

## MODELACIÓN DE MEDIOS FRACTURADOS MEDIANTE REDES DE FRACTURAS DISCRETAS

LEONARDO DAVID DONADO [1, 2]  
XAVIER SANCHEZ-VILA [1]  
EDUARDO RUIZ [3]  
FRANCISCO JAVIER ELORZA [4]

[1] Grupo de Hidrogeología – Universidad Politécnica de Cataluña  
Jordi Girona 1-3, UPC Campus Norte, Edificio D2, 08034 Barcelona, España  
e-mail: leonardo.david.donado@upc.edu

[2] Próximamente: Escuela de Ingeniería Civil – Universidad Industrial de Santander

[3] Enviro Spain S. L., Passeig de Rubi, 29-31, 08197 Valldoreix, Barcelona

[4] Departamento de Matemáticas Aplicadas y Métodos Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid, Ríos Rosas 21, Edificio M3, 28003 Madrid, España

**Resumen** Se propone una metodología para la interpretación de pruebas de bombeo y de trazadores en redes de fracturas discretas (DFN, por sus siglas en inglés). Se inicia con la generación de redes de fracturas (representadas por discos 2D) embebidas en un dominio 3D. Una vez se han generado las DFN, se adopta una aproximación estocástica. En cada DFN, las conexiones entre los discos definen una red conductiva modelada como una malla de elementos 1D. La conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento de cada elemento es el producto resultante de un valor individual multiplicado por un parámetro, que es el mismo para todos los elementos correspondientes a discos de la misma familia. Los parámetros de familia se ajustan por medio de modelación inversa usando datos de pruebas de bombeo. Los ensayos de trazadores igualmente son usados para determinar los parámetros de transporte (porosidad móvil e inmóvil, dispersividad, y difusión en las fracturas y la matriz). La metodología se desarrollo con pruebas realizadas en El Berrocal (España)

**Claves** medios fracturados; redes de fracturas discretas; interpretación de pruebas de bombeo y de trazadores

**Abstract** A methodology has been proposed here for interpreting hydraulic and tracer tests in a discrete fracture network (DFN). To start off, an externally generated network of fractures (represented by 2D disks) is embedded in a 3D domain. Since each generated DFN is considered one of the possible outcomes, it is adopted a stochastic approach. In each DFN, the connections between the disks define a conductive network, modelled as a suite of 1D elements. Hydraulic conductivity and specific storage coefficient for each element form the product resulting from an individual value multiplied by a parameter; this is the same for all the elements and corresponds to a disk belonging to a given family. These family parameters are fitted by means of an inverse problem solution using available pumping test data. Tracer tests are used as well to inversely calibrate solute transport parameters (mobile and immobile porosities, dispersivity, and diffusion in fractures and matrix). The methodology is illustrated with hydraulic and tracer tests performed in El Berrocal Site (Spain).

**Key words** fractured media; discrete fracture network; hydraulic and tracer tests interpretation.

## INTRODUCCIÓN

Los medios fracturados hacen de la modelación una tarea muy complicada. Esto se debe principalmente a la complejidad geométrica, tamaño y propiedades hidráulicas de las fracturas. El flujo y el transporte en medios fracturados puede ser modelado mediante cuatro tipos de aproximaciones: medios porosos equivalentes (EPM), redes de fracturas discretas (DFN), medios porosos con fracturas embebidas (modelo mixto) y redes de canales. Todos estos modelos se han aplicado ampliamente en la solución de problemas de medios fracturados. En análisis de calibración con modelación inversa, las DFNs plantean un gran reto, debido al gran número de parámetros hidráulicos a calibrar, ya que cada elemento de la red tendrá un parámetro asociado.

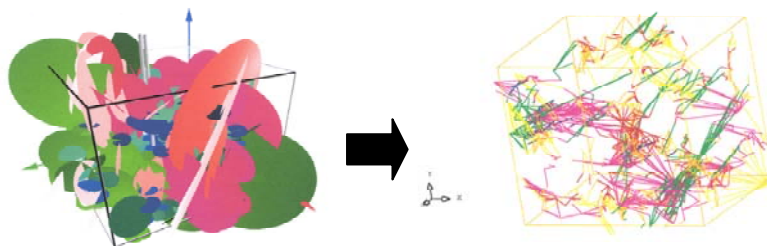
La incertidumbre en la localización, tamaño y propiedades hidráulicas de cada fractura hace que la aproximación determinística sea inútil, y por lo tanto la metodología propuesta está basada en la idea de la reducción de parámetros de calibración enfocando el problema en un marco estocástico. El método ha sido empleado para la interpretación de ensayos de bombeo y trazadores en el batolito granítico de El Berrocal (España) en el proyecto HIDROBAP-II, financiado por ENRESA y el Consejo de Seguridad Nuclear de España.

