

MODELO TRIDIMENSIONAL ESTOCÁSTICO DE DOBLE POROSIDAD PARA LA EVALUACIÓN DE FILTRACIONES EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA EN ROCA FRACTURADA: EXPERIENCIAS Y PERSPECTIVAS EN COLOMBIA

O. D. Álvarez-Villa

Emergente Energía Sostenible. Medellín, Colombia.
E-mail:oscar.alvarez@emergente.com.co

Introducción

Durante los últimos cinco años, Colombia ha sufrido una marcada transformación en su política de desarrollo de infraestructura vial. Mediante el planteamiento y ejecución de los Proyectos 4G, que procuran la mejora en calidad y cubrimiento de la malla vial con el propósito de mejorar la competitividad del país, disminuyendo tiempos de tránsito entre centros de producción y puertos (MINTRANSPORTE, 2016), se prevé aumentar drásticamente la construcción de túneles. Por otra parte, con la llegada de la Ley 1715 de 2014 de energías renovables, las ventajas tributarias ofrecidas han fomentado el planteamiento de proyectos energéticos no convencionales, con lo cual se ha incrementado las solicitudes de licenciamiento ambiental para proyectos de generación hidroeléctrica de pequeña escala. Una característica que comparten los proyectos de infraestructura antes mencionados es que, típicamente, involucran la construcción de túneles, con lo cual se modifica, en mayor o menor medida, las condiciones naturales de flujo subterráneo. En este sentido, los términos de referencia de licenciamiento ambiental para proyectos lineales en Colombia (ANLA, 2006) son estrictos, por que solicitan el seguimiento continuo de la cantidad y la calidad del agua subterránea, con el objetivo de asegurar la menor afectación posible a la disponibilidad de agua en las regiones influenciadas por dichos proyectos. Teniendo en cuenta lo anterior, desde el año 2014 se ha desarrollado un esquema conceptual para modelar estocásticamente el flujo subterráneo regional en macizos rocosos diaclasados. Dicho esquema es completamente distribuido y considera simulaciones en régimen permanente y transitorio. El interés principal en la aplicación de esta metodología ha sido cuantificar funciones de probabilidad acumulada de las relaciones río-roca bajo condiciones naturales y perturbadas, tal que se identifiquen las afectaciones de perforaciones y cambios de las características de la matriz rocosa (e.g. túneles hidroeléctricos o viales) sobre la disponibilidad natural del agua superficial.

Metodología

Aplicando la ecuación de continuidad sobre un volumen de control en forma de ortoedro y asumiendo que los ejes de anisotropía son paralelos a los ejes coordenados, se llega a la ecuación de estado del modelo de flujo (Bear, 1972):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

donde $h = h(x, y, z, t)$ es la altura piezométrica en el punto (x, y, z) en el tiempo t , k_x , k_y y k_z son las conductividades hidráulicas en la dirección de los ejes coordenados, S es la función del coeficiente de almacenamiento para el medio fracturado y $Q(x, y, z, t)$ son las acciones exteriores que le extraen o inyectan agua al macizo rocoso. Es evidente que la ecuación (1) es idéntica a la ecuación de flujo subterráneo para medio poroso, con la diferencia de que las conductividades hidráulicas en las direcciones coordenadas dependen fuertemente de las características geométricas de las estructuras de diaclasamiento de la roca, es decir, de su rumbo, su

buzamiento, su apertura efectiva, la separación entre planos de agrietamiento y la conductividad del relleno. Igualmente, se diferencia explícitamente la porosidad secundaria relacionada con el flujo en diaclasa, de la porosidad primaria de la roca, relacionada con el flujo en la matriz.

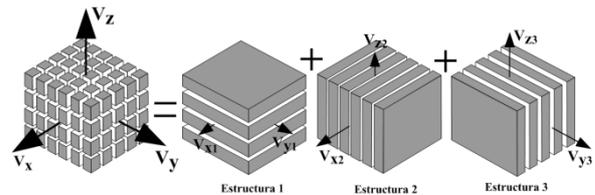


Figura 1.- Esquema de principio de superposición de las estructuras de diaclasamiento por bloque efectivo equivalente del modelo de flujo.

Ahora bien, asumiendo flujo laminar y aplicando el principio de superposición, la Figura 1 presenta un bloque fracturado compuesto por tres estructuras, cada una de las cuales tiene asociadas diferentes propiedades: rumbo, buzamiento, apertura y separación; los parámetros de direccionamiento de las estructuras han sido orientados en dirección de los ejes ordenados.

