación dominante.

En concreto se considera el ensayo de interferencia, donde se bombea en un tramo del sondeo S-14 y se observa en otro tramo del mismo sondeo y en tres tramos del sondeo S-18. Si condicionamos la red de modo que el tramo de bombeo intercepte una fractura de la Familia A se puede llegar al ajuste que se presenta en la Figura 5. En dicha figura se puede observar un buen ajuste en cuatro de los tramos en los que se dispone de datos de descenso. El único tramo en el que no se consigue un ajuste adecuado es el S-14.1 (tramo más profundo del sondeo).

Esta misma red puede condicionarse de modo que se imponga que la fractura que corta al tramo de sondeo en el que se produce el bombeo pertenezca a otra familia. En concreto puede asignarse a una fractura de la Familia E. El mejor ajuste obtenido tras el proceso de calibración puede verse en la Figura 6. El ajuste es similar, lo que puede verse por la similitud en los valores de función objetivo que se obtienen. Sin embargo en este caso es un tramo de sondeo distinto el que no consigue ajustarse de modo adecuado.

En la Tabla 3 se presentan los valores calibrados por el modelo numérico para cada una de las familias de fracturas (transmisividad y coeficiente de almacenamiento). En general podemos observar cómo las familias de fracturación cuyos parámetros presentan los mayores cambios son justamente las que interceptan los diferentes tramos de observación (familias C y H), además de la familia E. Estas tres familias pasan a ser mucho más transmisivas que las otras en el primer caso. Lo mismo sucede con el almacenamiento en las familias E y C.