La calidad de los ajustes obtenidos permiten concluir que inicialmente los modelos DFN son capaces de explicar las dinámicas de flujo y transporte en medios fracturados ya que sus resultados son comparables con los obtenidos mediante el modelo mixto (Ruiz *et al.*, 2001).

## METODOLOGÍA

En primera instancia el modelo consiste de un conjunto de familias de fracturas, definidas a priori con criterios tectónicos. Cada red está compuesta por un número de fracturas cuya localización, tamaño (radio), apertura y orientación son geoméricamente definidas por funciones de probabilidad con base en un exhaustivo trabajo de campo (Nita *et al.*, 2004). Cada fractura mantiene los rasgos de la familia a la que pertenece (algo supremamente importante en la metodología propuesta).

El siguiente paso es la solución de las ecuaciones de flujo y transporte en las DFNs. La metodología (una modificación del modelo de canales propuesto por Cacas *et al.*, 1990) se concentra en la definición de la red conductiva de fracturas. Esta red es la formada por las fracturas que están interconectadas y por aquellas que conectan las fronteras y por lo tanto son capaces de conducir agua. Usando esta aproximación es posible asociar cada elemento con una familia de fracturas. La Fig. 1 ilustra el procedimiento.



**Fig. 1** Construcción de la red de elementos conductivos. De la DFN en 3D a la malla de elementos 1D. Los colores representan las familias.

Los parámetros asociados con cada elemento son la conductividad hidráulica ( $K$ ) y el coeficiente de almacenamiento ( $S_s$ ) cuando se resuelve la ecuación y la porosidad ( $\phi$ ) y la dispersividad longitudinal ( $\alpha_L$ ) para transporte. En cada elemento, los valores actuales de los parámetros son iguales al producto de dos términos: (1) un término específico basado en consideraciones geométricas y de conectividad, y (2) un factor de escala (“parámetro de familia”) el cual es desconocido y es el mismo para todos los elementos asociados a una familia dada. Este valor es obtenido a partir de la calibración por medio del método inverso. Como consecuencia inmediata, sólo un número reducido de parámetros tienen que estimarse. Los datos usados para la calibración pueden ser niveles en estado estacionario, o datos provenientes de pruebas de bombeo (niveles) o de trazadores (concentraciones). La calibración se realiza con TRANSIN II (Medina *et al.*, 1996). El código requiere los valores de niveles observados y las concentraciones en un número dado de puntos de observación para estimar los parámetros que mejor ajustan los datos observados. En este tipo de mallas, las inestabilidades numéricas provocan problemas de convergencia del problema inverso. Esto se soluciona reduciendo la longitud de los elementos finitos 1-D, incrementando el número de nodos, causando una ampliación del tiempo de cálculo numérico de la CPU.

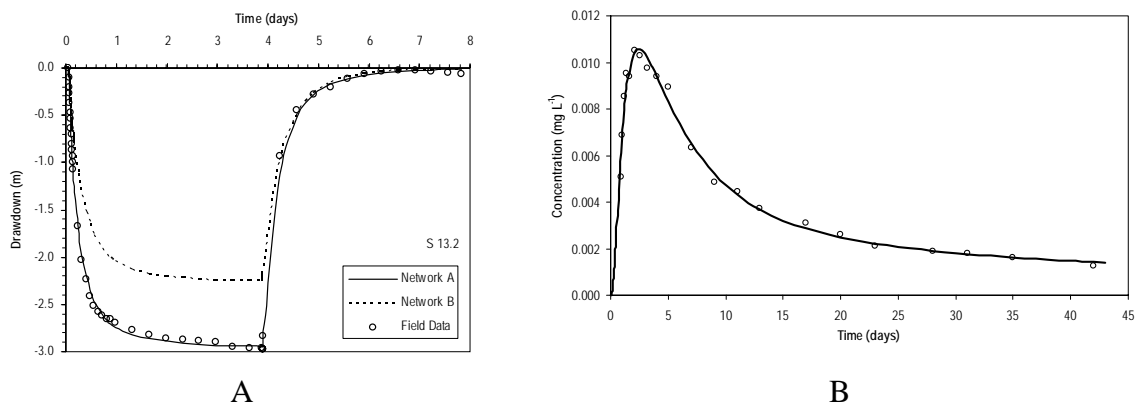
Las condiciones de borde (CB) se aplican a todos los elementos que intersequen una geometría predefinida. Las CB de flujo pueden ser: carga constante, flujo constante o una combinación de ambos. En transporte, las CB dependen del nodo del punto de inyección y de la concentración inyectada.