Las propiedades estructurales del macizo rocoso se construyen con base a dos procedimientos (Chica, 1979): (i) análisis geoestadístico hidroestructural de pesos hidráulicos que permite seleccionar las familias de diaclasas con mayor potencial conductor de agua con base a información primaria; (ii) análisis de la red de drenaje para inferir patrones de direccionamiento en las familias de diaclasas conductoras de agua. El fundamento de ello radica en que, en un ambiente geológico de rocas cristalinas, el desarrollo de la red de drenaje, a través del tiempo geológico y hasta llegar a su estado actual, ha sido controlado principalmente por el patrón de fracturamiento del macizo rocoso, el cual genera zonas de debilidad mecánica que facilitan la erosión fluvial y la incisión vertical de las corrientes. La combinación de ambos análisis permite construir un marco hidro-estructural de la región de estudio, para inferir propiedades hidráulicas distribuidas a incorporarse en los procedimientos de modelación. Así, se plantea el sistema lineal para resolver las alturas piezométricas en el dominio 3D de interés. El dominio se discretiza en nodos pertenecientes a una malla de Diferencia Finitas (DF), se aproximan las derivadas parciales de la ecuación [1] partiendo de postulados matemáticos para medios de doble porosidad (Singhal y Gupta, 2010). La conexión río-roca y los túneles se modelan usando condiciones de contorno dependiente de una altura externa (i.e. Cauchy), planteando una parametrización análoga a la presentada para los paquetes RIVER y DRAIN de MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988).

El marco conceptual de modelación de flujo subterráneo planteado es estocástico en el sentido de que se consideran los efectos debido a las incertidumbres de los parámetros de fracturamiento del macizo rocoso sobre las condiciones del flujo subterráneo en el medio fracturado. En general, los estadísticos necesarios para ejecutar la generación estocástica de dichos parámetros se estiman extrayendo una muestra de datos que se corresponda a los rangos de direccionamiento de las familias de

diaclasas más conductoras hidráulicamente. Sobre dichas muestras se aplican estimadores por momentos con el propósito de obtener la media y la desviación estándar de las funciones de distribución asumidas. Seguidamente, con base en dichos estadísticos, se ejecuta cierta cantidad de generaciones estocásticas de rumbo, buzamiento, separación y apertura para cada familia de diaclasas. Posteriormente, utilizando cada una de estas realizaciones, se efectúa el mismo número de simulaciones de Montecarlo para el flujo subterráneo y se extraen las variables de estado requeridas, pudiendo ser alturas piezométricas o relaciones río-roca sobre la red de drenaje o filtraciones en túneles. Los resultados de las simulaciones estocásticas se presentan como distribuciones de probabilidad acumuladas empíricas, a partir de las cuales se estiman algunos estadísticos de las muestras como la media, mediana y la desviación estándar. De allí se deducen los modelos de incertidumbre de las diferentes variables de estado del flujo subterráneo en el medio diaclasado.

Resultados y análisis

Proyecto hidroeléctrico. El marco conceptual de modelación se utilizó para realizar un Diagnostico Ambiental de Alternativas (DAA) de un proyecto hidroeléctrico de pequeña escala. Los objetivos del estudio fueron conceptualizar sobre los impactos de los alineamientos de las conducciones subterráneas de las alternativas, en los suelos, en el ecosistema y en la productividad del área de influencia por la reducción de los caudales de las corrientes y de los posibles abatimientos de niveles piezométricos. Las conclusiones del DAA se fueron planteadas con base a simulaciones numéricas de un modelo de flujo bajo diferentes escenarios, tanto de disponibilidad hídrica como de condiciones geológicas estructurales. Según la información geológica revisada, se concluyó la no existencia de unidades litológicas con alta porosidad y conductividad hidráulica primaria, por lo que la zona de influencia del proyecto puede considerarse como un macizo rocoso cristalino fracturado. Asimismo, en la región de estudio predominaron rasgos que sugieren un ambiente compresivo: cañones profundamente disectados con pendientes escarpadas, así como foliaciones y estratificaciones con alto grado de buzamiento. En consecuencia, se encontraron aperturas de diaclasamiento muy bajas y densidades de fracturamiento de medias a bajas. Dado lo anterior, a pesar de que para todas las alternativas de túnel consideradas por el DAA del proyecto hidroeléctrico mencionado se obtuvieron caudales de filtración y afectaciones muy pequeñas, pudo seleccionarse la alternativa más viable desde el punto de vista hidrogeológico. Los resultados se resumen en la Figura 1.