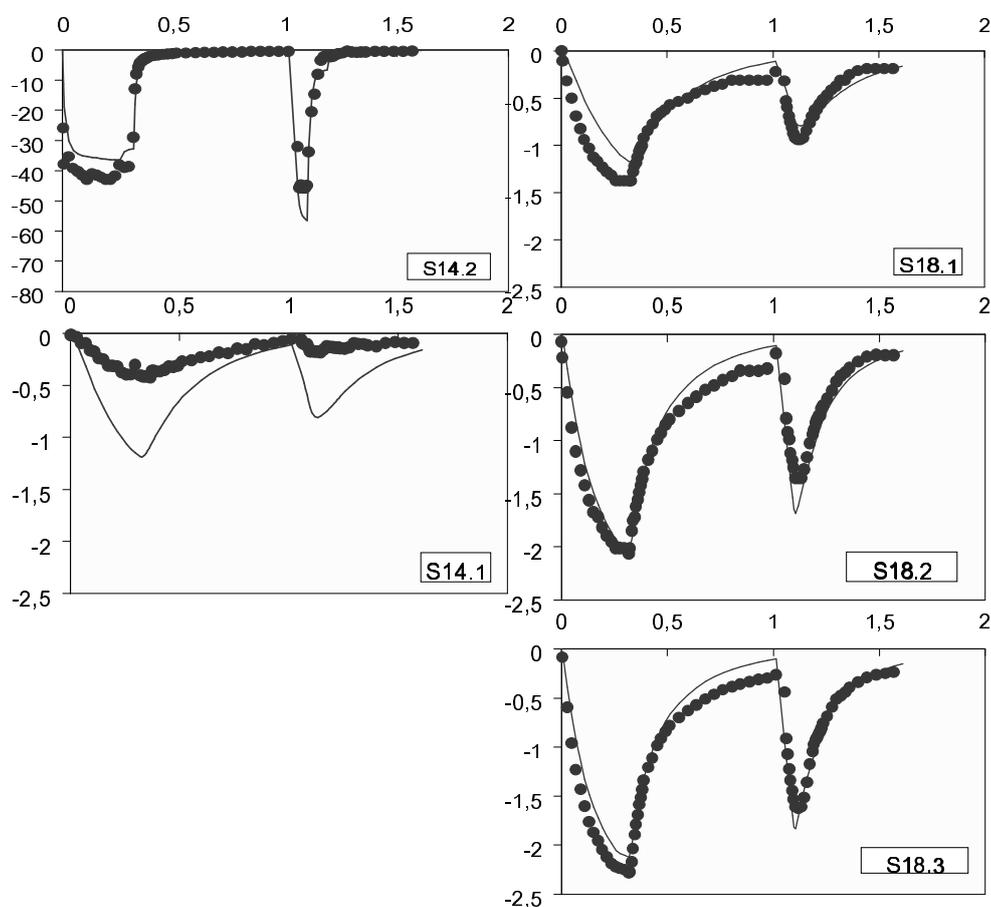


Figura 5: Ajuste conseguido en el ensayo de interferencia S14-S18 cuando la red de fracturas se condiciona con una fractura de la Familia A.

Tabla 3. Valores estimados en la calibración de los parámetros transmisividad (en m<sup>2</sup>/d) y coeficiente de almacenamiento (-) para el ensayo según se condicione el tramo de sondeo con una fractura de la familia A o E.

Parámetros estimados	Condicionado Familia A	Condicionado Familia E
Transmisividad Familia A	0.13	5.80
Transmisividad Familia B	2.30	0.99
Transmisividad Familia C	379.10	0.76
Transmisividad Familia D	2.16	0.99
Transmisividad Familia E	3379.10	38586.78
Transmisividad Familia H	23.00	1.02
Coef. Almac. Familia A	0.124E-08	0.243E-08
Coef. Almac. Familia B	0.289E-08	0.4339E-08
Coef. Almac. Familia C	0.115E-06	0.428E-08
Coef. Almac. Familia D	0.326E-08	0.326E-08
Coef. Almac. Familia E	0.559E-07	0.747E-07
Coef. Almac. Familia H	0.484E-09	0.243E-08