En el análisis de transporte es posible incorporar varios tipos de procesos como la adsorción, degradación radioactiva de primer orden o difusión en la matriz para tener en cuenta especies no conservativas. En aquellas partes donde cualquiera de estos procesos fuera agregado al modelo conceptual, es necesario añadir nuevos parámetros. Si fuese necesario los nuevos parámetros se asocian a las familias, a pesar del hecho de que cualquier elemento dado tuviera un coeficiente diferente de distribuciones estadísticas a priori. La figura 2 muestra los ajustes logrados para la modelación realizada.

## CONCLUSIONES

Se utilizaron cien realizaciones de DFN para calibrar pruebas de bombeo y de trazadores en medios fracturados. Ochenta por ciento (80%) de las DFN analizadas presentaron funciones objetivo de niveles con valores aceptables y de éstas, el treinta por ciento (30%) mostró excelentes ajustes en términos de niveles. Los ajustes son comparables con, y en algunos casos, mejor que aquellos obtenidos por medio de la aproximación basada en fracturas embebidas en un medio poroso equivalente. La metodología permite calibrar un número relativamente pequeño de parámetros, haciendo posible el proceso de calibración. Los parámetros ajustados (valores zonales de  $T$  y  $S$ ) varían con cada simulación. Las familias que no contribuyen al flujo se pueden detectar con este método. La interpretación de pruebas de trazadores permite la estimar parámetros adicionales como la porosidad, la dispersividad, así como la porosidad y el coeficiente de dispersión de las zonas inmóviles si se adopta un modelo de doble porosidad. En conclusión, la metodología presentada permite calibrar parámetros correspondientes a las DFN. La ventaja definitiva del método es que las DFN simuladas no es única, y la metodología

puede ser fácil e inmediatamente aplicada en un marco geoestadístico, y así darle un significado físico a los valores calibrados.



**Fig. 2** (a) Abatimientos observados (puntos) vs. calculados (líneas) luego de la calibración de pruebas de bombeo en El Berrocal, usando un modelo DFN. La figura muestra dos diferentes ajustes (de 100 disponibles). La red A corresponde a uno de los mejores ajustes y la B a uno que presento buenos resultados. (b) Concentraciones observadas (puntos) y calculadas (líneas) luego de calibrar una prueba de trazadores en El Berrocal, usando un modelo DFN para solucionar la ecuación Advección-Dispersión + Difusión en la matriz.

#### AGRADECIMIENTOS

La financiación del trabajo fue otorgada por ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos) y el CNS (Consejo de Seguridad Nuclear de España) a través del proyecto HIDROBAP-II (Hidrogeología de medios de baja permeabilidad – II).

#### REFERENCIAS

- Cacas, M. C., Ledoux, E., de Marsily, G., Tillie, B. (1990) Modelling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation. 1: The flow model. *Wat. Resour. Res.* **26**(3), 479-489.
- HIDROBAP (Hidrogeología de medios de baja permeabilidad) (1998) *Final Report*. CSN-ENRESA-UPM-UPC-UCM. 6 vol.
- Medina, A., Galarza, G. y Carrera, J. (1996) TRANSIN II. FORTRAN code for solving the coupled flow and transport inverse problem in saturated conditions. *Topical report 16, volume IV, El Berrocal Project, EC Contract nº FI2W/CT91/0080*.
- Nita, R.; Ruiz E.; Sánchez-Vila, X.; Elorza F.J.; Carrera, J. (2004) Calibration of a DFN model for the simulation of groundwater flow and solute transport in fracture geological media. *Geophysical Research Abstracts*, **6**, 04363.
- Rivas P, Hernán P, Bruno J, Carrera J, Gómez P, Guimerà J, Marín J, Pérez del Villar L. (1997) El Berrocal Project. Characterization and validation of natural radionuclide migration processes under real conditions on the fissured granitic environment. *Final Report. EC Contract FI2W/CT91/0080*.
- Ruiz, E; Vives, L.; Carrera, J.; Sánchez-Vila, X.; Elorza, F. J.; Paredes, C.; Bajos, C.; Vela, A. (2001). Metodología de simulación de flujo y transporte de solutos en modelos de fracturas discretas. *VII Simposio de Hidrogeología. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. 753-764.