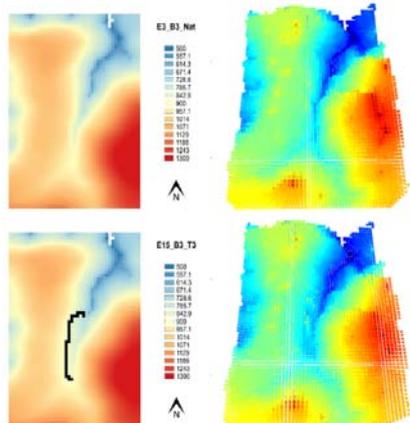


Figura 1.- Solución del modelo para medios anisótropo con ejes de anisotropía paralelos a los ejes cartesianos (centro) y rotados 45°.

Proyecto vial. La estrategia de modelación propuesta se utilizó para simular las condiciones de flujo subterráneo de un túnel

vial ya existente, el cual se someterá a una expansión por efecto de la construcción de una doble calzada. En este caso, se dispuso de información geológica estructural de estudios previos y la empresa concesionaria levantó nueva información geológica realizando siete perforaciones a diferentes profundidades. Además, realizó un seguimiento: (i) de los caudales mensuales fluyendo por el túnel existente durante cinco años y (ii) los niveles piezométricos mensualmente durante cuatro meses. Esta información se incluyó en la calibración del modelo; procedimiento que permitió reproducir de forma los flujos existentes en el túnel y los niveles piezométricos de la zona aledaña al túnel mediante la modificación inmediata de la densidad de fracturamiento del macizo rocoso y las aperturas del diaclasamiento (ver Figura 2). Asimismo, se incluyó la presencia de tres fallas que cortan el túnel localmente. El modelo calibrado se usó para evaluar las afectaciones hidrogeológicas generadas por la perforación y construcción de un túnel gemelo asociado a la segunda calzada del proyecto vial.

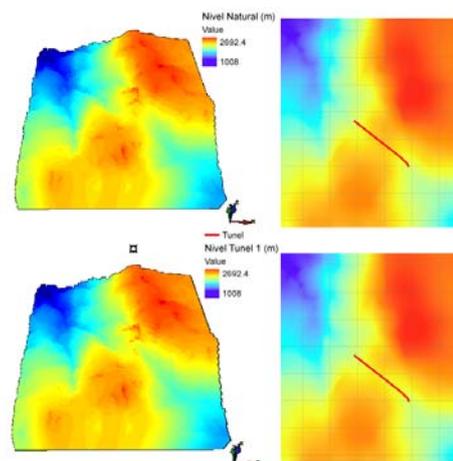


Figura 2.- Alturas piezométricas simuladas por para las condiciones de calibración en el proyecto vial.

Conclusiones

Se ha planteado una metodología estocástica tridimensional de modelación de flujo subterráneo en medio diaclasado que permite cuantificar las potenciales modificaciones de la disponibilidad de agua por efecto de la construcción de obras de infraestructura que actúan sobre el medio subterráneo, principalmente por efecto de túneles perforados en roca fracturada. Las ventajas de dicha metodología es que, al tratarse de un modelo completamente distribuido, los intercambios de agua entre los canales de la red de drenaje y los túneles conectados con las diaclasas de las rocas pueden evaluarse en cualquier punto deseado. Asimismo, permite considerar la incertidumbre de los parámetros del medio en la modelación. Ambas características permiten a los planificadores y gestores del recurso establecer estrategias localizadas de manejo y remediación a la escasez del agua cuando las acciones antrópicas modifican las condiciones hidrológicas naturales.

Referencias

- Bear J. (1972) Dynamics of Fluids in Porous Media. Dover Publications Inc. New York, EEUU.
- Chica A. (1979) Aspectos Mecánicos e Hidráulicos de las Rocas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- McDonald M.G., A.W. Harbaugh (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey Techniques for Water Resources Investigations. Book 6, chapter A1.
- Singhal B.B.S, Gupta R.P. (2010) Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Springer.