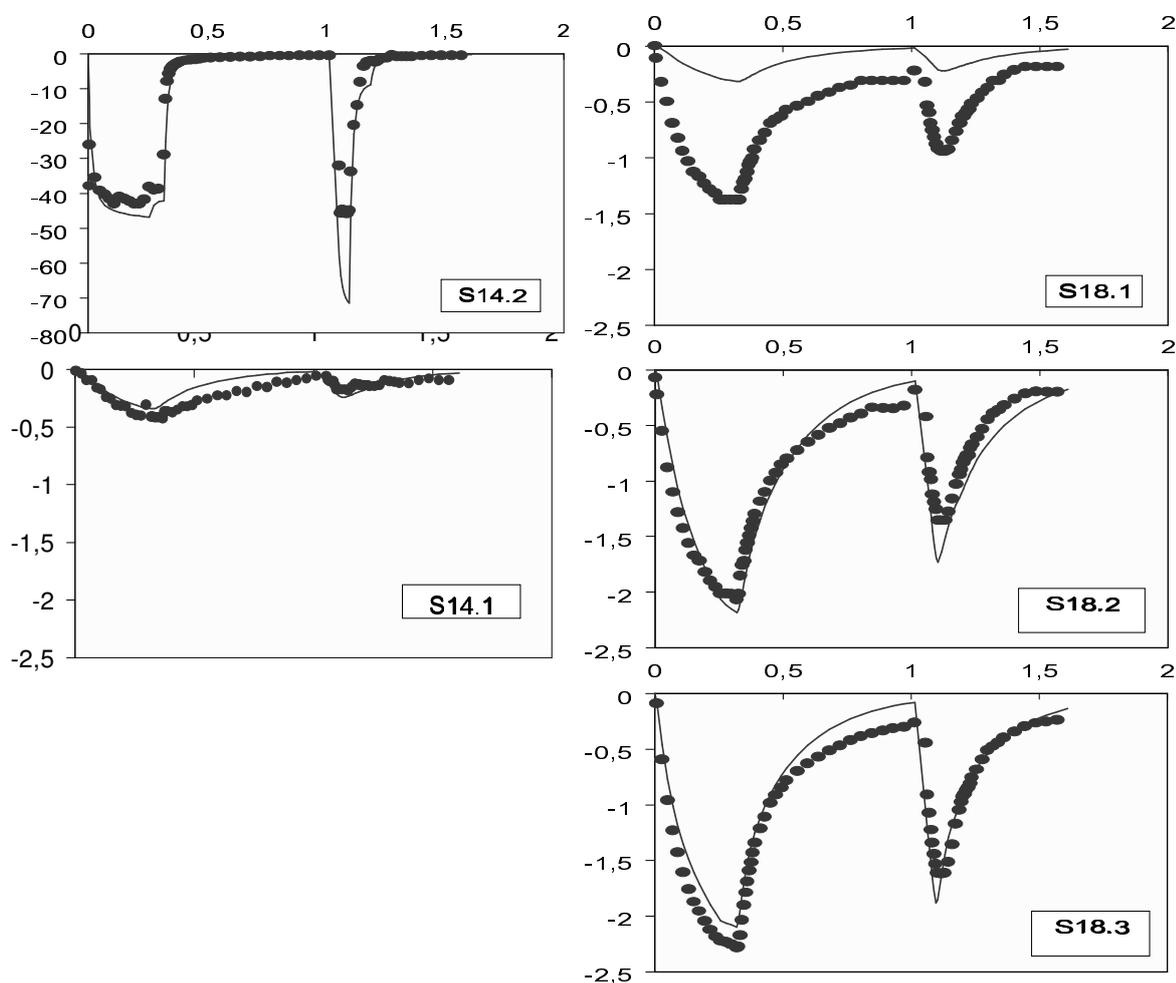


Figura 6: Ajuste conseguido en el ensayo de interferencia S-14 - S-18 cuando la red de fracturas se condiciona con una fractura de la Familia E.

Como conclusión de este ejemplo se observa la gran necesidad de condicionar la red de fracturas a la presencia de aquellas fracturas que hayan podido identificarse en campo. Esto permitirá reducir en gran medida la incertidumbre asociada a los MDF.

#### 4 SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE

Para poder realizar esto se ha seguido una metodología similar a la realizada con el flujo, es decir acoplar a un modelo de fracturas discretas (código FRACAS) un modelo continuo (código TRANSIN) con el objetivo de aprovechar las ventajas de ambos. La versión disponible del código FRACAS sólo es capaz de simular flujo en régimen estacionario, además de tener unas condiciones de contorno muy restringidas (sólo admite nivel fijo y caudal nulo). Con el acoplamiento con TRANSIN se ha permitido la simulación del transporte, así como la posibilidad de trabajar en régimen transitorio y realizar el problema

inverso, definición de puntos de observación, nuevas condiciones de contorno, incorporación de informaciones puntuales y de control del ancho de banda.

Para ello, los primeros pasos fueron encaminados a implementar una opción en el acoplamiento que permitiese simular el transporte en régimen estacionario con las mismas modificaciones que se efectuaban en la red de fracturación para el caso anterior de flujo. Esa primera fase de simulación del transporte estacionario en la red de fracturación nos permitió ver que es lo que pasa al intentar simular transporte en ella y, por tanto, poder evaluar que posibles modificaciones se deberían realizar en dicha red para poder simular transporte 'eficientemente'. Tras ello, se ha desarrollado una nueva versión capaz de resolver flujo, transporte o simultáneamente flujo y transporte, tanto en régimen temporal estacionario como transitorio, problema directo o inverso.

Como ejemplo de aplicación de la metodología de simulación del transporte se presenta un ensayo de trazadores realizado en el marco del Proyecto El Berrocal [9]. Se trata concretamente del ensayo de trazadores L3, y más concretamente de la curva de llegada del trazador uranina. En este mismo ensayo de trazadores se recogieron distintos trazadores, todos ellos teóricamente conservativos. Las curvas de llegada del Deuterio, Uranina y Gadolinio fueron muy distintas. Por tanto es de suponer que los procesos relevantes que intervienen sobre cada uno de los trazadores son distintos, de modo que en este caso varios modelos conceptuales son aceptables.

En este ensayo se extraía caudal y se medía la concentración de salida en el tramo S-2.1. La inyección de los trazadores se producía en el tramo S13.4 (Figura 7). Por lo que respecta a la calibración con el modelo de fracturas discretas se consideró la misma red utilizada en las simulaciones de flujo. Las condiciones de contorno para transporte se presentan de nuevo en la Figura 7.

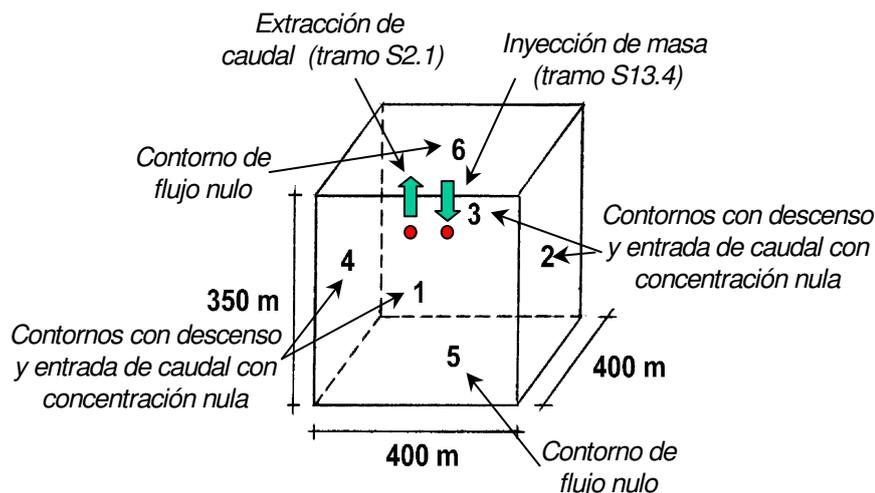


Figura 7: Condiciones de contorno de flujo y transporte para el ensayo de trazadores L3.

Los resultados obtenidos son muy buenos si se considera exclusivamente el ajuste entre concentraciones observadas y medidas. En la Figura 8 puede verse el ajuste conseguido para la curva de llegada en el punto S-2.1 suponiendo dos modelos conceptuales distintos. El primer modelo considera como procesos relevantes la advección y la difusión/dispersión. El segundo modelo incluye además la difusión hacia la matriz rocosa. Aunque los ajustes son semejantes sí se observa que el segundo modelo es algo mejor, también porque el número de parámetros a ajustar es superior.

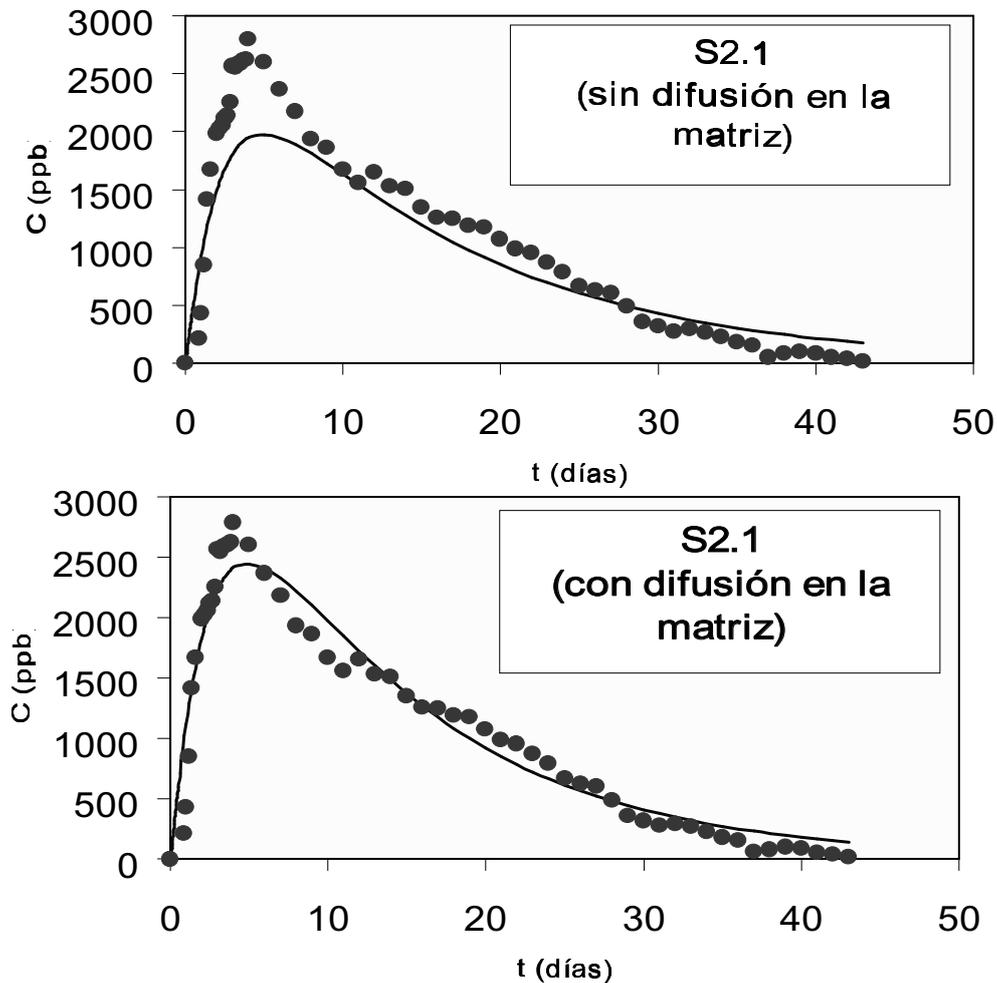


Figura 8. Valores de concentración observados y calculados para el ensayo L3 con trazador de uranina.

Sin embargo, este buen ajuste no se consigue con unos parámetros que tengan sentido físico [10], sino que se consigue casi eliminando el proceso de advección, de modo que todo el soluto se desplaza por dispersión en las fracturas. En la distribución espacial de la concentración para el primero de los modelos, incluso para tiempos muy cortos, el soluto

ocupa prácticamente todo el dominio de estudio, lo que es una clara indicación de que el proceso dominante es el dispersivo.

Así pues, aunque la metodología para la simulación del transporte se ha completado, en realidad aun debe realizarse un estudio de detalle sobre el significado de algunos de los parámetros que usa TRANSIN cuando pasamos a un medio formado por elementos unidimensionales. La razón pasa probablemente por el concepto de “channeling” [11]. El 95-98% del flujo tiene lugar en el 2-5% del área de la fractura. Será imprescindible en el futuro realizar un estudio de escalado de parámetros (“upscaling”) en este tipo de medios de fracturas discretos para entender el significado físico de algunos de los parámetros que intervienen en TRANSIN.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Se ha presentado una metodología para la simulación estocástica del flujo subterráneo y el transporte de solutos en medios geológicos fracturados, mediante una aproximación basada en las redes de fracturas discretas. Hay que decir que esta metodología ha sido aplicada con éxito en la simulación de problemas de flujo subterráneo en este tipo de medios y que se presenta una primera aplicación a problemas de transporte de solutos. Pero, al mismo tiempo, quedan por resolver interesantes problemas como son: la puesta en marcha de algoritmos de simulación geoméricamente condicionada de redes de fracturas, la inclusión de fenómenos de canalización en el transporte, la introducción de fenómenos de transporte reactivo y la simulación de fenómenos acoplados hidro-mecánicos [12].

## 6 AGRADECIMIENTOS

La puesta en marcha y la verificación de la metodología desarrollada, ha sido posible gracias a los datos aportados por el Proyecto El Berrocal (CIEMAT-ENRESA). El código FRACAS ha sido suministrado por el CIG de la ENS des Mines de Paris.

## 7 REFERENCIAS

- [1] J. Carrera and S.P. Neuman (1986). “Estimation of aquifer parameters under transient and steady-state conditions, 1. Maximum likelihood method incorporating prior information. *Water Resour. Res.*, 22(2), 199-210.
- [2] ENRESA (1996). “El Berrocal Project. Hydrogeological Modelling and Code Development”. Volume IV. European Commission Contract n° FI2W/CT91/0080, Nuclear Science and technology.
- [3] C. Paredes y F. J. Elorza (1999) Fractal and multifractal analysis of fractured geological media: surface – subsurface correlation. *Computers & Geosciences*. 25, pp: 1081-1096.
- [4] Cacas, M. C. (1989). “Développement d’un modèle tridimensionnel stochastique discret pour la simulation de l’écoulement et des transports de masse et de chaleur en milieu fracturé. Ph. D. Thesis, Ecole des Mines de Paris, Fointanebleau.
- [5] A. Medina, G. Galarza, J. Carrera, “TRANSIN-II. Fortran code for solving the coupled flow and transport inverse problem in saturated conditions”, taken from the topical report hydrogeological modelling and code development, El Berrocal Project, 1996, Volume IV, edited by ENRESA.
- [6] Vives L, Medina A y Carrera J, 1999. “Modelización matemática de medios fracturados de baja permeabilidad”. II Congreso Argentino de hidrogeología y IV seminario Hispano Argentino sobre temas

- actuales en hidrogeología, Santa Fe, Argentina. (Ed. Alfredo Tineo) pp. 51-60.II
- [7] Guimerà, J., L. Vives, M. Saaltink, P. Tume, J. Carrera y P. Meiers (1996). ‘Numerical modelling of pumping test in a fractured low permeability medium.’ Topical Report 14, volume IV, El Berrocal Project. Characterization and validation of natural radionuclide migration process under real conditions on the fissured granitic environment, European Commission Contract n° FI2W/CT91/0080.
- [8] F. J. Elorza, F. Florez, C. Paredes, O. Calle, R. Nita, L. Mazadiego, J. F. Llamas, E. Pérez, L. Vives, J. Carrera, A. Muñoz, G. De Vicente, C. Casquet, A. Vela, C. Bajos. ‘A DFN Hydrogeological Simulation for the El Berrocal Granitic Batholith’, International Mine Water Association 1999, Congreso Internacional del Agua y Medio Ambiente en la Minería del Siglo XXI. Residuos Mineros y Abandono de Minas y Canteras. Vol. 1, Sección: Uranium Mining, Ed. R. Fdez. Rubio, pp. 325-335, Sevilla 1999.
- [9] Rivas, P., P. Hernán, J. Bruno, J. Carrera, P. Gómez, J. Guimerà, C. Marín y L. Pérez del Villar (1996). ‘El Berrocal Project. Characterization and validation of natural radionuclide migration process under real conditions on the fissured granitic environment’. Final Report. European Commission Contract n° FI2W/CT91/0080, Nuclear Science and technology.
- [10] Ruiz, E., Vives, L., Carrera, J., Sánchez-Vila, X., Elorza, F. J., Paredes, C., Bajos, C., Vela, A., ‘Metodología de simulación de flujo y transporte de solutos en modelos de fracturas discretas’. VII Simposio de Hidrogeología. Ed. A. Fernández Uría. pp. 753-763. Asociación Española de Hidrogeólogos. Murcia, 28 de mayo - 1 de junio de 2001. (2001)
- [11] Tsang, Y.W y C.F. Tsang (1987). ‘Channel model of flow through fractured media’. Water Resources Research, 23(3), 467-479.
- [12] Bruel, D. (1990) ‘Exploitation de la chaleur des roches chaudes et sèches. Etude des phénomènes hydrauliques, mécaniques et thermiques au moyen d’un modèle à fractures discretas.’ Ph. D. Thesis. Ecole des Mines de Paris. Fontainebleau.